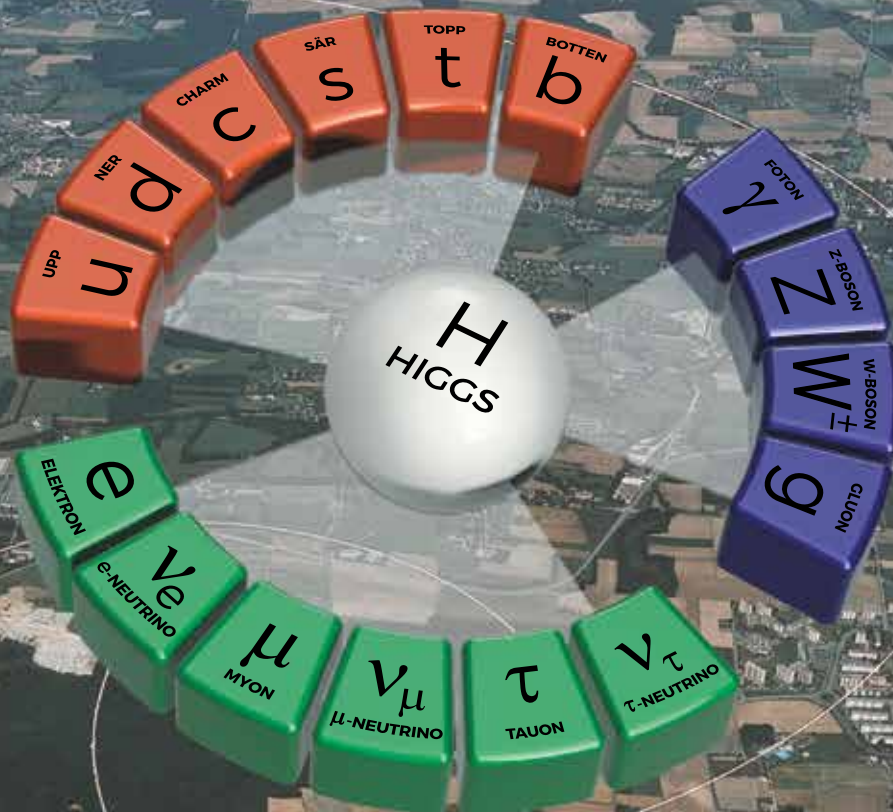


KOSMOS

STANDARDMODELLEN

SVENSKA FYSIKERSAMFUNDETS ÅRSBOK 2023



PROTONEN – EN HUNDRAÅRIG GÅTA

© KARIN SCHÖNNING



Artikeln publiceras under Creative Commons-licensen CC BY-NC-SA 4.0. För bildmaterial med källhänvisning gäller samma upphovsrättsliga regler som för källan.

f SVENSKA
FYSIKER
SAMFUNDET



Karin Schönning

disputerade i kärnfysik år 2009 vid Uppsala universitet och var sedan Research Fellow på CERN. Sedan 2012 är hon tillbaka i Uppsala och år 2020 blev hon professor i fysik med inriktning mot experimentell hadronfysik. Karin Schönning's huvudintresse är hyperoner, det vill säga protonliknande system som innehåller tunga och instabila sär- eller charmkvarkar. Det är i synnerhet deras mätbara spinnegenskaper som fascinerar, då man genom dessa kan belysa en rad fenomen inom fundamental fysik.

I en artikel om protonen förklarar Karin Schönning att trots att vi känt till partikeln i över ett sekel, är den mycket mer komplicerad än det enkla, positivt laddade trekvarkssystem den ofta presenteras som. Det har visat sig att ju mer i detalj man studerar protonens egenskaper, desto mer tättnar mystiken. Att undersöka dessa motstridigheter ger en djupare förståelse för standardmodellen och en förbättrad färdplan för den fortsatta jakten på fysik bortom denna.

Bilden: Protonen brukar förenklat beskrivas som tre sammanbundna färggladdade kvarkar, men i en mer realistisk bild skapas och förntas kvarkar, antikvarkar och gluoner i en ständigt föränderlig kvantsoppa.

Protonen – en hundraårig gåta

Finns det verkligen fortfarande något intressant att säga om protonen, mer än hundra år efter att den upptäcktes? Ja, faktum är att dess fascinerande egenskaper är helt avgörande för vår existens. Till att börja med är protonen överkligt stabil — trots att den är ett sammansatt system av tre kvarkar. Den empiriska livslängden på minst 10^{30} år,¹ placerar den i samma liga som elektronen trots att allt tyder på att den senare är en ”ren” elementarpartikel.² Som en jämförelse beräknas universums ålder till cirka 14×10^9 år. Om protonen inte vore stabil, skulle universums synliga materia förr eller senare falla sönder. Vidare är den starka kraften, som håller ihop kvarkarna i protonen, så stark att andra protoner och även neutroner känner av den. Tack vare denna kraft binds de samman till atomkärnor, som i sin tur bildar stjärnor och planeter och det stjärnstoff du och jag är gjorda av.

Med detta sagt, kanske du ändå undrar: finns det fortfarande något *nytt* att lära om protonen? I vår strävan att förstå universum söker vi gärna svaren i det okända: partiklar som på grund av sin gigantiska massa håller sig gömda för våra experiment, förmodat förbjudna sönderfall eller överraskande identitetsbyten. Att lösa universums gåtor kräver att vi ger oss ut på okänd mark, men också att vi gräver där vi står. En anledning till det senare är att även det till synes trygga och välbekanta kan rymma avgrundsdjupa hem-

¹Se sammanställningen av forskningsläget gjord av Particle Data Group, <https://pdg.lbl.gov/>.

²Hittills har man inte observerat något sönderfall hos vare sig protoner eller elektroner, så det enda man har kunnat bestämma i bägge fallen är en nedre gräns. Den verkliga livslängden kan skilja sig från det empiriska gränsvärdet med flera storleksordningar.

ligheter. Detta blir särskilt påtagligt när vi försöker härleda protonens egenskaper utifrån en annan kändis, nämligen standardmodellen:

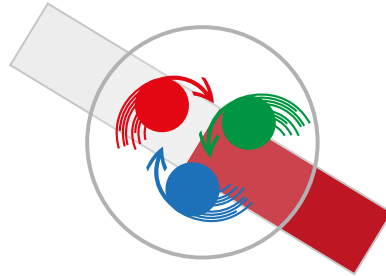
1. Massa: standardmodellens Higgsmekanism förklarar bara drygt 1% av protonens massa.
2. Radie: protonens laddningsradie har mätts med elektron- och myonbaserade metoder. Till forskarnas förvåning ger de olika metoderna olika resultat.
3. Spinn: endast drygt hälften av protonens spinn, det vill säga dess inre magnet, kommer från dess tre valenskvarkar.
4. Överskott: det finns betydligt fler protoner (materia) än antiprotoner (antimateria) i universum, trots att lika delar borde bildats i big bang. Vart tog antiprotonerna vägen?

Låt oss kalla dessa för protonens mysterier — även om de inte är obegripliga i strikt vetenskaplig mening är de föremål för intensiv forskning och debatt i fysikvärlden. Hur som helst: nyckeln till mysterierna 1–3 ligger i den starka kraftens speciella egenskaper. Svaren finns alltså inom standardmodellen, men kräver djupare insikter i den än vad vi har för tillfället. Att lösa mysterium nummer 4 kräver att vi rör oss bortom standardmodellen, men för att förstå det nya och okända landskap som väntar där, behöver vi rätt verktyg. Även här spelar den starka kraften en avgörande roll. Innan vi dyker ner i protonens mysterier, ska vi titta närmare på hur protonen gett sig till känna genom historien.

Vad är en proton?

Protonens upptäckt tillskrivs Rutherford, som insåg att grundämnen som regel innehåller vätekärnor. Han lyckades också visa att vätekärnor frigjordes i kärnreaktioner där alfapartiklar absorberades av kväve. Ungefär hundra år tidigare hade Prout föreslagit att alla grundämnen består av väteatomer, och Rutherfords resultat var i linje med detta förutom att det gällde kärnor snarare än atomer. 1920 etablerades den positivt laddade protonen som atomkärnornas mest fundamentala byggsten. Namnet kommer från grekiskans *próta* som betyder först. Rutherford själv föreslog även ordet prouton för att hedra Prout. Drygt ett decennium senare upptäckte Chadwick att protonen har sällskap av neutrala neutroner inuti atomkärnorna. Både protonen och neutronen antogs vara odelbara elementarpartiklar, även om det fanns observationer som störde den bilden. Ett exempel är protonens magnetiska moment, som illustreras i Figur 1. Esterman, Frisch och Stern

mätte det 1933 och fann att det är betydligt större än vad man förväntar sig av en elementarpartikel. Även neutronen har ett magnetiskt moment — något som är omöjligt för en neutral punktformig partikel. Om den istället består av mindre, laddade byggstenar, kan deras rörelser ge upphov till ett magnetiskt moment.



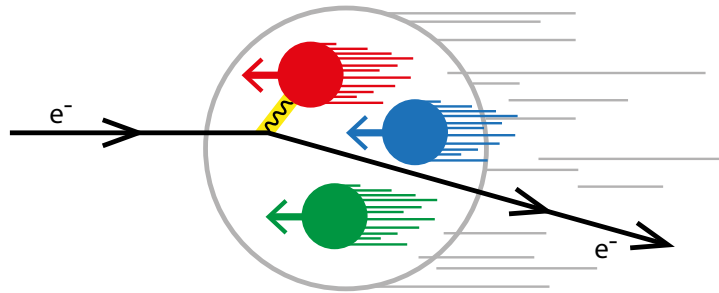
Figur 1: Protonens magnetiska moment uppstår tack vare rörelsen hos dess laddade beståndsdelar.

Under slutet av 1940-talet och vidare in på 1950-talet började det hända saker, tack vare *spektroskopi* och *strukturmätningar*. Kosmiska strålar bildade dittills okända partiklar när de krockade med atmosfären eller med detektormaterial. Dessutom intog accelererade protonstrålar scenen och i dessa experiment upptäcktes ett veritabelt zoo av märkliga partiklar. Flera av dem ansågs *sällsamma* eftersom de var så pass långlivade (med en livslängd på cirka 10^{-10} s) att de hann färdas flera centimeter innan de föll isär. Man antog att detta berodde på att de kunde karaktäriseras av ett dittills okänt kvanttal som man kallade särtal (eng. *strangeness*). Utöver de sällsamma partiklarna, fann man partiklar som verkade sönderfalla direkt efter att de bildats, och åter andra som var relativt långlivade (ca. 10^{-6} s). Inte kunde väl alla dessa partiklar vara odelbara? Nej, de verkade kunna inordnas i symmetriska mönster utifrån egenskaper såsom massa, spinn och särtal. Grundämnenas periodiska system hade tidigare förklarats av att de förmodat odelbara atomerna i själva verket är sammansatta system av tre sorters partiklar — protoner, neutroner och elektroner. Kunde det vara så att även neutronerna, protonerna och alla de andra ”nya” partiklarna består av mer fundamentala byggstenar?

Under samma period förbättrades tekniken för accelererade elektronstrålar och möjliggjorde en ny sorts mikroskop: genom att skjuta, eller sprida som man brukar säga inom kärnfysiken, energirika elektroner mot atomkärnor kunde man detaljstudera

atomkärnors och protoners *struktur*. I dessa tidiga experiment spreds elektronen *elastiskt* mot protonen, vilket betyder att även om det skedde en energi- och impulsöverföring från elektron till proton, förblev protonen intakt och inga nya partiklar bildades. Genom experimenten konstaterade Hofstaedter att protonernas laddning inte är koncentrerad till en punkt i rummet. Istället karaktäriseras protonen av en laddningstäthet som har en utsträckning på ungefär en femtometer (10^{-15} m).

På sextioalet kunde man skönja samband mellan de nya rönen inom spektroskopi och struktur, och snart började bitarna falla på plats. 1964 formulerade Gell-Mann och Zweig, oberoende av varandra, den så kallade kvarkmodellen. Enligt denna består protonen av två uppkvarkar (u, var och en med laddning $+2/3 e$, där e är absolutbeloppet av elektronens laddning) och en nerkvark (d, laddning $-1/3 e$), medan neutronen består av två nerkvarkar och en uppkvark. Särtalet, som vi nämnde tidigare, kunde förklaras med en tredje kvarktyp, nämligen den instabila särkvarken (s, laddning $-1/3 e$). Men kvarkmodellen kunde inte bara beskriva det zoo av partiklar som redan upptäckts, utan även förutsäga existensen av dittills okända partiklar — som man snart hittade! Hypotesen att protonen bestod av tre så kallade kvarkar verkade alltså stämma. Nu gällde det att få fram konkreta bevis, och inte bara indikationer, på att kvarkarna fanns. I de nya, moderna acceleratörerna kunde elektronerna få så höga energier att de, när de spreds mot protoner, kunde ”bryta sönder” protonen till fragment som blixtnabbt bildar nya, mätbara partiklar. Resultaten från dessa *inelastiska* elektronspredningsexperiment, som illustreras i Figur 2 och i vilka Friedman, Kendall och Taylor var drivande, skilde sig markant från de tidigare elastiska spridningsexperimenten. Inspirerad av detta föreslog Feynman 1969 en modell där protonen består av punktformiga byggstenar, *partoner*, som elektronstrålar med tillräckligt höga energier kan urskilja enligt figuren nedan. År 1972 kunde man, tack vare spridningsexperiment med neutriner och antineutriner vid CERN, visa att dessa partoner hade samma laddning som kvarkmodellen förutsagt. Standardmodellen, som vuxit fram parallellt med kvarkmodellen, införlivade kvarkarna tillsammans med de andra elementarpartiklarna och framgången var ett faktum.

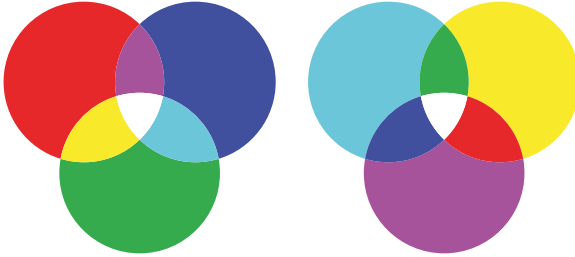


Figur 2: Inelastisk elektronspridning, där en elektron med hög energi kan urskilja protonens punktformiga beståndsdelar, nämligen kvarkarna.

Den starka kraften

Stark växelverkan mellan kvarkar beskrivs inom standardmodellen genom kvantkromodynamik, eller *Quantum ChromoDynamics* (QCD). Ordet krom kommer sig av att kvarkarna förutom elektrisk laddning även bär på den starka växelverkans laddning. Den kallas *färgladdning* och har tre olika värden: röd, blå och grön. Dessa är såklart inte den sortens färger vi ser, utan är ett mer abstrakt kvanttal som delar en central egenskap med vanliga färger. Tänk dig att vi lyser med tre olika ficklampor — en med rött, en med blått och en med grönt ljus — på samma punkt (se till vänster i figur 3). Då kommer ljuset i den punkten vara vitt, det vill säga färglöst. På samma sätt som den elektromagnetiska kraften binder ihop elektriskt laddade atomkärnor med elektroner till elektriskt neutrala atomer, binder den starka kraften ihop färgladdade kvarkar till färglösa system som kallas *hadroner*. Det minsta antal kvarkar som kan bilda en färglös kombination är tre — och det förklarar varför protoner och neutroner är trekvarksystem, eller *baryoner*. Ett annat sätt att uppnå färglöshet är att kombinera en färg och en antifärg, såsom röd och cyan, blå och gul, eller grön och magenta. Antikvarkar bär antifärger och när en antikvark bildar ett färglöst par med en kvark, kallas paret för en *meson*. Tre antikvarkar kan dessutom bilda antibaryoner (se till höger i figur 3). De allra flesta partiklar som upptäcktes i 1960-talets partikelzoo visade sig vara antingen baryoner eller mesoner. Inuti dessa växelverkar kvarkar och antikvarkar på mycket små avstånd. Då

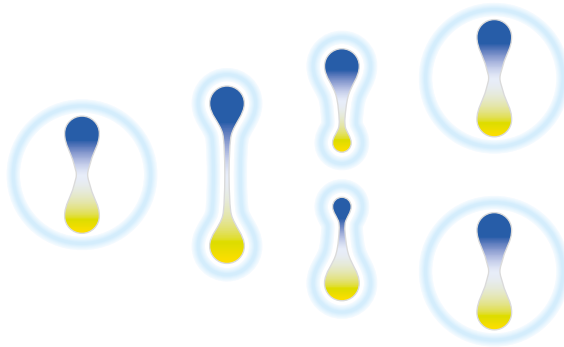
beter de sig som fria partiklar, ett fenomen som kallas *asymptotisk frihet* och är en direkt konsekvens av QCD. Gross, Politzer och Wilczek bevisade detta redan 1973.



Figur 3: De tre grundfärgerna röd, blå och grön (vänster) samt de tre antifärgerna cyan, gul och magenta (höger) kombineras till färglöst ljus.

Den starka kraftpartikeln (se Rikard Enbergs översikt om standardmodellen i denna upplaga av Kosmos) kallas gluon, som kommer från ordet *glue* — gluoner fungerar som ett riktigt superlim! Gluonen är masslös och har spinn ett precis som elektromagnetismens foton, men där upphör likheterna. Medan fotonen är elektrisk neutral och därför inte känner av andra fotoner, bär gluonen på både färg och antifärg (till exempel röd och magenta). Det betyder att den påverkas starkt av andra gluoner, vilket kallas *självkoppling*. Denna speciella egenskap får till följd att när man försöker dra isär två färgladdningar, till exempel en kvark och en antikvark, ökar den potentiella energin mellan dem ju större avståndet blir. För att dra isär dem ytterligare, måste man därför tillföra mer energi. Till slut krävs så mycket energi att det blir ”billigare” att skapa ett nytt kvark-antikvark par, där den nybildade kvarken parar ihop sig med den ursprungliga antikvarken och den nybildade antikvarken med den ursprungliga kvarken. Denna process, som illustreras i Figur 4, innebär att vi går från att ha ett sammanbundet kvark-antikvarkpar till att ha två. Dock har vi aldrig, under hela processen, någon isolerad kvark eller antikvark. Faktum är att vi inte kan observera kvarkar eller andra färgladdningar som fria partiklar — de är alltid inneslutna i färglösa system. Inneslutningen, eller *confinement*, är vid sidan av asymptotisk frihet den starka kraftens mest utmärkande egenskap. Att härleda inneslutning från QCD har dock visat sig mer komplicerat, och det finns tydliga kopplingar mellan inneslutning och protonens mysterier.

Gluonens självkoppling försvårar kvantitativa beräkningar av processer som involverar färgladdade partiklar. Inom kvant-elektrodynamik (QED), och inom QCD vid höga energier/korta avstånd, är växelverkans styrka så svag att man kan tillämpa störningsteori. Då kan man utgå ifrån de enklaste, *första ordningens* Feynmandiagram (se Rikard Enbergs översikt i denna upplaga av Kosmos) och behandla de mer komplicerade *högre ordningens* diagram som störningar. Ju fler ordningar man inkluderar, desto bättre blir förutsägelseerna, men skillnaderna blir mindre och mindre för varje tillagd ordning. För QCD-beräkningar vid låga energier/stora avstånd, blir dock kopplingskonstanten så stor att detta inte fungerar. Kvantitativa förutsägelser kräver därför andra metoder. En vanlig sådan går ut på att man istället för att utgå från frihetsgraderna kvarkar och gluoner, betraktar processerna från ett hadronperspektiv. I en sådan modell är det mesoner, och inte gluoner, som agerar kraftpartikel. Detta tillvägagångssätt har använts framgångsrikt för att beskriva atomkärnors egenskaper. Ett annat sätt att hantera stark växelverkan i beräkningar är *lattice QCD* (se Nils Hermansson-Truedssons artikel i denna Kosmos-upplaga). Då utförs beräkningarna på ett diskretiserat kristallgitter (*lattice*) i rumtiden. Kvarkfälten representeras av noder på gittret, och gluonfälten av länkarna mellan noderna. I och med att moderna datorer blir allt mer kraftfulla, kan man förkorta avståndet mellan noderna på gittret vilket gör beräkningarna mer och mer realistiska.



Figur 4: Tolkning av hur en kvark (blå) och en antikvark (gul) dras isär genom att energi tillförs, varpå den potentiella energin ökar tills det blir energimässigt billigare att bilda en ny kvark och en ny antikvark.

QCD omfattar en stor del av standardmodellens komplexitet i det avseendet att den innehåller åtta av dess totalt 19 parametrar: den starka kopplingen, de sex kvarkmassorna och den starka CP-brottsparametern. Dessutom spelar den en central roll i att fastställa de fyra oberoende parametrarna i Cabibbo, Kobayashi och Maskawas kvarkmixmatris. Det är därför nödvändigt att begripa den starka kraften, både när man vill försöka förstå standardmodellen, och när man letar efter tecken på fysik bortom den.

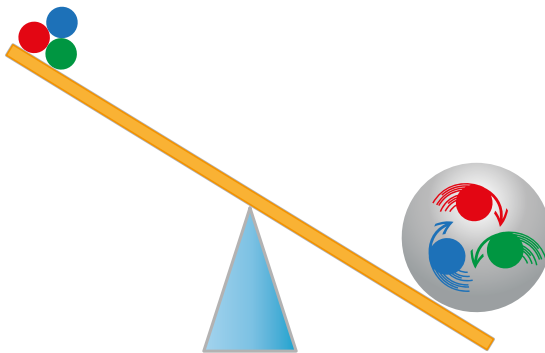
Massa

Protonens massa är $938,27 \text{ MeV}/c^2$. När Higgsbosonens existens bevisats av experimenten ATLAS och CMS på CERN, presenterades upptäckten ofta som att man äntligen löst massans gåta. Det är dock en sanning med modifikation. Kvarkarnas massa genereras mycket riktigt av Higgsmekanismen, och de upp- och nerkvarkar som bildar protoner och neutroner har massorna $2,2 \text{ MeV}/c^2$ respektive $4,7 \text{ MeV}/c^2$. Men om vi lägger ihop kvarkmassorna, finner vi att summan bara utgör ca 1% av protonens och neutronens totala massa:

$$\text{proton: } m_u + m_u + m_n = 9,1 \text{ MeV}/c^2,$$

$$\text{neutron: } m_u + m_n + m_n = 11,6 \text{ MeV}/c^2,$$

Protonen som helhet väger alltså mer än sina beståndsdelar, vilket står i bjärt kontrast till atomen som väger mindre än kärnan och elektronerna tillsammans. Hur kan det komma sig?



Figur 5: Protonen väger mycket mer än sina beståndsdelar.

Atomers storlek domineras av elektronmolnet, där en elektrons läge kan bestämmas med en precision runt en ångström, alltså 10^{-10} m . Om vi tillämpar Heisenbergs osäkerhetsrelation:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

inser vi att detta motsvarar en impuls i storleksordningen $1 \text{ eV}/c$. Om vi använder så kallade naturliga enheter, kan vi jämföra impuls, energi och massa på samma bas. Vi konstaterar då att atomära elektroners kinetiska energi är mycket mindre än deras massa, som är $511 \text{ keV}/c^2$, för att inte tala om atommassan som är minst $1 \text{ GeV}/c^2$. Elektronens kinetiska energi bidrar alltså obetydligt till atomens massa. För protonen ser det annorlunda ut: dess storlek på cirka en femtometer (10^{-15} m) är ett mått på hur väl vi kan bestämma kvarkarnas läge inuti den. Detta motsvarar en osäkerhet i kvarkarnas impuls på cirka $200 \text{ MeV}/c$, det vill säga betydligt mer än kvarkarnas massa och fullt jämförbart med protonens massa. Från detta drar vi slutsatsen att kvarkarnas rörelseenergi spelar stor roll. Men borde det då inte finnas sammanbundna trekvarksystem, där kvarkarna rör sig långsammare och som därför är lättare? Svaret är att inneslutningsfenomenet inte tillåter detta. Långsammare kvarkar skulle innebära att de även blir mindre avgränsade — alltså skulle det genomsnittliga avståndet mellan kvarkarna öka. Med kvarkavståndet ökar den potentiella energin, som också bidrar till massan. På grund av inneslutningen kan dock inte kvarkavståndet öka hur mycket som helst — det finns en övre gräns. Det gör att det även finns en nedre gräns för hur lätt en proton kan bli. Faktum är att en hypotetisk proton av helt masslösa kvarkar skulle vara nästan lika tung som den verkliga protonen. Man kan därför säga att det, på grund av inneslutningen, uppstår en minimimassa eller ett *massgap*. Att bevisa matematiskt att det finns en kvantteori med denna egenskap är ett av de sju hittills olösta *Milleniumproblemen*.

För att bättre förstå hur den starka kraften genererar massa behövs experimentella studier. Formfaktorer och andra strukturfunktioner mäts genom elektronspridning eller när ett elektronpositronpar förintas och blir till energi, ur vilken ett proton-anti-protonpar kan bildas. I andra experiment kan man tillföra energi så att protonen exciteras, alltså når ett högre kvanttillstånd. Genom att mäta massan hos de exciterade tillstånden får vi ytterligare ledtrådar om massans ursprung. Tillför man tillräckligt mycket energi kan tyngre och instabila särkvarkar, charmkvarkar eller bottenkvarkar bildas. Trekvarksystem med tyngre kvarkar kallas *hyperoner* och kan betraktas som protonens tyngre syskon. Ef-

tersom hyperonens byggstenar är tyngre, kommer en större andel av deras massa från Higgsmekanismen jämfört med protonen och neutronen. Hyperonen kan därför hjälpa oss att förstå samspelet mellan Higgsgenererad massa och den starka kraftens massa. Genom att kombinera två eller flera av de nämnda tillvägagångssätten (spridning, excitation, tyngre kvarkar) kan vi bit för bit lägga ett pussel. Förhoppningsvis leder detta till att vi en dag förstår hur universums synliga massa bildas.

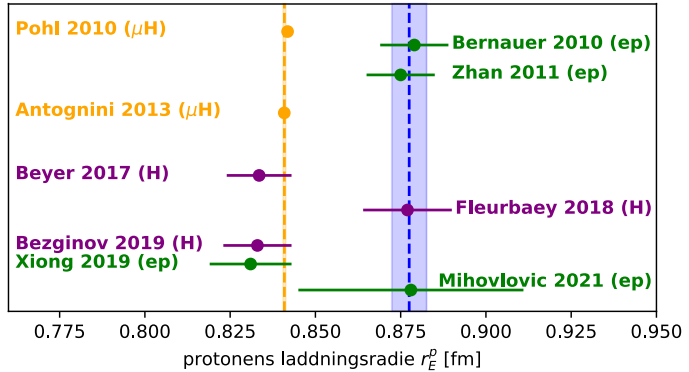
Radie

Vi har tidigare diskuterat sambandet mellan protonens storlek och dess massa. Men hur mäter vi dess storlek? Till att börja med, behöver vi klargöra vad storlek betyder — det är inte självklart i kvantvärlden. Om vi är ute efter avståndet mellan de elektriskt laddade kvarkarna, är det *laddningsradien* vi är intresserade av. Om vi istället vill titta på protonen som helhet, det vill säga inte bara kvarkarna utan även gluonerna, är det *massradien* vi vill mäta. Låt oss börja med laddningsradien, då det är ett område där vi sett enorma framsteg de senaste åren. Protonens laddningsradie mättes redan i Hofstaedters elektronspridningsexperiment 1957 genom att man utgick från en dipolmodell som man anpassade till data. Från den elektriska formfaktorns lutning med avseende på impulsöverföringen kunde man sedan beräkna radien:

$$r_p^2 = 6 \left. \frac{dG_p^E(t)}{dt} \right|_{t=0},$$

som befanns vara cirka 0,88 femtometer. Ungefär samtidigt mätte atomfysiker protonradien med en oberoende metod: protonens radie påverkar vätespektrets finstruktur. Resultatet stämde väl överens med elektronspridningsradien. Tack vare tekniska framsteg kunde man så småningom bilda myonväte — likt vanligt elektronväte med en protonkärna, men där elektronen ersatts av sin 200 gånger tyngre kusin myonen (se artiklar av Rikard Enberg och Nils Hermansson-Truedsson i denna upplaga av Kosmos). På grund av myonens mycket större massa, är myonvätes finstruktur mycket känsligare för protonens storlek och 2010 kunde man därför mäta protonens laddningsradie med mycket högre precision än tidigare. Till de flestas stora förvåning var inte bara mätosäkerheten mindre utan även själva radien: 0,842 femtometer, vilket skilde sig från tidigare resultat med mer än 5 standardavvikelser. Fle- ra oberoende experiment utförde nya, mer precisa mätningar och

ett mönster utkristalliserades: elektronbaserade metoder resulterade i högre värden än myonbaserade metoder. Detta illustreras genom data från experiment före 2017 i Figur 6. Fenomenet kom att kallas *proton radius puzzle* och ledde till kraftsamlingar inom både experiment och teori. Reagerar elektroner och myoner olika på protonens kraftfält? Det skulle i så fall vara ett brott mot standardmodellens *leptonuniversalitet*. Var resultatet i själva verket ett tecken på fysik bortom standardmodellen?



Figur 6: Protonens laddningsradie från elektronspridningsexperiment (ep) och atomspektroskopi med antingen elektronväte (H) eller myonväte (myH). CODATA och Particle Data Group gör regelbundna sammanställningar av tillgängliga och tillförlitliga data (grafik med hjälp av Michael Papenbrock).

Nej, istället visade det sig att protonradien är ett utmärkt exempel på hur viktigt det är att förstå den starka kraften när man tolkar experimentella resultat. De teoretiska verktygen har utvecklats enormt sedan de första elektronspridningsexperimenten, vilket ger mycket bättre precision. Med dessa verktyg, som baseras på dispersionsteori och som beaktar alla QCDs grundläggande symmetrier, har gamla och nya elektronspridningsdata analyserats på nytt. Resultatet är en protonradie kring 0,84 femtometer, likt den som uppmätts med myonväte. Samtidigt har nya experiment gjorts med vanligt elektronväte, och även här stämmer resultatet överens med dem från myonvätet, som figur 6 visar. En fråga som fortfarande inte fått sitt svar är varför de första mätningarna baserade på vätespektroskopi överskattade protonens laddningsradie. Det är dock troligt att svaret står att finna inom den experimentella och teoretiska metodiken, snarare än i fysik bortom standardmodellen.

Protonens massradie är svårare att mäta. Det beror på att vi då även måste ta hänsyn till gluonerna, som är elektriskt neutrala och därmed osynliga i till exempel elektronspridning. Dock har man nyligen visat att i protonreaktioner, där det finns tillräckligt mycket överskottsenergi för att bilda ett tungt kvark-antikvarkpar med samma kvanttal som fotonen, kan massradien beräknas. Nya data från Jefferson Laboratory i USA tyder på att massradien är cirka 0,55 femtometer, alltså mycket mindre än laddningsradien. Diskussionerna kring vad detta beror på är ännu i sin linda, men det står klart att vi i och med detta fått ännu ett verktyg som kan hjälpa oss att förstå hur universums massa uppstår.

Spinn

När kvarkmodellen introducerades på 1960-talet var det slående hur väl den kunde förklara alla de nyupptäckta partiklarna. Den visade sig dessutom kunna förutsäga dittills oupptäckta partiklars existens — förutsägelser som snart visade sig stämma. Med hjälp av kvarkmodellen tänkte man sig även beskriva protonens inre magnet, eller spinn. Protonen har spinn $\frac{1}{2}$, vilket betyder att om man väljer en godtycklig riktning är spinnets projektion antingen parallell eller antiparallell med den riktningen. Eftersom protonen är stabil och därmed måste befinna sig i det lägsta möjliga energitillståndet, antogs valenskvarkarnas vågfunktion vara en sfäriskt symmetrisk s-orbital,³ där kvarkarna inte har något relativt rörelsemängdsmoment. Protonens spinn skulle därmed, på icke-relativistiskt manér, helt utgöras av kvarkarnas spinn: två kvarkars spinn riktade åt ett håll och den tredje kvarkens spinn riktad åt motsatt håll. Kvarkmodellens tidiga succé gjorde att det kom som en blixtnedslag från en klar himmel när EMC-experimentet vid CERN upptäckte att endast hälften av protonens spinn kommer från valenskvarkarna. Varifrån kom resten? Denna gåta kom att kallas *spinnkrisen*.

Det stod snart klart att protonen är mycket mer komplicerad än vad kvarkmodellen antyder. Utöver de tre så kallade valenskvarkarna kan det skapas *virtuella* kvarkar och antikvarkar, som bara existerar ett kort ögonblick innan de förintas. Ju tyngre kvarkar, desto kortare livslängd. Kraften mellan valenskvarkar och virtuella kvarkar förmedlas av gluoner som även de skapas

³I en s-orbital är kvanttalet l , som beskriver det relativa rörelsemängdsmomentet, lika med noll.

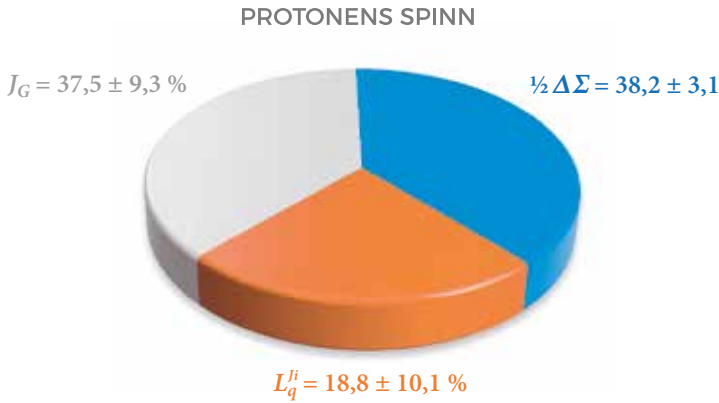
och förintas. Protonen kan alltså ses som en slags kvantsoppa av valenskvarkar samt virtuella kvarkar, antikvarkar och gluoner. Valenskvarkarna bär på merparten av protonens impuls, men kanske bidrar även virtuella kvarkar och gluoner till protonens spinn? Och stämmer det verkligen att kvarkarna inte har något relativt rörelsemängdsmoment? Enligt Ji kan man uttrycka protonens spinn J_p på följande sätt:

$$J_p = J_q + J_G = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + L_q^i + J_G \quad ,$$

där J_q är kvarkarnas (valens- och virtuella) bidrag uppdelat i kvarkarnas spinn $\Delta\Sigma$ och rörelsemängdsmoment L_q^i , medan J_G är gluonernas bidrag. Flera experiment världen över har konstruerats och utförts enkom för att mäta de olika bidragen. I dessa sprider man högenergetiska elektron- eller myonstrålar mot ett strålmål av protoner. Vid tillräckligt hög impulsöverföring mellan stråle och strålmål, kan man urskilja enskilda valenskvarkar eller virtuella kvarkar snarare än protonen som helhet. Detta kallas *djupt inelastisk spridning*. För att avslöja spinnstrukturen behöver antingen strålen eller strålålet, eller bägge, vara *polariserade*. Det betyder att partiklarnas spinn har en bestämd riktning, antingen longitudinell med avseende på strålens riktning, eller transversell. Tack vare dessa experiment har man kunnat konstatera att både gluoner och kvarkars rörelsemängd spelar en betydande roll, medan bidraget från virtuella sär- och charmkvarkar är ganska litet. Teoretiska lattice QCD-beräkningar bekräftar denna bild, som figuren nedan visar. Protonens spinn kan alltså sägas ha lämnat kriszonen och istället utvecklats till ett sofistikerat diagnostiskt verktyg för den starka kraftens mångfacetterade egenskaper.

Överskott

Det finns oerhört många protoner i vårt synliga universum — runt 10^{80} stycken! Antiprotoner verkar däremot vara ganska sällsynta. Vi tackar och bockar för det, eftersom protoner och antiprotoner förintar varandra när de kommer i kontakt. Men vem är det egentligen vi ska tacka? Enligt dagens paradig bildades lika mycket materia som antimateria i big bang. Om det stämmer, måste något ha hänt som gjorde att antimaterien försvann. Men vad skulle det kunna vara? Den ryske fysikern och fredspristagaren Andrej Sacharov förslög att materieöverskottet genereras dynamiskt, i en



Figur 7: Protonens spinn, uppdelat i olika bidrag enligt Jis sumregel. Kvar-karnas spinn visas i blått, deras relativa impuls i orange och gluonernas spinn i grått. Resultaten kommer från lattice QCD-beräkningar

process som kallas *baryogenesis*. Men för att den överhuvudtaget ska vara möjlig, måste tre kriterier vara uppfyllda:

1. *Baryontalsbrott*: det måste finnas processer där baryoner, det vill säga trekvarksystem, sönderfaller till ett system som inte innehåller några baryoner. På så sätt skulle universum kunna gå från ett tillstånd med baryontal noll till det nuvarande, med ett baryontal kring 10^{80} .
2. *C- och CP-brott*: det måste finnas processer där partiklar och antipartiklar beter sig olika, så kallat C-brott. Annars skulle baryontalsbrottet ovan lika gärna kunna leda till att universum får ett negativt baryontal och alltså bestå av antimateria. Dessutom måste det finnas processer där så kallat vänsterhänta partiklar beter sig annorlunda än högerhänta antipartiklar, det vill säga CP-brott.
3. *Termisk obalans*: processerna i kriterierna 1 och 2 måste ske långsammare än universums expansion, annars skulle universum pendla mellan att ha ett materieöverskott och ett antimaterieöverskott.

Låt oss titta närmare på kriterierna 1 och 2, som har direkt koppling till protonen.

Baryontalsbrott: Protoner och neutroner har baryontal ett, medan antiprotoner och antineutroner har minus ett. Leptoner,

mesoner och kraftbosoner har baryontal noll. Kan baryoner sönderfalla till icke-baryoner, det vill säga finns det processer där baryontalet går från ett till noll eller till och med minus ett? Alla baryoner utom protonen är instabila och sönderfaller därmed, men då till andra, lättare baryoner och bevarar alltså baryontalet. Protonen å andra sidan, verkar inte sönderfalla alls — i alla fall inte på 10^{30} år.

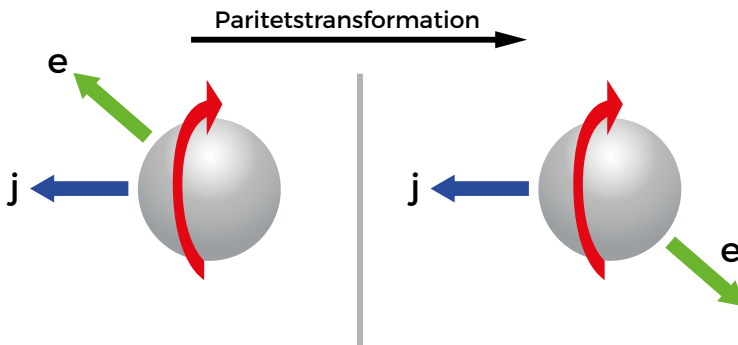
I standardmodellen är inte baryontal en exakt symmetri, så i princip skulle baryontalsbrott vara möjligt i svag växelverkan genom olika kvanteffekter. Processerna är dock undertryckta vid låga temperaturer och därför alldeles för små för att observeras. Teorier bortom standardmodellen förutspår proton sönderfall såsom $p \rightarrow \pi^0 e^+$ och $p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}$. Neutrinoexperimentet SuperKamiookande har försökt påvisa sådana sönderfall, men utan framgång. Däremot har man kunnat konstatera att om sådana sönderfall är möjliga, så måste livslängden vara minst 10^{33} år.

I en annan typ av baryontalsbrott skulle protonens neutrala syskon neutronen kunna spela huvudrollen. Eftersom en neutron inte har någon laddning, kanske neutronen kan förvandlas till sin egen antipartikel, antineutronen? Neutrala kaoner genomgår liknande förvandlingar genom den svaga processen $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$, eftersom särtal inte bevaras i svag växelverkan. Om baryontal inte är en exakt symmetri skulle processer som $n \leftrightarrow \bar{n}$ vara möjliga. När man försökt påvisa detta vid neutronanläggningen ILL i Grenoble har man dock inte hittat någon signal, utan har fått nöja sig med att fastställa en nedre gräns för livslängden. Vid Fermilab i USA och ESS i Lund finns möjligheter att fortsätta sökandet. Hittar man något vore det ett genombrott, men även ett negativt resultat ger värdefull vägledning: hur sällsynt kan en process vara, och ändå driva fram det materieöverskott vi ser?

C- och CP-brott: Tre centrala begrepp inom subatomär fysik är paritet P, laddningskonjugering eller C-paritet, samt kombinationen CP. Paritetstransformation innebär att rumskoordinaterna byter tecken, och vi får en ”spegelvänd” värld⁴ där partiklar rör sig i motsatta riktningar jämfört med den ursprungliga. Längre trodde man att paritet är en exakt symmetri. Det skulle betyda att naturlagarna är desamma i spegelvärlden, och inte gör någon skillnad

⁴I en vanlig spegel byter inte alla rumskoordinater tecken utan bara den som är vinkelrät mot själva spegeln, så ni får föreställa er en annan slags spegel där både x-, y- och z-koordinaterna byter tecken.

på höger och vänster. I stark och elektromagnetisk växelverkan stämmer det, men hur är det med den svaga? Enligt Yang och Lee borde det vara möjligt. Chien-Shiung Wu ville undersöka saken närmare. 1956 konstruerade och utförde hon ett experiment där hon kylde kobolt-60 till nära nollpunkten, för att sedan likriktade koboltkärnornas spinn i ett magnetfält. Kobolt-60 sönderfaller svagt genom att sända ut β -strålning, varpå dotterkärnan nickel-60 sönderfaller elektromagnetiskt genom att sända ut γ -strålning. Wu studerade bägge sönderfallen genom två spegelvända experimentuppställningar. Det elektromagnetiska och paritetsbevarande γ -sönderfallet gav information om moderkärnans spinnriktning. Om pariteten bevarats även i β -sönderfallet, borde β -partiklarnas riktning inte bero på moderpartikelns spinn. Wu konstaterade dock att β -partiklarna företrädevis sänds ut i motsatt riktning jämfört med moderpartikelns spinn, såsom illustreras i Figur 8.



Figur 8: En kobolt-60-kärna sönderfaller genom att sända ut en β -partikel, det vill säga en elektron. Om pariteten bevaras, borde scenariet till höger vara lika sannolikt som det till vänster, men Wus experiment visade att β -partiklarna oftast rör sig i motsatt riktning jämfört med koboltkärnans spinn.

Skulle anti-kobolt bete sig annorlunda? Det kommer förmodligen dröja länge innan vi kan få ett empiriskt svar på den frågan, eftersom det vore en enorm teknisk utmaning att skapa anti-kobolt. Det finns dock andra sätt att undersöka saken — varför inte undersöka en mindre komplicerad partikel, vars antipartikel är mer lättillgänglig?

C-transformation innebär att en partikel förvandlas till sin

egen antipartikel: kvanttal såsom laddning, färg, särtal och baryontal byter tecken, medan till exempel massa och spinn är oförändrade. C-symmetri betyder att partiklar och antipartiklar följer samma lagar. År 1957 studerade Garwin, Lederman och Weinrich laddade pioner, som sönderfaller svagt till myoner, vilka i sin tur sönderfaller svagt till elektroner. Eftersom svaga sönderfall inte bevarar paritet, kan man mäta myonens spinnriktning genom att studera sönderfallsvinkeln hos dotterelektronerna. Det visade sig att negativa och positivt laddade myoners spinn var polariserade, men i motsatta riktningar. Av detta lär vi oss följande:

1. Bägge sönderfallen är paritetsbrytande eftersom myonens spinn polariseras i pionsönderfallet och eftersom myonens dotterelektroners vinkelfördelning är asymmetrisk.
2. Sönderfallet bryter även mot C-symmetri eftersom polarisationen har olika tecken för positivt och negativt laddade myoner.
3. Om vi byter både paritet och C-paritet ser processen likadan ut som den gjorde innan bytena — processen är alltså symmetrisk under paritets- och C-paritetsbyte.

Trots att pionsönderfallet bryter mot både C- och P-symmetri, bevarar den alltså kombinationen, CP-symmetrin. Det betyder att partiklar och antipartiklar följer samma lagar, men i spegelvända världar. Om partiklar är vänsterhänta, är antipartiklar högerhänta, men gäller detta alltid? Den minnesgode erinrar sig att CP-brott är ett nödvändigt villkor för att materien ska kunna utplåna antimaterien. Är detta villkor uppfyllt? Svaret är att svaga CP-brytande processer finns och de kan förklaras inom ramen för standardmodellen tack vare den så kallade Cabibbo-Kobayashi-Maskawamekanismen. De första empiriska bevisen kom i ett experiment i Brookhaven där neutrala kaoner sönderföll till pioner. Numera har man även påvisat CP-brytande sönderfall för mesoner med bottenkvarkar (experimenten BaBar vid SLAC, USA och Belle vid KEK, Japan) och charmkvarkar (LHCb vid CERN). De observerade signalerna stämmer väl överens med vad vi förväntar oss från standardmodellen och de är mycket små — faktiskt för små för att förklara universums gigantiska materieöverskott. Betyder detta att vi kan förkasta baryogenesis som förklaring? Eller kan detta rentav vara ett tecken på att fysikens lagar sträcker sig bortom standardmodellen?

Baryoner kan utmana standardmodellen

För att försöka svara på frågan vi nyss ställt ger vi oss ut på ett relativt underutforskat område: baryonsönderfall. Här har man ännu inte observerat signifikanta CP-brott, men det är oklart om det betyder att de inte existerar eller om anledningen snarare är att de metoder man använt tidigare inte till fullo utnyttjat baryoners potential. Bara under de senaste åren har utvecklingen gått framåt med stormsteg: de nya, moderna experimentanläggningarna kan hantera högre intensiteter, samtidigt som mätnoggrannheten blivit allt bättre. Dessutom har de analytiska metoderna förfinats. Som vi just lärt oss är det främst i svaga processer vi förväntar oss CP-brott. De hadronsönderfall vi studerar sker dock genom en komplex samverkan mellan starka, elektromagnetiska och svaga processer. Eftersom de två första bevarar CP-symmetri, kan de spä ut CP-brytande signaler eller dölja dem helt. Vi behöver alltså förstå den starka växelverkan för att kunna dra korrekta slutsatser om den svaga.

När särtalsrika hyperoner sönderfaller, avslöjar de spinnriktningen på moderpartikeln. Spinn är ett kraftfullt verktyg i jakten på CP-brott, eftersom spinn inte byter tecken under paritets-transformation. Genom att studera kvantsammanflätade hyperoners och antihyperoners spinn, kan man separera bidragen från starka och svaga processer och därmed testa CP-symmetri med mycket högre precision än tidigare. Detta utnyttjades första gången i ett experiment vid BESIII i Kina, med stark inblandning av svenska forskare. Inga tecken på CP-brott syntes — men precisionen behöver fortfarande förbättras för att vi ska kunna dra definitiva slutsatser. Enligt standardmodellen bör eventuella CP-brott vara oerhört små, men går vi bortom den skulle de kunna vara flera storleksordningar större. Med bättre mätnoggrannhet skulle vi kunna jämföra med olika teoretiska förutsägelser, och se vilken som stämmer bäst med våra data. De gigantiska mängder data vi förväntar oss kunna samla in i framtiden, i kombination med de nya metoderna, ger goda möjligheter att påvisa CP-brott i baryonsönderfall — om de existerar. Annars får vi leta efter andra förklaringar till universums materieöverskott. Kanske fanns det mer materia redan från början? Eller skulle anrikningen av materia kunnat drivas fram av leptoner istället? Nya experimentella rön tyder på det, men om det skulle visa sig stämna kommer vi behöva gå bortom standardmodellen för att kunna förstå hur det går till.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera att när vi försöker gå till botten med universums och vår egen existens, så kommer vi förr eller senare till en punkt när den annars så framgångrika standardmodellen går bet. Men vad finns bortom den? Protonen lyckas fortfarande, efter mer än hundra års kändisskap, att överraska forskarsamhället. Kanske blir det med hjälp av protonen vi kan hitta sprickor i standardmodellen? Och kanske blir de sprickorna tillräckligt stora för att ljuset ska kunna ta sig in?



Vidare läsning

- Farrar, G. R. och Shaposhnikov, M. E. (1991). Baryon asymmetry of the Universe in the minimal standard model, *Phys. Rev. Lett.* 70, 2833.
- Hammer, H.-W. och Meissner, U.-G. (2020). The Proton Radius: From a puzzle to Precision, *Science Bulletin* 65, 257–258.
- Jaffe, A. och Witten, E. (2000). Quantum Yang-Mills Theory. I J. Carlson (red.), *The Millenium Prize Problems*, s. 129–152, American Mathematical Society och Clay Mathematics Institute.
- Ji, X., Yuan, F. och Zhao, Y. (2021). What we know and what we don't know about the proton spin after 30 years, *Nature Rev. Phys.* 3, 27–38.
- Kendall, H. (1990). Nobel Lecture: Deep Inelastic Scattering: Experiments on the Proton and the Observation of Scaling, *Rev. Mod. Phys.*, 63(3), 597.
- Kobayashi, M. (2008). Nobel Lecture: CP Violation and Flavour Mixing, *Rev. Mod. Phys.*, 81(3), 1019.
- Wilczek, F. (2004). Nobel Lecture: Asymptotic Freedom: From Paradox to Paradigm, *Rev. Mod. Phys.*, 77(3), 857.