

Antibrint aflivet!

- eller blot i venteposition?

Ove Nathan

Når et gigantprojekt står på dagsordenen, og budgettet er begrænset, så kan de små komme i klemme. Sådan gik det i CERN, da man i slutningen af 1994 omsider fik grønt lys for bygning af LHC, Den Store Hadron Kollider, den maskine som om godt et årti vil markere CERN på landkortet som verdens mest avancerede højenergilaboratorium. Med LHC (omtalt af John Renner Hansen i KVANT 1991) regner man med i år 2008 at kunne studere protonstød et godt stykke oppe i TeV området. Gennem en analyse af sådanne stød vil man kunne spore kvarkernes og gluonernes opførsel ved disse høje energier inde i de stødende proton-partikler. Håbet er, at man på den måde kan få afdækket dele af den såkaldte Higgs-mekanisme, som synes at være nøglen til forståelsen af elementarpartiklernes masse.

Beslutningen om LHC er på flere måder positiv for højenergifysikken i almindelighed og for europæisk højenergifysik i særdeleshed. Men det er ærgerligt, at CERN samtidig har måttet acceptere et slagteoffer, som næppe vil indebære megen reel økonomisk besparelse, men som symbolsk skal demonstrere sparevilje. Det drejer sig om LEAR, en mindre ring-maskine i CERNs maskinpark, hvis specialitet er at lagre antiprotoner ved lav energi. Det mindre måtte vige for det gigantiske, uanset at LEARs lavenergetiske antiprotonfacilitet er enestående lige nu, globalt set, og uanset at der i feltet omkring LEAR er tegnet ganske fascinerende fremtidsperspektiver. En dag får LEAR vel en efterfølger et eller andet sted i verden, og så kommer "kolde" antiprotoner på tapetet igen. Men i en årrække vil den slags fysik få trange kår.

Men gemt bør ikke være glemt, og det gælder ikke mindst ideen om at bruge LEAR til at producere og studere brintatomets modstykke, antibrint. Antibrint er det - stabile - atom, der består af en antiproton og en positron. Nok er antiprotoner og andre antipartikler blevet rutine i nutidens højenergilaboratorier, men elektrisk neutralt, atomart antistof er så delikat at producere, at det endnu har unddraget sig et eksperimentelt studium. Perspektivet er ellers spændende nok: via spektroskopi med antibrint vil man kunne afprøve symmetrien mellem stof og antistof mere direkte end man hidtil har kunnet gøre det. Pointen er, at atomfysikken har ekstremt præcise metoder til måling af fundamentale fysiske størrelser. Dertil kommer, at man vil kunne afprøve antistoffets opførsel i et gravitationsfelt under adskilligt bedre betingelser end man har kunnet gøre fx med antiprotoner, netop fordi antibrint er neutralt, og dermed mindre udsat for forstyrrelser fra elektriske felter i forsøgsopstillingen.

Den fundamentale symmetri mellem stof og anti-

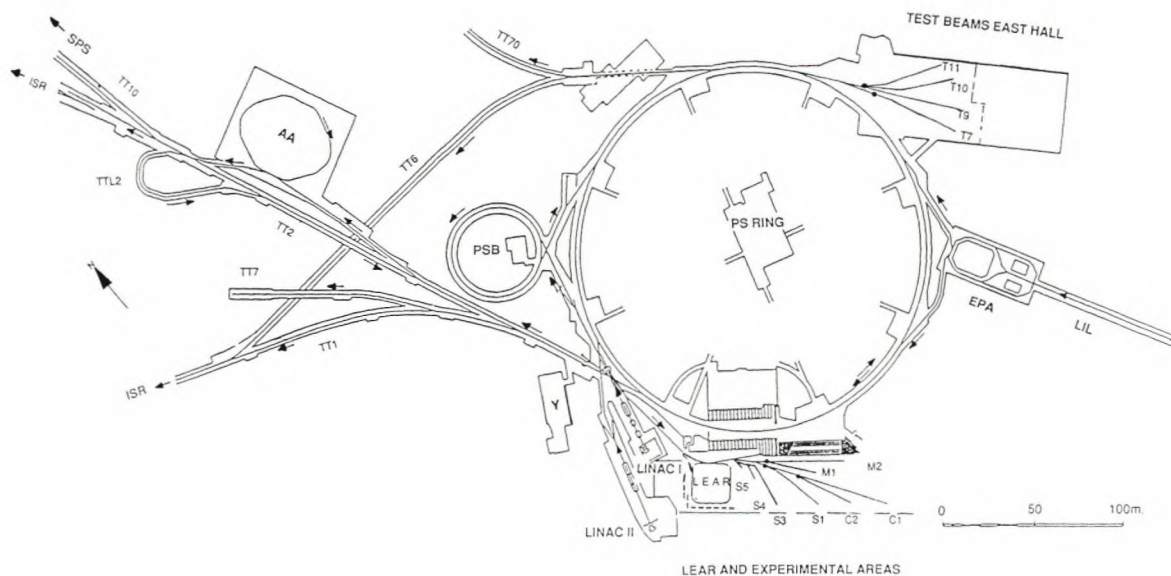
stof udtrykkes i den relativistiske kvantefeltteori ved det såkaldte CPT teorem (C = ladning, P = paritet, T = tid), hvis generelle gyldighed ikke er blevet antastet i tidens løb. Derimod ved vi, at symmetriegenskaberne undertiden bryder sammen, når en af de tre transformationer ikke udføres. Således er der ikke paritetsbevarelse i svage vekselvirkningsprocesser, som fx beta-henfald. En total CPT operation indeholder en ladningsomvendning, en paritets-transformation og en tidsomvendning, og den kombinerede udførelse af disse tre operationer transformerer en partikel over i en antipartikel. Eksperimentelt kan gyldigheden af CPT symmetrien afprøves ved at sammenligne egenskaber ved partikler og antipartikler. Inertimasserne (de træge masser) af en elementarpartikel og dens antipartikel forudsiges at være eksakt ens, og ladningerne forudsiges at være af modsat fortegn, men af nøjagtig samme størrelse. Og i sammensatte systemer som brint og antibrint skal de atomare spektre være ens. Det gælder både grovstrukturen, finstrukturen, hyperfinstrukturen og Lamb skiftet. Hvis fremtidige eksperimenter skulle vise, at dette ikke er tilfældet, vil den relativistiske kvantefeltteori komme i vanskeligheder. Hughes² opregner en række mekanismer, som kunne give anledning til brud på en ideel CPT symmetri. Hans konklusion er, at selvom CPT symmetrien endnu ikke er blevet antastet, så er den dog ikke på samme urokkelige grund som fx energibevarelsen er.

Den hidtil nøjagtigste test af stof-antistofsymmetrien kommer fra en sammenligning af masserne af den neutrale K^0 meson og dennes antipartikel. For dette system har man målt en relativ inerti-masseforskel på mindre end $5 \cdot 10^{-18}$. Men målingen er ret indirekte. Den beror på et studium (Carosi et al., CERN 1990) af den neutrale K^0 mesons henfald til to pioner, hvorfra man kan slutte sig til den nævnte masseforskel. Ordet masse henfører her udtrykkeligt til inertimasse eller træg masse, ikke til den tunge masse, der giver sig til kende i et tyngdefelt.

Mere direkte målinger af masseforskellen foreligger for det baryonsystem, der består af en proton og en antiproton, men her er nøjagtigheden langt lavere, nemlig af størrelsesordenen 10^{-8} (Gabrielese et al., CERN/LEAR 1990). Det man direkte måler er strengt taget ikke en forskel mellem inertimasser, men mellem cyklotron-frekvenser, dvs forskelle i forholdet mellem ladning og masse for proton og antiproton.

I lepton systemer er den nøjagtigste eksperimentelle test af stof/antistofsymmetrien en sammenligning mellem de magnetiske momenter af elektronen og positronen. Den relative afvigelse er målt til at være mindre end 10^{-10} .

Hvis man havde antibrint til rådighed i tilstrækkelig



Figur 1. Det nuværende acceleratorkompleks i CERN. LEAR er det forholdsvis lille anlæg fornedet i billedet

mængde ville studiet af stof/antistof symmetrien kunne få nye og attraktive facetter. De skarpslebne metoder, der idag er udviklet til optisk spektroskopi af hydrogenatomet, vil kunne bruges til anti-hydrogen, med ekstrem præcision som målsætning. Hughes har fx påpeget, at energiforskellen mellem brintatomets grundtilstand og den metastabile $2s$ tilstand nu kendes med en præcision af 5 dele på 10^{10} . Den teoretiske grænse for nøjagtigheden af denne energimåling sættes af kvantemekanikkens ubestemthedsrelation, taget sammen med $2s$ tilstandens kendte levetid. Man er faktisk ret tæt på denne teoretiske grænse idag, nemlig mindre end end 5 størrelsesordener. Og en skærpelse af målenøjagtigheden er på vej, via lasertechnologi og nye metoder til fremstilling af ultrakolde atomer (T.Andreae et al., 1992). Hughes bemærker iøvrigt, at en ultra-nøjagtig, sammenlignende måling af Rydbergkonstanten for brintatomet og anti-Rydbergkonstanten for antibrintatomet vil muliggøre en direkte sammenligning mellem størrelsen af den sædvanlige elektriske elementarladning og den tilsvarende ladning i antistofsystemet. Nøjagtigheden i en sådan måling vil kunne nærme sig den nøjagtighed, som man påberåber sig i det ovennævnte eksperiment med K^0 mesoner. Men medens Rydbergmålingen må siges at udgøre en ret direkte afprøvning af en CPT forudsigtelse, så er bestemmelsen af K^0 masseforskellen en langt mere indirekte sag.

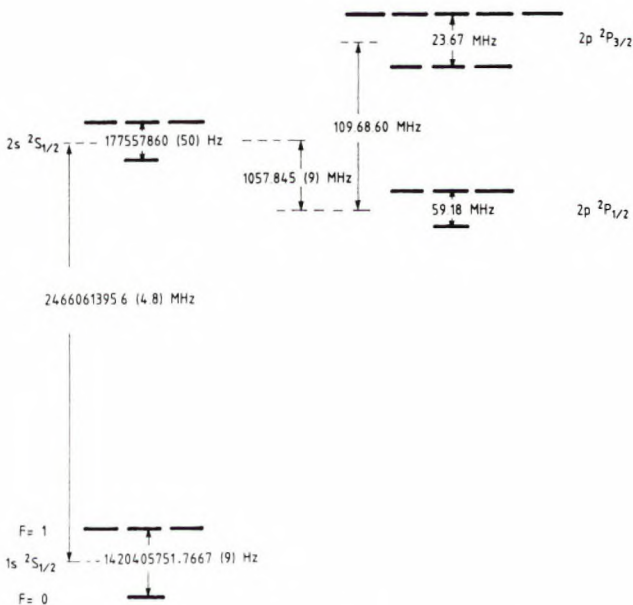
Symmetrien mellem stof og antistof rejser det spørgsmål, om partikler og anti-partikler falder med nøjagtig samme acceleration i tyngdefeltet. Faktisk har det været overvejet, om anti-partiklers gravitationsmasse kunne være lidt forskellig fra gravitationsmassen af de tilsvarende partikler, men direkte eksperimentelle resul-

tater glimrer ved deres fravær. Hynes (Los Alamos, 1988) har, blandt andre, foreslået eksperimenter ved LEAR, der direkte skulle måle antiprotoners gravitationsmasse med et flyvetidsforsøg. Eksperimentet vil støde på mange vanskeligheder, herunder ikke mindst nedkøling og langtidslagring af antiprotoner, hvis temperatur ikke må overstige nogle få grader Kelvin. Men selv om disse vanskeligheder en dag skulle blive overvundne, henstår det stadig i et forsøg med antiprotoner at undgå systematiske fejl hidrørende fra elektriske randfelter. Sådanne forstyrrelser ville kunne overskygge evt. små gravitationseffekter. Den vanskelighed vil være elimineret i et tilsvarende forsøg med det elektrisk neutrale antibrint. Inhomogene magnetiske felter vil dog stadig kunne påvirke et antibrintatom, via dets magnetiske moment, men sådanne magnetiske effekter vil ifl. Poth (Karlsruhe, 1988) kunne kontrolleres med stor nøjagtighed.

Er det overhovedet realistisk at forestille sig en produktion af atomart antibrint, i mængder der muliggør spektroskopi og undersøgelser af gravitationseffekter? Diskussionen om den sag har været levende i tiden inden beslutningen blev truffet om LEARs nedlukning, og en lang række ideer er bragt frem, ideer som altså nu kommer til at afvente fremkomsten af en LEAR jr. før de kan blive afprøvet.

I første omgang er det oplagt at kaste blikket på dannelse af et sædvanligt brintatom, ved simpel rekombination af frie protoner og elektroner. Den proces er en klassiker, men eksperimentelt er den på ingen måde et afsluttet emne. Rekombination af en elektron og en fri proton til et atom i grundtilstanden kan opfattes som den omvendte proces af foto-ionisering af et brintatom. Ved ioniseringen absorberes en foton, medens den samme foton udsendes

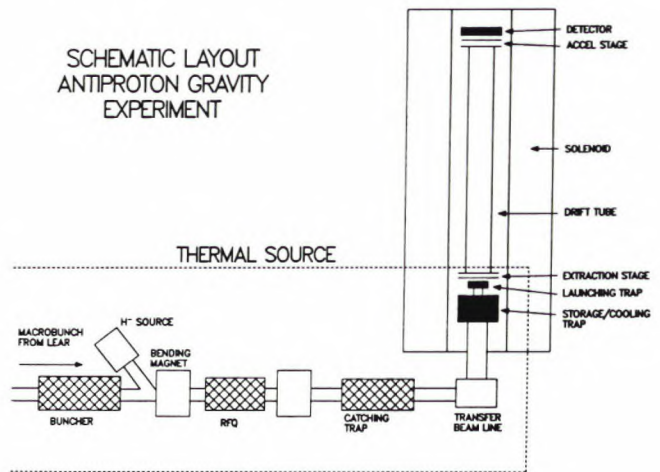
ved rekombinationen. Men fotonudsendelse fra et brintatom er en forholdsvis langsom proces, med karakteristiske tider af størrelsesordenen 10^{-9} sekund. Derfor er sandsynligheden for rekombinationsprocessen ret lav. Men det har tidligere været foreslået at sætte mere gang i processen ved bestråling med laserlys, hvor laserfotonernes energi er afstemt til fotonenergien i den atomare emissionsproces. En sådan laser-stimuleret rekombination er nu faktisk rapporteret i forsøg med blandede elektron- og protonstråler (U. Schramm et al. og F.B. Yousif et al., begge 1991), og resultaterne viser, at man vil kunne opnå en forøgelse af produktionstværsnittet med faktorer på flere tusinde. Og den forøgelse vil man få brug for, hvis man vil producere antibrint ved antiproton-positron rekombination under LEAR-lignende betingelser, dvs med en 5 MeV proton stråle blandet op med en intens positron stråle. Hughes anslår nemlig, at man uden laser-stimulering næppe ville kunne producere mere end nogle få antibrint atomer pr. sekund ved simpel rekombination. Det ville unægtelig være et spinkelt udgangspunkt for påfølgende atomspektroskopi.



Figur 2. De laveste tilstande i brintatomet (Poth, 1988). Frekvensen af 2s-1s overgangen er siden bestemt af Andreae et al. (1992) med en næsten 20 gange skærpet nøjagtighed. Efter udvalgsreglerne for elektrisk dipolstråling er denne Lyman overgang forbudt, og 2s tilstanden er derfor metastabil. Levetiden er ca. 1/8 sekund. Grundtilstanden af brint er en dublet, hvor (hyperfin) koblingen mellem elektronens og protonens spin resulterer i en opsplitning mellem en tilstand med totalspin 0 og en tilstand med totalspin 1. Overgangen mellem de to tilstande er den berømte 21 cm linie, der kendes fra astrofysikken.

Men der er andre veje, der muligvis kunne føre til Rom. Opmærksomheden har samlet sig om nedbremsning af antiprotoner til energier under 50 keV og påfølgende oplagring af antiprotonerne i et elektromag-

netisk bindingsfelt, en slags "fælde", der kan fastholde antiprotonerne over næsten ubegrænset lange tidsrum. I denne fælde kan antiprotonerne så nedkøles til energier svarende til nogle få grader Kelvin og fortsat fastholdes. Iflg. Zimmerman og Hänisch (Garching, 1993) har man allerede nu opnået at fastholde mere end 10^5 sådanne ultrakolde antiprotoner i timevis, produceret fra blot 12 pulser af 5 MeV LEAR antiprotoner. Det synes at være et realistisk perspektiv at kunne producere et lager af ultrakolde antiprotoner i et antal, der overstiger det ovennævnte med flere størrelsesordener, og med lagringstider af størrelsesordenen måneder, og indenfor ret små voluminer, dvs med høj koncentration.



Figur 3. Skitseforslag af en opstilling til måling af antiprotonens masse i tyngdefeltet (fra Hynes, 1988).

Men der skal jo også positroner til for at producere antibrint, og positroner må man hente enten fra intense, radioaktive kilder eller via acceleratorreaktioner. Og ligesom med antiprotoner kan man nedbremse positronerne, indfange dem i en elektromagnetisk fælde og nedkøle til lave temperaturer. Også her er perspektivet, at man kan opnå høje koncentrationer og lange lagringstider. Endemålet er at frembringe et koldt, neutralt plasma af en blanding af ultrakolde positroner og antiprotoner, hvor antipartiklerne kan vekselvirke via en proces, hvori indgår tre af slagsen: antiproton + positron + positron \rightarrow antibrint + positron. Pointen er, at den overskydende energi ved dannelsen af atomet her bæres væk af en antipartikel, positronen, og ikke af en foton. Og (anti)partikeludsendelse er en langt hurtigere proces end fotonudsendelse, således at reaktionssandsynligheden bliver større. Gabrielese (1988) anslår, at udbyttet af antibrint fra ovenstående tre-komponentproces ved 4 grader Kelvin vil være omkring 6 størrelsesordener større end det tilsvarende udbytte for rekombination med fotonudsendelse.

En alternativ metode til fremstilling af antibrint har været foreslået af en fysikergruppe i Århus (B. Deutch m.fl., 1993). Deres ide er at først binde positronen i positronium (det ustabile "atom", der dannes ved gensidig binding af en elektron og en positron) og derefter producere antibrint ved reaktionen: antiproton + positronium \rightarrow antibrint + elektron. Tværsnittet for denne proces er meget stort, og svarer groft set til den geometriske udstrækning af positronium. Og den geometriske udstrækning af positronium-systemet vokser jo med systemets hovedkvantetal, jfr. udstrækningen af de såkaldte Rydberg-atomer med hovedkvantetal i området 50-100. Århus-gruppen foreslår at udnytte denne Rydberg-effekt til at danne antibrint ved en proces, der involverer positronium i en højt anslået tilstand. Der er dog også ulemper ved positronium ideen, ikke mindst positroniums instabilitet overfor gensidig annihilation af elektron og positron.

Tanken - eller måske snarere drømmen? - om antibrint er tæt knyttet til tidens avancerede accelerator- og decelerator-teknologi. I tilfældet LEAR starter produktionen af antibrint med en stråle af ca. 26 GeV protoner, rettet mod et passende target. Fra target kommer så antiprotoner i energiområdet 3-4 GeV, som derefter i en række decelerationstrin ender som en fokuseret 5 MeV stråle i lagerringen. Det er en kunst at kunne nå så vidt, uden for store tab af (anti)partikler og med bevarelse af strålekvaliteten (fokusering, emittans m.v.). Som det fremgår af ovenstående, er man godt igang med udvikling af ny kunstfærdig teknik, der kan nedkøle (anti)partiklerne yderligere, inden man anbringer dem næsten permanent i et ultrakoldt regie. Ganske mange raffinerede metoder er opfundet til disse formål, nogle er allerede blevet til rutine, mens andre stadig udvikles videre. Rimeligt nok er det blevet til en nobelpris i den forbindelse (van der Meer, 1984).

For ti år siden kunne man sige om ambitiøse eksperimenter med antibrint, at de var så vanskelige, at de reelt var uden for rækkevidde. I dag er forsøg med antibrint stadig vanskelige, men fagfolk bedømmer dem dog nu til at være indenfor mulighedernes horisont. Hvis altså ellers

LEAR havde været i live og havde været i god form. Efter LHC beslutningen er modet dog nok faldet en kende...

Jeg har ikke forudsætninger for at vurdere rimeligheden af den beslutning, der inkluderede annihilationen af LEAR. Måske har denne lagring og dens brugerkreds ikke levet helt op til CERNs forventninger, jeg tør ikke sige det. Antibrint var jo langt fra det eneste projekt ved LEAR. Jeg vil overlade vurderingen til William Shakespeare. "Ondt har jeg lidt", siger hans Kong Lear, "mod mig er syndet mere, end jeg har syndet"³.

Referencer:

- 1) R.J. Hughes, Antihydrogen in a New Light, Nature 353, 700, (1991)
- 2) R.J.Hughes, Fundamental Symmetry Tests with Antihydrogen, Nuclear Physics, A 558, 605c, (1993)
- 3) W. Shakespeare: King Lear (1607), (Tredie akt, anden scene)
- 4) Denne oversigt dækker et bredt felt og mange arbejder. Hughes's artikler giver et godt udgangspunkt. Dybt interesserede kan kontakte mig og få en længere referenceliste. O.N.



Ove Nathan er professor ved Niels Bohr Institutet. han har tidligere arbejdet med eksperimentel kernefysik. Universitetsrektor i en årrække. Nuværende interesse: fysik, i bred forstand.