

Antibrint på flaske

NIELS MADSEN, MICHAEL CHARLTON, STEFAN ERIKSSON, C. ALED ISAAC og DIRK PETER VAN DER WERF
PHYSICS DEPARTMENT, College of Science, Swansea University, Swansea SA2 8PP, UK

Vi beskriver et aktuelt eksperiment på CERN, hvor antibrint, et atom lavet udelukkende af antistof, er blevet holdt fanget i en magnetisk minimumsfælde for neutrale atomer og er blevet påvirket med mikrobølgestråler, der har forårsaget de første kvantespring, der nogensinde er observeret i et antiatom. Vi beskriver, hvordan denne milepæl i udviklingen af antistoffysik er foregået, og vi beskriver noget af baggrunden for fysik med antistof, samt motivationen for eksperimenterne.

1 Indledning

2 566 061 413 187 035 \pm 10 Hz er den seneste måling med en svimlende præcision på $4,1 \cdot 10^{-15}$ af overgangen mellem grundtilstanden og den første anslåede tilstand i atomart brint [Parthey2011]. En sådan præcision kan nås med laserspektroskopi og resultatet er en hjørnesteen i fundamental fysik og metrologi. Målingen involverede en to-foton anslåning af 1S grundtilstanden til den metastabile (med en levetid på omkring en ottendedel sekund) 2S tilstand. De to fotoner anslår antibrintatomet fra modsat løbende laserstråler således, at de udligner førsteordens Dopplerskiftet, der skyldes atomernes bevægelse, som normalt ville udtvære overgangen.

Detaljerede studier af brint har i sig selv stor værdi, men i forbindelse med vore planer er det specielt ved sammenligningen med den samme overgang i antibrint, at vi leder efter nye fysiske fænomener. I en tidligere artikel [Charlton2005] blev det beskrevet, hvordan antibrint var blevet frembragt på kontrolleret vis. I denne artikel beskriver vi den seneste videreudvikling, som ALPHA samarbejdet har resulteret i på CERN [ALPHAweb], hvor vi er på vej mod de første sammenligninger af egenskaberne ved stof og antistof. Men først bør vi besvare et vigtigt spørgsmål. Hvorfor gøre alt besværet?

2 Problemet med antistof

Der er mange fundamentale mysterier i forbindelse med sammensætningen og

udviklingen af Universet, som ikke kan forklares med de fysiske lovmæssigheder, vi kender i dag. Som eksempler kan vi nævne mørkt stof, der ser ud til at bidrage med 83% af stoffet i Universet, og mørk energi, der tilsyneladende fylder hele rumtiden. Et yderligere spørgsmål, der plager fysikken, er den tilsyneladende mangel på antistof i Universet – i det mindste så vidt, vi kan se fra Jorden. At det overhovedet er et spørgsmål, kan forklares med nogle symmetribetragtninger som beskrevet i fx [Charlton2005]. Her vil vi vælge en anden indgangsvinkel.

Antistof er dybt integreret i fysikken. Begrebet blev første gang introduceret (selvom der er tidligere spekulationer hos Schuster [Schuster] og måske andre) af den britiske fysiker Paul Dirac. (Se fx Kragh [Kragh] og Farmelo [Farmelo] med let tilgængelige beskrivelser (på engelsk)). Det lykkedes Dirac i de sene 1920'ere at forene den på det tidspunkt unge kvantemekanik med Einsteins specielle relativitetsteori. Dette arbejde ledte til noget af en overraskelse. Han fandt, at løsningen til hans kvanteligning (nu kendt under navnet Diracligningen) for energien, E , af en isoleret, fri elektron i hvile var $E = \pm mc^2$.

Denne løsning ligner Einsteins berømte ligning for hvileenergien af en partikel med massen m , hvor c som sædvanlig er lysets hastighed i vacuum – bortset fra, at en af løsningerne har en negativ total energi!

Dirac og andre fandt hurtigt ud af, at denne negative løsning ikke blot kunne negligeres som ufysisk, da disse elektroner med negative energitilstande var nødvendige for, at beregningerne kunne hænge sammen. Det tog 2–3 år at finde ud af de fulde konsekvenser af disse negative energitilstande.

I en mindeværdig artikel i 1931 (hvor han i øvrigt mest diskuterede et urelateret problem: Hvorfor elektrisk ladning så ud til at komme i pakker af størrelse e)

lavede Dirac [Dirac1931] den følgende imponerende forudsigelse. ... *they would be a new kind of particle, unknown to experimental physics, having the same mass and opposite charge to an electron. We may call such a particle an anti-electron. We should not expect to find any of them in nature, on account of their rapid rate of recombination with electrons, but if they could be produced experimentally in vacuum they would be quite stable and amenable to observation.*

Således fødtes positronen (som antielektronen kaldes), og kort tid efter blev den første gang observeret af Carl Anderson [Anderson].

Noget måske endnu mere imponerende er, at kun få linier senere i samme artikel (vi ignorerer fotonen for et øjeblik) argumenterede Dirac for, at den eneste anden kendte partikel på det tidspunkt, protonen, også måtte have en antipartikel, og han forudså således eksistensen af antiprotonen.

Resten, som man siger, er historie, men så absolut ikke lige ud af landevejen. Hen mod slutningen af 1950'erne var antiprotonen blevet opdaget, men en bunke andre partikler var også begyndt at dukke op (såsom myoner, pioner og neutrinoer). Det tog mange hjerner op mod 50 år at få ordnet alle disse forskellige partikler ind i, hvad vi i dag kalder standardmodellen. En ting, der blev afklaret under alt dette arbejde, var, at hver type partikel har en antipartikel associeret med sig (med enkelte undtagelser som fx fotonen, der er sin egen antipartikel). Der udviklede sig en forståelse af, at stof og antistof har en særlig gensidig symmetri der betyder, at egenskaber som fx masse og ladning skal være enten ens (masse) eller ens og modsat (ladning).

Det blev derfor muligt at forestille sig, at et helt univers kunne opbygges af enten stof eller antistof – måske begge! Det forekommer fuldkommen realistisk at have alt fra planeter til planter, fra ga-

lakser til regnorme osv. lavet af antistof. Så eksisterer sådanne antiting? Hvordan kan vi vide det?

Hvis symmetrien mellem stof og antistof er eksakt, ville lyset fra en stjerne lavet af rent antistof ikke adskille sig fra lyset fra en tilsvarende stjerne lavet af stof. Derimod ville sammenstød mellem områder af kosmos lavet af stof og områder lavet af antistof medføre vanvittige energiudladninger, man ikke kunne forveksle med noget andet. Energien udløst ved sådanne megaannihilationer ville kunne ses fra Jorden.

Problemet er bare, at vi aldrig har set tegn på noget sådant. Om ikke andet er vi for vores egen galakses vedkommende helt sikre på, at der ikke er større mængder antistof til stede. Indtil videre gælder det samme for længere kig ud i rumtiden, hvor vi heller ikke ser noget tegn på antistof. Dette er kernen i problemet med antistof.

Fysikkens love forudsiger, at det må eksistere, hvilket det gør, der er bare ikke noget af det derude. Hver gang vi laver antistof her på Jorden ved at pumpe energi ind ($E = mc^2$ igen), får vi altid samme symmetriske resultat: Lige dele stof og antistof bliver dannet. Vi forventer, at det samme må være sket ved Universets begyndelse, Big Bang. Så hvad er der siden sket med antistoffet? Vi ved det ikke. Mens vi har fundet nogle enkelte vekselvirkninger med meget kortlivede partikler, der giver en svag præference til stof, er de mange størrelsesordner for små til at forklare selv kun den synlige del af Universet.

Hvad vi er nogenlunde sikre på er, at det meste af det stof, der blev dannet i Big

Bang annihilerede med antistof, som også var til stede. Det ser ud til, at det synlige univers er dannet af resterne fra denne kosmiske eksplosion, en milliardendedel af, hvad det startede med. Således må det være hændt, at på et eller andet tidspunkt under nedkølingen af Universet efter Big Bang er først antikvarerne og dernæst positronerne forsvundet. Men vi ved ikke hvorfor.

Under alle omstændigheder ser det ud til, at da Universet endelig var koldt nok til, at der kunne dannes atomer, var der ikke længere nogen antipartikler til stede således, at der kunne dannes antibrint.

For at forsøge at få svar på spørgsmålet om, hvor antistoffet blev af, eller måske rettere, hvorfor der var stof nok tilbage til, at vi kunne blive dannet, kan man kigge på, hvordan partikler opfører sig ved høje energier for derved at krybe så tæt på betingelserne under Big Bang som muligt. Vi har dog besluttet at tage en komplementær indgangsvinkel, en der involverer antibrint, det atom Universet aldrig fik mulighed for at danne. På lidt længere sigt ønsker vi at undersøge antibrints egenskaber med samme (eller bedre!) præcision, som den vi tidligere omtalte for brint. Har Universet efterladt et fingeraftryk af stof-antistof asymmetrien begravet dybt inden i de atomare spektre af disse to mest fundamentale atomer? Resten af artiklen beskriver, hvor langt vi er nået på vores vej.

3 At lave en magnetisk flaske

For at kunne komme så langt som til at lave spektroskopi på antibrint må vi først fremstille det ved forsigtigt at blande positroner og antiprotoner. Vi beskriver se-

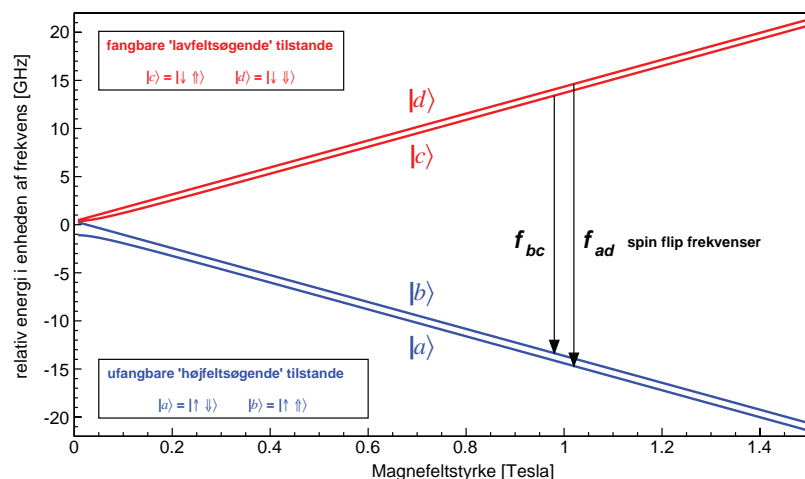
nere, hvordan vi gør. Først er det dog værd at konstatere, at det er svært at forestille sig særligt præcise målinger, hvis vi ikke kan holde på antibrinten i en længere periode. Det er forholdsvist nemt at forstå hvorfor: Jo længere man betragter en genstand, desto mere sandsynligt er det, at små detaljer bliver synlige. I fysikkens verden kan man formulere dette helt præcist, i det mindste op til en velforstået grænse. Der er således en reciprok sammenhæng mellem den præcision, med hvilken man kan måle frekvensen af en atomar overgang og længden af det tidsrum, hvori man observerer atomet.

For at kunne nærstudere antibrint forekommer det derfor nødvendigt at holde det fanget i en slags flaske. En sådan flaske skal dog samtidig sørge for, at antibrinten ikke kommer i kontakt med almindeligt stof og annihilerer. Men hvordan gør vi det?

Hvor det er forholdsvist enkelt at benytte en kombination af elektriske og magnetiske felter til at holde på ladede antipartikler (se nedenfor), er det samme desværre ikke muligt for antibrint, da det er elektrisk neutralt. Heldigvis har antibrint, som brint, en egenskab der kaldes et magnetisk moment, der gør det i stand til at føle en svag kraft fra rumlige variationer af et magnetisk felt. Dette moment kan forstås ved at forestille sig positronen i bane om antiprotonen som en lille strømførende spole eller elektromagnet, om man vil, der vil rette sig ind efter det lokale magnetfelt, enten parallelt med feltet eller antiparallelt. Denne effekt er et kvantemekanisk fænomen der kaldes spin. Hvis det magnetiske moment er lig μ_B , så er den potentielle energi U af ato-

Figur 1

Breit-Rabi diagrammet for antibrints grundtilstand med angivelse af lav- og højfelt søgende tilstande. Andenaksen angiver tilstandens energi relativt til værdien uden magnetfelt og i frekvensenheden GHz. Førsteaksen viser magnetfeltstyrken i Tesla. Pilene ud for kurverne angiver positronens spin (enkelt pil) og antiprotonens spin (dobbeltpil). Der dannes fire forskellige tilstande, da vi har to 1/2-spins partikler. De lodrette linier angiver tilladte overgange mellem de øvre (fangede) og nedre (frie) tilstande.



met i et magnetfelt B givet ved $U = \pm \mu_B B$. Plustegnet i ligningen angiver, hvorvidt den potentielle energi vokser med magnetfeltstyrken, og det kan vises, at disse atomer har deres magnetiske moment rettet ind, så det er antiparallelt med feltet. Modsat angiver minustegnet, at den potentielle energi falder ved øget magnetfelt, og disse atomer er rettet ind, så de er parallelle med magnetfeltet. På figur 1 har vi afbildet det såkaldte Breit-Rabi diagram for brints (og antibrints) grundtilstand. Det viser, hvordan den indre energi i atomet afhænger af magnetfeltstyrken og dets magnetiske moment.

Lad os begynde med at kigge på de atomer, hvis indre energi vokser med magnetfeltstyrken. Jo større magnetfelt, desto større ændring. Da den totale energi er bevaret, må denne ekstra indre energi have en oprindelse, og det er atomets kinetiske energi. Dvs. atomerne bevæger sig langsommere og langsommere, når de bevæger sig mod højere feltstyrker, og hvis de har lav nok kinetisk energi i starten, vil de blive reflekterede, før de når væggen og kan således blive indfanget. Det er disse antibrint atomer vi kan fange og studere. Desværre er de magnetiske kræfter her ret små, så kun atomer med en kinetisk energi mindre end, hvad der svarer til 0,5 Kelvin kan fanges. Hvad sker der med de atomer, hvis energi falder med feltstyrken? Sådanne atomer blive trukket mod stærkere felter, og hvis minimum er i midten, bliver de derfor trukket mod væggen af apparatet, hvor de bliver tabt. Denne sideeffekt kan vi dog også udnytte, som vi skal se senere, når vi kigger på, hvad der sker, når vi bestråler den indfangne antibrint med mikrobølger.

Vi kan således se, at ved at arrangere vores magneter således, at den samlede feltstyrke har et minimum i tre dimensioner, kan vi danne en fælde, der kan fange neutrale atomer, så længe disse blot har lav nok kinetisk energi. Figur 2 illustrerer skematisk den indre del af ALPHAs opstilling. Bemærk især spolerens opsætning: Et par såkaldte spejlspoler er placeret koaksialt og med en vis afstand, og en oktopolformet spole er vundet rundt om ydersiden af vakuumkamret, der huser elektroderne. Sendes der strøm gennem spejlspolerne, dannes der et aksialt

magnetfeltminimum, og tilsvarende dannes der et radiale minimum, når der sendes strøm gennem oktopolen.

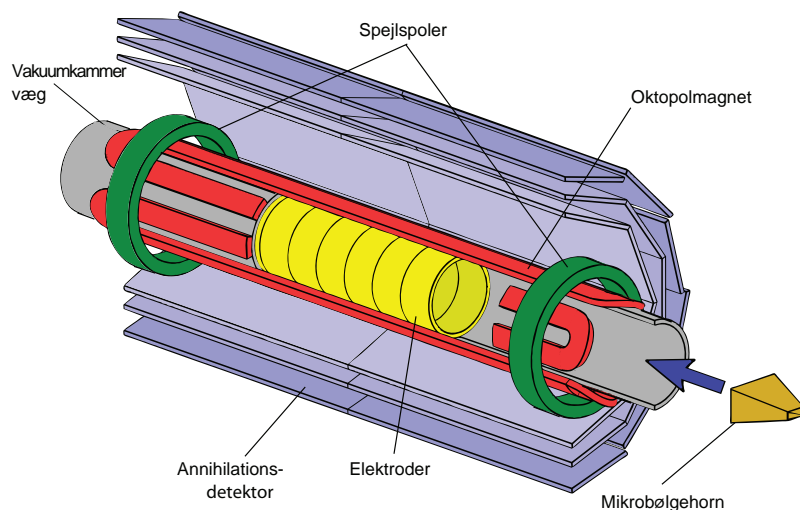
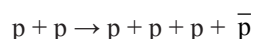
Spolerne er vundet af det nyeste inden for superledende kabler, og vi sender op til tusinde Ampere gennem dem, når fælden aktiveres. På trods af de stærke strømme er den største forskel i magnetfeltstyrken mellem midten af fælden (som er systemets akse) og væggen, der kun er ca. 2 cm væk, på lige under 0,8 Tesla. Da størrelsen af det magnetiske moment af antibrint i grundtilstanden er den såkaldte Bohr Magneton (omkring $0,67 \text{ KT}^{-1}$) er fældedybden derfor kun lige over 0,5 Kelvin.

Den lille fældedybde er en stor udfordring. Det betyder, at vi er tvunget til inde i fælden at fabrikere antibrint atomer med kinetiske energier, der er lavere end fældedybden, for at have nogen chance for at fange dem. Det gøres, som forklaret i det følgende.

4 Antibrintbrygning

I en tidligere artikel (på engelsk) [Charlton2005] blev det beskrevet, hvordan man danner antibrint ved at blande skyer af antiprotoner og positroner under kontrollerede forhold. Her følger en kort opsummering.

Siden starten i 1954 har CERN været ansvarlig for mange unikke maskiner og teknikker, deriblandt en helt unik evne til at decelerere antiprotoner. Antiprotoner dannes ved reaktionen



Figur 2

Oversigt over den centrale del af ALPHAs opstilling, der viser elektroderne, der danner fælder for antiprotoner og positroner, og spolerne, der danner den magnetiske fælde, der kan fange nogle af antibrint atomerne. Annihulationsdetektoren, der omgiver fælderne på tegningen, detekterer antibrint annihilationer på elektrodestrukturen (som også udgør væggen på den neutrale fælde). De forskellige dele er ikke tegnet i korrekt størrelseforhold.

der aktiveres ved at smadre en kort puls af højenergetiske (omkring 26 GeV) antiprotoner ind i en metalklods. Antiprotonerne skummes derefter fra resultatet af denne kollision ved en kinetisk energi på et par GeV af en maskine kaldet Antiproton Deceleratoren (AD). I ADen bremses de så ned til en kinetisk energi på lidt over 5 MeV for derefter at blive sendt videre til vores opstilling i en 200 ns lang puls. Ved ankomst i vores opstilling lader vi dem passere gennem et tyndt folie, hvori de taber yderligere energi: En procentdel af dem ender med lav nok energi til at blive fanget i en såkaldt Penningfælde. Penningfælden er en hjørneste for dannelse af antibrint, så det er værd at kigge nærmere på, hvordan den fungerer.

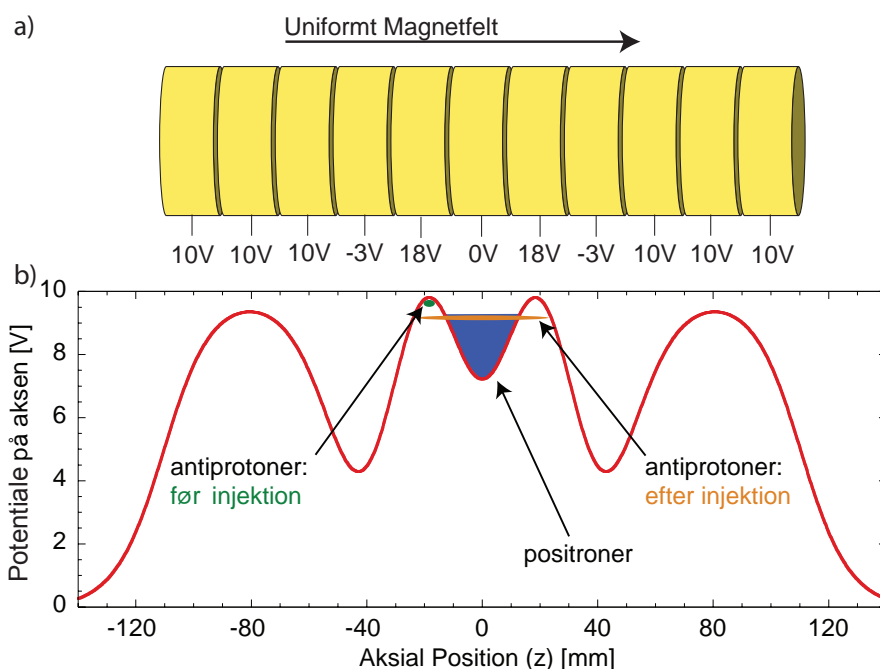
Diagrammet på figur 3a viser en tegning af en Penningfælde. Der er lærebøger og mange lange oversigtsartikler om sådanne fælder (se også [ALPHAweb, wiki-Penning]), som benyttes mange centrale steder i fysikkens og kemiens verden. Her vil vi blot kigge på et par kernepunkter for at kunne forstå, hvad der foregår. Primært består en Penningfælde af et aksialt magnetfelt (for øjeblikket konstant) i

aksial retning og homogent over fældens volumen. Et typisk felt er mindst 1 Tesla. Ladede (anti)partikler vil lave spiralbaner langs med akse, når de bevæger sig i et sådant magnetfelt, og feltet holder derfor sådanne partikler fanget radialt.

Den næste centrale komponent er elektrodesystemet, der i øvrigt også kunne ses på figur 2, og som benyttes til at fange antipartiklerne langs akse ved at pålægge passende elektriske potentialer. Figur 3b viser et eksempel på et antal potentialbrønde, der kan holde positroner og antiprotoner fanget under antibrintsyntesen. Man kan således benytte en kombination af elektriske og magnetiske felter til at holde ladede antipartikler fanget i et ultrahøjt vakuum, hvori deres vekselvirkning med almindeligt stof er næsten totalt udslettet. På denne vis kan man lagre ladede antipartikler i mange timer. Inden vi kigger på at fange antibrinten, lige et par ord om positronerne. Som også omtalt i artiklen fra 2005 er det blevet forholdsvis rutine gennem de sidste 40 år at lave partikelstråler af lavenergetiske positroner i vakuum. Positronerne kommer fra β^+ -henfald fra radioaktive isotoper som fx ^{22}Na . I løbet af de seneste 10–20 år er udviklingen gået videre, og der er udviklet teknikker til at fange disse lavenergetiske positroner i Penningagtige fælder, præcis som vi har brug for til at danne antibrint [Jorgensen].

Så vi har ingredienserne, men besværets kerne er stadig at danne antibrinten på sådan vis, at mindst noget af det er koldt nok til, at det kan forblive i vores magnetiske flaske. Det første lavenergetiske antibrint blev dannet i 2002 [ATHENA, ATRAP], men nye teknikker var nødvendige for at kunne lave fangbar antibrint. Som udgangspunkt skal antipartiklerne naturligvis være kolde, inden de blandes sammen for at forme antibrint. For at opnå dette har vi lånt en teknik fra fysik med kolde atomer, den såkaldte fordamningskøling. De grundlæggende fysiske principper er ganske generelle, og man benytter ofte afkølingen af en kop kaffe eller te som illustration.

Vore positroner og antiprotoner holdes i meget lave brønde, som det blev vist på figur 3b. Vi køler dem ved at mindske brøndens dybde med små skridt. For



hvert skridt slipper de varmeste partikler ud fra fordelingen, der er en Maxwell-Boltzmann fordeling for temperaturen T . De resterende (fangede) partikler kolliderer med hinanden, og da de varmeste nu er væk, finder de et nyt ækvilibrium ved en lavere temperatur. Med denne fordamningsteknik har vi kunnet nå temperaturer på kun 10 K. Selvom de er noget højere end vores antibrint brønddybde på 0,5 K, er der jo tale om en termisk fordeling af energier i skyen, og en lille brøkdel vil derfor have en kinetisk energi, der er lavere end 0,5 K.

Med antipartiklerne kølet og i hver deres brønd er vi klar til at blande dem, men det skal gøres uden, at de varmes op, eller i det mindste med så lav opvarmning som muligt. I tidligere eksperimenter [Charlton2005, ATHENA] skød vi antiprotonerne ind i positronskyen ved at manipulere de elektriske potentialer med 10–20V. Det var måske derfor ikke så overraskende, at vi måtte konstatere, at antibrint produceret på den vis havde kinetiske energier, der var noget større end man skulle forvente fra temperaturfordelingen af positronerne [Madsen]. Da det ikke er muligt at fange disse energetiske antibrintatomer, måtte vi finde på en anden metode.

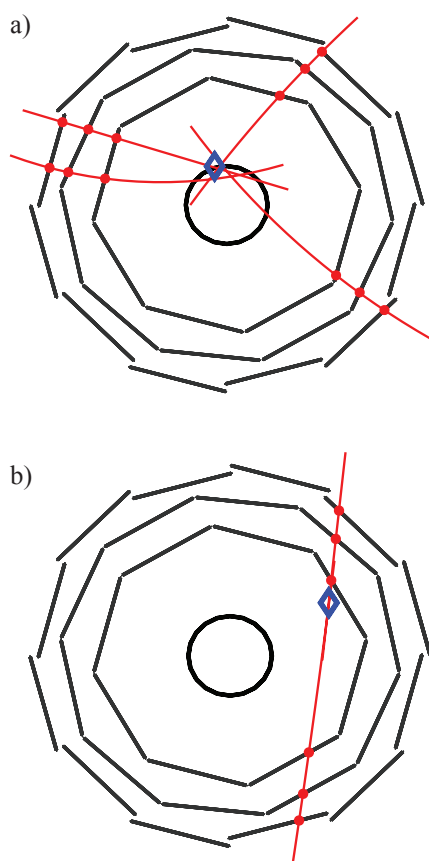
Antiprotoner i en potentialbrønd opfører sig som en bunke harmoniske oscillatorer, og de bevæger sig frem og tilbage langs systemets akse med en bestemt frekvens f_z . I vores tilfælde er f_z omkring 410 kHz,

Figur 3
a) Illustration af ALPHAs Penningfælde. Spændingerne, der er pålagt de cylindriske elektroder, er angivet og giver samlet anledning til det elektriske potentiale vist på diagrammet nedenfor (b).
b) Diagrammet viser det elektriske potentiale langs systemets akse. Udover det elektriske felt er der et aksialt magnetfelt, der holder partiklerne fanget radialt.

hvilket svarer til en rundturstid på under 2,5 ms. For at få dem ud af deres brønd kan man forsøge at anslå deres aksiale bevægelse ved at benytte en varierende spænding med frekvens f_z . Desværre sker der så det, at efterhånden som antiprotonerne får mere energi i brønden, når de til et niveau, hvor den ikke længere er harmonisk (den harmoniske approksimation gælder kun for små udsving fra ligevægt). Det der sker er – som på en gyngestol – at rundturen bliver længere og længere, og vores anslagsfrekvens f_z er derfor ikke længere i resonans med bevægelsen, hvorefter bevægelsen bliver dæmpet ned igen. Denne cyklus vil gentage sig i en uendelighed uden, at vores antiprotoner forlader deres brønd.

Og dog, hvis anslagsfrekvensen varieres med tiden på passende vis, kan man observere et specielt koblingsfænomen. Ideen er at starte anslaget ved en frekvens f_d , der er højere end f_z , for derefter at sænke den til en lavere frekvens. I vores eksperiment startede vi typisk med f_d ved 420 kHz for derefter at rampe fre-

kvensen ned med en rate på 200 MHz s^{-1} i kun 0,3 ms for at ende ved 360 kHz. Idet f_d passerer f_z låser antiprotonernes bevægelse sig til anslaget og følger det ind i det ikke-lineære område, mens deres oscillationsamplitude vokser. Til sidst når antiprotonerne en amplitude, der er stor nok til, at de undslipper fælden og kan bevæge sig ind i positronskyen, der er holdt klar ved siden af. Det snedige er, at med denne metode tilføres meget lidt ekstra kinetisk energi, der hurtigt bliver tabt til positronskyen. Teknikken er en variant af noget der hedder autoresonans, et fænomen der går igen i mange typer af oscillerende systemer. En interessant gennemgang af fænomenet kan findes andetsteds [Fajans], og man kan også finde flere detaljer om ALPHAs version [Autoresonance].



Figur 4

a) Rekonstrueret antiproton annihilation efter, at et antibrintatom har kollideret med fældens væg; væggen er angivet som en sort cirkel i midten. Denne begivenhed har fire spor og vertexet er vist som en blå diamant. Stederne, hvor pionerne har passeret gennem silicium detektorens plader (vist her set fra enden (se også figur 2)), er angivet med røde klatter.

b) Sporet fra en partikel fra rummet (kosmisk stråling), der er fløjet lige gennem detektoren.

Når antiprotonerne først befinder sig i positronskyen, danner de hurtigt antibrint. Det har vist sig, at positronskyen er tætpakket nok til, at antibrint formes ved at to positroner kolliderer med en antiproton, dvs. $\bar{p} + e^+ + e^+ \rightarrow \bar{H} + e^+$, hvor den ene af positronerne bindes til en antiproton, og den anden rekyllerer således, at der er impuls- og energibevarelse. Så antibrinten dannes direkte i vores fælde, men når det foregår ved ovennævnte proces, dannes de i meget højt anslåede tilstande. Det gør de, fordi energiudvekslingen finder sted mellem de to positroner tæt på antiprotonen. Det er næsten en elastisk kollision af to partikler med samme masse (som billiard kugler). Der kan derfor ikke udveksles meget mere energi end positronernes kinetiske energi, dvs. omkring $k_B T$ (hvor k_B er Boltzmanns konstant), hvilket betyder, at den ene af dem bliver bundet med en energi af denne størrelsesorden. I tal betyder det, at typiske bindingsenergier er omkring 5 meV. Til sammenligning er grundtilstandens bindingsenergi på 13,6 eV.

Det er her indfangning bliver nødvendigt. For at kunne foretage målinger på antibrint, der er af samme kvalitet som dem, der er foretaget på brint, skal antibrinten være i grundtilstanden. Vi kan beregne, at det tager cirka et halvt sekund for den nydannede svagt bundne antibrint at henfalde til grundtilstanden ved at udsende fotoner. Så vi er altså nødt til at fange så mange atomer i vores fælde, som vi kan, og holde fast på dem mindst, indtil disse henfald har fundet sted.

Det er for nylig lykkedes at fange et par hundrede antibrint atomer (dog typisk kun et ad gangen) og holde dem fast i op til 1000 s [Trap1, Trap2]. Skåret til benet: Når vi først har fanget et antibrint atom, er gastrykket i vores opstilling så lavt, at der nærmest ingenting er, som kan forstyrre dem, og de forbliver fanget. Med antibrint i vores fælde er vi klar til at lave eksperimenter, da vi nu er sikre på, at de er i deres grundtilstand.

5 Mikrobølger og spinflip

For at kunne foretage et eksperiment er vi naturligvis nødt til at kunne opfange resultatet. Heldigvis er annihilationen af et enkelt antibrintatom, når det kommer i

kontakt med stof, relativt enkel at observere. Når antiprotonen i antibrinten annihilere, kommer der en lille flok partikler ud, der kaldes pioner. Pionerne har stor kinetisk energi, typisk 10 eller flere MeV, og for hver annihilation er indtil flere af de udsendte pioner elektrisk ladede. Deres store kinetiske energi betyder, at de kan trænge gennem det materiale, der adskiller annihilationsstedet og detektoren, der omgiver fælden, som det var vist på figur 2. Ladede pioner kan tabe energi til detektoren. Detektoren er baseret på en pladeformet silicium teknologi og kan danne billeder således, at vi kan rekonstruere, hvor en given pion trængte gennem hver plade. Da der er tre lag af disse siliciumplader, kan vi rekonstruere pionens bane gennem detektoren, og hvis der er pioner nok (to eller flere), kan vi finde annihilationsstedet (kaldet et vertex).

Figur 4a viser et eksempel på en sådan rekonstrueret annihilation, hvor annihilationen fandt sted (når man tager højde for detektorens opløsning) på undersiden af en af de elektroder, der danner kernen i opstillingen (se også figur 2). Figur 4b viser, hvordan det ser ud når en partikel fra rummet passerer gennem detektoren (kosmisk stråling). Vi har været påpasselige med at adskille den kosmiske stråling fra annihilationer, da de udgør en baggrundskilde i eksperimentet. De to typer begivenheders meget forskellige topologi hjælper gevaldigt med det. Men hvordan kan vi nu vide, om vi har fanget et antibrintatom eller to? En måde at afgøre det på er at tømme fælden ved at slukke for magnetfeltet og kigge efter annihilationer i det korte tidsrum, det tager at gøre dette. Spolerne lavet til vores fælde er specielt fremstillede således, at vi kan slukke for de meget stærke magnetfelter på meget kort tid. Det tager omkring 30 ms at bringe fældedybden til omkring en procent af den fulde dybde og lade næsten alle antibrintatomer undslippe. Vi nøjes derfor med at kigge efter annihilationer i dette korte tidsrum, noget der også hjælper til at begrænse baggrunden fra den kosmiske stråling, da denne er tidsmæssigt tilfældig. Således er vores signal for, at vi har fanget et antiatom, at vi observerer en annihilation, som den på figur 4a, i et 30 ms tidsrum efter, at vi begynder at slukke for magneterne.

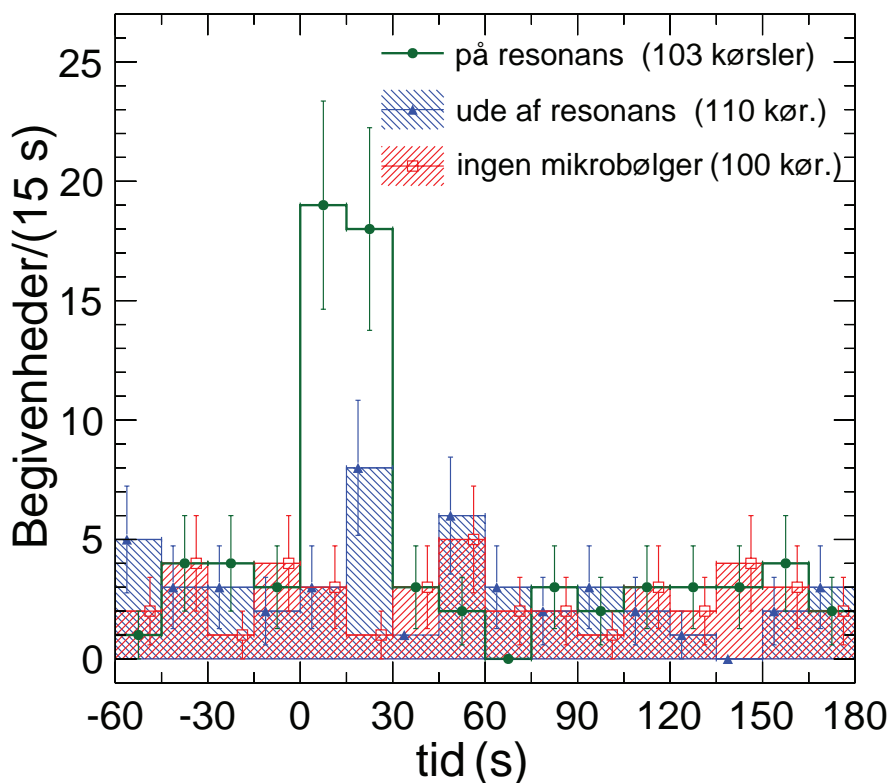
Betragt et øjeblik figur 1 fra før og husk på, at kun de to øverste tilstande, kaldet |c> og |d> kan fanges. Magnetfeltstyrken i midten af vores fælde er tæt på 1 T, så hvis vi bestråler antiatomerne med (viser det sig) mikrobølger ved frekvenserne f_{bc} og f_{ad} kan positronens spin flippe rundt. |c> tilstande bliver således til |b> tilstande, mens |d> bliver til |a>; hvilken det nu end er, er resultatet en tilstand, der ikke kan fanges. Antiatomerne vil derfor undslippe fælden og annihilere på væggen næsten i samme nu. Hvis vi derfor efter at have bestrålet antiatomerne kigger på, hvad der er i fælden, ved at slukke for magnetfeltet, som vi gjorde ovenfor, forventer vi at finde en tom fælde, hvis vi har foranstaltet et resonant kvantespring i antibrintet. Det er præcist, hvad vi har observeret.

Vi har gennemført over 100 forsøg med mikrobølger på og ude af resonans og sammenlignet tælle-tallene, når vi slukker for fælden. Med mikrobølgerne ude af resonans fandt vi 23 antiatomer, der stadig var fangede, mens vi med mikrobølgerne på resonans med de to overgange kun fandt 2 [Resonance]. Tydeligvis er det lykkedes os at smide de fleste atomer væk på denne vis.

Vi tog dog målingerne endnu videre. Ved en mere forfinet analyse af dem, der kommer ud af vores billeddannende silicium detektor, var vi i stand til at isolere annihilationssignalet fra de undslipende antibrintatomer, når mikrobølgerne var resonante. Målingen kan ses på figur 5, der viser et overskud af tællinger i de to 15 s tidsvinduer, hvor mikrobølgerne var resonante med henholdsvis f_{bc} og f_{ad} . Derimod er der ingen tegn på tællinger, når mikrobølgerne er afbrudt eller ude af resonans. På denne vis har ALPHA været i stand til ikke kun at påvise, at antistoffet antibrint kan dannes, men også, at det kan lagres i en længere periode. Desuden har vi som det første nogensinde observeret resonante kvantespring i antistof.

6 Hvad så nu?

Nu hvor vi er sikre på, at vi kan holde fast i antibrint længe nok til, at vi kan eksperimentere med det, planlægger vi at øge præcisionen af målingerne. For at sikre, at de første målinger vist her skulle lykkes,



lod vi mikrobølgefrequenserne dække et interval på 15 MHz. Det lægger naturligvis en dæmper på målingens opløsning.

ALPHAs opstilling, som blev vist i figur 2, var hovedsageligt lavet med antibrint indfangning for øje, selvom det dog lykkedes os også at føre mikrobølgestråling ind i apparatet ved at benytte det horn, der også er vist på figuren. Vi koncentrerer os netop nu om at bygge en opdateret udgave af apparatet. I den opdaterede udgave har vi mere præcist designede, manipulerbare magnetfelter for at gøre mikrobølgeresonansen så smal som (teoretisk) muligt. Vi tilføjer også vinduer, så vi kan bringe laserlys ind i opstillingen. Vi håber derfor på snart at være i stand til at lave målinger på *positroniske* tilstande i antibrint for at kunne sammenligne dem med de svimlende nøjagtige målinger, vi så i starten af brints elektroniske tilstande.

7 Kig her!

Med hjælp fra Gallator, et britisk firma der arbejder med matematik og videnskab i industrielle og undervisningsmæssige sammenhænge, har vi fået lavet en simulation af vores eksperiment. Kig på ALPHAs hjemmeside [ALPHAweb], og se hvordan man fanger antibrint, og derefter hvordan mikrobølgerne flipper positronens spin, så antibrinten undslipper.

Figur 5

Annihilationsbegivenheder som funktion af tiden relativt til afslutningen af antibrint produktionen. De angivne usikkerheder skyldes tællestatistik. De ekstra begivenheder, når vi er på resonans, skyldes mikrobølgeinducerede annihilationer på fældevæggen.

8 Kildemateriale

- C. G. Parthey et al. *Phys. Rev. Lett.*, 107:203001, 2011.
- M. Charlton. *Phys. Ed.*, 40:229, 2005.
<http://alpha.new.web.cern.ch>.
- A. Schuster. *Nature*, 58:367, 1898.
- H. S. Kragh. *Dirac: A Scientific Biography*. Cambridge University Press, 1990.
- G. Farmelo. *The Strangest Man: The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*. Faber and Faber, 2009.
- P. A. M. Dirac. *Proc. Roy. Soc. A*, 133:60, 1931.
- C. D. Anderson. *Phys. Rev.*, 43:491, 1933.
http://en.wikipedia.org/wiki/Penning_trap.
- L. V. Jørgensen et al. *Phys. Rev. Lett.*, 95:025002, 2005.
- M. Amoretti et al. *Nature*, 419:456, 2002.
- G. Gabrielse et al. *Phys. Rev. Lett.*, 89:213401, 2002.
- N. Madsen et al. *Phys. Rev. Lett.*, 94:033403, 2005.
- J. Fajans and L. Friedland. *Am. J. Phys.*, 69:1096, 2001.
- G. B. Andresen et al. *Phys. Rev. Lett.*, 106:025002, 2011.
- G. B. Andresen et al. *Nature*, 468:673, 2010.
- G. B. Andresen et al. *Nature Physics*, 7:558, 2011.
- C. Amole et al. *Nature*, 483:439, 2012.