

Nye målinger afgør sagen: **ANTISTOF FALDER IKKE OPAD**

På det fælleseuropæiske center for højenergifysik CERN forsøger fysikerne at besvare det grundlæggende spørgsmål, om antistof opfører sig på samme måde som almindeligt stof. Det seneste forsøg viser, at atomer af antihydrogen (antibrint) og atomer af almindeligt hydrogen opfører sig ens i et tyngdefelt: Begge falder nedad.

Om forfatteren
Af Henrik Bendix,
videnskabsjournalist.
bendix@vidmere.dk



Om forskeren
Jeffrey Hangst er professor i eksperimentalfysik ved Aarhus Universitet. Han er grundlægger og talsperson for eksperimentet ALPHA ved CERN, hvor forskerne eksperimenterer med antistof.
Jeffrey.Hangst@cern.ch

Jeffrey Hangst holder den 7. november 2023 foredrag om forskningen i antistof ved CERN i serien offentlige foredrag i Naturvidenskab. Denne artikel knytter an til dette foredrag og er lavet som led i projektet *Brobygning på første række* finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Antistof falder nedad. I forhold til tyngdekraften opfører antiatomer sig som almindelige atomer. Det ved vi nu, efter at det nu er lykkedes en gruppe CERN-forskere med Aarhus-forskeren Jeffrey Hangst i spidsen at måle på antihydrogen i frit fald. Resultatet er det foreløbige højdepunkt i årtiers forskning inden for antistof.

»Vi har lavet den første direkte måling på antistof i et tyngdefelt. Tyngdekraften er den suverænt svageste af de fire naturkræfter, og det er meget svært at måle, hvordan tyngdekraften påvirker antipartikler. Ingen har gjort det før, og det har kun været muligt, fordi vi har målt på antiatomer, der er elektrisk neutrale,« siger Jeffrey Hangst, der ikke lægger skjul på, at han er stolt af bedriften.

Det nye forskningsresultat er netop publiceret i *Nature*, og det er ikke første gang, CERN-gruppen har fået en videnskabelig artikel i det

prestigefyldte tidsskrift. Det er sket adskillige gange i løbet af de seneste par årtier, og antistoffet har været omdrejningspunktet for Jeffrey Hangsts karriere endnu længere.

»Vores styrke er netop, at vi kan danne og indfange antiatomerne. Vi er de eneste i verden, der kan gøre det. Vi har indfanget antihydrogenatomer, sluppet dem løs og målt, hvad der sker. Vores målinger viser, at Jorden tiltrækker antihydrogenatomer, og vi kan udelukke, at antistof falder opad,« fortæller han.

Jeffrey Hangst er professor ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet, men tilbringer det meste af sin tid ved det europæiske forskningscenter CERN i Schweiz. Det er nemlig her, fysikerne har mulighed for at eksperimenterer med det ekstremt sjældne og dyrebare antistof. Lige siden 2001 har forskeren med de amerikanske rødder været udstationeret ved CERN, hvor han har udforsket antistoffet i samarbejde med andre forskere

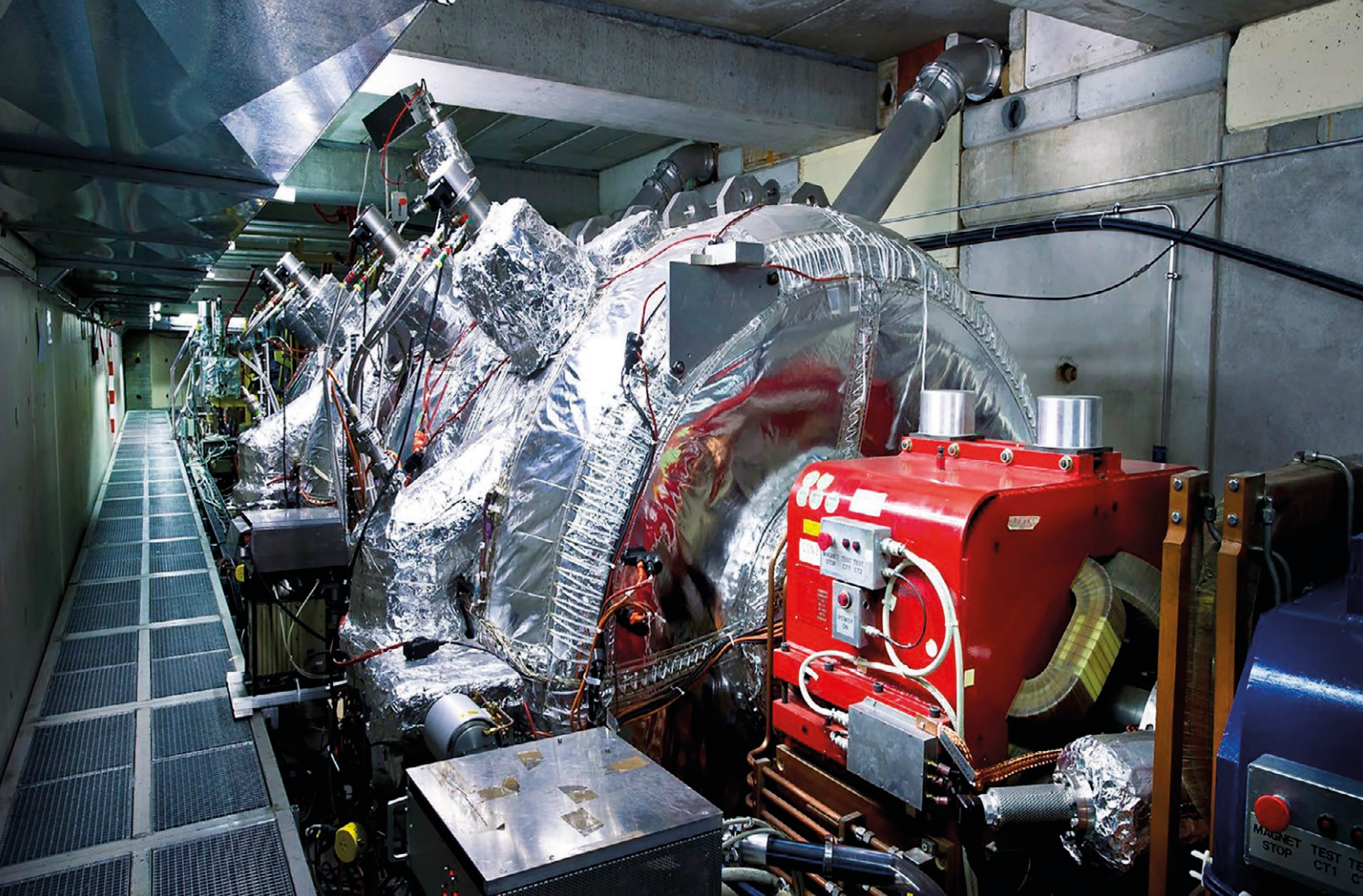
fra Aarhus Universitet og en række andre forskningsinstitutioner rundt omkring i verden.

Universet foretrækker stof frem for antistof

Med lidt god vilje kan man sige, at antistof er stoffets spejlbillede. Antistof ligner almindeligt stof til forveksling, bortset fra den vigtige forskel, at antistoffet har den modsatte elektriske ladning. Til hver en partikel hører en antipartikel, for eksempel har elektronen en antipartikel, der kaldes positronen.

Mange kender antistof fra bøger som for eksempel Dan Browns *Engle og dæmoner*, hvor forbrydere stjæler antistof fra CERN for at bruge det i en bombe. Antistof optræder også i science fictions, hvor det bliver brugt som raketbrændstof.

I litteratur og film bunder fascinationen af antistof først og fremmest i dets højeksplosive natur. Når antistof kommer i kontakt med almindeligt stof, bliver begge dele



tilintetgjort under udsendelse af energi i form af stråling og/eller nye partikler. Massen omdannes til energi jævnfør Einsteins berømte formel $E = mc^2$, hvor E er energi, m er den samlede masse af partiklen og antipartiklen, og c er lysets hastighed. Der skal blot et halvt gram antistof til at skabe samme mængde energi, som blev frigivet af atombomben over Nagasaki.

Men selvom CERN-forskerne nu kan danne og fastholde tusindvis af antiatomer, er der meget langt til det halve gram, og fysikerne tænker da heller ikke i brændstof eller bomber. For dem er det langt vigtigere, at studiet af antistof måske kan føre os på sporet af løsningen på et af fysikkens største mysterier: Hvorfor foretrækker naturen tilsyneladende stof frem for antistof? Hvorfor lever vi i et univers, hvor der er masser af stof, men næsten ikke noget antistof?

»Der mangler antistof i universet. Vi mener, at der ganske tidligt i

universets historie blev dannet lige så meget antistof som stof, men nu er kun stoffet tilbage. Det kan vi simpelthen ikke forklare,« fortæller Jeffrey Hangst.

»Det er ikke sikkert, at studiet af antihydrogen kan opklare mysteriet, men når nu vi har muligheden, ville det være fjollet ikke at forsøge at foretage så præcise målinger som muligt på antistoffet.«

Fysikernes bedste teori for elementarpartikler og deres vekselvirkninger kaldes standardmodellen, og her forudsættes en grundlæggende symmetri mellem stof og antistof. Hvis alt stof i universet blev byttet ud med antistof, universet blev spejlvendt og tiden gik baglæns, ville vi ende med et univers som det, vi bor i.

Men det gælder altså kun, hvis stof og antistof er hinandens spejlbilleder, og antihydrogen opfører sig som hydrogen i de forsøg, som CERN-holderet står bag. Hvis det ikke

er tilfældet, må fysikerne revidere teorierne, og så kan universets forklærlighed for stof frem for antistof måske forklares.

Antiatomer slippes fri

Indtil videre ser det ikke ud til, at der er forskel, og de fleste fysikere forventede da også, at antistof blev påvirket af tyngdekraften på præcis samme måde som almindeligt stof. Ifølge Einsteins almene relativitetsteori kan tyngdekraften beskrives som en krumning af rumtiden, og den krumning forårsages af alle former for energi, inklusive masse. Da antistof har masse, burde det ifølge relativitetsteorien opføre sig som almindeligt stof.

Sagt på en anden måde ville det bryde mod Einsteins ækvivalensprincip, der er en grundlæggende antagelse i den almene relativitetsteori, hvis antistof viste sig at falde opad eller blot falde en smule anderledes end almindeligt stof. Ækvivalensprincippet har som konsekvens, at alle objekter falder

Ved hjælp af Antiproton-decelatoren, der blev taget i brug ved CERN i år 2000, blev det meget lettere for fysikerne at danne antihydrogenatomer. Foto: CERN



Antihydrogenforskningen foregår i en lille del af CERN's enorme acceleratorkompleks, nærmere bestemt i den store antiprotondecelerator-hal, der populært kaldes antistoffabrikken. På oversigtsbilledet er indtegnet de største acceleratorer ved CERN, som er Large Hadron Collider (LHC) og Super Proton Synkrotron (SPS). Fotos: CERN



lige hurtigt i et tyngdefelt, og det gælder altså også antistof.

Der findes dog også fysikere, der har leget med tanken om, at stof og antistof i stedet frastøder hinanden. En del modeller for universets udvikling er baseret på den antagelse. Men disse kosmologiske modeller kan ryge i glemmebogen, efter at det nu er lykkedes at få data baseret på eksperimenter.

»Der er mange argumenter for, at tyngdekraft er universelt tiltrækkende. Men ét er at påstå, at antistof falder nedad, noget andet er at måle det. Fysik er en videnskab, hvor observationen er kongen,« siger Jeffrey Hangst.

Ekperimentet hedder ALPHA-g, hvor ALPHA er en forkortelse for Antihydrogen Laser Physics Apparatus, mens det lille g står for tyngdeaccelerationen ved Jordens overflade. Apparatet blev konstrueret i 2018, efter at Carlsbergfondet støttede med en Semper Ardens-bevilling på 15,5 millioner kroner.

Forsøget er nemt at beskrive. Man fanger en flok antiatomer i et magnetfelt, og så lader man dem undslippe igennem én af to udgange: En foroven og en forneden. Hvis antiatomerne falder opad, vil de fleste af dem smutte ud ad døren foroven og omvendt.

»Når vi slipper antiatomerne løs, er

nogle på vej opad, nogle på vej nedad og nogle bevæger sig sidelæns. Men når de påvirkes af tyngdekraften, bevæger flere sig nedad end opad, og det kan vi måle,« siger Jeffrey Hangst.

Men lige så simpelt eksperimentet lyder, lige så svært har det været at udføre det i praksis, og rejsen dertil har været lang. Man kan faktisk sige, at den startede helt tilbage i 1928, hvor antistof blev forudsagt teoretisk, før det blev fundet eksperimentelt.

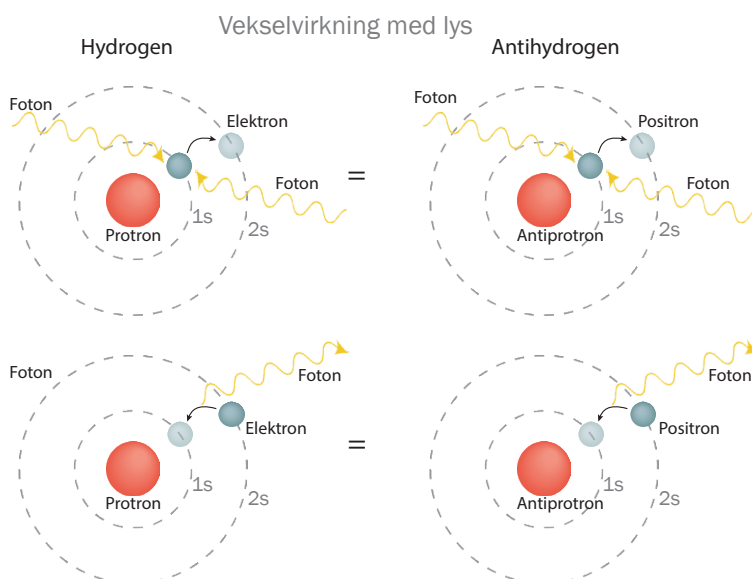
Først forudsagt, så fundet

Sidst i 1920'erne arbejdede den geniale britiske matematiker og fysiker Paul Dirac med at kombinere kvantemekanikken med den specielle relativitetsteori, og i 1928 kom han frem til en ligning, som kan beskrive en elektron, der bevæger sig med en hastighed nær lysets. Men ligningen, der nu kaldes Dirac-ligningen, tillader også en partikel, der til forveksling ligner en elektron, blot med modsat elektrisk ladning.

Tre år senere konkluderede Dirac, at der til enhver partikel måtte høre en antipartikel, altså en partikel med samme masse, men modsat elektrisk ladning. For eksempel burde der eksistere en antielektron med positiv ladning og en proton med negativ ladning. Det var en påstand, som var svær at tage for gode varer, for sådanne antipartikel-

Det kræver præcis samme mængde energi at løfte hydrogen og antihydrogen fra grundtilstanden til første exciterede tilstand – dvs. at få henholdsvis en elektron og en positron til at skifte bane fra 1s til 2s (øverst).

Når elektronerne skifter tilbage til grundtilstanden (nederst), kan forskerne måle frekvensen (farven) af lyset ved denne overgang med stor præcision.



ler var aldrig blevet observeret.

Men det ændrede sig i 1932, hvor den amerikanske fysiker Carl Anderson opdagede et spor efter en hidtil ukendt partikel i sit tågekammer. Partiklen havde præcis samme masse som elektronen, men en positiv frem for negativ ladning. Det stod klart, da dens bane blev afbøjet i et magnetfelt nøjagtigt som en elektrons bane ville gøre det, men i den modsatte retning.

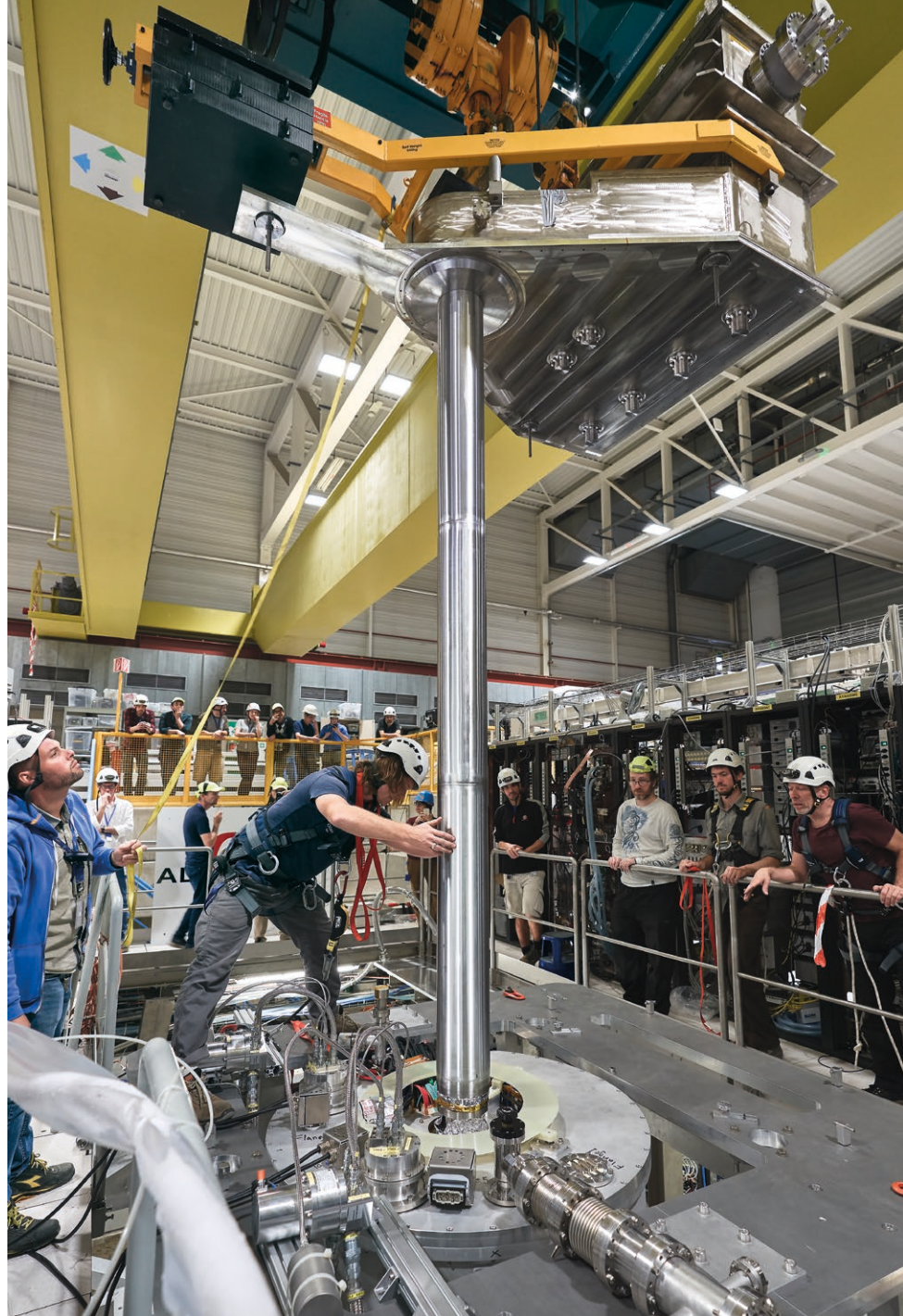
Elektronens antipartikel fik navnet positronen. Paul Dirac fik Nobelprisen i fysik i 1933, mens Carl Anderson modtog den tre år senere. Begge var blot 31 år, da de fik den prestigefyldte pris.

Den positron, som Carl Anderson så sporet efter i tågekammeret, stammede fra kosmisk stråling. Når energirige partikler – hovedsageligt protoner – fra det ydre rum rammer atomkerner i atmosfæren, opstår der nye, eksotiske partikler, der hurtigt henfalder. Blandt henfaldsprodukterne finder man positroner.

Det blev hurtigt klart, at positroner også udsendes af visse radioaktive isotoper (grundstofvarianter). For eksempel rummer naturligt forekommende kalium cirka 0,01 procent radioaktivt kalium-40, der primært henfalder ved beta-plus-henfald, hvor der udsendes en positron. Da bananer rummer meget kalium, producerer bananer faktisk ganske små og fuldstændig uskadelige mængder positroner, der hurtigt forsvinder i mødet med elektroner.

Efter opdagelsen af positroner gik jagten på antiprotoner ind, og her fik fysikerne hjælp fra partikelacceleratorer. Små acceleratorer dukkede op i 1930'erne og 1940'erne, men der skulle en stor accelerator til, før antiprotoner kunne produceres.

Først i 1955 lykkedes det amerikanske forskere ved Lawrence Berkeley National Laboratory at frembringe antiprotoner. De brugte den nye,



Billedet viser ALPHA-g kryostatens, der indeholder alle superledende magneter og partikelfælder (Penning) til ALPHA-g-eksperimentet. Foto: CERN

store accelerator Bevatron til at accelerere protoner op til meget høje energier (over 6 GeV) og lade dem kolliderer med et metalmål, hvorved et væld af nye partikler – herunder ind mellem en antiproton – opstod. Den eksperimentelle påvisning af antiprotoner kastede også et par Nobelpriser af sig.

Antiprotoner skal bremses

Med antiprotoner og positroner har man ingredienserne til at fremstille antiatomer i form af antihydrogen. Men det er nemmere sagt end gjort, for de nyskabte antipartik-

ler har godt med fart på, så de er svære at holde styr på. Det bliver ikke nemmere af, at det er bydende nødvendigt at holde antistof isoleret fra almindeligt stof, så begge dele ikke forsvinder i et glimt af elektromagnetisk stråling.

I 1995 lykkedes det forskere fra CERN at fremstille ni antiatomer ved at bombardere xenongas med milliarder af antiprotoner igennem tre uger. Antiatomerne holdt kun i 40 milliardtedele af et sekund, før de forsvandt ved sammenstødet med almindeligt stof.

Sådan målte fysikerne tyngdekraftens påvirkning af antistof

CERN rummer et enormt kompleks af accelerators beregnet til eksperimenter med højenergifysik. Grafikken viser øverst det udsnit af det samlede kompleks, som er relevant for antistofforskningen (de stiplede linjer viser, at protonsynkrotronen er forbundet til en række andre accelerators og eksperimenter på CERN).

Nederst i grafikken zoomes ind på selve eksperimentet, hvor fysikerne målte tyngdekraftens påvirkning af antistof. Bemærk, at i højenergifysikken måles partiklers energi i elektronvolt (eV), hvor en elektronvolt svarer til $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule.

- 2 I antiprotondeceleratoren bliver antiprotonerne bremset ned til en energi på 5,3 megaelektronvolt (MeV) ved hjælp af kraftige elektriske felter.

Antiprotondecelerator (182 meter)
ELENA (Extra Low ENergy Antiproton)

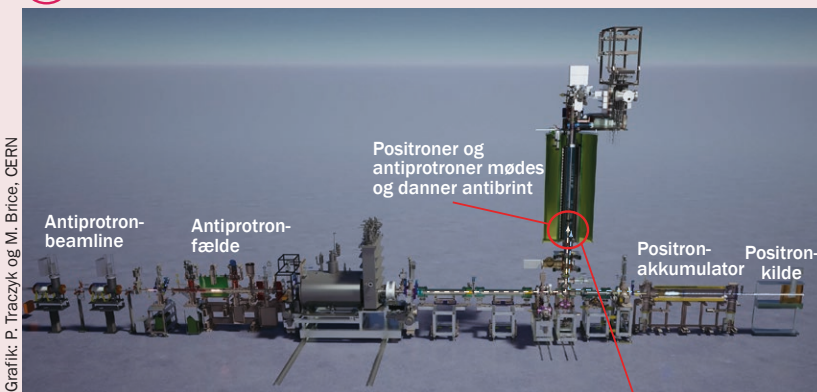
- 1 Antiprotoner skabes, når protoner fra den 628 meter lange accelerator Proton Synkrotron (PS) kolliderer med iridium. Antiprotonerne sendes videre til den 182 meter lange antiprotondecelerator (AD).

- 3 En ekstra antiprotondecelerator kaldet ELENA (Extra Low ENergy Antiproton) bringer energien ned på 0,1 MeV. Herfra sendes antiprotonerne videre til forskellige eksperimenter.

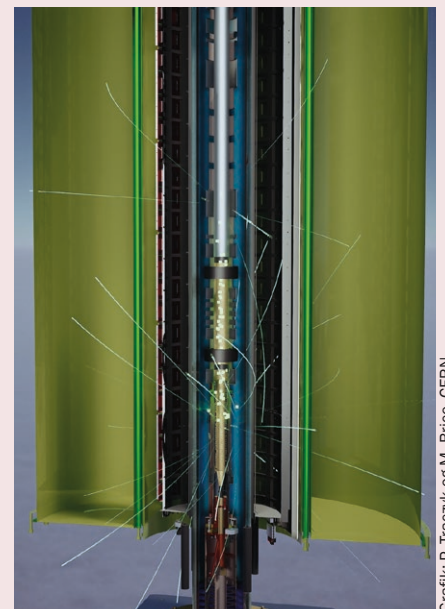
► = protoner
► = antiprotoner

Protonsynkrotron (628 meter)

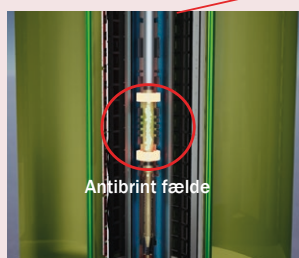
- 4



Antiprotonerne fra ELENA fanges i elektriske og magnetiske felter i en såkaldt Penning-fælde og afkøles, før de sendes ind i ALPHA-g. Her møder de positroner opsamlet fra radioaktivt natrium, så der dannes antihydrogenatomer. Det er helt afgørende, at antihydrogenatomer dannes ultrakoldt – med en temperatur under 0,5 K, for at de kan fanges.



- 5 Antihydrogenatomerne har ingen elektrisk ladning, men de har et magnetisk dipolmoment, der gør det muligt at opbevare dem i et kraftigt magnetfelt. Cirka 100 antiatomer opsamles, før de frigives, så de enten forlader fælden foroven eller forneden.



- 6

Når et antiatom kolliderer med væggen i ALPHA-g, tilintetgøres det, og der dannes herved nye partikler (pioner), som forskerne kan detektere. På den måde kan forskerne tælle sig frem til, at langt de fleste antihydrogen-atomer falder mod bunden af fælden, før de forlader den, og antistof derfor falder nedad.

Se også en animation på YouTube:



Hvis fysikerne skulle gøre sig håb om at fastholde og måle på antiatomer, var det afgørende at bremse antiprotonerne ned, før de blev kombineret med positroner. Jeffrey Hangst var medvirkende til, at CERN besluttede at bygge The Antiproton Decelera-

tor, der stod klar i 2000. Med de nedbremsede antiprotoner blev det meget lettere at danne antihydrogenatomer.

»Vi har brug for antihydrogen, for det er perfekt til at undersøge, hvordan antistof opfører sig. Lige

siden Niels Bohrs dage har vi kendt almindeligt hydrogen rigtig godt, og vi har foretaget ekstremt præcise målinger på det. Når vi kan danne og indfange antihydrogenatomer, kan vi måle på dem og sammenligne med hydrogenatomer,« siger Jeffrey Hangst.

Han stod i spidsen for eksperimentet Athena, hvor antiprotoner fra deceleratoren blev bremset yderligere ned og kombineret med positroner fra radioaktivt natrium-22. I 2002 kunne forskerne vise, at Athena frembragte tusindvis af antihydrogenatomer.

Men det krævede en ny og forbedret forsøgsopstilling med en antihydrogenfælde i form af et kraftigt magnetfelt med en særlig udformning at opbevare antistoffet længe nok til, at der kunne måles på det. Den fik navnet ALPHA, og i 2010 lykkedes det at fange 38 antihydrogenatomer i 172 millisekunder. Året efter kunne holdet bag ALPHA meddele, at de nu kunne opbevare hundredvis af antiatomer i 1000 sekunder, altså godt 16 minutter.

Antihydrogen udsender samme lys som hydrogen

Endelig var vejen banet for at måle antihydrogens egenskaber. Så fysikerne satte sig for at finde ud af, om antihydrogen vekselvirker med lys – fotoner – på samme måde som almindeligt hydrogen. Tilbage i 1913 fandt Niels Bohr ud af, hvorfor hydrogenatomer absorberer og udsender lys med ganske bestemte bølgelængder, og nu ville Jeffrey Hangst finde ud af, om antihydrogenatomer udsender lys ved præcis samme bølgelængder.

ALPHA blev opgraderet til ALPHA-2, som blev forsynet med et vindue i antiatomfælden, så laserstråler kunne bringe antihydrogenatomerne i en højere energitilstand. I 2016 kunne fysikerne lave de første målinger på antiatomer, der vekselvirker med laserlys.

To år senere var målingerne 100 gange mere præcise, så forskerne nu kan sige, at antihydrogen opfører sig præcist som hydrogen, når det gælder vekselvirkningen med lys. Der skal samme energi til at løfte hydrogen og antihydrogen fra grundtilstanden til første exciterede tilstand.

Med det resultat i hus kastede forskerne sig over tyngdekraftmå-



Indsættelse af ALPHA-g annihilationsdetektoren, der måler positionen af antihydrogen-annihileringerne, når atomerne slipper ud. Foto: CERN

lingerne med ALPHA-g, fortæller Jeffrey Hangst:

»Der var rigtig meget, vi skulle lave om, for hvor ALPHA-2 ligger vandret, skulle vi bruge en lodret antihydrogenfælde for at måle tyngdekraftens virkning. Vi skulle dreje hele apparatet 90 grader, og det er meget krævende at få antiprotonerne til at skifte retning.«

ALPHA-g er da også et enormt apparat, der fylder flere etager, selv om selve atomfælden blot er 25,6 cm høj og 4,4 cm i diameter. Det var fra denne fælde, antihydrogenatomerne kunne slippe væk gennem åbninger foroven og forneden. Da de fleste faldt mod bunden af fælden, kan CERN-fysikerne nu sige, at anti-stof falder mod Jorden på samme måde som almindeligt stof.

Måleusikkerhederne er betydelige, så fysikerne kan ikke fuldstændig afvise, at der er forskel på, hvor hurtigt stof og antistof falder i et tyngdefelt. Men de kan sige, at anti-stof i hvert fald ikke falder opad.

Næste skridt er at forfine målingerne og gøre usikkerhederne mindre, men det kræver en ny og bedre udgave af ALPHA-g. Specielt skal antiatomerne køles ned, så de bevæger sig langsommere.

»I dag har de antihydrogenatomer, vi fanger, en temperatur på 0,5 grader over det absolutte nulpunkt ved $-273,15$ °C. Men med laserkøling kan vi få temperaturen helt ned på 10 millikelvin, altså 50 gange koldere. Det svarer til, at antiatomerne bevæger sig syv gange langsommere, og så kan vi lave langt bedre målinger,« fortæller Jeffrey Hangst og fortsætter:

»I år satser vi på at forbedre vores spektroskopiske målinger af antihydrogen, så de bliver lige så præcise som for hydrogen. Og i løbet af 2024 vil vi foretage mere præcise målinger af tyngdekraftens påvirkning på antihydrogen.«

Fysikerne ved CERN's antistof-fabrik har fast arbejde i nogle år endnu. ■

Videre læsning:

Artiklen i *Nature*: Anderson, E.K., Baker, C.J., Bertsche, W. et al. Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter. *Nature* 621, 716–722 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06527-1>

Animation på YouTube: <https://youtu.be/zpQQ43nrCp4?si=h2jwKtsKFvmOdCHY>
Kredit: P. Traczyk og M. Brice, CERN

Se mere om ALPHA: alpha.web.cern.ch

Læs mere om antipartikler og antihydrogen i *Aktuel Naturvidenskab*: Niels Madsen: Greb om antibrint – virkelighedens Engle og dæmoner. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2/2006

Helge Knudsen og Ulrik Uggerhøj: Antipartikler. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6/2001