
5

OM ANTISTOF:

HVORFOR ER HALVDELEN AF UNIVERSET FORSVUNDET?

Af

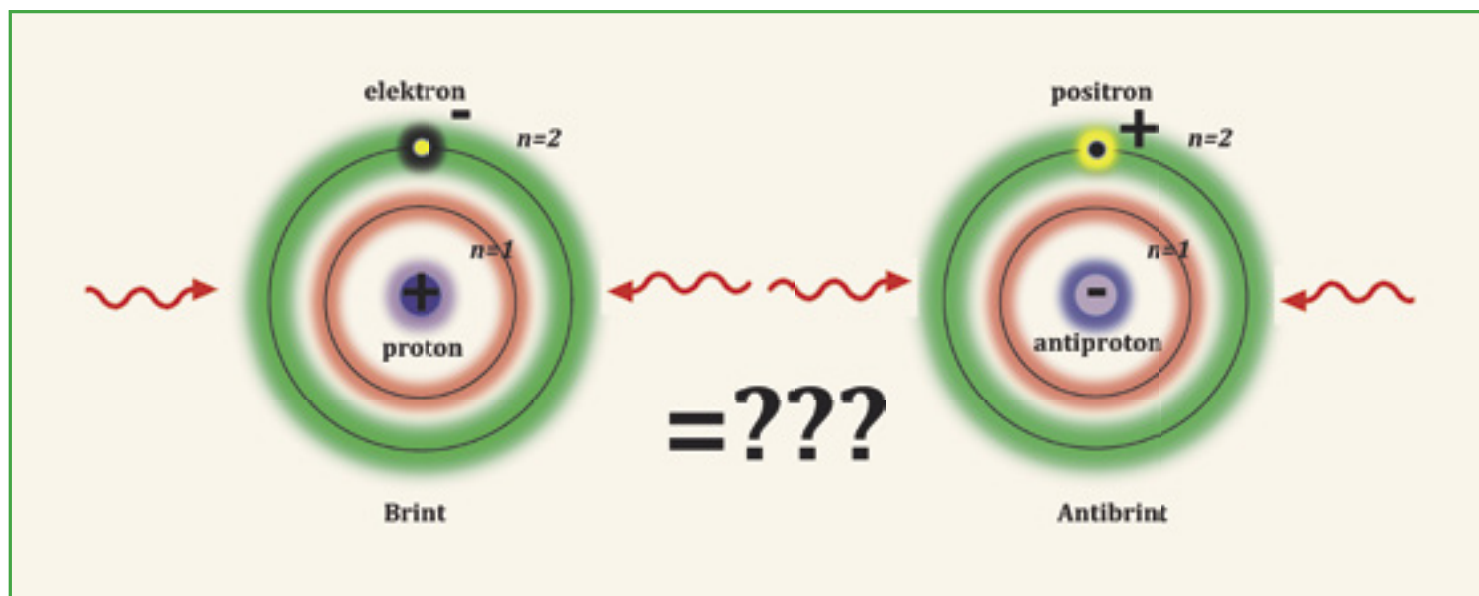
JEFFREY HANGST

PROFESSOR, PH.D.

INSTITUT FOR FYSIK OG
ASTRONOMI, AARHUS
UNIVERSITET

MODTAGET STØTTE TIL
SEMPER ARDENS-PROJEKTET:
THE ALPHA-G PROJECT

Vi ved i dag ikke, hvordan stoffet i universet har overlevet Big Bang, eller hvorfor universet er lavet af stof i stedet for antistof. Med støtte fra Carlsbergfondet skal det dansk-ledede ALPHA-konsortium studere antistof ved CERN i Genève. Er det muligt, at antibrint - den "onde" tvilling til Niels Bohrs brintatom - kan kaste lys over universets begyndelse? Og falder antistof opad eller nedad i et tyngdefelt? Det skal vi finde ud af.



V i kender alle Einsteins og en af fysikkens mest berømte ligninger: $E=mc^2$. Den udtrykker, at der til en given masse m er knyttet en ækvivalent mængde energi E , c er lysets hastighed. Eller sagt på en anden måde, hvis man har en given mængde energi E , kan det bruges til at skabe en given masse $m=E/c^2$. At skabe stof ud fra energi er blandt andet det, vi forsker i på CERN – det store internationale laboratorium for kerne- og partikelfysik i Genève. I dag benytter man den kæmpestore accelerator LHC (Large Hadron Collider) med en omkreds på 27 km til at opnå de højeste mulige energier for at finde nye partikler – som for eksempel den berømte Higgs-boson – som første gang blev observeret på CERN i 2012. Disse partikelacceleratorer hjælper fysikere til at forstå og forklare blandt andet universets opbygning og udvikling fra begyndelsen ved Big Bang.

Selvom Einsteins ligning er blevet bekræftet mange gange i eksperimenter, leder den til et af fysikkens største ubesvarede spørgsmål: Når vi bruger energi til at skabe stof i laboratoriet, får vi altid lige store mængder *stof* og *antistof*. Antistof findes ikke kun i *Star Trek*, *Engle* og *Dæmoner* og andre science fiction-historier. Fysikere ved i dag, at der til hver type partikel af almindeligt stof – f.eks. protoner, neutroner og elektroner, der udgør byggeklodserne i atomerne her i solsystemet – findes en antipartikel, heraf ordet antistof, der 'ligner, men er modsat'. En proton har en positiv elektrisk ladning, mens en *antiproton* har den samme masse som en proton, men en *negativ* ladning. En elektron har en negativ ladning, mens antipartiklen, en *positron*, har samme masse, men en positiv ladning.

Imidlertid kan en partikel (stof) og en anti-partikel (antistof) ikke eksistere i nærheden af hinanden – de *tilintetgør* hinanden ("annihilerer") og omskæbnes til ren energi, $E=mc^2$. Det er faktisk universets bedste måde at generere energi på – hvis man skulle være i besiddelse af antistof (se faktaboks). Vi kan danne antipartikler i laboratoriet på CERN, og de opfører sig – så vidt vi ved – som deres stof-søskende. Så hvad er problemet?

Problemet stammer tilbage fra universets oprindelse ved Big Bang. Hvis det stof, der findes i universet, er dannet fra energien ved Big Bang, skulle der være dannet lige så stor en mængde antistof som stof. Men hvor er antistoffet så blevet af? Så vidt vi kan måle og observere i laboratoriet, består universet kun af almindeligt stof. Fysikere mener i dag, at langt de fleste partikler og antipartikler annihilerede efter dannelsen, men at der eksisterer en lille *asymmetri* mellem stof og antistof, der tillod, at en vis mængde stof overlevede. En vis mængde, jo, vi taler bare om det univers, vi kender, og som blev tilbage efter annihilationen. Den såkaldte Standardmodel – den bedste nuværende teori, der beskriver fundamentale partikler og deres vekselvirkninger – kan imidlertid ikke forklare denne asymmetri, og man har hidtil ikke fundet eksperimentelt bevis for den. Vi er i dag således ikke i stand til at forklare, hvorfor universet består af stof i stedet for antistof. Vi kan faktisk heller ikke forklare, hvorfor universets stof og antistof ikke blot totalt tilintetgjorde hinanden – og efterlod et univers bestående udelukkende af energi. Eksisterer der virkelig en hidtil ukendt asymmetri mellem stof og antistof? I hvert fald kan Standardmodellen ikke forklare en

Figur 1
Et simpelt, elegant spørgsmål:
Adlyder brint og antibrint de samme fysiske love? For at sparke brints elektron fra grundtilstanden ($n=1$) til den første eksisterede tilstand ($n=2$), kræves der to ultraviolette fotoner (243 nm i bølglængde). Er antibrint identisk? Til 15 cifre?

“
Er det muligt, at antibrint – den "onde" tvilling til Niels Bohrs brintatom – kan kaste lys over universets begyndelse?
”



Figur 2
ALPHA-2-maskinen ved CERN.
Indvendigt findes der partikelfælder
ved 4 grader over det absolutte
nulpunkt og i ultra højt vakuum.
I ALPHA-2 kan man danne antibrint,
fange det i op til 1000 sekunder, og
belyse de fangede atomer med
laserlys – Probably the best anti-
hydrogen experiment in the world.

sådan asymmetri, og skulle en sådan findes eksperimentelt, så må Standardmodellen revideres.

Niels Bohr, brint og antibrint

Når den eksisterende teori ikke kan forklare et problem, er fysikerens tilgang ofte at undersøge problemet nærmere ved at foretage nye, mere detaljerede og mere præcise eksperimenter. Og når man taler om antistof, er det helt oplagt at kaste sig over *antibrint*. For lidt over hundrede år siden, i 1913, publicerede Niels Bohr sin berømte atom- og kvantemodell, der beskriver strukturen af brintatomet. Bohr startede en revolution i fysikken, og hans ideer førte til fødslen af den moderne atomfysik og kvantemekanik. Siden har fysikere studeret brintatomet i meget stor detalje, såvel eksperimentelt som teoretisk. Det er ikke en overdrivelse at påstå, at studier af brintatomet har ført til en særdeles indgående forståelse af atomfysik og kvantemekanik, og brintatomet er

i dag et af fysikkens allerbedst forståede systemer. Det er derfor uhyre interessant at undersøge, om *antibrint* adlyder de samme fysiske love som brintatomer, hvilket skulle være tilfældet ifølge Standardmodellen.

I dag er vi i stand til danne, fange og måle på antibrint – noget Niels Bohr kun kunne drømme om. Det er interessant, at den fysiker, der først fik ideen til eksistensen af antistof, var den engelske teoretiker Paul Dirac, da han i 1927 forsøgte at formulere en teori, der skulle kombinere Bohrs atommodel og kvantemekanik med Einsteins specielle relativitetsteori. Antistof fremkommer som en negativ energi i løsningen af den såkaldte Dirac-ligning, der i dag bruges til at beskrive brint. Dirac var således den første, der forudsagde eksistensen af antipartikler som modpart til de velkendte elementarpartikler.

Præcision ... og præcision

Brintatomet består af en positivt ladet proton (kernen) og en negativt ladet elektron. Antibrint består på tilsvarende vis af en negativt ladet kerne, en antiproton, og en positivt ladet anti-elektron, en *positron*. (Figur 1). Elektronen i brintatomet kan findes sig på forskellige energiniveauer, som ifølge Niels Bohr er *kvantiserede*. Elektronen kan hoppe imellem energiniveauer ved at absorbere eller udsende diskrete mængder (kvanta) af energi i form af lys (fotoner). Og det er netop disse fotoner, fysikere udnytter til at studere brint og andre atomer med meget høj præcision.

Vi kan illustrere, hvor godt vi forstår brint, med følgende lille eksempel: Hvis man måler længden af et skrivebord med et målebånd, kan man gøre det med en nøjagtighed på cirka 1 mm, og hvis skrivebordet har en længde på en meter, er der en usikkerhed på én ud af tusind (10^3). Når fysikere i dag måler på den energi, det kræver at tvinge brints elektron fra grundtilstanden til det næste energiniveau, kan det gøres med en usikkerhed på cirka én ud af 1.000.000.000.000.000 (10^{15}). Og det målte resultat er fuldstændig i overensstemmelse med teorien, dvs. at vi forstår brintatomet i meget stor detalje. Hvis vi kan studere *antibrint* med samme store præcision, er det oplagt, at vi kan påvise selv meget små forskelle mellem brint og antibrint, mellem stof og antistof – hvis sådan en forskel findes.

Formålet med det dansk-ledede ALPHA-eksperiment på CERN er netop at studere antibrint. Carlsbergfondet har støttet ALPHA-projektet siden 2012 og har netop tildelt forfatteren af denne artikel en *Semper Ardens*-bevilling på 15,5 mio. kr. til at fortsætte forsøgene med antibrint.

At skabe – og tabe – antibrint

Da antibrint ikke kan eksistere i nærheden af almindeligt stof, skal det skabes i laboratoriet og opbevares i kamre med ultrahøjt vakuum. På CERN dannes antiprotonerne i et anlæg ved navn 'Antiproton Decelerator' (AD), og bagefter bremses de ned til hastigheder, hvor vi kan "fange" dem og bruge dem til at danne antibrint. Anlægget kendes måske fra begyndelsen af Dan Browns roman, *Engle og Dæmoner*, og det er netop vores forskning ved AD'en på CERN, som har inspireret til denne roman. Antiprotonerne dannes i kollisioner mellem højenergetiske protoner fra en af CERN's accelerators og et 'target' af metal. De sendes derefter videre til AD'en, hvor de bliver bremsede og transporteret til ALPHA-maskinen (Figur 2). I ALPHA bliver de fanget ved hjælp af stærke elektriske og magnetiske felter og derefter afkølet til meget lave temperaturer omkring det absolutte nulpunkt, -273°C .

Positronerne kan dannes ved hjælp af en accelerators radioaktiv kilde af Na-22, der konstant udsender positroner. Disse skal også bremses og fanges i en elektromagnetisk partikelfælde, indtil de blandes med antiprotoner og danner antibrint. Herefter bliver det vanskeligt, for mens antiprotoner og positroner er forholdsvis nemme at håndtere, fordi de har en elektrisk ladning, er antibrint *neutralt*, dvs. de elektromagnetiske felter, vi bruger til antiprotoner og positroner, påvirker ikke antibrint – det flyver bare sin vej, indtil det møder noget stof på indervæggen af partikelfælden og tilintetgøres. Antibrint blev først skabt i AD'en på denne måde i 2002 i ATHENA-eksperimentet – forgængeren til ALPHA. ATHENA kunne detektere produkter fra tilintetgørelsen af både antiprotonen og positronen samtidig, så man kunne påvise, at antibrint blev skabt. Det var en stor milepæl i antistof-forskningen, som selvfølgelig blev offentliggjort i fagfællebedømte tidsskrifter¹, men også på forsiden af f.eks. *The New York Times*.



Vi er i dag ikke i stand til at forklare, hvorfor universet består af stof i stedet for antistof.



Kan vi lave brændstof til et rumskib eller sprænge Vatikanet i luften ved hjælp af antistof? Trods det, du har læst i science fiction-romaner, er svaret NEJ! Det er rigtigt, at antistof er en fantastisk energikilde – hvis man altså *har* noget antistof. Stof og antistof tilintetgør hinanden, og deres masse bliver omdannet til energi. I princippet er det det meste energi, man kan få *per kilogram*. Det er netop det, der er vigtigt for et brændstof til et rumskib, der skal slippe væk fra Jordens tyngdekraftfelt – mest energi udgivet per enhed masse. Problemet er, at vi skal *danne* antistoffet i laboratoriet, og det kræver meget mere energi, end vi får igen. Man skal også lige nævne, at i ALPHA-forsøget kan vi fange et par antibrintatomer hvert 15. minut. Så det tager omkring 10^{19} år at lave ét gram fanget antibrint; Universet er omkring 14 milliarder år gammelt – det vil sige cirka 10^{10} år. Det betyder, at vi har brug for et tidsrum som er en milliard gange universets alder bare for at lave ét gram neutralt, stabilt antistof. Det vil også kræve mere energi, end vi har her på jorden. Så det står klart, at vi i ALPHA går op i grundforskning, og ikke overvejer "science fiction"-anvendelser af vores arbejde. Vatikanet har ikke noget at frygte!

Hold nu fast på dit antistof

For at studere antibrint skal vi have tid til at vekselvirke med det. Vi ønsker derfor at fange det i en fælde for at kunne belyse det med fotoner fra en laser, påvirke det med mikrobølger, eller foretage andre eksperimenter med det. Den gode nyhed er, at selv om antibrint er elektrisk neutralt, er det en lille smule *magnetisk*, hvilket betyder, at vi forhåbentlig kan fastholde det ved hjælp af stærke magnetfelter. Problemet er, at denne magnetiske vekselvirkning er *meget* svag, og beregninger viser, at for at fange antibrint, skal det *dannes* ved et temperatur på højst 0,5 grader over det absolutte nulpunkt.

At fange netop antibrint var motivationen bag ALPHA-eksperimentet og det konsortium, jeg dannede i 2005. ALPHA-konsortiet består af omkring 40 fysikere fra 16 institutioner fra syv forskellige lande. Det er teknisk meget vanskeligt at danne kolde antibrintatomer, men det lykkedes ALPHA-gruppen som den første at fange dem i 2010. Dette gennembrud, offentliggjort i *Nature*², blev kåret som 'Physics Breakthrough of the Year' af fagbladet *Physics World* i Storbritannien. Senere har ALPHA-konsortiet demonstreret, at vi kan fastholde antibrintatomer i vores eksperimentelle set-up i op til 1000

sekunder – mere end rigelig tid til at foretage meget detaljerede målinger på dem. Vi har gennemført de første målinger på antibrints energiniveauer og har studeret, hvordan man kan måle på *tyngdekraftens* påvirkning på antistof – mere om det om lidt.

At belyse antistof

For at beskyde antibrint med lasere var det nødvendigt at bygge et egnet andengenerations-apparat, hvilket lykkedes i 2012. Maskinen, som kaldes ALPHA-2, er finansieret med støtte fra Carlsbergfondet, som har betalt for den store superledende magnet (Figur 2), der bruges til at samle antibrint fra positroner og antiprotoner. Med ALPHA-2 er vi nu klar til at undersøge, om antibrint kræver de samme energier som brint for at drive sin positron fra grundtilstanden til det næste energiniveau. Vi håber på at få de første resultater i 2016 og vil så fortsætte med at måle med bedre og bedre præcision i de kommende år. Målet er at opnå den samme 15-cifrede præcision, som er opnået for brint. Netop denne helt afgørende måling er hovedgrunden til, at CERN byggede AD'en tilbage i slutningen af halvfemserne. Med ALPHA-2-eksperimentet håber vi at være de første til at gennemføre denne sammenligning mellem brint og antibrint, og vi tror, at Niels Bohr ville have glædet sig over, at dette nu bliver muligt, og at han ville have været lige så utålmodig som os efter at kende resultatet: Findes der en hidtil ukendt asymmetri mellem stof og antistof?

Med ALPHA-2 har vi allerede vist, at antibrint faktisk er *neutralt* – i hvert fald har det en ladning, der er mindre end 1 milliardtedel af elektronens ladning. Det virker måske åbenlyst, men med antistof kan man ikke tage noget som helst for givet. Almindeligt stof er kendt for at være neutralt til én ud af 10^{21} – så vi har endnu ikke samme præcision med antistof. Dette resultat har vi for nylig offentliggjort i *Nature*³.

Op eller ned ad? Et tungt spørgsmål

Vi ved faktisk ingenting om antistofs opførsel under påvirkning af tyngdekraften. De fleste teoretikere mener, at det skal opføre sig på samme måde som stof – det vil sige, at antibrint bliver tiltrukket mod jorden med den samme styrke som brint. Men vi har,



Findes der en hidtil ukendt asymmetri mellem stof og antistof?



indtil videre, ingen direkte måling af dette. I ALPHA-konsortiet er vi i gang med at opbygge en ny maskine – ALPHA-g – der forhåbentlig kan besvare dette spørgsmål. Ideen er simpel nok: Fang lidt antibrint, og giv så slip for at se, hvad der sker. For at gøre det, skal vi bygge en lodret – og cirka dobbelt så lang – version af ALPHA-2. Carlsbergfondet støtter ALPHA-g med en *Semper Ardens*-bevilling på 15,5 mio. kr. til køb af apparatur og til støtte af unge talentfulde danske forskere, som vil deltage i forskningen ved ALPHA-eksperimenterne på CERN. Vi regner således med, at ALPHA-g kommer op at køre i 2017.

Falder antibrint opad eller nedad? Teoretikerne siger nedad; opad vil være en sensation og kunne bringe en Nobelpris inden for rækkevidde. Stay tuned ...

I Bohrs skygge

I løbet af de næste par år håber vi således på at kunne besvare nogle af de fundamentale spørgsmål, der er knyttet til antibrint. Det er grundforskning ud i det helt ukendte – måske er antibrint fuldstændig

identisk med brint, som den nuværende teori forudsiger. Omvendt, hvis vi finder en forskel mellem brint og antibrint, vil det måske kunne medvirke til at forklare universets udvikling. Det er ikke nemt at forudsige, men nogle få teoretikere mener, at *frastødende* tyngdekraft mellem stof og antistof kunne forklare mange af de uløste gåder.

Under alle omstændigheder taler vi her om basal grundforskning: Det er nysgerrighed om universets struktur og udvikling, der driver os og vore forsøg – akkurat som i Niels Bohrs tid. Vi kan ikke sammenligne vores arbejde med Niels Bohrs revolution, men vi er stolte af, med Carlsbergfondets støtte, at kunne være med til at løfte hans fornemme arv.

Noter

1 *Production and detection of cold antihydrogen atoms*, M. Amoretti, et al. (ATHENA Collaboration) *Nature* 419, 456 (2002). **2** *Trapped antihydrogen*, G.B. Andresen, et al. (ALPHA Collaboration), *Nature* 468, 673 (2010). **3** *An improved limit on the charge of antihydrogen by stochastic acceleration*, M. Ahmadi et al., (ALPHA Collaboration) *Nature* 529, 373 (2016).

Figur 3
En superledende magnet, finansieret af Carlsbergfondet, ankommer på ALPHA-laboratoriet ved CERN. Magneten bruges til at danne antibrint-atomer i ALPHA-2-maskinen. Foto: Maximillien Brice, CERN

