
5

AT KASTE LYS OVER ANTISTOF

ALPHA-FORSØGET VED CERN

Af

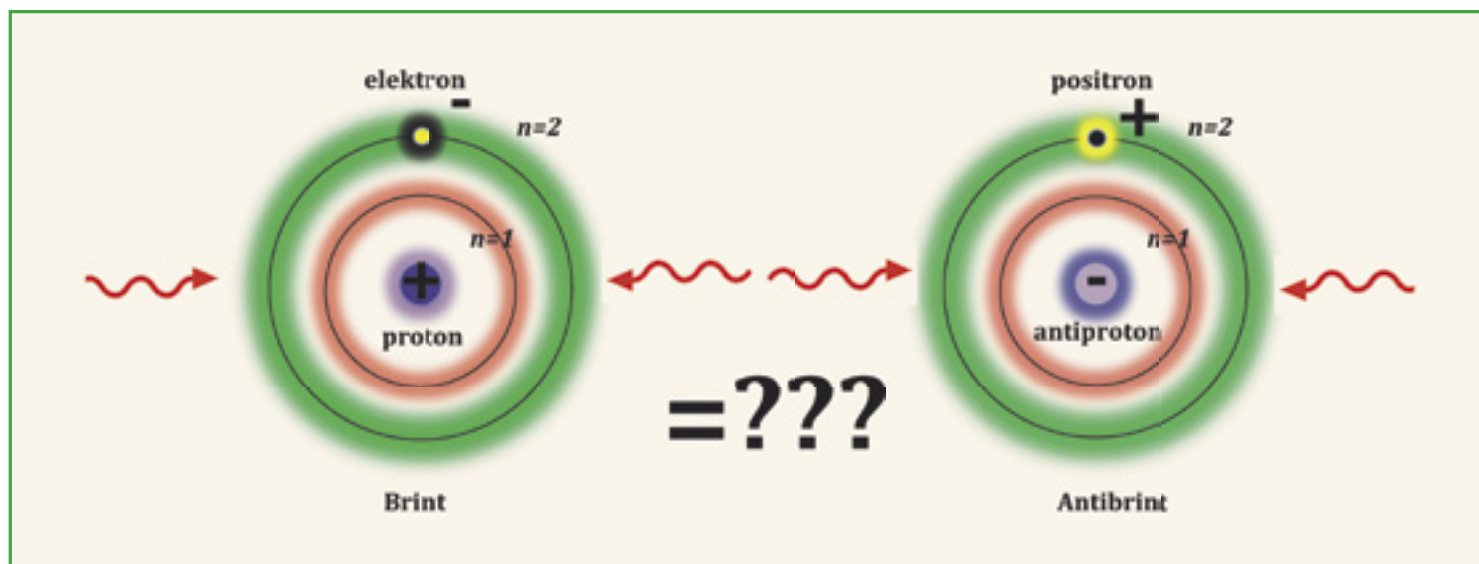
JEFFREY HANGST

PROFESSOR, PH.D.

INSTITUT FOR FYSIK OG
ASTRONOMI, AARHUS
UNIVERSITET

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

Jeffrey Hangst publicerede for nylig artiklen "Observation of the 1S-2S transition in trapped antihydrogen" i det højt ansete tidsskrift Nature. I denne artikel fortæller han om sin forskning og de eksperimenter med antistof, som han med støtte fra Carlsbergfondet gennemfører ved CERN i Geneve i Schweiz.



Start med et univers. Nu laver vi lidt om på det. Først bytter vi alt stof ud med antistof. Derefter skal vi spejlvende alle retninger: Højre bliver til venstre, opad bliver nedad, og fremad bliver tilbage. Til sidst tvinger vi tiden til at køre baglæns. Hvad sker der så med vores univers? Ingenting. Ifølge den nuværende 'Standardmodel', der beskriver fysikkens lov om partikler og kræfter, er vores nye univers identisk med det, vi startede med.

Science fiction? Det lyder underligt, men man kan faktisk få løn for at tænke over den slags ting ... Vi snakker her om *symmetrier*, som er af afgørende betydning i moderne fysik. Vores opskrift på det nye univers kan beskrives ved tre symmetrioperationer: C (for *charge*: da partikler af stof og antistof har modsat ladning), P (for *parity* - at bytte om på retninger) og T (for *time* - at lade tiden køre baglæns). Fysikere siger, at fysikken i universet - så vidt vi ved - er uændret, hvis vi laver en CPT-transformation på det. Vi kan selvfølgelig ikke lave om på universet som beskrevet, men vi kan faktisk lave eksperimenter, der undersøger, om naturlovene indeholder de beskrevne symmetrier.

Tag Niels Bohr og brintatomet. Hvis fysikken virkelig er uændret af CPT-transformationer, skal brintatomet og *antibrinatomet* opføre sig ens. Antibrint er en antistof-tvilling til brintatomet (Figur 1). Stof og antistof ville ikke eksistere i nærheden af hinanden - de ville tilintetgøre hinanden og omformes til ren energi. Men vi kan producere antibrint i laboratoriet ved CERN i Geneve og opbevare det i vakuum ved hjælp af en magnetisk fælde. ALPHA-konsortiet, som er støttet af Carlsbergfondet, er verdens førende gruppe inden for antibrint-forskning.

Vores formål er at sammenligne antibrint med brint med høj præcision for at undersøge, om naturlovene faktisk er symmetriske for stof og antistof - som teorien i Standardmodellen forudsiger. Hvordan kan man gøre det, og hvorfor er det vigtigt?

På jagt efter den lille forskel

Vi starter med det andet spørgsmål. Fysikere er uhyre nysgerrige på antistof, fordi vi ikke ved, hvordan universet har overlevet Big Bang. Ifølge Standardmodellen, burde den voldsomme eksplosion, der startede universet, have dannet lige store mængder stof og antistof; det er det, der sker, når vi bruger energi til at danne partikler i laboratoriet. Men når stof og antistof ikke kan eksistere i samme tid og rum, burde universet have tilintetgjort sig selv umiddelbart efter sin dannelse - og kun efterladt energi: intet stof, der kan danne stjerner, planeter og pilsnere. Ubekvemt. I dag leder forskerne efter noget, vi må have overset - en lille forskel mellem stof og antistof, der kunne forklare, hvorfor universet foretrækker stof over antistof. Her er der tale om 'new physics', eller 'physics beyond the Standard Model' - noget helt banebrydende nyt. I fysikersprog leder vi efter et *symmetribrud*.

Men hvor skal vi lede? Det er der desværre ingen teori, der fortæller os. Vi kigger bredt omkring - blandt andet på højenergetiske eksperimenter ved Large Hadron Collider (LHC) på CERN, i rummet ved AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) på den Internationale Space Station og på lavenergi-antiprotoner og antibrinatomet ved Antiproton Decelerator (måske kendt som maskinen, der inspirerede Dan Browns *Engle og Dæmoner*) på CERN. I ALPHA arbejder vi udelukkende med antibrint. Antibrint er

Figur 1
Antibrint er en antistof-tvilling til brintatomet. Stof og antistof kan ikke eksistere i nærheden af hinanden - de ville tilintetgøre hinanden og omformes til ren energi. Men vi kan producere antibrint i laboratoriet på CERN i Geneve og opbevare det i vakuum ved hjælp af en magnetisk fælde.

Figur 2
ALPHA-2 blev bygget
i 2012-2013 ved hjælp af en
bevilling fra Carlsbergfondet.

det eneste anti-atom, vi kan skabe i laboratoriet, men det er helt ok. Takket være Niels Bohr og hans efterfølgere er brintatomet nok det allerbedst forståede system i fysikken.

Lad os huske, hvad Bohr gjorde tilbage i 1913. Bohrs atommodel¹ påstod, at negativt ladede elektroner i et atom befandt sig i planetagtige cirkelbaner omkring den positivt ladede kerne, og – her kommer revolutionen – at disse baner havde diskrete, eller *kvantiserede* energiniveauer. Elektronerne kunne ikke befinde sig i hvilken som helst afstand fra kernen. Det er kun nogle bestemte energier, der er tilladte, og elektronen må hoppe op og ned mellem niveauerne ved at absorbere eller udgive bestemte *kvanter* af lys – fotoner med unikke energier. Bohrs model blev modificeret sidenhen, men ideen var god nok – atomare energiniveauer er kvantiserede!

Vi forstår alt om brint

I dag bruger vi variabelen n til at identificere Bohrs energiniveauer: $n=1$ (den laveste mulige energi eller *grundtilstanden*), $n=2$ (den første eksisterede tilstand), osv. Dermed har vi defineret nomenklaturen bag ALPHA-forsøgets seneste gennembrud: Vi har observeret overgangen fra $n=1$ til $n=2$ i *antibrint-atomer*². Det er ingen overdrivelse at sige, at netop denne milepæl har været den hellige gral inden for antistofforskning i omkring 30 år. Men hvorfor?

I den moderne fysik mener vi, at vi forstår *alt* om brint med meget høj præcision. Vi har studeret brints *spektrum* – farverne og intensiteter af lys afgivet af brintatomer, når elektronerne hopper imellem kvanteniveauerne – i mere end 200 år. Hvis vi taler om overgangen $n=1$ til $n=2$, kan lysets frekvens (eller farve, om man vil) måles med en præcision på nogle få dele³ ud af 10^{15} (1.000.000.000.000.000), så hvis vi kan måle antibrints energiniveauer med samme præcision, er vi *meget* følsomme over for små forskelle mellem stof og antistof. En af verdens førende eksperter i brintspektroskopi er Professor Ted Hänsch fra *Max Planck Institute for Quantum Optics* i Garching, Tyskland.

Men for at kunne undersøge antibrint skal man først skabe det af antiprotoner og positroner (anti-elektroner), fange det i en magnetisk fælde dannet af superledende magneter, opbevare det i lang nok tid til at belyse det med laserlys og så observere konsekvensen af vekselvirkningen med lyset. Mange tekniske og videnskabelige skridt er nødvendige for at kunne gøre disse ting, og det har da også taget mere end 20 år at opnå dem. Lad os se på det seneste resultat, og hvad det betyder.

Brint – nemt at have med at gøre

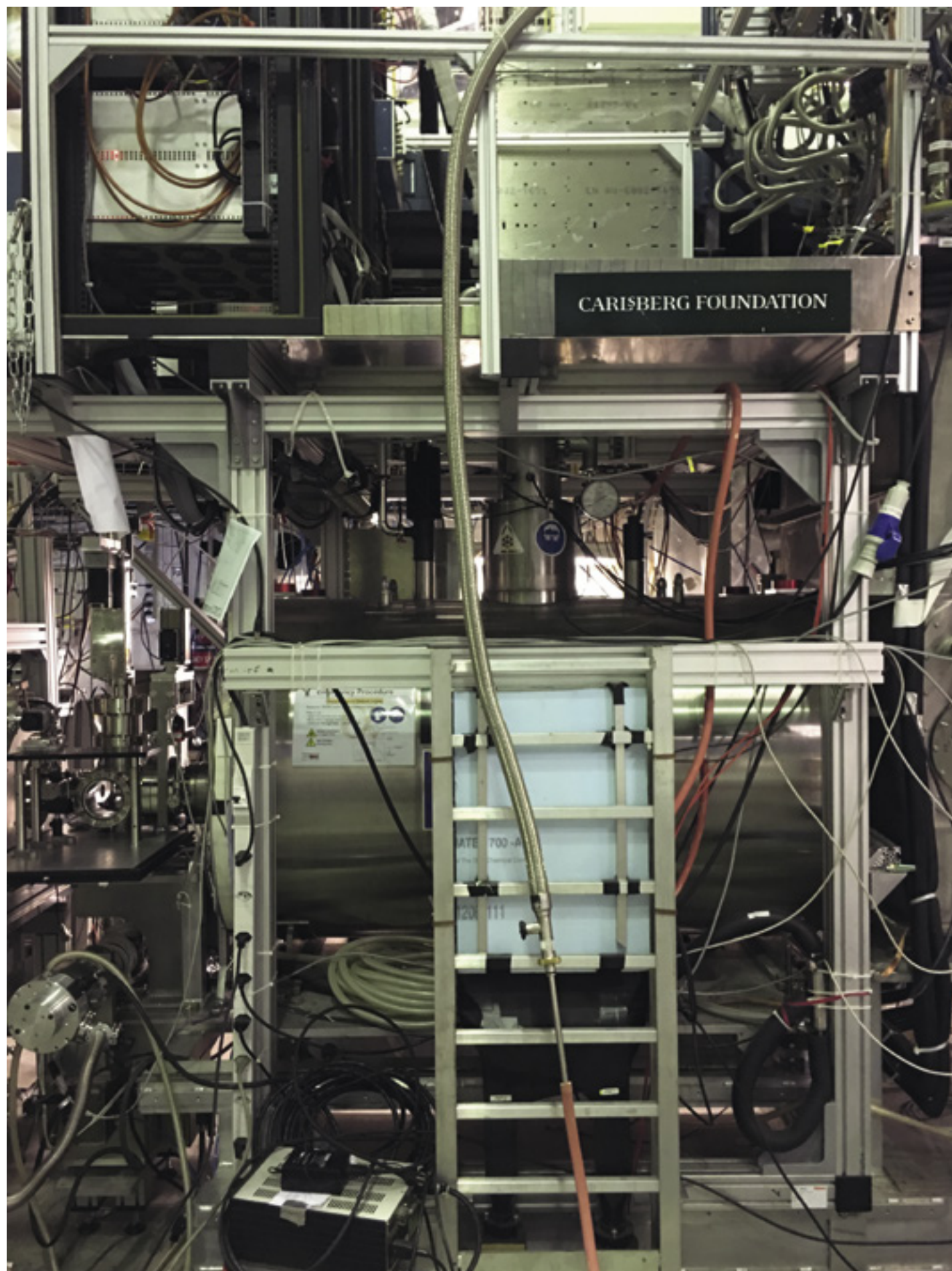
Hvis man skal lave spektroskopi på brint, kan man bare købe sig noget brint. Det er muligt at fange brintatomer i en magnetisk fælde⁴ eller bruge en kold stråle af brintatomer. Det lys, man behøver for at drive overgangen $n=1$ til $n=2$, er ultraviolet lys med en bølglængde på 243 nm. Det kræver to fotoner ved 243 nm at tvinge elektronen fra niveau $n=1$ til niveau $n=2$. I dag kan man købe en laser til dette formål fra *Toptica* – et tysk firma, som er et spin-off af Hänschs laboratorium i München. I et fældeeksperiment med brint kan man fange cirka 10^{12} (1.000.000.000.000) atomer, bruge 243 nm lys til at sparke elektronen op til niveau $n=2$, og så observere lyset, der bliver afgivet, når elektronerne falder tilbage til grundtilstanden. Laserens frekvens kan måles meget nøjagtigt ved hjælp af mere Hänsch-udstyr – den såkaldte 'frequency comb'. Man må lige nævne her, at Hänsch vandt Nobelprisen i 2005 for udviklingen af denne. En 'frequency comb' køber man fra *Menlo Systems* – endnu et tysk firma baseret på Hänschs arbejde.

Fra en antistoffysikers synspunkt er brint 'nemt' at have med at gøre. ALPHA er den eneste gruppe i verden, der kan lave og fange antibrintatomer for at måle på dem. Hvor mange kan man fange? Efter seks års erfaring med at fange antibrint er svaret: 15. Det tager cirka 10 minutter at fange antiprotoner (cirka 100.000) og positroner (cirka 2.000.000), afkøle dem og blande dem sammen for at lave antibrint. Det giver cirka 25.000 antibrintatomer, men kun 15 af disse er kolde nok (mindre



Fysikere er uhyre nysgerrige på antistoffer, fordi vi ikke ved, hvordan universet har overlevet Big Bang. Ifølge Standardmodellen burde den voldsomme eksplosion, der startede universet, have dannet lige store mængder stof og antistof; det er det, der sker, når vi bruger energi til at danne partikler i laboratoriet. Men når stof og antistof ikke kan eksistere i samme tid og rum, burde universet have tilintetgjort sig selv umiddelbart efter sin dannelselse – og kun efterladt energi: intet stof, der kan danne stjerner, planeter og pilsner.





end 0.5 K over det absolutte nulpunkt) til at blive fanget. Derefter kan de fangne anti-atomer belyses med laserlys i 10 minutter for at sparke positronen op til $n=2$. Alt dette forgår i vores anden-generations antibrintmaskine, ALPHA-2 (Figur 2).

Området, hvor antibrint dannes og fanges, kan betragtes som en cylinder med en diameter på 44 mm og en længde på 280 mm. Volumen er afkølet til 4 grader kelvin og har ultra-højt vakuum – vi ønsker, at næsten intet almindeligt stof er tilbage til at annihilere med vores antibrint. At man kun har 15 antibrintatomer at gøre med betyder, at vi skal bruge andre metoder end dem, man bruger til brintspektroskopi. Man kan ikke bare belyse så få atomer med en laser og håbe på at se noget, og man kan heller ikke detektere de fotoner, der er afgivet ved henfald, da fælden er begravet under en masse udstyr – elektroder, superledende magneter, en kryostat (en termokande til flydende helium), en partikeldetektor osv.

”Når man taber det, så ved man det”

For at have en chance for at vekselvirke med antibrint, udnytter vi en kendt teknik til at forstærke lyset fra vores laser. I Figur 3 kan man se, at to spejle (input og output coupler i Figur 3) danner en såkaldt *optisk kavitet* omkring det volumen, hvori antibrint er fanget. Lyset går ind i kaviteten og bliver reflekteret frem og tilbage mange gange imellem de to spejle. Ved at kontrollere kavitets længde meget præcist kan man sikre, at lysintensiteten vokser på grund af konstruktiv interferens. Resultatet er, at de 50 mW effekt, vi har fra laserens, bliver til cirka 1 W inde i fælden. Normalt bygger man sådan en optisk kavitet på en laboratoriebænk, hvor man kan justere på spejlene og optimere sin virkning. I ALPHA-2 er spejlene som sagt i vakuum og afkølet til 4 kelvin – de kan ikke røres eller justeres og skal bare virke. Det har krævet udvikling, men i efteråret 2016 fik vi det hele til at køre, som det skulle.

Forsøget som sådan er meget simpelt. Vi danner og fanger nogle antibrintatomer – omkring 15 – belyser dem med laserlys i 10 minutter, og så tømmer vi fælden for at se, hvor mange der er tilbage. Når vi slipper antibrintet fra fælden, rammer anti-atomerne almindeligt stof i væggen af fælden og

annihilerer. Det kan vi detektere med en meget følsom partikeldetektor, der omgiver fælden. Annihilationen af antibrint er – mikroskopisk set – en voldsom begivenhed. I praksis kan vi detektere annihilationer af antibrintatomer med næsten 100 procent effektivitet. Det er faktisk den *eneste* gode ting ved at arbejde med antistof – når man taber det, så *ved man det*.

Et fanget antibrintatom belyst med laserlys ved den rigtige frekvens har flere mulige skæbner: 1) der sker ingenting, fordi laserstrålen er meget smal (0.3 mm diameter) i forhold til fældens størrelse, og atomets bane krydser den slet ikke, 2) atomet absorberer to fotoner og hopper op til $n=2$ tilstanden, hvorefter tre forskellige ting er mulige: 2a) det henfalder til grundtilstanden igen, uden ændring og forbliver fanget, 2b) det henfalder til grundtilstanden igen, men i en anden magnetisk orientering – så bliver det tabt fra fælden, eller 2c) det absorberer en *tredje* foton og bliver *ioniseret* (slået i stykker), og så er det også tabt.

Kun tre tal at kigge på

Det vil sige, at en laser med den rigtige frekvens og nok intensitet kan smide antibrint ud af fælden. Derfor kører vi tre forskellige udgaver af forsøget: 1) laser med den rigtige frekvens (den vi forventer for brint), 2) laser med en frekvens som er tæt på, men ikke matchende, 3) ingen laser overhovedet. Summa summarum, efter mere end 20 års forskning har vi kun tre tal at kigge på. Vi har lavet de tre forskellige målinger, 11 gange af hver, og svaret er:

Antal antibrintatomer tilbage i fælden:

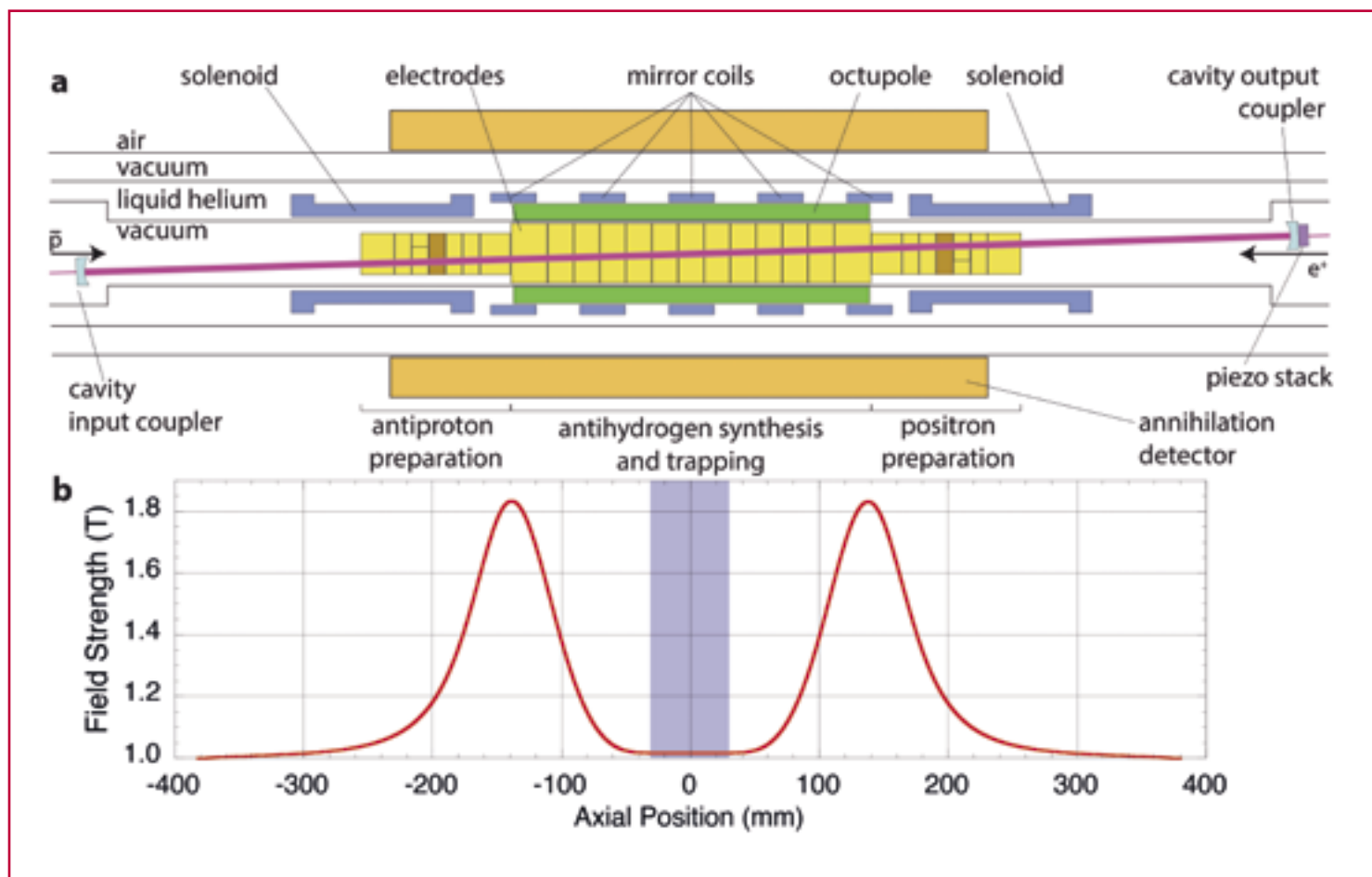
Med den rigtige laserfrekvens:	67±8.2
Med den forkerte laserfrekvens:	159±13
Med ingen laser:	142±12

Der er dog altid en statistisk usikkerhed i sådan et forsøg; antallet af fangne atomer kan variere lidt for hvert forsøg osv. Det vil sige, at laserens med den rigtige frekvens har sparket cirka 58 procent af atomerne ud af fælden. Det er i overensstemmelse med det, vi forventer for almindelig brint. Vi kan konkludere, at vi faktisk har ”snakket” med de interne kvantiserede niveauer i antibrint, og at opførslen i



Det, vi snakker om her, er den første præcise måling på et atom af antistof. For 30 år siden var det bare en drøm. Det åbner en ny gren i fysikken og bygger på grundlæggende ideer, der kan spores til Niels Bohr og hans kolleger. Tiden vil vise, om stof og antistof er identiske, eller om der ligger ny fysik i antibrints spektrum.





første omgang ligner den, vi forventer for almindelig brint.

Nu skal vi være lidt mere kvantitative. Den forkerte laserfrekvens var alligevel tæt på den rigtige, cirka 400 kHz ud af 2×10^{15} Hz. Det vil sige, at antibrint ligner brint til cirka 2×10^{-10} , eller 0.2 parts per billion. Dette er kun den allerførste måling af antibrints spektrum, og vi regner med at gøre det meget bedre allerede i 2017. Ved at måle flere punkter med frekvenser meget tæt på resonansen, kan vi finde formen af denne overgang i antibrint meget mere nøjagtigt. Ved ALPHA-2 regner vi med at opnå en præcision på 10^{-12} eller 10^{-13} . Der kræves nok videre udvikling – ALPHA-3? – til at opnå de 10^{-15} , som er rekorden for brint.

Nu nok om det tekniske – det, vi snakker om her, er den første præcise måling på et atom af *antistof*. For 30 år siden var det bare en drøm. Det åbner en ny gren i fysikken og bygger på grundlæggende ideer, der kan spores til Niels Bohr og hans kolleger. Tiden vil vise, om stof og antistof er identiske, eller om der ligger ny fysik i antibrints spektrum. Lige meget hvad svaret bliver, er vi i ALPHA stolte af re-

sultatet og taknemlige for at kunne arbejde med grundforskning støttet af Carlsbergfondet.

ALPHA (Antihydrogen Laser Physics Apparatus) er et konsortium af cirka 50 forskere fra 16 institutter i seks forskellige lande (Danmark, Storbritannien, Canada, USA, Israel, Brasilien og Sverige). Det blev dannet af forfatteren i 2005 for at opnå præcis denne måling på antibrint. Carlsbergfondet finansierede en stor superledende magnet til ALPHA-2 og støtter os i dag videre med en *Semper Ardens*-bevilling til det nye ALPHA-g forsøg, der går ud på at studere tyngdekraftens virkning på antibrint (se Carlsbergfondets Årsskrift 2016).

Noter

- 1 Bohr, N., On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I, *Philosophical Magazine* 26 (151) 1-24 (1913).
- 2 Ahmadi, M., et al., Observation of the 1s-2s Transition in Trapped Antihydrogen, (ALPHA Collaboration) *Nature* doi:10.1038/nature 21040 (2016).
- 3 Parthey, C. G. et al., Improved measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency. *Phys. Rev. Lett.* 107, 203001 (2011).
- 4 Cesar, C. L., et al., Two-photon spectroscopy of trapped atomic hydrogen, *Phys. Rev. Lett.* 77, 255-258 (1996).

Figur 3
Antibrint-fælden i ALPHA-2 er her skitseret. En animation af antibrintdannelse og laserforsøget findes her:
<http://alpha.web.cern.ch/>