

Greb om Antibrint

- virkelighedens engle og dæmoner

I efteråret 2002 lykkedes det for første gang forskere at fremstille koldt antistof i form af antibrint-atomer. Nu vil forskerne så forsøge at fange disse antiatomer. Men hvordan fanger man noget, der tilintetgøres så snart det kommer i kontakt med almindeligt stof?

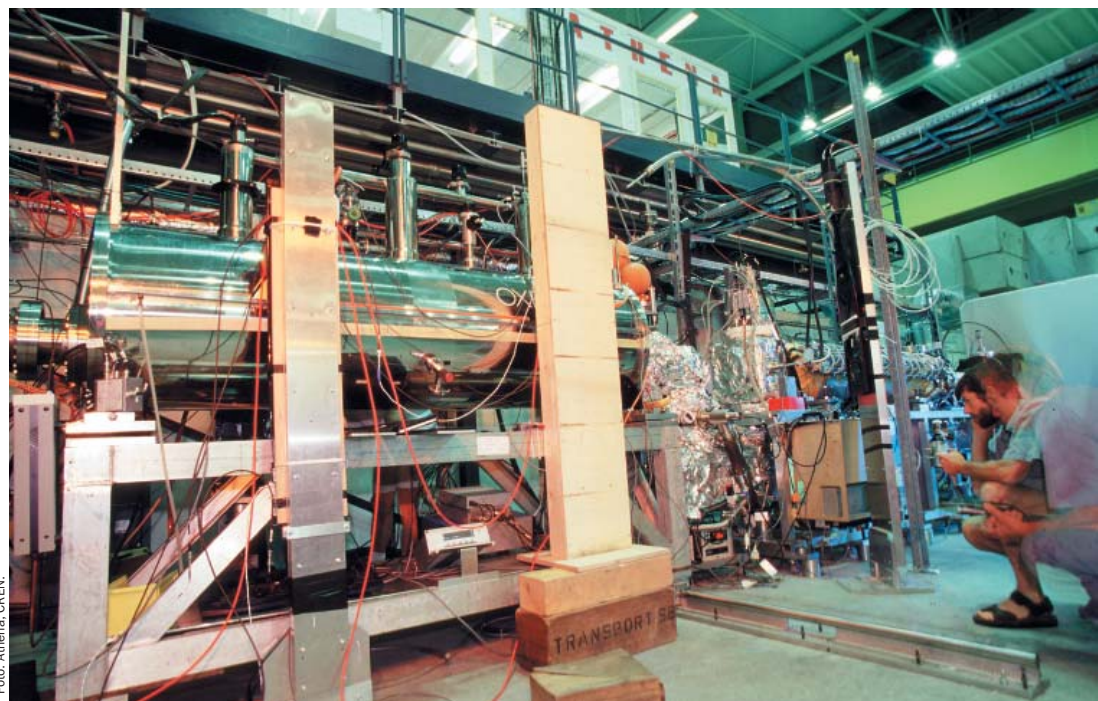
Af Niels Madsen

■ I Dan Browns bestseller *Engle og Dæmoner* stjæler en tyv cirka 1 gram antistof og placerer det under Vatikanet i Rom. Med dette ene gram antistof truer tyven med at forvandle Vatikanet til et hul i jorden. Hvad der kommer ud af løjerne skal ikke afsløres her, men det er næppe en tilfældighed, at antistof nu for alvor har holdt sit indtog i populærlitteraturen. Interessen for antistof er nemlig steget voldsomt de seneste år.

Antistof i form af antibrint blev første gang dannet i store mængder i efteråret 2002. Denne begivenhed fyldte dagspressen med billeder fra *Star Trek*, og drømme om rejser til fjerne stjerner. Netop nu er forskere i et nyt internationalt samarbejde kaldet ALPHA ved at stille op til et nyt forsøg, der skal indfange antibrint. En ikke trivial affære – antistof tilintetgøres ved kontakt med almindeligt stof!

En kompliceret affære

Det er kompliceret at lave antibrint. Et antibrintatom består af en antiproton og en antielek-



ATHENA er navnet på det internationale samarbejde, der i 2002 frembragte det første kolde antibrint.

tron (positron). Disse partikler findes ikke naturligt i vores omgivelser og skal derfor dannes i laboratoriet. Positroner udsendes ved visse radioaktive

henfald, hvorefter man kan "opsamle" dem. For at danne antiprotoner er der derimod brug for masser af energi. Det fælleseuropæiske center for ker-

neforskning CERN er et af de få steder i verdenen, hvor der i dag kan laves antiprotoner. De energirige antiprotoner og positroner skal bremses ned til

energier, der er lave nok til at de kan binde sig til hinanden og dermed danne antibrint. For antiprotonens vedkommende betyder det en reduktion i energien på 12 størrelsesordner eller tusind milliarder gange.

Dette lyder og er kompliceret, og så er det i øvrigt også ret ineffektivt. At producere et gram antistof (svarende til 6×10^{23} atomer) som i Dan Browns bog ville med vores nuværende kunnen tage cirka 300 milliarder år. Det er sådan ca. 20 gange universets alder! Når det nu er så kompliceret, hvorfor så overhovedet bruge tiden på det?

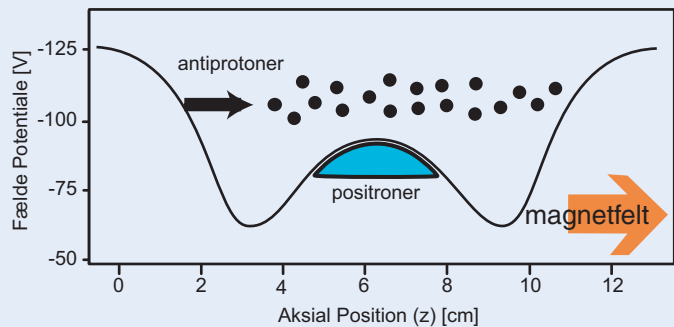
Hvorfor lave antibrint?

Alt tyder på at universet blev dannet i "det store knald" (the big bang). Populært sagt startede universet som ren energi, og efterhånden som det udvidede sig og kølede ned, blev noget af denne energi omdannet til stof. Husk på Einsteins berømte ligning $E=mc^2$, der beskriver sammenhængen mellem masse m og energi E . c er lysets hastighed i vakuum. Ligningen beskriver således, at hvis man ønsker at danne noget stof, skal der spenderes en masse energi. F.eks. repræsenterer 1 gram stof cirka 10 kiloton TNT, eller hvad der svarer til en lille atombombe som den, der blev kastet over Hiroshima under den anden verdenskrig.

Nu er det dog ikke helt så lige til. For at lave en partikel skal man faktisk mindst bruge energi svarende til to partikler – og det har ikke noget med skattevæsenet at gøre. Når energi omdannes til stof sker det nemlig altid som en pardannelse, hvor der dannes lige dele stof og antistof. Ergo bør halvdelen af universet være lavet af antistof. Universet har dog spillet os et puds. Vi kan ikke se nogen tegn på, at halvdelen består af antistof. Faktisk er der ikke tegn på så meget som en eneste planet lavet af antistof i universet. Hvis vores beskrivelse er korrekt, mangler halvdelen af universet altså! Tydeligvis halter vores beskrivelse et sted. Men hvor?

Sådan danner man antibrint

Antibrint dannes ved at bringe positroner i kontakt med antiprotoner i en dobbeltfælde, der kan holde de modsat ladede partikler i samme område. Et stærkt magnetfelt holder partiklerne på plads på akse. Den fuldt optrukne linie viser det elektriske potentiale, der holder positroner og antiprotoner fanget. Pilen angiver den energi som antiprotonerne introduceres ved. Hele eksperimentet er holdt i ekstremt vakuum, og kølet ned til kun 15 grader over det absolutte nulpunkt (15° K). Positronerne, der er ganske lette, vil i det stærke magnetfelt udsende stråling, og tabe energi, indtil de opnår



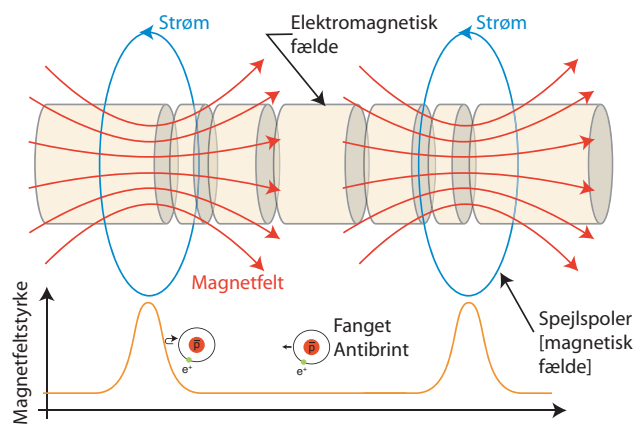
en ligevægt med de kolde omgivelser. Antiprotonerne derimod er knap så kolde. Antiprotonerne køles ved kontakt med positronerne.

Når den relative hastighed mellem antiprotoner og

positroner er lav nok, vil de kunne binde sig til hinanden og danne antibrint. Antibrint er neutralt, og derfor ikke fanget, og vil drive væk fra åstedet, indtil det annihilerer ved kontakt med almindeligt stof.

Indfangning af antibrint

Man kan fange (anti)brint i et magnetfelt minimum. Et sådant minimum kan skabes langs en akse ved at have to såkaldte spejlspoler i en passende afstand fra hinanden rundt om akse. For at stoppe (anti)atomerne fra at undslippe vinkelret fra akse, benytter man et såkaldt multipolfelt, hvor man omgiver akse med nordpoler og sydpoler skiftevis efter hinanden. I midten, dvs. på akse, vil deres felter summe sammen til nul, og feltet vil vokse jo længere fra akse man kommer (dvs. jo nærmere man er på en af polerne). Dybden af fælden er givet ved feltforskellen mellem midten og kanten. Med en superledende



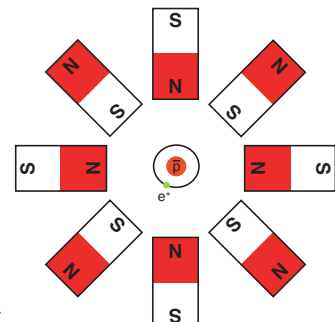
magnet, hvor strømmene når op på 1000 Ampere, kan man opnå et felt på op til cirka 2 Tesla ved kanten. En sådan

fælde vil kun kunne fange (anti)atomer, der er koldere end ca. 1° K, så den er ikke særligt dyb.



De elektriske ledere, der skal til for at frembringe et oktopol magnetfelt. Inden i denne supraledeende magnet vil antibrint kunne fanges.

Illustration af et oktopolmagnetfelt dannet med små stangmagneter.



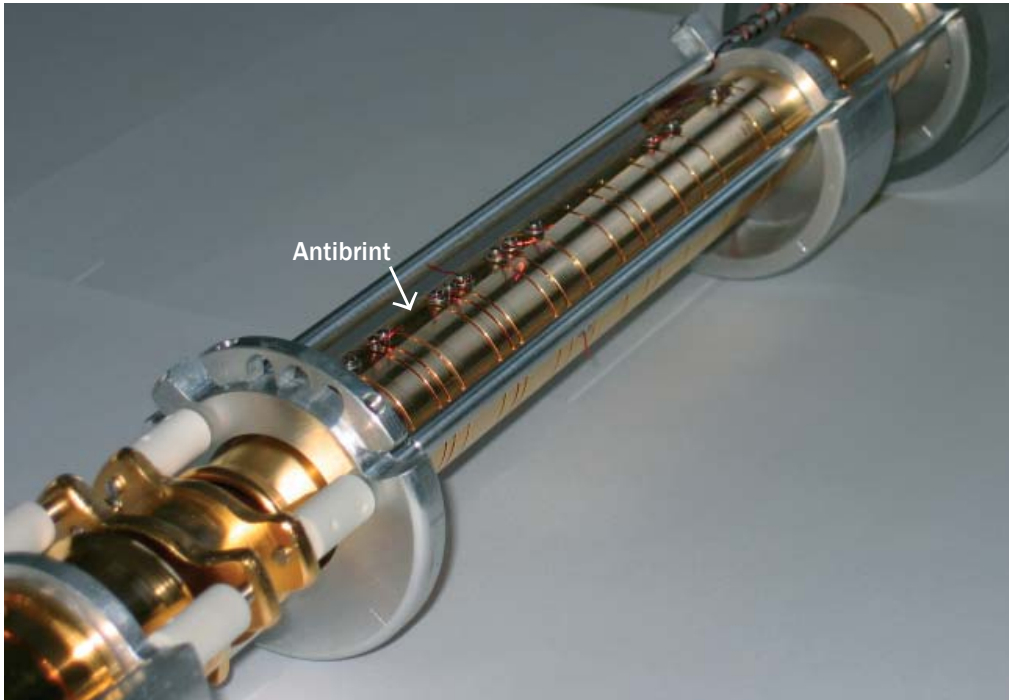
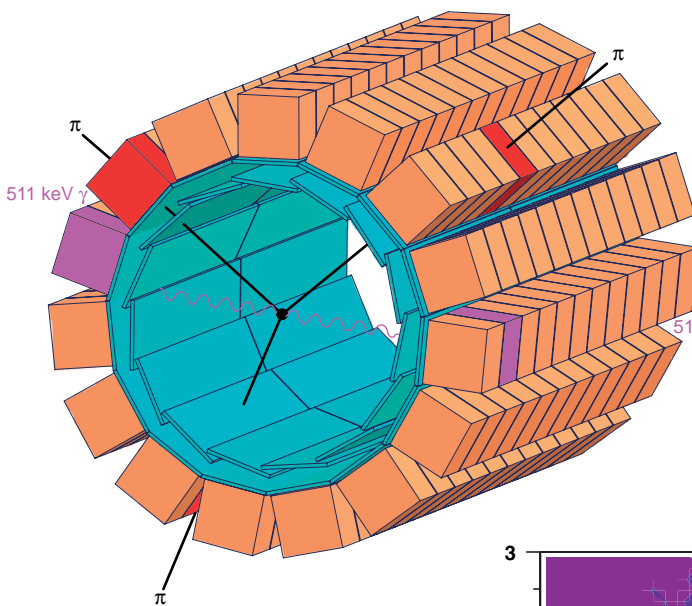


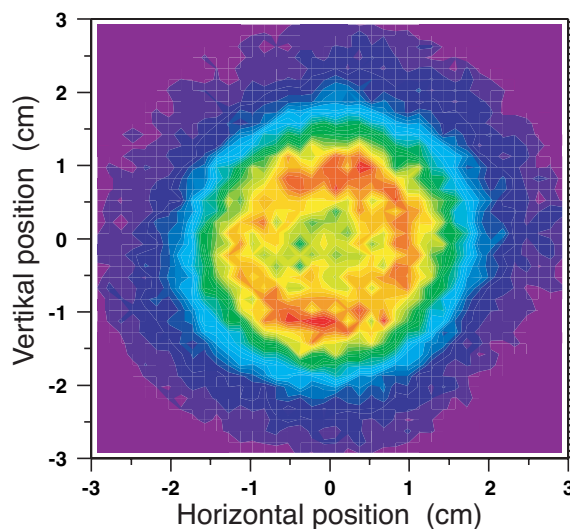
Foto: Athena, CREN.

Figur 1. Elektroderne der blev brugt til at danne det elektriske potentiale til at bringe antiprotoner og positroner i kontakt. De enkelte elektroder er cylinderiske og elektrisk isoleret fra hinanden. Vi ser elektroderne fra siden med skruer til at fastgøre de elektriske forbindelser. Elektroderne er guldbelagte. Pilen angiver inden i hvilken elektrode antibrinten blev dannet.



Figur 2. Observation af antibrint. Tegning af den cylinderformede detektor der omgiver den elektromagnetiske fælde. De blå "plader" er positionfølsomme detektorer til ladede pioner. De orange terninger, der er på størrelse med sukkerknalder, er foton detektorer. Linierne angiver rekonstruerede partikelbaner for restprodukterne. De sorte (lilla) linier markerer pion (511 keV gammafoton) baner. Pioner (fotoner) er "restprodukt" af en antiproton (positron) tilintetgørelse (annihilation).

Figur 3. Afbildning af en masse antiproton-annihilationer under dannelse af antibrint. Farverne angiver hvor mange der er annihileret på en bestemt position. Rødt angiver der hvor der er flest annihilationer. Vi ser rekonstruktionen fra enden af fælden og den tydeligt synlige rød/gule ring markerer der hvor de fleste annihilationer har fundet sted. Ringen svarer til at antibrinten annihilerer på de cylinderformede elektroder



Her er det, at dannelsen af antibrint kommer på banen. Der er flere steder i vores forståelse, der kan være huller. Et af dem er i hvor høj grad antistof og stof virkeligt er hinandens spejlbillede (tvillinger). Hvis der var en lille forskel, kunne denne, universets høje alder taget i betragtning, have udviklet sig til det meget asymmetriske univers, vi har i dag.

I forhold til blot at måle på antiprotoner og antielektroner er antibrint neutralt, og det påvirkes derfor i væsentlig mindre grad af omgivelserne – specielt af elektriske felter. Antibrint åbner derfor muligheden for at undersøge for forskelle mellem stof og antistof med hidtil uhørt præcision. At det er relativt upåvirket af omgivelserne åbner potentielt også for at undersøge, om det falder i et tyngdefelt, og i så fald med hvilken acceleration. For at give en fornemmelse af, hvilken præcision vi taler om, så er den mest præcist målte overgang i brint (stof) blevet målt med 14 decimalers nøjagtighed. Til sammenligning er præcisionen af en typisk stemmegaffel 4 decimaler!

Måling af antibrint

Koldt antibrint kan i princippet dannes på flere måder. Til dato er kun to af måderne blevet eftervist, mens fire er blevet forsøgt.

Den hidtil mest effektive metode går ud på at bringe antiprotoner og positroner i kontakt med hinanden i en elektromagnetisk fælde. Det første kolde antibrint blev dannet på denne måde.

Hele eksperimentet er holdt i ekstremt vakuum – mindre end et atom per kubikmillimeter – idet antipartikler tilintetgøres (annihilerer) ved kontakt med almindeligt stof. Fælden er endvidere kølet ned til 15 grader over det absolutte nulpunkt (15° K).

Vores vakuum er så godt, at det tillader antiprotonerne og positronerne, der holdes fanget, at drive rundt i op til flere dage uden at komme i kontakt med stof. Antibrint er derimod ikke

fanget og vil drive af sted indtil det rammer elektroderne, der udgør væggen i vores fælde. Det tager typisk nogle mikrosekunder – ikke lang tid for noget, der var så svært at lave.

Vi kan faktisk kun måle antibrint, når det bliver tilintetgjort. Når antibrint tilintetgøres ved kontakt med stof, bliver energien fra tilintetgørelsen frigivet. Positronen annihilere på en elektron, og derved frigøres to lyskvant (fotoner), som har en energi svarende til massen af positronen og elektronen (511 keV) Disse fotoner kan vi måle. Antiprotonen derimod kommer enten i kontakt med en enkelt proton eller en atomkerne. Den kan annihilere på forskellig vis, men typisk kommer der en to-tre partikler kaldet pioner ud af processen. Pioner er partikler, der består af en kvark og en antikvark. Disse pioner kan vi også måle. Hvis vi kan måle, at en antiproton og en positron annihilere på samme sted til samme tid, har vi identificeret antibrint.

At lave og observere antibrint er således forholdsvis enkelt. Antiprotoner og positroner blandes i en fælde, mens vi kigger på hvad der sker med vores detektor, der omgiver fælden.

At fange antibrint

I Dan Browns bog har forskerne ikke blot produceret, men også fanget antibrint. Dette er endnu ikke lykkedes i virkelighedens verden, men vi er netop nu ved at opstille et forsøg med netop dette formål. Hvis vi ønsker at lave præcise sammenligninger med brint, eller måske endda undersøge tyngdekraftens indvirkning på antistof, er det ikke nok at producere antibrint – det er også nødvendigt at indfange disse antiatomer.

Da antistof er neutralt er en ren magnetisk fælde nødvendig. Magnetiske fælder har dog den ulempe, at de er ikke er særligt stærke. Typisk vil de kun fange atomer med temperaturer under 1° K, så hvis vi ønsker at fange antibrint, er det nødvendigt at fremstille det ved tilsvarende temperaturer.

ATHENA og ALPHA

ATHENA er navnet på det internationale samarbejde, der i 2002 frembragte det første kolde antibrint. Som Stenostipendiat ved Aarhus Universitet spillede artiklens forfatter en central rolle i ATHENA. ALPHA er et nyt internationalt samarbejde under ledelse af Jeffrey S. Hangst fra Aarhus Universitet.

I ALPHA er halvdelen af ATHENAs forskningsgrupper gået sammen med nye folk om at fortsætte eksperimenter med antibrint på CERN. ALPHA har deltagere fra Brasilien, Canada, Danmark, Israel, Japan, Storbritannien og USA. ALPHAs første mål er indfangning af de kolde antibrintatomer. Artiklens forfatter er medstifter af ALPHA.

I en magnetisk fælde fanger man atomerne ved at "gribe" fat i deres magnetiske moment. Det magnetiske moment kan sammenlignes med, at atomet er en lille stangmagnet. Man kan fange atomerne der, hvor det magnetiske felt har sit minimum – og et sådant feltminimum kan laves med en såkaldt multipol-magnet. Til at fange almindelige atomer bruger man normalt en magnet med fire poler en kvadrupol magnet. Men for at kunne indfange positroner og antiprotoner har det vist sig nødvendigt at tilføje yderligere fire magneter, så vi ender med en oktopol.

Lunken antibrint

For at fange antibrint skal det som nævnt være rigtig koldt. Vi har imidlertid observeret, at antibrinten, vi danner, er "lunken" – dvs. flere hundrede grader over det absolutte nulpunkt. Når man danner antibrint sker dette ved, at antiprotonerne køles af positronerne indtil deres relative hastighed er lav nok til, at der kan dannes antibrint (se boks). Indtil år 2002 regnede man med, at antiprotonerne måtte være kølet helt ned til samme temperatur som positronerne før der kan dannes antibrint. Men det har vist sig, at de tunge antiprotoner bevæger sig meget langsomt i forhold til positronerne, selv når de er "lunkne". Og det medfører altså, at der dannes lunken antibrint.

Til gengæld troede man også,

at antibrint var uhyre svært at frembringe – men i dag kan vi danne flere tusinder antibrintatomer på et par minutter.

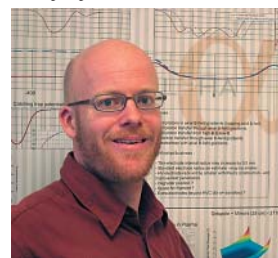
Antibrint er altså "nemt" at lave, men det er alt for varmt til at kunne fanges! Løsningen er naturligvis at sørge for, at antiprotonerne er kolde, når antibrinten dannes. Dette kan måske opnås ved at lave en mindre voldsom blanding af de to typer partikler end hidtil. Vi arbejder for tiden på højtryk på at modellere dannelsen og finde metoder til at danne antibrinten kold nok til, at den kan fanges.

Guleroden

I 2005 har CERNs maskiner inklusiv Antiproton Deceleratoren, der forsyner os med antiprotoner, holdt ferie. I sommeren 2006 starter kapløbet mod næste milepæl igen. Det er håbet, at vi senest i 2007 har fanget antibrint i en magnetisk fælde, og at vi derefter kan gøre klar til at sammenligne det med brint. Sammenligningen med brint bliver på ingen måde en mindre udfordring.

De ultrapræcise målinger på brint, der blev omtalt i starten, krævede cirka tusind milliarder (10^{12}) brintatomer. Til sammenligning kan vi lave op til 500 antibrintatomer i minuttet. Det bliver således ikke nogen dans på roser at lave den samme måling, men guleroden er det værd: Hvis vi finder en forskel sender vi kvantemekanikken tilbage til tegnebordet! ■

Om forfatteren



Niels Madsen er ph.d., Lektor ved University of Wales Swansea
E-mail: Niels.Madsen@cern.ch

Yderligere læsning:

- [1] Mere om antistof: <http://massen.home.cern.ch/massen/snf/antistof.html>
- [2] CERNs sider om antistof (på engelsk) : <http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/anti-matter/>
- [3] M. Amoretti, et al., ATHENA collaboration, Production and detection of cold antihydrogen atoms, *Nature* 419, 456 (2002)
- [4] H. Knudsen og U. Uggerhøj, Antipartikler, *Aktuel Naturvidenskab* 6, 11 (2001)
- [5] M. Charlton, Antihydrogen on tap, *Physics Education* 40, 229 (2005)
- [6] M. Charlton and J.S. Hangst, Probing the antiworld, *Physics World*, October (2005)
- [7] ALPHA Samarbejdet : <http://alpha.web.cern.ch/alpha/>