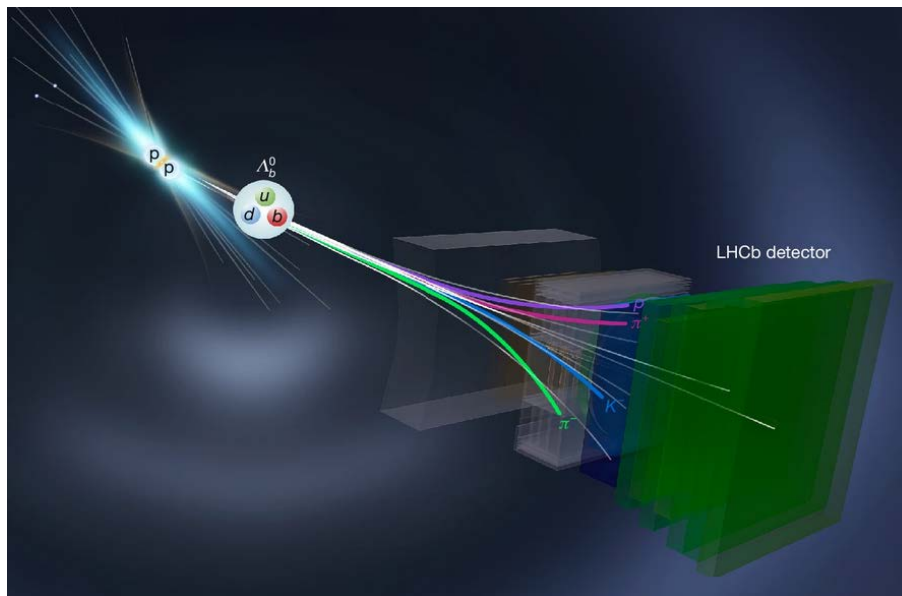


Large Hadron Collider beauty (LHCb) eksperimentet: CP-brud i baryoner

Lars Eklund og Patrik Adlarson, Institutionen för Fysik och Astronomi, Uppsala Universitet

LHCb-eksperimentet ved CERN har for første gang observeret forskelle mellem stof og antistof i henfald af partikler, der består af tre kvarker – såkaldte baryoner. Dette er en vigtig milepæl i udforskningen af forskellen mellem stof og antistof, som sigter mod at forstå, hvorfor universet næsten udelukkende består af stof.



Figur 1. Til den CP-brydende måling blev baryonen Λ_b^0 skabt gennem højenergetiske proton-proton-kollisioner, hvorefter den henfaldt til elektrisk ladede partikler – en proton, en kaon og to pioner – som måles og rekonstrueres i LHCb-detektoren. Figuren er modificeret fra [1].

Ifølge kosmologiens standardmodel blev der skabt lige store mængder stof og antistof ved Big Bang, og når de mødtes, annihilerede de hinanden. Hvis mængderne havde været helt identiske, ville alt være blevet annihileret; men en lille rest af stof blev tilbage – kimen til nutidens galakser, stjerner, planeter og biologisk liv.

De fleste fysikere antager, at en endnu ukendt mekanisme i det tidlige univers skabte det overskud af stof, der findes i dag. Selvom detaljerne er ukendte, ved vi, at tre grundlæggende kriterier skal være opfyldte. Ét af dem er, at der findes processer, der bryder *CP-symmetrien*. En *CP-symmetrisk* proces indebærer, at fysikkens love er de samme, hvis man erstatter en partikel med dens antipartikel (*fra engelsk: C, charge conjugation*) samtidig med, at man spejlvender rummet (*P, parity*).

Standardmodellen for elementarpartikelfysik indeholder en mekanisme, der bryder *CP-symmetrien* ved overgange mellem forskellige kvarktyper gennem den svage vekselvirkning. Kvarker findes i seks varianter:

up, down, charm, strange, top og bottom. Mekanismen beskrives af en 3×3 kompleks matrix (CKM-matricen), hvis elementer angiver sandsynlighederne for et kvark-flavourskifte, men som også introducerer en kompleks fase i amplituden. Det er denne fase, der gennem kvantemekanisk interferens er ansvarlig for CP-symmetribruddet i standardmodellen.¹

At der eksisterer processer i naturen, som bryder CP-symmetrien, blev opdaget i 1964 i henfald af mesoner – partikler bestående af kvark-antikvarkpar – der indeholder strange-kvarker. Siden da er CP-brud blevet yderligere bekræftet i henfald af bottom-mesoner² i 2001 i eksperimenter ved BaBar (ved SLAC i USA) Belle (Japan) og charm-mesoner³ i 2019 ved LHCb. CP-symmetribrud er målt med høj præcision i mange henfald, og resultaterne stemmer overens med forudsigelserne fra CKM-mekanismen. Men da CKM-mekanismen kun kan forklare en brøkdel af universets samlede stof-antistof-asymmetri, må der findes flere bidragende mekanismer. En måde at søge efter sådanne

¹Der findes en lignende mekanisme for neutrinoer, men indtil videre har man ikke kunnet bekræfte, at den komplekse fase i neutrino-sektoren er forskellig fra nul.

²Mesoner med to kvarker, hvor den ene kvark er en bottom-kvark eller en anti-bottom-kvark.

³Mesoner med to kvarker, hvor den ene kvark er en charm-kvark eller en anti-charm-kvark

nye mekanismer på er at måle afvigelser fra CP-symmetrien og sammenligne dem med forudsigelserne fra CKM-modellen. LHCb-eksperimentet ved LHC i Genève har et omfattende program af præcisionsstudier af CP-symmetri, og experimentet offentliggjorde for nylig [1] opdagelsen af CP-symmetribrud i henfald af baryoner – partikler, ligesom protonen og neutronen, der består af tre kvarker.

Opdagelsen blev gjort ved at studere bottom-baryonen Λ_b^0 , som består af en up-, en down- og en bottom-kvark, samt dens antipartikel $\bar{\Lambda}_b^0$. Den tunge og relativt kortlivede baryon henfalder til mere stabile partikelsystemer – i dette tilfælde $pK^-\pi^+\pi^-$ (se figur 1). Hvis CP-symmetrien er bevaret, skal henfaldskæden for Λ_b^0 og $\bar{\Lambda}_b^0$ forekomme lige hyppigt; men målingen viste, at Λ_b^0 -baryonen henfalder omkring 2,5 % oftere til sluttillstanden end sin antistof-modpart.

Antallet af registrerede Λ_b^0 - og $\bar{\Lambda}_b^0$ -henfald påvirkes også af mulige asymmetrier i produktionen af disse partikler og i detektion af deres henfald. Når der korrigeres for disse effekter i dataanalysen, er den statistiske signifikans af observationen 5,2 standardafvigelser. Nøjere studier viser, at kortlivede resonanser af andre partikler i henfaldet både kan øge og mindske CP-asymmetrien, fordi den kvantemekaniske interferens varierer mellem de forskellige henfaldsveje. LHCb har også undersøgt henfaldskanalerne $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ og $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ (hvor J/ψ er en meson, der består af en charm-kvark og en anti-charm-kvark), som viser tegn på CP-symmetribrud med signifikans på hhv. 3,1 og 3,9 standardafvigelser, men der kræves mere data for endeligt at fastslå CP-brud i disse henfald.

LHCb befinder sig nu i sin tredje dataindsamlingspe-

riode med et planlagt produktionsstop i midten af 2026. Med de nyindsamlede datamængder fortsætter arbejdet med at forstå, hvad der skete ved universets fødsel, hvor stof og antistof gik hver sin vej.

Litteratur

- [1] LHCb Collaboration (2025) “Observation of charge-parity symmetry breaking in baryon decays”, *Nature*. bind **643**, side 1223–1228.



Lars Eklund er professor ved Institutionen för Fysik och Astronomi, Uppsala Universitet.



Patrik Adlarson er forsker ved Institutionen för Fysik och Astronomi, Uppsala Universitet.

Fra Skyhav til Stjernelys: Erfaringer fra NOT-sommerskolen på La Palma

Charlie Emil Lind-Thomsen, Niels Bohr Institutet

Artiklen præsenterer en beretning fra den observationelle sommerskole ved Det Nordiske Optiske Teleskop (NOT), hvor danske fysikstuderende opnår praktisk erfaring med planlægning og udførelse af astronomiske observationer. Forløbet omfatter både forberedende arbejde i København og fem nætters observationer på La Palma, herunder udvælgelse af mål, analyse af sigtbarhed, konstruktion af observationsblokke samt håndtering af kalibrationsdata og rådata. Artiklen skitserer centrale tekniske procedurer og læringsprocesser og fremhæver, hvordan opholdet giver indblik i observationsastronomiens metodik og arbejdskultur, herunder gruppens identifikation af en mulig lensed kvasar.

Forberedelserne i København

Hvert år afholdes en observationel sommerskole ved Det Nordiske Optiske Teleskop (NOT). Målet med sommerskolen er at give studerende i astrofysik ”hands-on” erfaring med brugen af teleskoper og alt, hvad der hører til.

Sommerskolen varer to uger. Først forbereder man de observationer, man gerne vil lave hjemme i Danmark, hvorefter man flyver til La Palma, hvor sommerskolen har hele fem nætters observationstid på NOT. I løbet af den sidste uge bliver man indført i alt, hvad der skal til – fra man opstarter NOT, til man sidder med et