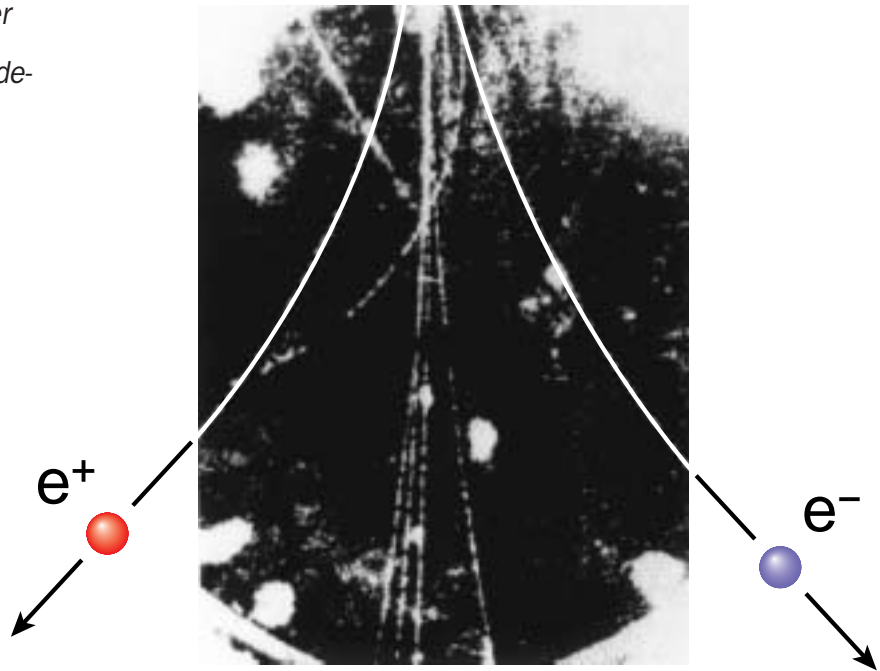


Antipartikler

Antipartikler og en modsat verden lyder som det rene science fiction for almindelige mennesker. Men fysikerne forsker intenst i antipartiklernes mysterier i disse år.



Figur 1. Et af Carl Andersons første billeder af sporet efter en positron.

Af Helge Knudsen & Ulrik Uggerhøj

■ Det er mindre end hundrede år siden, at vi mennesker fandt ud af hvilken struktur stoffets mindste enheder, atomerne, har. Denne indsigt blev, som med de fleste videnskabelige gennembrud, til i et samarbejde mellem mange videnskabsmænd.

Især bør vi nævne E. Rutherford, H. A. Geiger og E. Marsden, der i 1911-1913 påviste, at atomerne består af en tung, positiv og meget lille kerne, hvorom der befinder sig en række lette, negative partikler. Kort tid herefter fremsatte Niels Bohr sin model for atomet, der nok stadig er den, de fleste mennesker bruger: *Atomets består af en atomkerne, hvorom der bevæger sig et antal elektroner i ganske bestemte baner.*

Allerede Bohrs model inde-

holder elementer, der er i modstrid med klassisk mekanik og det blev hurtigt klart, at hvis man vil beskrive så små systemer som atomer, skal der en ny teori til, nemlig *kvantemekanikken*.

Kvantemekanik

I 1928 satte Paul Dirac sig til at nedfælde de grundligninger, der beskriver bevægelsen af en elektron i atomet. Hans ligninger udgør nu en del af grundlaget for kvantemekanikken. Vi skal ikke komme nærmere ind på disse ligninger, bortset fra at vise en af dem:

$$E^2 = c^2 p^2 + (m_0 c^2)^2$$

Denne giver sammenhængen mellem elektronens energi, E og dens impuls, p , dens masse m_0 samt lyshastigheden c .

Lad os nu sammenligne

denne ligning med noget bedre kendt, nemlig sammenhængen mellem arealet, A , og kantlængden, L af et kvadrat:

$$L^2 = A$$

Hvis for eksempel arealet af $A = 4 \text{ m}^2$ kan vi heraf finde, at $L = 2 \text{ m}$.

Men der er faktisk også en anden løsning til denne simple ligning, nemlig $L = -2 \text{ m}$. Nu er det jo noget "pjat" at tale om negative kantlængder for et kvadrat, men det var netop Diracs fortjeneste, at han ikke blot så bort fra de tilsvarende negative værdier af E , der er løsninger til hans ligning. Han havde modet til at foreslå, at disse værdier skulle svare til en ny slags elementarpartikel, der skulle minde om elektronen, men bl.a. have en positiv elektrisk ladning.

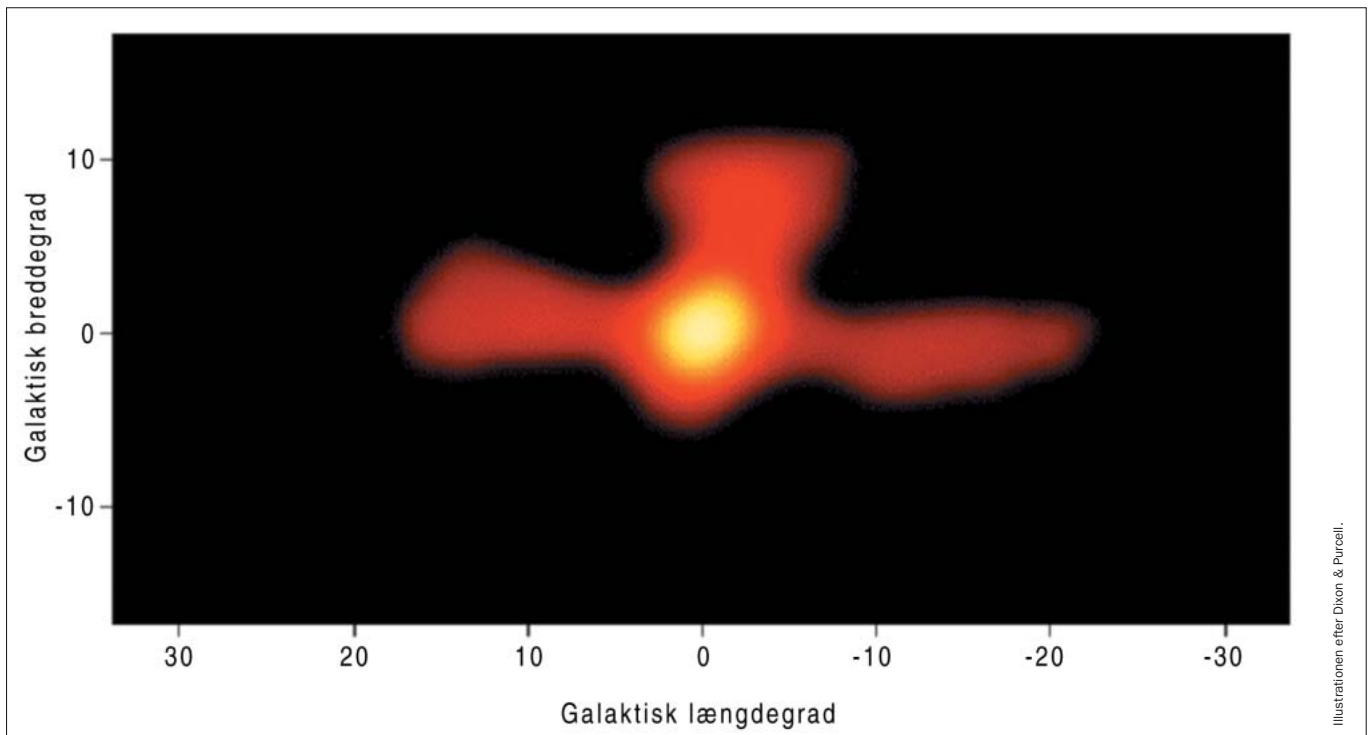
Dannelse af antipartikler – pardannelse

Det varede ikke mere end fire år, før denne *positron*, som den nu kaldes, blev fundet eksperimentelt: I 1932 påviste Carl Anderson eksistensen af elektronens antipartikel ved at studere sporene i et tågekammer af par-

Antipartikler

Positron	1932
Antiproton	1955
Antineutron	1957
Antideuteron	1965
Antiheliumkerne	1971
Antitritium	1975
Antibrint	1995

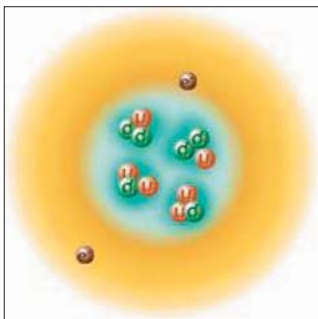
Anti-partikler, -kerner og -atom og hvilket år de blev fundet eksperimentelt.



Illustrationen efter Dixon & Purcell.

Figur 2. Tætheden af positroner nær Mælkevejens centrum, udtrykt ved intensiteten af 511 keV gamma-stråling. Den horisontale struktur ligger i Mælkevejens plan. Bemærk "skyen" af antistof, der strækker sig op fra mælkevejens centrum. Denne kaldes "The Great Annihilator". Selvom denne del af Mælkevejen altså indeholder antistof (positroner), så udgør det samlet en forsvindende mængde i forhold til mængden af stof.

partikler, der var blevet skabt ved vekselvirkning mellem kosmisk stråling og tunge atomkerner. Figur 1 viser et af hans resultater: Øverst i figuren har en kosmisk stråle ved en kollision med et blyatom afgivet lidt af sin energi til at danne et elektron-positron par, hvis baner registreres i tågekammeret. De to baner har samme afbøjning i det magnetfelt, tågekammeret



Figur 3. Et helium-atom bestående af to neutroner, to protoner og to elektroner. Protonerne og neutronerne er begge sammensatte partikler, således består en proton af to up-quarker og en down-quark, mens neutronen består af to down-quarker og en up-quark.

befinder sig i, men da banerne afbøjes til hver sin side, er de afsat af partikler med modsat elektrisk ladning.

Dannelsen af dette par af en elektron og en positron sker ved, at noget af den kosmiske stråles energi laves om til masse efter den kendte formel $E=mc^2$. Dette er i det hele taget den måde, hvorpå antipartikler generelt dannes: Ved en tilstrækkelig stor koncentration af energi, kan der spontant dannes et par af en partikel og dens antipartikel. Denne process kaldes *parproduktion*. Vi ved nu, at der til enhver elementarpartikel hører en antipartikel (se boks). I forhold til deres tilhørende partikel har antipartiklerne samme masse, men de har ellers modsatte "egenskaber" såsom elektrisk ladning.

Tilintetgørelse

Den modsatte effekt af parproduktion er *annihilation*, eller "tilintetgørelse" af et partikel-antipartikel par. Hvis et sådant par kommer tilstrækkelig tæt på hinanden, vil det blive omdannet til ren energi. Således "for-

svinder" et elektron-positronpar under udsendelse af to lyskvantter, der hver har en energi svarende til elektronens hvilemasse, nemlig 511 keV.

Hvis der eksempelvis sker annihilation af et sådant par nær Mælkevejens centrum vil det derfor være let at registrere (se figur 2).

Man har i mange år søgt efter sådanne signaler fra fjerne koncentrationer af antipartikler, bl.a. for at afgøre, hvorvidt der findes f.eks. antistjerner eller antigalakser. Som et resultat af mange sådanne eftersøgninger ved vi nu, at der ikke findes store mængder af antistof i Universet.

Men når man nu ved, at partikler og antipartikler produceres og forsvinder parvist, hvordan kan det så være, at der i dag er en stor overvægt af partikler?

Hvor er antipartiklerne blevet af?

For omkring 14 mia. år siden begyndte Universet at udvide sig fra ét punkt og det har udvidet sig lige siden. Dette er en meget kort udgave af fysikerens og astronomers opfattelse af Verdens

udvikling (men ikke skabelse), der under et kaldes "Big Bang modellen". Med betragtelig sikkerhed kan man sige, hvordan Universet har opført sig fra ca. 0,000001 sekund efter selve skabelsen, og noget mere usikre teorier kan gå så langt tilbage som 10^{-34} sekund. Pga. udvidelsen er Universet blevet afkølet og har nu en målelig temperatur på 2,7 grader over det absolutte nulpunkt. Under afkølingen har sekvenser af partikler klumpet sig sammen eller "kondenseret" til at danne det synlige Univers – først quarkerne, dernæst kernerne, så atomerne, molekylerne og til sidst stjerner, galakser, planeter og mennesker.

Quarkerne er, hvad man i dag betragter som "ægte" elementarpartikler, dvs. udelelige enheder, som alt andet er bygget op af. Således er f.eks. en proton lavet af to såkaldte up-quarker og en down-quark (se figur 3).

Disse to quarker er, foruden elektronen og en nærmest usynlig partikel, neutrinoen, alt hvad der skal til for at konstruere et Univers som vi ser det. Næsten. For det viser sig, at der udover

disse fire partikler desuden findes to sæt, eller familier som de kaldes, der umiddelbart synes at være unødvendige. Det er en af fysikkens endnu uløste gåder, hvorfor disse familier findes, og hvilken funktion de har. Dog har antipartiklerne givet os et lille fingerpeg i retning af svaret: Hvis man begynder med lige mange partikler og antipartikler og ender med et overskud af partikler, er det nødvendigt med mindst tre familier af partikler i alt. Uligevægten mellem partikler og antipartikler skyldes, at de ikke opfører sig fuldstændig ens – et fænomen, der benævnes CP-brud, og som blev observeret første gang i 1964. Denne lille, men afgørende, forskel kan kun eksistere, hvis de to øjensynlig unødvendige familier er til stede.

Faktisk er det, hvad man regner med skete i den tidligste fase efter the Big Bang, idet det hele begyndte med lige mange partikler og antipartikler. Tilintetgørelse af langt de fleste af disse er så endt med en stor overvægt af partikler. Vi ved endda, hvor mange partikler, der var pr. antipartikel, da antipartiklerne "forsvandt": For hver milliard antipartikler var der en milliard og én partikler og denne uhyre lille "rest" er blevet til læseren og den stol han sidder i!

Antibrint

Fælles for parproduktion af nye partikler er, at de bliver skabt med en meget høj fart, omkring 90% af lysets. Derimod bevæger elektronen i sin bane omkring protonen i brint sig kun med knap 1% af lysets fart. Hvis man kunstigt vil fremstille et nyt atom, som feks. brint, må man bringe elektronen til samme fart som protonen inden for omkring 1% af lysets fart. Er det ikke tilfældet, vil elektronen "overhale" protonen, inden den når at 'hænge ved' under kollisionen, og jo lavere indbyrdes fart, jo bedre. Desuden skal bindingsenergien fjernes, enten vha. andre partikler eller ved udsendelse af lyskvanter. Endelig er det nemmest og mest præcist at undersøge atomer, som befinder sig i hvile.

Nøjagtigt det samme gør sig

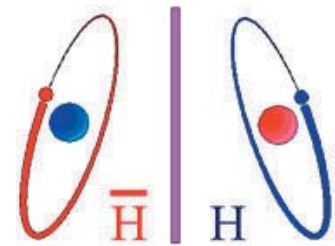
gældende, hvis man vil skabe et antibrintatom (som består af en antiproton og en positron) og undersøge dets egenskaber: Positronen skal have ca. samme fart som antiprotonen for at skabe et antiatom og skal man derefter måle meget nøjagtigt betyder det, at både positronen og antiprotonen skal bremses kraftigt op efter produktionen og bringes i tæt kontakt. På det fælleseuropæiske laboratorium, CERN, udenfor Geneve udføres denne produktion, opbremsning og "sammenblanding" i en lang sekvens af partikelacceleratorer, hvor det sidste led er en såkaldt elektromagnetisk fælde. I denne fælde kan man lagre sådanne eksotiske partikler i ugevis og manipulere dem til ganske langsomt at komme i kontakt med hinanden, således at antibrint kan blive skabt. Det er endnu ikke lykkedes i skrivende stund, men man regner med at være så tæt på, at vi med spænding venter på det første resultat.

Derimod detekterede man i et banebrydende eksperiment i 1995 omkring 11 antibrint ato-

mer, som dog bevægede sig alt for hurtigt til, at de kunne undersøges i detalje. Ikke desto mindre var det vores første kontakt med antiverdenen!

Antibrint og Verdens symmetri

En stor del af fysikken er baseret på symmetrier. (Et specifikt eksempel er "spejl-symmetri", hvor man spejler alle de rumlige koordinater for et fysisk system). Et af de mest fundamentale krav til enhver fysisk teori er, at hvis man ændrer ladningen af de beskrevne partikler (C), spejler deres koordinater (P) og vender tidens retning (T) på en gang, så skal alting være uændret. En konsekvens af denne symmetri, kaldet CPT, er, at positronbanerne i antibrint skal være identiske med elektronbanerne i brint. Men i sidste ende er fysik en eksperimentel videnskab, og et af hovedformålene med at skabe antibrint er at undersøge, om det faktisk er tilfældet, at CPT er en "god" symmetri, eller om man evt. må søge efter nye principper i grundlæggelsen af de fysiske love. Sådanne



Figur 4. CPT symmetrien mellem brint og antibrint

brud med den konventionelle opfattelse har fundet sted mange gange før og har givet startskud til store spring fremad i vores viden om, hvordan naturen opfører sig.

Praktisk anvendelse af antipartikler

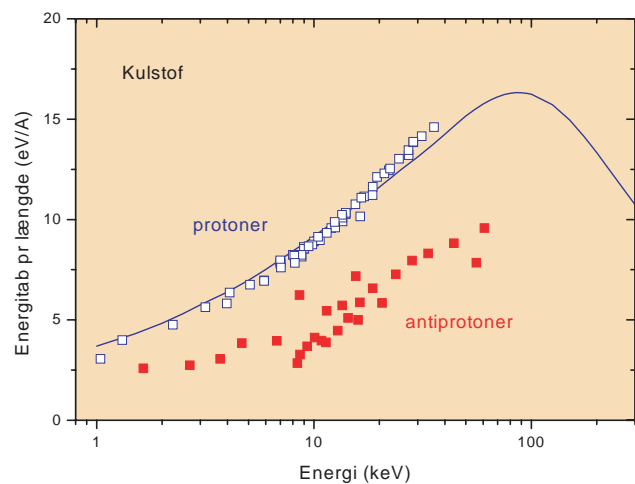
Da der ikke skal nær så meget energi til at "fremstille" positroner, som der kræves til skabelsen af tungere antipartikler, knytter den praktiske anvendelse af antipartikler sig nu om dage til brugen af positroner.

Et eksempel herpå er, at der på de fleste store hospitaler er en såkaldt PET scanner (Positron Emission Tomography). Denne

Energi og partikler

Lige siden Bohrs tid har fysikerne interesseret sig for vekselvirkningen mellem atomer og energirige, ladede partikler. De fleste af sådanne vekselvirkninger medfører, at partiklen mister energi ved at eksitere de atomare elektroner. Man er nødt til at kunne beskrive sådanne processer teoretisk, hvis man skal kunne forstå partiklernes nedbremsning, når de passerer stof, (hvilket har betydning for eksempel strålingsbeskyttelse og cancer terapi med partikelstråling) og hvis man skal kunne forstå de ændringer, der sker med stoffets struktur ved bestråling (hvilket er centralt for fremstilling af "chips" og overfladebehandling).

Ved en af opstillingerne ved CERN's Antiproton decelerator har vores gruppe, sammen med andre kolleger, for eksempel målt energitabet for antiprotoner, når disse trænger igennem forskellige stoffer. I figuren er vist energitabet per vej længde ved passage af kulstof for anti-



protoner og protoner som funktion af disse partiklers energi. Den fuldt optrukne kurve viser resultatet af mange andre proton-målinger.

Som man kan se taber antiprotonerne meget mindre energi per vej længde end tilsvarende protoner. Dette kan kort forklares ved, at protonerne har en positiv ladning. De tiltrækker altså kulstoffets elektro-

ner, og vekselvirker derfor stærkere med dem end antiprotoner, der frastøder elektronerne. Dette betyder, at antiprotoner trænger dybere ind i et materiale end protoner af samme oprindelige energi. Sådanne målinger kan også bruges til at teste teorier om generelle vekselvirkninger mellem atomer og ladede partikler.

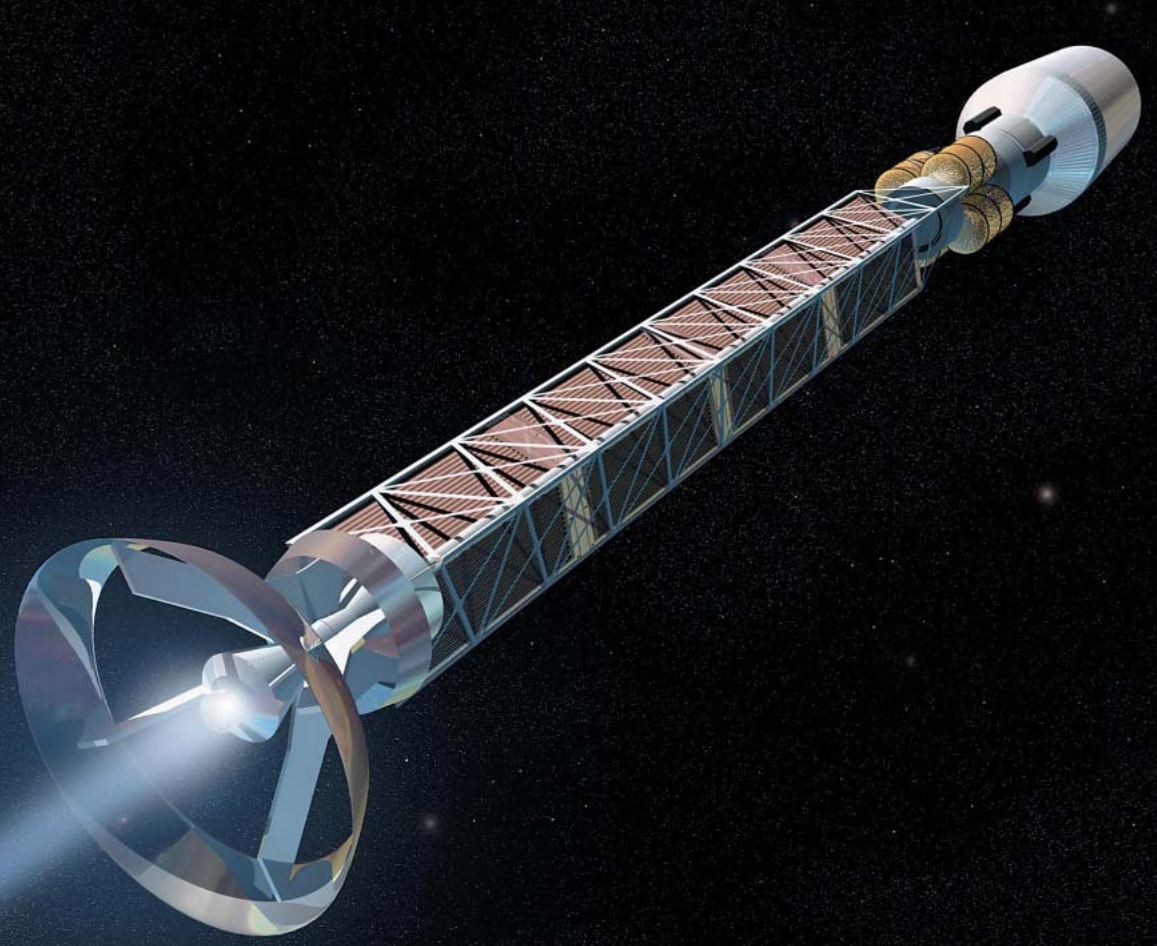


Illustration: NASA, MSFC.

En kunstners illustration af en fremtidsdrøm: En rejse til stjernerne i et rumskib drevet af antistof.

bruges til at registrere omsættelsseshastigheden af stof i levende væv, både normalt og sygt. Man kan give en patient en dosis sukker (glucose), hvor nogle af de normale kul atomer, ^{12}C , er erstattet af isotopen ^{11}C . Denne er ustabil, og med en halveringstid på 20 minutter henfalder den ved udsendelse af en positron. Det særlige sukker vil blive ført med blodet hen til steder i kroppen, hvor der er en særlig stor stofomsætning (metabolisme), hvilket for eksempel er tilfældet i kræftsvulster.

De udsendte positroner vil straks annihilere med en elektron og blive til to 511 keV gamma-stråler, der udsendes i præcis modsat retning. Hvis nu patienten er placeret mellem en række gamma-detektorer, og hvis man registrerer parvist

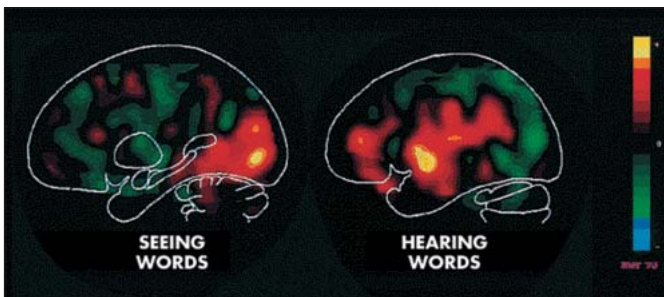
detekterede 511 keV gamma stråler, kan man således ved hjælp af en computer fremstille et tre-dimensionalt kort over det væv, hvorfra udsendelsen skete. PET-scannere bruges også til neurofysiologiske undersøgelser af raske mennesker, og kan for eksempel besvare spørgsmålet: Hvilke dele af vores hjerne er særligt aktive, når vi læser denne artikel om antistof?

Fremtidsdrømme

Det er sandsynligt, at mennesker til alle tider har drømt om at rejse til stjernerne. Sådanne rejser er desværre ikke mulige med den teknologi, vi besidder i dag. En af de mange hindringer for stjernerejser er, at det brændstof, der skal accelerere et rumskib, i de fleste scenarier skal bringes med på rejsen. Det nyt-

ter så ikke, at udnyttelsesgraden af brændstoffet er ringe. Med dette mener vi, at den del af brændstoffet, der kan omsættes til ren energi, m , ikke må være meget mindre end brændstoffets hele masse M , for hvis det var tilfældet skulle vi jo accelerere en stor dødvægt. For almindelig afbrænding af kul eller andre kemiske processer er m/M ca. 10^{-11} , for fissionsprocesser er m/M ca. 0,001. Kun hvis vi kan anvende antistof som brændstof, kommer vi nær $m/M = 1$.

Desværre er den effektivitet, hvormed vi i dag kan producere antipartikler så lille, at hvis vi brugte Verdens samlede energiresourcer på at lave antistof, ville vi ikke få mere end der skal til for at bringe en bil tværs over USA. Så antistof-drevne rumskibe ligger stadig langt ude i fremtiden. ☹



Resultat fra PET-scanning – forskellige dele af hjernen arbejder, når vi ser eller hører ord.

Om forfatterne:



Helge Knudsen er lektor ved Institut for fysik og Astronomi Ny Munkegade, bygn. 520 8000 Århus C
Tlf.: 89423607
e-post: hk@ifu.au.dk



Ulrik Uggerhøj er Stenostipendiat ved Institut for Fysik og Astronomi
Tlf.: 8942 3738
E-post: ulrik@ifu.au.dk

Supplerende læsning:

Hvad er antipartikler?:
http://www.ifu.au.dk/~ulrik/anti_world.htm
Forskning i antipartikler:
<http://www.ifu.au.dk/amo/collwapp/collwapp.htm>