

# Antimaterien, der blev væk

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

I starten af Big Bang var der præcis lige så mange partikler som antipartikler. Men i det nuværende univers eksisterer der kun materie bestående af ordinære partikler. Alle antipartiklerne er væk. Hvad der skete med antimaterien i starten af Big Bang i den proces, som vi kalder baryogenesen, er fremdeles et af de største mysterier i fysikken. Vi ved ikke, hvad løsningen er, men vi kan antyde lidt om i hvilken retning, løsningen skal søges.

Antipartikler blev teoretisk forudsagt af den engelske fysiker Paul A. M. Dirac i 1930 [1]. Dirac ville prøve at forene den kvantemekanik, der var formuleret af Schrödinger, Heisenberg og Pauli, med Einsteins specielle relativitetsteori i en ny bølge ligning for elektronen. I klassisk fysik er en partikels energi givet ved formlen

$$E = \frac{1}{2}m \cdot v^2 + E_{pot} \quad (1)$$

Kvantemekanikken var i sin oprindelige version baseret på den klassiske mekanik, og alle løsninger af Schrödinger-ligningen har positiv energi.

Men i relativitetsteorien har en partikel energien

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \quad (2)$$

hvor  $p$  er impulsen (egentlig bevægelsesmængden, men herefter kaldes den impulsen).

Når man går fra klassisk fysik til kvantemekanik, erstattes en partikels koordinater for position og impuls med de tilsvarende differential-operatorer. Men kvadratroden af en differential-operator giver ingen mening. Dirac opdagede, at han kunne komme elegant uden om problemet med kvadratroden i udtrykket for energien og samtidig tage højde for elektronens spin, ved at kvadrere ligningen og lade bølgefunktionen for elektronen (som er løsningerne for Dirac-ligningen og beskriver amplituden af sandsynligheden for at finde elektronen i en bestemt tilstand) være matricer med fire komponenter.

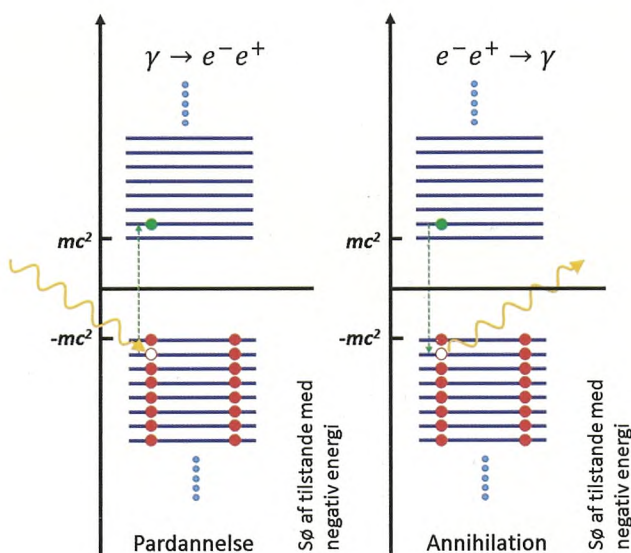
Dette medførte, at Diracs bølge ligning havde fire løsninger for en fri elektron med impuls  $p$ :

- Spin op med energi  $E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$
- Spin ned med energi  $E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$
- Spin op med energi  $E = -\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$
- Spin ned med energi  $E = -\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$

Men det betyder, at Diracs ligning har løsninger med negativ energi. Dette giver umiddelbart ingen mening, men Dirac fandt en fortolkning baseret på Paulis udelukkelsesprincip. Elektronen er en fermion, og der kan derfor kun være én elektron i hver tilstand. Dirac fremsatte den hypotese, at "vakuum" er den tilstand, hvor alle negative energitilstande er fyldt op, men der er ingen positive energitilstande. Hvis en elektron med negativ energi absorberer en foton, får den positiv energi og bliver en "rigtig" elektron. Men dette efterlader et hul i søen af negative energitilstande. Dette hul opfører sig som en partikel med positiv ladning, men med

samme masse og spin som en elektron. Dette hul er elektronens antipartikel, positronen.

Hullet kan fyldes ved, at en "rigtig" elektron "falder ned" i søen ved at afgive energidifferencen til den ledige negative energitilstand i form af en foton. Derved annihileres elektronen. Processerne er vist på figur 1.



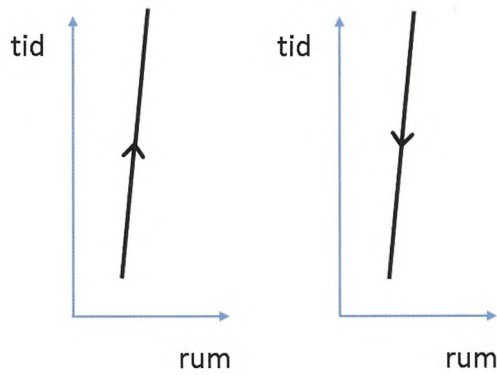
Figur 1. Dirac-søen.

I 1932 blev elektronens antipartikel opdaget i et tågekammer af Carl David Anderson [2]. I 1936 fik han Nobelprisen i fysik for sin opdagelse af positronen. Dirac fik Nobelprisen i 1933 for sit bidrag til kvantemekanikken.

## Antipartikler

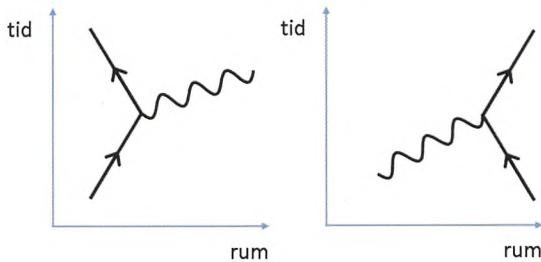
Ligesom elektronen har alle elementarpartikler en antipartikel. I kvantefeltteori beskriver vi antipartikler som partikler, der bevæger sig baglæns i tid og rum. Richard P. Feynman har skabt en meget illustrativ grafisk model til at beskrive vekselvirkning mellem partikler. Vi tegner simple diagrammer, hvor  $x$ -aksen repræsenterer rumkoordinaterne, og  $y$ -aksen repræsenterer tiden.

En partikel, som bevæger sig uden at vekselvirke, tegnes som en sammenhængende linje med pil opad, og den tilsvarende antipartikel har pil nedad:



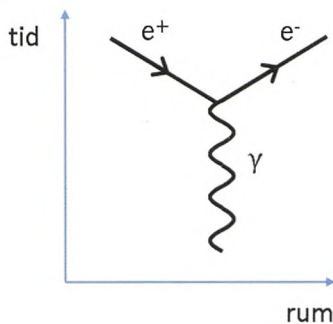
**Figur 2.** Feynman-diagram for partikel og antipartikel.

Tilsvarende tegner vi en foton som en bølgelinje. Vi kan nu tegne diagrammet for en partikel, som udsender eller absorberer en foton og ændrer bevægelse:



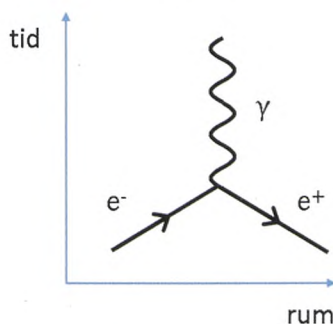
**Figur 3.** En partikel udsender eller absorberer en foton.

Men vi kan også rotere diagrammet, så vi starter med en foton i bunden. Nu illustrerer diagrammet, at en foton skaber et partikel/antipartikel-par, for eksempel elektron/positron:



**Figur 4.** Skabelse af partikel/antipartikel-par.

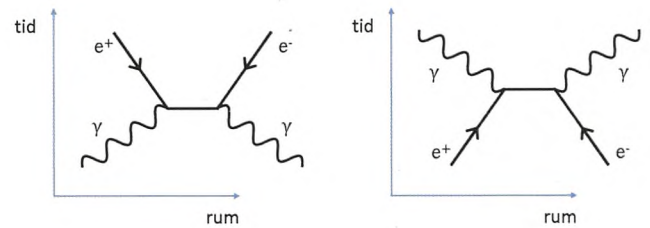
Hvis vi vender dette diagram på hovedet, får vi annihilation af partikel/antipartikel:



**Figur 5.** Annihilation af partikel/antipartikel-par.

Disse simple diagrammer kan ikke finde sted i denne form i naturen, da de ikke samtidig kan bevare energi

og impuls. De beskriver virtuelle processer. For at alle fysiske love skal være opfyldt, må der være to fotoner. Disse processer er vist i figur 6.



**Figur 6.** Pardannelse og annihilation af partikel/antipartikelpar i naturen.

Processen, hvor der dannes et partikel/antipartikel-par, er den eneste proces i standardmodellen, hvor der kan dannes stof af fotoner. I denne proces dannes der præcis lige så mange antipartikler som partikler.

*Det vil sige, at da der blev dannet stof af stråling i det meget tidlige univers, var der lige så mange antipartikler som partikler.*

### CPT-symmetri

Indtil slutningen af 1950'erne var fysikerne enige om, at universet ikke kender forskel på højre og venstre. Men man opdagede, at den svage vekselvirkning har en meget mærkelig egenskab, som strider mod al sund fornuft:

Kun venstrehåandede partikler (og højrehåandede antipartikler) kan deltage i den svage vekselvirkning!

Årsagen til, at spejlsymmetrien ikke gælder, er, at neutrinoerne altid er venstrehåandede, mens antineutrinoer er højrehåandede. Spejlbilledet af en neutrino eksisterer derfor ikke i naturen.

Matematisk ytrer det sig ved, at paritetssymmetri ikke gælder i denne vekselvirkning. En partikels paritet angiver, om bølgefunktionen  $\Psi$  (som beskriver amplituden for at finde partiklen i en bestemt tilstand) skifter fortegn, når den spejles omkring origo (alle rumkoordinater skifter fortegn). Lige paritet angiver, at fortegnet ikke skifter

$$\Psi(x, y, z) = \Psi(-x - y - z)$$

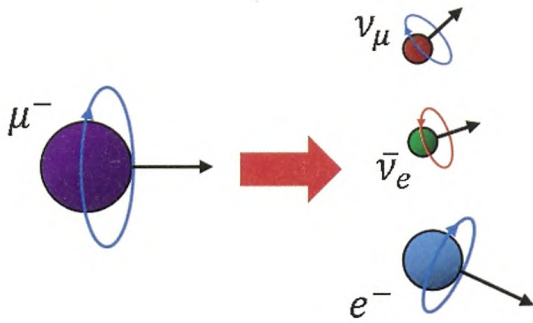
og ulige paritet angiver, at det skifter

$$\Psi(x, y, z) = -\Psi(-x - y - z).$$

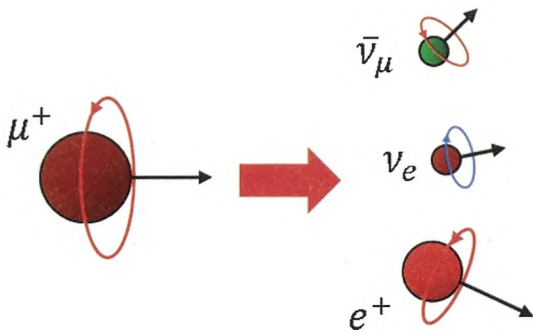
Da bruddet på paritetssymmetri blev opdaget, gik man ud fra, at hvis man kombinerer paritets-transformationen med ladningskonjugation, det vil sige, at man skifter alle partikler om til de tilsvarende antipartikler, har man en gyldig symmetri.

Et eksempel på en sådan transformation har vi i myonhenfald. En myon henfalder til en elektron, en myon-neutrino og en elektron-antineutrino. Denne proces er kun mulig for en venstrehådet myon, som vist på figur 7.

Spejlbilledet af denne proces er umulig i naturen. Men hvis vi udfører en CP-transformation, det vil sige, at vi spejlvender billedet og skifter alle partikler til antipartikler og omvendt, får vi en mulig proces, nemlig antimyonhenfald (figur 8).



Figur 7. Myonhenfald.



Figur 8. Antimyonhenfald.

Hvis alle processer i naturen opfylder CP-symmetri eksakt, skal alle antipartikler have samme levetid som deres tilsvarende partikler. Men i 1964 opdagede James Cronin og Val Fitch ved Brookhaven-laboratoriet, at den neutrale  $K^0$ -meson kan forvandle sig til sin egen antipartikel,  $\bar{K}^0$  [3]. Dette skyldes, at  $K^0$  består af en  $s$ -kvarke og en anti- $d$ -kvarke, mens  $\bar{K}^0$  består af en anti- $s$ -kvarke og en  $d$ -kvarke. Disse kvarke/antikvarke-par kan forvandle sig til hinanden ved hjælp af den svage vekselvirkning. Men, denne forvandling sker ikke med samme hyppighed i begge retninger. Det vil sige, at der er forskel på levetiden på partikler og de tilsvarende antipartikler, og CP-symmetrien er brudt. Cronin og Fitch fik Nobelprisen i fysik i 1980 for denne opdagelse.

Senere er der fundet flere andre eksempler på, at partikel og antipartikel har forskellig levetid.

Vi må derfor konkludere, at CP-symmetrien ikke altid er overholdt i naturen.

Hvis vi også omvender tiden, det vil sige, at vi "kører filmen baglæns", løser vi problemet med hyppigheden, da reaktionen nu også kører baglæns. Vi kan derfor konkludere, at vi også må omvende tiden for at få en eksakt symmetri.

CPT, det vil sige ladningskonjugation (bytte om på partikler/antipartikler) + paritetstransformation (spejlvende processen) + tidsomvendning (køre filmen baglæns) er en eksakt symmetri i naturen. Det vil sige, at hvis en proces er mulig, vil CPT-transformationen også være mulig i naturen.

### Baryoner og leptoner

Alt stof i universet (med undtagelse af mørkt stof, hvis natur vi ikke kender) er opbygget af protoner, neutroner og elektroner. Protoner og neutroner består af tre kvarke. Partikler, som består af tre kvarke, kaldes baryoner.

Der findes mange andre baryoner med højere masse end protonen (for eksempel  $\Sigma, \Xi, \Lambda, \Delta, \Omega$  osv.). De består alle af tre kvarke fra standardmodellens tre familier. Der findes også de tilsvarende antipartikler, som består af tre antikvarke. For at holde rede på de mulige partikelreaktioner har fysikerne givet baryonerne et kvantetal, som kaldes baryontallet  $B$ . Alle baryoner har  $B=1$ , mens antibaryonerne har  $B=-1$ . Tilsvarende har alle kvarke  $B=1/3$ , og antikvarkerne har  $B=-1/3$ .

I alle partikelreaktioner i standardmodellen er baryontallet bevaret. Tilsvarende er elektronen og dens tunge brødre myonen og tau-leptonen fundamentale partikler i standardmodellen. Sammen med neutrinoerne kaldes de leptoner og har også et tilknyttet kvantetal kaldet leptontallet  $L$ . Alle leptoner (også neutrinoerne) har leptontal  $L=1$ , og antileptonerne har  $L=-1$ .

Ligesom baryontallet er leptontallet altid bevaret i standardmodellen.

Lad os betragte et par eksempler. Når en elektron annihilerer med en positron, dannes der to fotoner (én foton ville ikke kunne bevare både energi og impuls, se også figur 6 th.):

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (3)$$

Leptontallet i starttilstanden er  $L=1-1=0$ .

Leptontallet i slutttilstanden er også  $L=0$ , da fotoner ikke har leptontal.

Vi ser nu på en proces, som involverer både leptoner og baryoner, nemlig neutronhenfald:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (4)$$

Leptontallet i starttilstanden er  $L=0$  (neutronen er en baryon). Leptontallet i slutttilstanden er  $L=1-1=0$  (elektronen har  $L=1$  og antineutrinoen har  $L=-1$ ).

Baryontallet i både begyndelsestilstand og slutttilstand er  $B=1$  (både neutronen og protonen er baryoner).

Ligesom partikel/antipartikel-par kan annihilere til fotoner, kan den modsatte proces danne elektron/positron-par eller kvarke/antikvarke-par fra fotoner:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (5)$$

eller

$$\gamma + \gamma \rightarrow q + \bar{q} \quad (6)$$

I alle processer med pardannelse vil der gælde, at  $B=0$  og  $L=0$ , da fotoner hverken er baryoner eller leptoner.

Da alle processer ifølge standardmodellen bevarer baryontal og leptontal, skulle vi naivt forestille os, at universet har  $B=L=0$ , hvis det er startet med lys, det vil sige fotoner. Der burde derfor være præcis lige så mange antipartikler som partikler i universet.

### Hvor er antimaterien?

I det nuværende univers er der ca.  $6,7 \cdot 10^{-10}$  baryoner for hver foton [4]. Af disse baryoner er mindre end én ud af 10.000 en antibaryon. Hvad er der sket med antimaterien?

Vi ved, at solsystemet udelukkende består af normal materie, ellers ville vi se voldsom stråling fra annihilationer. Tilsvarende ved vi, at der kun er normal materie

i Mælkevejens stjerner. Vi rammes af mange alfapartikler i kosmisk stråling, men vi har aldrig nogensinde observeret en anti-alfapartikel (man leder bl.a. efter anti-atomkerner med eksperimentet Alpha Magnetic Spectrometer ombord på ISS). Det lille antal antiprotoner, vi observerer, skyldes højenergetiske partikler, som kolliderer med normal materie. Når vi observerer forholdet mellem mængden af brint, deuterium, helium og litium i universet, finder vi en forekomst, som er fuldstændig i overensstemmelse med, at hovedparten af de lette grundstoffer, der findes, blev dannet under nukleosyntesen i Big Bang, da universet var nogle sekunder gammelt [5]. Tilstedeværelse af antimaterie på dette tidspunkt ville have forrykket balancen mellem baryoner og fotoner.

Faktisk findes den bedste indikation, vi har på manglen på antimaterie, i den kosmiske mikrobølgestråling. Her observerer vi en fuldstændig perfekt sortlegemestråling med en temperatur på 2,7 K. Hvis der fandtes antimaterie, ville vi se mange fotoner med en energi svarende til elektron/positron- og proton/antiproton-annihilation (rødforskudt til mikrobølgeområdet ligesom resten af baggrundsstrålingen).

Den eneste mulighed for, at der er lige så mange antibaryoner som baryoner, er, at de ved en eller anden mærkelig proces skulle være flyttet ud af det observerbare univers. Men vi kan ikke forestille os nogen fysisk proces, som kan være ansvarlig for dette.

## Baryogenesen

Vi vil nu prøve at forstå lidt mere af, hvad der skete, da materien (elementarpartiklerne) blev dannet. Vi regner med, at det begyndte umiddelbart efter det, vi i kosmologien kalder den elektrosvage faseovergang. Før denne faseovergang havde elementarpartiklerne ingen masse, og fotoner og vektorbosoner var kvanter i det samme elektrosvage felt. Men da temperaturen var faldet ned til et niveau, hvor fotonenergien var lig med Higgs-massen, skete der et symmetribrud, hvor elektromagnetismen og den svage vekselvirkning blev to separate kræfter, vektorbosonerne ( $W^+$ ,  $W^-$  og  $Z^0$ ) og elementarpartiklerne fik masse ved at vekselvirke med Higgs-feltet. Dette skete ved en temperatur på  $10^{15}$  K (svarende til Higgs-massen på 125 GeV).

Efter den elektrosvage faseovergang kan vi med stor succes bruge termodynamikken og kvantemekanikken til at beskrive universets udvikling. Universet udvidede sig, og temperaturen faldt ligesom i en gas, der udvider sig. Som vi har set, vil fotoner kunne skabe par af partikler og antipartikler. Så længe fotonenergien er større end masseenergien, vil der være termisk ligevægt mellem materie og fotoner, da processen kan gå begge veje. Når fotonenergien falder under masseenergien, kan processen kun gå én vej, og partikel/antipartikel-par vil annihilere.

Så længe temperaturen var over  $10^{13}$  K, havde kvarkerne endnu ikke dannet protoner og neutroner, og der var ca. lige så mange kvark/antikvark-par som fotoner i termisk ligevægt. Men da baryontallet (en tredjedel af antal kvarke minus antal antikvarke) er bevaret, må der på en eller anden måde være dannet et overskud af

kvarke (svarende til ca. tre kvarke pr.  $10^9$  fotoner).

Hvis dette ikke var sket, ville der være lige så mange protoner som antiprotoner i universet, og forholdet mellem protoner  $n_p$  og fotoner  $n_\gamma$  ville være det samme som forholdet mellem antiprotoner  $n_{\bar{p}}$  og fotoner. Dette forhold kan beregnes ud fra statistiske fluktuationer på grund af vakuumpolarisation, hvor fotonerne skaber virtuelle proton-antiproton-par. [6]:

$$\frac{n_p}{n_\gamma} = \frac{n_{\bar{p}}}{n_\gamma} \cong 10^{-18} \quad (7)$$

Dette er 8 størrelsesordner mindre end det observerede forhold mellem protoner og fotoner. Det viser helt klart, at der må være sket "noget" med antipartiklerne, så de ikke nåede at annihilere med partiklerne. Da universet er elektrisk neutralt, må noget tilsvarende være sket med leptonerne, da der er lige så mange elektroner som protoner i universet.

Vi kan også se, at det er nok, hvis der var et overskud på 3 kvarke per milliard kvark/antikvark-par, inden temperaturen faldt under tærsklen for at danne nye par.

Hvis dette "noget" ikke var sket, ville universet være tomt bortset fra den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, og vi ville ikke være her.

Den proces, som førte til, at antimaterien forsvandt, og at vores univers domineres af baryoner (og leptoner), kaldes baryogenesen. Vi har ingen god teori for, hvad der skete, men vi skal prøve at skitsere lidt om, hvad vi ved.

## Sakharovs kriterier

I 1967 offentliggjorde den russiske brintbombs fader (og senere vinder af Nobels fredspris), Andrej Sakharov, tre kriterier [7], som skal være opfyldt for, at de manglende antipartikler skal kunne forklares. De tre Sakharov-kriterier er:

1. Der er nødt til at findes en proces, som bryder med bevarelse af baryontallet  $B$ . Hvis en sådan proces ikke findes, vil vi ikke kunne have nogen asymmetri, og universet ville bestå af fotoner fra annihilationen af partikel/antipartikel-par.

2. Der må være brud på både C- og CP-symmetri. Hvis dette ikke var tilfældet, ville der ikke kunne dannes overvægt af partikler. Hvis der ikke var brud på C-symmetri, gælder samme love for antipartikler som for partikler og den proces, der producerer ekstra baryoner, vil også producere ekstra antibaryoner. Tilsvarende, hvis CP-symmetrien ikke var brudt, ville der gælde de samme love for produktion af venstrehåandede baryoner som for højrehåandede antibaryoner. Processen ville ikke give overskud af baryoner, kun asymmetri mellem venstrehåandede og højrehåandede baryoner og antibaryoner.

3. På det tidspunkt, da bruddet på symmetrien skete, må universet have været ude af termisk ligevægt. Hvis der var ligevægt, ville processen, der bryder bevarelse af baryontallet, løbe lige hurtigt begge veje, og baryontallet ville fluktuere omkring nul. Hvis temperaturen derimod falder meget hurtigt, vil det kunne favorisere den ene retning, hvis sandsynligheden afhænger af temperaturen.

Vi har ingen færdig teori, som kan opfylde Sakharovs tre kriterier og forklare forholdet mellem antal fotoner og antal baryoner i det nuværende univers. Vi har dog en ide om, i hvilken retning vi skal lede efter denne teori. Vi vil i det følgende gennemgå et par af disse ideer.

### Protonhenfald

Den simpleste forklaring på manglen på antibaryoner ville være, at de er ustabile og henfaldt i starten af Big Bang, inden nukleosyntesen (dannelsen af de første atomkerner) startede efter ca. et sekund. Da kvarker ikke har nogen kendte partikler at henfalde til, hvis elektrisk ladning skal bevares, må det være protoner og neutroner, som henfalder.

Desværre kan vi (på grund af CPT-symmetri) ikke lave en teori, hvor baryoner er stabile, mens antibaryoner henfalder; vi kan kun lave forskel på levetiden ved at bryde CP-symmetri.

Hvis antiprotoner er ustabile, må også protoner kunne henfalde. Vi kan prøve at spekulere over, hvorledes denne proces ville se ud. Vi ved, at energi, impuls, ladning og spin må være bevaret. De eneste kendte elementarpartikler med ladning, der har mindre masse end protonen, er elektronen og myonen. De har også samme spin som protonen. Men vi kan ikke lave en proton om til en positron og samtidig bevare både energi, spin og impuls. Der må derfor være to fotoner i sluttilstanden. De simplest mulige reaktioner vil derfor være:

$$p^+ \rightarrow e^+ \gamma + \gamma \quad (8)$$

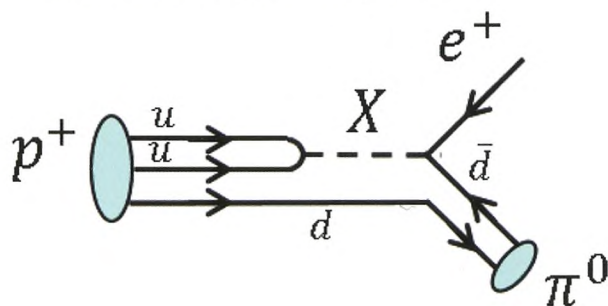
$$p^+ \rightarrow \mu^+ \gamma + \gamma \quad (9)$$

Disse reaktioner er ikke mulige i standardmodellen, men der findes en udvidelse af den, som kaldes GUT (Grand Unified Theory) [8], som forener den elektrosvage teori med kvantekromodynamikken ved høje energier. I GUT findes der to meget tunge  $X$ - og  $Y$ -bosoner med elektrisk ladning  $+4/3 e$  og  $+1/3 e$  (hvor  $e$  er elementarladningen).

I GUT-teorien kan protonen henfalde til en elektron via den neutrale  $\pi^0$ -meson efter reaktionen:

$$p^+ \rightarrow X + q_d \rightarrow e^+ + \pi^0 \rightarrow e^+ + \gamma + \gamma \quad (10)$$

Det tilsvarende Feynman-diagram er:



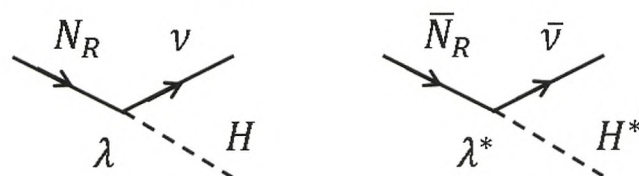
Figur 9. Protonhenfald.

$X$ -bosonen skulle have en masse på ca.  $10^{15}$  GeV. Dette ville give protonen en levetid på mere end  $10^{35}$  år, da levetiden er proportional med kvadratet af den inverse masse af  $X$ . På grund af brud på CT-symmetri

vil antiprotonen have en kortere levetid, og asymmetrien kan være opstået i det meget tidlige univers, da antiprotonens kinetiske energi var meget tættere på  $X$ -massen, og levetiden derfor var meget kortere.

Der er lavet en lang række forsøg på at påvise protonhenfald efter denne proces. I princippet fylder man en gammel mine med vand og installerer fotondetektorer, som kan se de to fotoner. Men alle forsøg har været resultatløse, og det ser ud til, at protonen er stabil. Videre har teorien et problem med den høje masse af  $X$ -bosonen. Hvis den skulle være produceret under Big Bang, måtte det være sket, mens temperaturen var over  $10^{19}$  K, hvilket var før inflationsfasen var overstået. Et overskud af baryoner ville derfor blive fortyndet med 50 størrelsesordener af inflationen, og universets baryontal ville blive alt for lille.

De fleste fysikere afviser derfor GUT-teorien på grund af bosonernes urealistisk høje masser og manglen på observation af protonhenfald.



Figur 10. Henfald af Majorana-neutrinoer.  $N_R$  er en tung, højrehåndet neutrino,  $\bar{N}_R$  den tilsvarende antineutrino,  $H$  og  $H^*$  er Higgs-partikler,  $\lambda$  og  $\lambda^*$  er koblingskonstanterne.

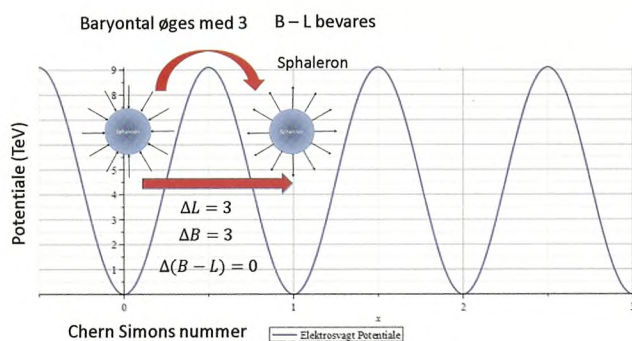
### Elektrosvag leptogenesis

Der findes en bagdør i standardmodellen, hvor vi kan lave om på baryontallet ved at bryde konservering af leptontallet og skabe overskud af leptoner eller antileptoner. Denne proces kaldes leptogenesis. Processen er interessant, da den også hjælper med at forklare, at neutrinoerne har en lille masse. I standardmodellen findes der kun venstrehåndede neutrinoer. I leptogenesis-modellen antager man, at der også findes højrehåndede neutrinoer, men de er sterile og kan ikke mærke den elektrosvage vekselvirkning. Til gengæld er disse partikler Majorana-partikler, det vil sige, at de er deres egne antipartikler. Det viser sig, at hvis de højrehåndede neutrinoer er ekstremt tunge, medfører dette, at de venstrehåndede er ekstremt lette. Dette kaldes "vippe-mekanismen" (seesaw mechanism) og forklarer, hvorfor de normale neutrinoer er så meget lettere end alle andre elementarpartikler. Masse opstår ved, at elementarpartiklerne vekselvirker med Higgs-feltet. Når en neutrino absorberer en Higgs-boson, skifter den mellem højre- og venstrehåndet. Men da massen af den højrehåndede neutrino er ekstremt høj, sker dette meget sjældent. Men dengang, da universets fotonenergi var af samme størrelsesorden som massen af den tunge, højrehåndede neutrino, oscillerede neutrinoerne kontinuerligt. I leptogenesis-modellen kan den tunge neutrino henfalde til en normal, venstrehåndet neutrino ved at udsende en Higgs-boson. Neutrinoen har leptontal  $L=1$ . Men da den tunge neutrino er sin egen antipartikel, kan den også henfalde til en antineutrino og en Higgs-boson. Antineutrinoen har leptontal  $L=-1$  (se figur 10). Hvis der er brud på CP-symmetri, vil

koblingskonstanterne  $\lambda$  og  $\lambda^*$  for de to processer være forskellige, og de vil have forskellig sandsynlighed (for at henfalde). Dette vil kunne skabe et overskud af antileptoner.

Her er  $N_R$  den tunge neutrino,  $\lambda$  er koblingskonstanten og  $H$  er Higgs-bosonen. Ved hjælp af denne proces kan vi bryde bevarelsen af leptontallet, hvis den højrehåndede neutrino er en Majorana-partikel (fermioner, som er deres egen antipartikel, kaldes Majorana-partikler). Men vi mangler at veksle et lepton-overskud til et baryon-overskud. Det viser sig, imidlertid, at baryontal og leptontal ikke behøver at være bevaret hver for sig i standardmodellen. Derimod er differencen  $B - L$  altid bevaret. Der findes en lidet kendt proces i standardmodellen, som kan konvertere leptoner til baryoner. Denne proces, som kaldes en elektrosvag sphaleron (græsk for glat eller fedtet) blev opdaget (teoretisk) i 1984 [9].

Baggrunden for, at det kan lade sig gøre at ændre baryontal og leptontal, er, at vakuumtilstanden i det elektrosvage felt er degenereret. Det vil sige, at der eksisterer uendelig mange vakuumtilstande med potentiel energi lig nul, men med forskellig baryontal og leptontal, dog således, at  $B - L$  altid er bevaret. Men de enkelte vakuumtilstande er adskilt af en potentialbarriere, som er ugennemtrængelig i det nuværende univers. Men i det tidlige, meget varme univers, var det muligt, at baryoner og leptoner kunne smutte over potentialbarrieren ved at danne en sphaleron, som er en ustabil løsning af Winberg-Salams feltligninger for den elektrosvage vekselvirkning, i form af en lille "klump" feltenergi med en udstrækning på ca.  $10^{-2}$  fm (figur 11).



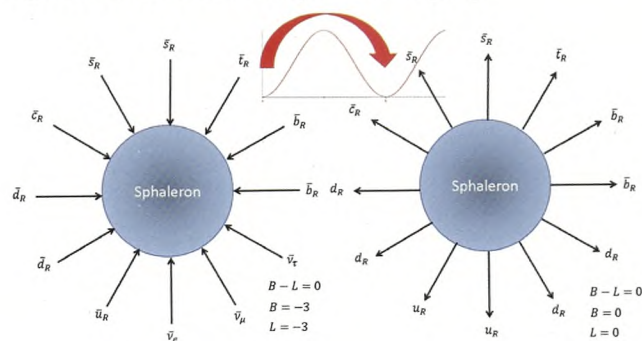
Figur 11. Overgang mellem vakuumtilstande.

En sådan sphaleron kan ikke beskrives ved hjælp af Feynman-diagrammer og kan ikke beregnes ved at addere amplituder. Men det er en klassisk løsning af feltligningerne. For eksempel kan tre antileptoner og seks antikvarer danne en sphaleron, som, hvis den smutter over til næste vakuumtilstand, vil henfalde til tre kvarker og seks antikvarer. Processen er vist på figur 12.

På denne måde kan vi trylle tre antileptoner som for eksempel antineutrinoer og tre antikvarer om til seks kvarker og øge leptontal og baryontal med tre [10].

Denne proces vil kun kunne løbe, når universets temperatur svarer til højden af potentialbarrieren, det vil sige ca.  $7 \cdot 10^{16}$  K. Dette skete, da universet var  $3 \cdot 10^{-14}$

sekunder gammelt, det vil sige efter inflationsfasen og lige inden den elektrosvage faseovergang.



Figur 12. Forvandling af antileptoner til baryoner.

Vi skal være opmærksomme på, at sphaleronprocessen kører begge veje, med samme sandsynlighed. Den vil ikke i sig selv kunne bryde bevarelse af baryontallet ud over statistiske fluktuationer. Men ved et overskud af antileptoner, vil den favorisere baryoner. Vi skal også huske på, at ved termisk ligevægt vil det overskud af baryoner, vi har skabt, blive udvasket igen. Men her hjælper Sakharovs 3. kriterium os. Hvis temperaturen falder meget hurtig, vil det være sværere at komme tilbage over potentialbarrieren, fordi energiforskellen er større efter første overgang.

Vi kan opsummere processen:

1. De tunge, "højrehåndede" (Majorana-)neutrinoer bliver til normale, "venstrehåndede" neutrinoer ved at vekselvirke med Higgs-feltet.

2. Fordi de højrehåndede neutrinoer er deres egen antipartikel, kan de også blive antineutrinoer, men på grund af brud på CP-symmetri (Sakharovs 2. kriterium) har denne proces større hyppighed, og der dannes overskud af antineutrinoer.

3. Antineutrinoer og antikvarer danner sphaleroner, som smutter over i nabo-vakuumtilstanden, hvorved baryontallet øges med tre (Sakharovs 1. kriterium).

4. På grund af termisk uligevægt er temperaturen faldet, inden processen når at køre tilbage, og der dannes overskud af kvarker og leptoner (Sakharovs 3. kriterium).

Der er foreslået flere varianter af denne mekanisme. Nogle af dem involverer Supersymmetri, som er en foreslået udvidelse af standardmodellen, men hidtil er alle forudsigelser fra denne teori blevet afkræftet af data fra LHC-acceleratoren, og tiden er ved at løbe ud for Supersymmetri.

## Konklusion

I det meget varme univers, hvor fotonenergien var højere end masseenergien i partikel/antipartikel-par, var der ligevægt mellem fotoner, leptoner og baryoner. Da temperaturen faldt under masseenergien, blev der ikke skabt flere nye partikler, og partikler annihilerede med antipartikler til fotoner.

Hvis dette var hele sandheden, ville universet være fyldt med fotoner, og stof ville ikke eksistere. Den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, som er fotonerne strækket til mikrobølger på grund af rødforskydning forårsaget af universets udvidelse, ville være universets eneste indhold. Men inden partikler og antipartikler

annihilerede, må der have været en lille overvægt af kvarker på ca. 3 ud af en milliard kvark/antikvarkpar. Denne overvægt har ikke kunnet annihilere, da de mangler en antikvark, og har derfor kunnet danne de protoner og neutroner, som universet består af i dag, ca. et sekund efter Big Bang. Der er i dag ca.  $6,7 \cdot 10^{-10}$  nukleoner for hver foton.

Standardmodellen giver ingen forklaring på, hvad der skabte denne overvægt, men vi ved, at den har sammenhæng med brud på nogle af naturens dybeste symmetrier som højre/venstre, +/- ladning og tidens pil. Måske ligger nøglen til gåden i neutrinoernes mærkelige egenskaber. I standardmodellen findes der kun masseløse venstrehåandede neutrinoer, men mange observationer har vist, at neutrinoernes egenskaber går langt ud over standardmodellen, og måske ligger nøglen til gåden om antimaterien hos højrehåandede neutrinoer.

## Litteratur

- [1] P. Dirac (1930) "A Theory of Electrons and Protons", *Proceedings of the Royal Society A*, bind **126**, nr. 801, side 360–365.
- [2] C. D. Anderson (1933) "The Positive Electron", *Physical Review*, bind **43**, nr. 6, side 491–494.
- [3] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch og R. Turlay (1964) "Evidence for the  $2\pi$  Decay of the  $K^0_2$ -Meson System", *Physical Review Letters*, bind **13**, nr. 4, side 138.
- [4] Andrew Liddle (2015) "An Introduction to Modern Cosmology", John Wiley & Sons, side 79–80.

- [5] Steven Weinberg (2008) "Cosmology", Oxford University Press, side 163–173.
- [6] Hannu Kurki-Suonio, "Thermal history of the Early Universe", Lecture notes University of Helsinki, <http://www.courses.physics.helsinki.fi/teor/-cosmology/Cosm4.pdf>
- [7] A. D. Sakharov (1967) "Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe", *Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz.*, bind **5**, side 32–35.
- [8] H. Georgi og S. L. Glashow (1974) "Unity of All Elementary Particle Forces", *Physical Review Letters*, bind **32**, nr. 8, side 438–41.
- [9] F. R. Klinkhamer, og N. S. Manton (1984) "A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory", *Phys. Rev. D.*, **30**, nr. 10, 2212–2220.
- [10] M. Fukugita og T. Yanagida (2003) "Physics of Neutrinos and Application to Astrophysics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, side 487–500.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste fem år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

## KVANT-nyheder

Af Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

### Netværk af teleskoper tager det første billede af et sort hul

**ASTROFYSIK.** Det er måske de færreste, også ikke-fysikere, der ikke har set billedet af det sorte hul, som Event Horizon Telescope (EHT) præsenterede i april. Nu viser vi det alligevel i KVANT, så vi er sikre på, at alle vores læsere får set det. Billedet viser et supermassivt sort hul, som ligger i midten af galaksen M87, der befinder sig 55 millioner lysår fra Jorden. Billedet er taget af EHT, som består af 8 teleskoper, der er fordelt ud over Jorden. Billedet af det sorte hul er en imponerende bedrift og bekræfter, ligesom målingen af tyngdebølger i 2015 gjorde, igen Einsteins generelle relativitetsteori, der her forudsiger den runde form af det sorte huls skygge.

Et sort hul er et meget lille og tæt objekt med en enormt høj massefylde, hvor tyngdekraften er så stærk, at selv ikke lys kan undslippe, når det kommer

inden for en vis afstand af det sorte hul. Denne afstand kaldes begivenhedshorisonten og afhænger af det sorte huls masse. Uden for begivenhedshorisonten kan lys og partikler med høje hastigheder godt undslippe. Begivenhedshorisonten er netop den afstand, hvor undvigelseshastigheden er lig lysets hastighed. Det sorte hul er en singularitet i rumtiden, da det er en enorm mængde masse på et uendeligt lille punkt i rumtiden. Ifølge Einsteins generelle relativitetsteori vil det sorte huls tyngdefelt afbøje lys omkring det sorte hul og forme en ring rundt om det. Stof og lys i nærheden af det sorte hul vil kredse omkring det, og friktionen vil opvarme det så meget, at det stråler. Denne lysende ring, som består af gas og plasma, laver en skygge af det sorte hul.

Det stof og lys, der bevæger sig imod os, er mere intenst end det, der bevæger sig væk. Det ses nederst i ringen, hvor intensiteten af stråling er højere end øverst. Fra billedet kunne forskerne se, at det sorte hul i M87