

Jagten på antityngdekraft og forklaringen på vores eksistens

Peter Granum, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Fysikkens Standardmodel forudsiger, at antistof, der er "spejlbilledet" af stof, som vi kender det, er et *nøjagtigt* spejlbillede. Dette kan dog konkluderes at være i uoverensstemmelse med vores blotte eksistens. Ved ALPHA-eksperimentet ved CERN måler vi egenskaberne af antibrint for at kunne lave en direkte sammenligning med brint og derved komme tættere på at besvare nogle af fysikkens ubesvarede spørgsmål.

Opdagelsen af antistof

I starten af 1900-tallet havde man ikke nogen god model for atomet. Ernest Rutherford foreslog i 1911 en model, hvor elektroner kredser omkring en atomkerne, men hans model havde store problemer. Det blev Niels Bohr, der løste disse problemer ved at foreslå, at elektronerne er begrænset til at bevæge sig i bestemte baner eller skaller – svarende til bestemte energier – omkring kernen. Atomets energispektrum er derfor kvantiseret.

En vigtig forudsætning for Bohrs model var Max Plancks arbejde fra 1900. Planck forsøgte at forklare et andet af datidens problemer i fysikken¹ ved at foreslå, at energien af lys er kvantiseret. Baseret på denne idé beskrev Albert Einstein i 1905, hvordan fotoner kan forårsage overgange af elektroner mellem energiniveauer, hvis fotonens energi svarer til forskellen mellem

niveauerne. Ved hjælp af lys kan man altså undersøge et stofs energispektrum, som er unikt for stoffet – det er en slags fingeraftryk. Einstein forklarede herved den fotoelektriske effekt. Kvantiseringen af energien af lys og atomets energitilstande var vigtige elementer i fødslen af et nyt felt: kvantemekanikken.

Kvantemekanikken skulle vise sig at forårsage et paradigmeskift i fysikken. Den var langt fra komplet ved fødslen, men tog mange år at udvikle. Paul Dirac arbejdede i slutningen af 1920'erne på at indkorporere relativitetsteorien i kvantemekanikken. I sit arbejde kom Dirac frem til en ligning, der havde løsninger med både "positiv og negativ masse eller energi". I fysikken er vi vant til at forkaste matematiske løsninger, der ikke giver fysisk mening, men Dirac holdt fast i sine løsninger med negativ energi, og han endte med at forudsige eksistensen af antistof i 1928.

Fysikere med historisk centrale roller for nutidens antistofforskning



Paul Dirac (t.v.) var en engelsk teoretisk fysiker født i 1902. Han er kendt for at inkorporere relativitetsteorien i kvantemekanikken og forudsige eksistensen af antistof. For sit arbejde modtog han Nobelprisen i fysik i 1933.

I 1905 blev Carl Anderson (midt) født af svenske immigranter i New York. Han skulle senere, i 1932, bekræfte eksistensen af positronen ved at undersøge kosmisk baggrundsstråling i et tågekammer. For sin opdagelse modtog han Nobelprisen i fysik fire år senere. Samme år opdagede han også myonen.

Andrei Sakharov (t.h.) blev født i Moskva i 1921 og arbejdede med kernefysik, partikelfysik og kosmologi. Han er kendt for at opstille kriterierne opkaldt efter ham, men han er måske mest berømt for at være "den sovjetiske brintbombs fader". Han markerede sig senere som systemkritiker og menneskerettighedsforkæmper og modtog Nobels fredspris i 1975.

¹Et problem med sort-legeme-hulrumsstrålingen også kaldet den ultraviolette katastrofe.

Antistof er i følge Dirac et slags spejlbillede af "normalt" stof. Hver type partikel har således en slags partner, der ligner partiklen selv, men har modsatte egenskaber. For eksempel skal der eksistere en antiproton med samme masse som protonen, men med modsat ladning. Ligeledes skal der eksistere en antielektron (kaldet en positron af historiske årsager), en antineutron og så videre. Med sin forudsigelse fordoblede Dirac på en måde størrelsen af det kendte univers! Da folk blev opmærksomme på den mulige eksistens af antistof, varede det ikke længe, før dets eksistens blev bekræftet. Det skete ved Carl Andersons opdagelse af positronen i 1932.

Einsteins berømte ligning $E = mc^2$ fortæller os, at der er en ækvivalens mellem energi og masse. Det vil sige, at hvis en partikel møder sin antipartikel, vil de annihilere og derved omdannes til ren energi. Omvendt kan man med nok energi danne et partikel-antipartikel-par! Dette er, hvad der skete ved universets fødsel, hvilket vil sige, at der bør være lige meget stof og antistof i universet. Kigger vi omkring os – ikke blot på Jorden, men i universet – ser vi dog primært stof. Det rejser det åbenlyse spørgsmål²: hvor er alt antistoffet henne? Burde Universet ikke have annihileret for længe siden?



Figur 1. Antistoffabrikken på CERN.

I 1987 opstillede Andrei Sakharov tre kriterier for vores univers' eksistens kendt som Sakharovkriterierne. Lidt forsimplet siger kriterierne, at der skal være en asymmetri mellem stof og antistof, som har tilladt stof at komme til at dominere over antistof i universet. Det synes logisk, men problemet er, at Standardmodellen, der er fysikkens bedste bud på en model for universet, forudsiger, at der er komplet symmetri mellem stof og antistof. De bør altså være hinandens perfekte spejlbil-lede, og der bør eksistere lige meget stof og antistof.

Man fristes måske til at krølle Standardmodellen sammen og smide den i skraldespanden, men Standardmodellen er en utroligt succesfuld model, der blandt andet forudså eksistensen af Higgspartiklen, der blev opdaget ved CERN i 2012. Den er resultatet af alt det arbejde, der er udført siden udviklingen af kvantemekanikken for over 100 år siden. Så hvordan løses denne uenighed mellem Standardmodellen og Sakharovkriterierne? Det åbenlyse svar synes at være at undersøge antistofs egenskaber grundigt og sammenligne dem

²Dette spørgsmål har tidligere været behandlet i en artikel i KVANT [8]

Antistof ved CERN

CERN er nok mest kendt for den 27 km lange acceleratorring, LHC, der løber under jorden uden for Genève, men der foregår meget andet på CERN. Ved at bombardere en blok lavet af iridium kan den samme protonstråle, der løber i LHC'en, bruges til at danne antiprotoner. Det er udnyttelse af Einsteins $E = mc^2$. Antiprotonerne indfanges og bremses i CERN's "Antimatter Factory". I antistoffabrikken er der endnu en ring kaldet Antiproton Deceleratoren (AD'en). Som navnet antyder er AD'ens formål at decelerere antiprotonerne til lavere energi. Dette er modsat de fleste andre accelerators, som for eksempel LHC'en, der accelererer partikler op til høj energi.

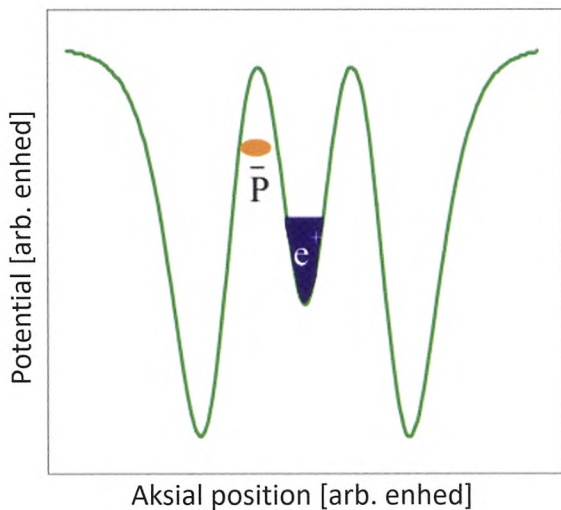
AD'en kan levere antiprotonerne videre til de forskellige eksperimenter i AD-hallen: AEGIS, ALPHA, ASACUSA, BASE og GBAR. BASE undersøger antiprotonens egenskaber, mens de resterende eksperimenter arbejder med antibrint. ASACUSA arbejder desuden med antiprotonisk helium. Udover antiprotoner kræves der naturligvis positroner for at lave antibrint. I ALPHA får vi vores positroner fra en Na-22-kilde, der er β^+ -radioaktiv. Omkring tre millioner positroner og 100.000 antiprotoner kan blandes ad gangen til at give blot 20 antibrintatomer i ALPHA's atomfælde. Fælden er det eneste apparat i verden, hvor antibrint kan dannes og efterfølgende holdes fanget.

ALPHA-kollaboration blev stiftet af Jeffrey S. Hangst, som leder eksperimentet. Der kan læses mere om ALPHA og forskningen i antistof i [6].

med stofs. Det er netop, hvad vi gør ved ALPHA-eksperimentet ved CERN.

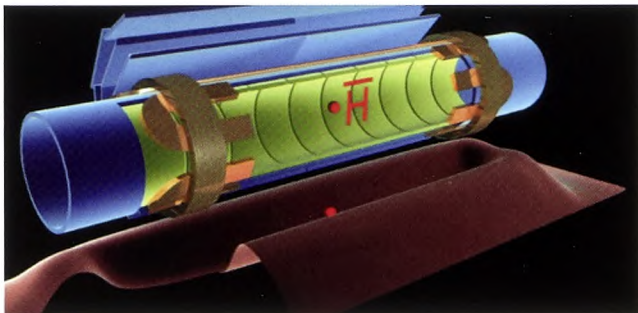
ALPHA-eksperimentet

I ALPHA-eksperimentet kontrolleres de elektrisk ladede positroner og antiprotoner med elektromagnetiske felter, mens det elektrisk neutrale antibrint kontrolleres med magnetfelter genereret af superledende magneter kølet til 4 K med flydende helium. I vores atomfælde, hvor positronerne mødes med antiprotonerne, danner elektroderne et "nested" potential (se figur 2), der kan holde både de positive positroner og de negative antiprotoner fanget. Ved at justere potentialet kan partiklerne bringes til at overlappende, så de kan binde sig til hinanden og danne antibrint. En octupolmagnet sørger for den radiale indeslutning af antibrintatomerne ved at interagere med deres magnetiske dipolmoment, mens "spejlspoler" (korte solenoider) indeslutter dem aksialt. Tilsammen danner magneterne et "badekarformet" potential, som det er illustreret på figur 3. Potentialt kan fange de langsomste af de dannede antiatomer.



Figur 2. Det aksiale potential, der bruges til at holde positroner og antiprotoner fanget og blande dem for at få antibrint.

Ved at holde antibrint fanget i et ultrahøjt vakuum og lyse på det med lasere med den rette bølgelængde, er det lykkedes os at måle flere overgange i antibrints energispektrum. Vi har for nyligt offentliggjort en måling af finstrukturen i 2P-niveauet [2]. Den mest nøjagtigt målte overgang er mellem 1S- og 2S-niveauerne, og den er målt med en relativ præcision på omkring 10^{-12} [1]. Til sammenligning er præcisionen for brint omkring 10^{-15} [7]. Den væsentligste konklusion er, at der selv med denne præcision ikke har vist sig at være nogen forskel på energispektrene for brint og antibrint – indtil videre.



Figur 3. Skitse af atomfælden i ALPHA-2. To spejlspoler i enderne og en octupol (orange) skaber tilsammen et badekarformet potential, der kan holde antibrint fanget. Elektroder (gul) og detektor (blå) er også vist.

Det er dog ikke givet, at det er i energispektret, at en eventuel forskel mellem stof og antistof skal findes. En anden mulighed er, at deres interaktion med tyngdekraften er forskellig. Et lidt naivt argument kan konstrueres ved at sammenligne Coulombs lov med Newtons tyngdelov. Coulombs lov giver kraften, \vec{F} , mellem to ladninger, q_1 og q_2 , som en funktion af afstanden mellem ladningerne, \vec{r}

$$\vec{F} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

Denne kraft kan som bekendt være frastødende, hvis de to ladninger har samme fortegn. Ligeledes er den

gravitationelle kraft mellem to masser, m_1 og m_2 , givet ved

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2)$$

Proportionalitetskonstanterne k_e og G er forskellige, men ellers ligner de to udtryk hinanden. Dog har man indtil videre ikke observeret en “negativ masse”, så kraften vil altid være tiltrækkende. Tingene er mere komplicerede end som så, men det er en interessant tanke, at antistof ikke behøver at falde nedad. Faktisk er der forskere, der hævder, at det blandt andet ville forklare mørkt stof og mørk energi, hvis antistof så at sige “faldt opad” i Jordens tyngdefelt [5]. Det er dog en kontroversiel holdning.

ALPHA demonstrerede i 2013 en metode til at bestemme accelerationen af antibrint i Jordens tyngdefelt [4]. Metoden er simpel: at fange og holde antibrint, slippe det, og se, hvor det går hen. Metoden blev demonstreret i ALPHA-2-atomfælden beskrevet tidligere, men det er en horisontal fælde. Målingen vil kræve en vertikal version af fælden, hvor faldvejen er længere. Derfor begyndte vi i 2018 konstruktionen af ALPHA-g, som er en tilføjelse til det eksisterende eksperiment.

Antager vi, at Jordens tyngdefelt genererer en nedadrettet kraft på antibrint, vil antibrint se et lineært potential som det på figur 4. To spejlspoler placeret i forskellige højder genererer den aksiale indeslutning, der ses som to barrierer. Sendes den samme strøm gennem de to spoler, dannes lige høje barrierer (blåt potential på figur 4). Hvis man fanger antibrint med lav energi i dette potential og derefter gradvist sænker barriererne, vil langt de fleste antiatomer undslippe til venstre/nedad.

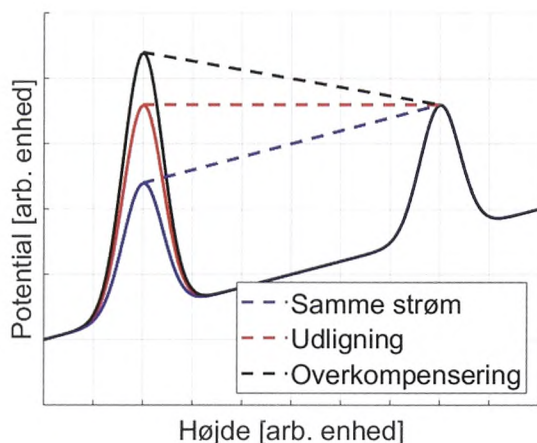
Er strømmen i den nederste spole derimod højere end i den øverste, så det totale potential ved de to spoler bliver lige stort, er der en lige stor sandsynlighed for, at antibrinten undslipper opad eller nedad. Ved at detektere, hvor antibrinten undslipper og annihilere, kan man bestemme, hvornår man har kompenseret for tyngdekraftens effekt!

Fordi tyngdekraften er en meget svag kraft sammenlignet med den elektromagnetiske, er det praktisk talt umuligt at bestemme tyngdeaccelerationen af elektrisk ladet stof/antistof på samme måde, som vi planlægger i ALPHA. Interaktionen mellem ladede partikler og elektrisk støj genereret af udstyr er simpelthen meget større end tyngdekraftens effekt. Eftersom ALPHA indtil videre er den eneste gruppe i verden, der kan danne elektrisk neutralt antistof og fange det, er der ikke nogen, der hidtil har kunnet lave en sådan måling.

Udvidelse af Standardmodellen

Selvom Standardmodellen er meget succesfuld, er der mange tilfælde, hvor den kommer til kort. Arbejdet med at udvide Standardmodellen er derfor et stort felt. At udvide modellen er egentlig “ligetil”, men en teori skal også kunne testes eksperimentelt. Ofte er størrelsen af nye, forudsagte effekter ukendt, og eftersom eksperimenter aldrig er 100% nøjagtige, sætter de altid blot en øvre grænse for disse effekter. Når vi har målt

en overgang mellem to energiniveauer med en relativ præcision på 10^{-12} , kan vi derfor kun udelukke effekter af en tilsvarende størrelse. Desuden er det kun effekter, der ville vise sig i den givne overgang, vi tester for. En række udvidelser af Standardmodellen, der er relevante for antibrint, er beskrevet i [3].



Figur 4. Potentialet set af antibrint som funktion af højde. De to endebARRIERER er genereret af spejlspoler. Ved at sende en stærkere strøm gennem for eksempel den nederste spole, kan tyngdekraftens effekt udlignes (rød kurve). Den blå kurve illustrerer identiske strømme i spolerne, mens den sorte kurve illustrerer overkompensering.

En mulig udvidelse forudsiger eksistensen af en såkaldt “gravivector”, der skulle være årsag til en tyngdekraft, der virker ud over den “normale” tyngdekraft. Til forskel fra den normale tyngdekraft, der kobler til bindingsenergien af for eksempel kvarkerne i en proton, ville gravivectoren udelukkende koble til hvilemassen. I protonens tilfælde udgør kvarkernes hvilemasse omkring 1% af den samlede masse. Gravivectoren ville have den modsatte effekt på stof og antistof, og tyngdekraftens totale effekt på antiprotonen kunne derfor være omkring 1% forskellig fra effekten på protonen. Hvis vi i ALPHA skulle måle en forskel i accelerationen af antibrint i Jordens tyngdefelt, kunne eksistensen af en gravivector være en mulig forklaring.

Fremtidens antistof på CERN

CERN er i øjeblikket midt i en planlagt toårig nedlukning, der varer indtil sommeren 2021. Formålet er at opgradere acceleratorinfrastrukturen. I antistof-fabrikken er en ny lavenergiring, ELENA, ved at bli-

ve installeret. Den vil levere antiprotoner med lavere energi til eksperimenterne, når nedlukningen er ovre. Derved vil flere antiprotoner kunne indfanges. Sammen med nyudviklede teknikker til køling af antibrint tror vi på, at vi i ALPHA har værktøjerne til at matche præcisionen af spektroskopi af brint samt bestemme accelerationen af antistof i Jordens tyngdefelt med 1%’s nøjagtighed. Derved vil vi forhåbentlig blive klogere på, hvorfor vores eksistens overhovedet er mulig.

Litteratur

- [1] M. Ahmadi m.fl. (2018) Characterization of the 1S–2S transition in antihydrogen, *Nature*, bind 557, side 71–75.
- [2] M. Ahmadi m.fl. (2020) Investigation of the fine structure of antihydrogen. *Nature*, *Nature*, bind 578, side 375–380.
- [3] M. Charlton, S. Eriksson og G. M. Shore (2020) Testing fundamental physics in antihydrogen experiments. <http://arxiv.org/abs/2002.09348v1>.
- [4] A.E. Charman m.fl. (2013) Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen, *Nature Communications*, bind 4, side 1785.
- [5] D.S. Hajdukovic (2014) Virtual gravitational dipoles: The key for the understanding of the universe? *Physics of the Dark Universe*, bind 3, side 34–40.
- [6] J. Hangst (2018) Illuminating antimatter, *CERN Courier*, bind 58, side 30.
- [7] A. Matveev m.fl. (2013) Precision measurement of the hydrogen 1S–2S frequency via a 920-km fiber link, *Physical Review Letters*, bind 110, side 230801.
- [8] B.L. Schistad (2019) Antimaterien, der blev væk, *Kvant*, bind 30, nr. 2, side 22.



Peter Granum er ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet under vejleder Jeffrey S. Hangst. Han arbejder ved ALPHA-kollaborationen, der undersøger antibrint, ved CERN. Hans fokus er udviklingen af magnetsystemet til ALPHA-g-eksperimentet, der skal undersøge, hvordan antibrint påvirkes af Jordens tyngdefelt.

Lars Occhionero, suppleant
Peter Andreassen, suppleant

Tak til Majken

Bestyrelsen vil gerne rette en stor tak til afgangende formand Majken Brahe Ellegaard Christensen for hendes store arbejde for Astronomisk Selskab, herunder hendes arbejde med sikring af selskabets arkivalier og mediedækningen af Einsteinbrevene. Bestyrelsen ser frem til at følge Majken i hendes fortsatte arbejde med astronomiformidling.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab har efter generalforsamlingen den 5. september afholdt konstituerende bestyrelsesmøde, og bestyrelsen består nu af følgende:

Andreas Kjær Dideriksen, formand
Johan Fynbo, næstformand
Peter Stub Jørgensen, kasserer
Julie Søgaard, bestyrelsesmedlem
Christina Toldbo, bestyrelsesmedlem
Søren K. Lynggaard, bestyrelsesmedlem