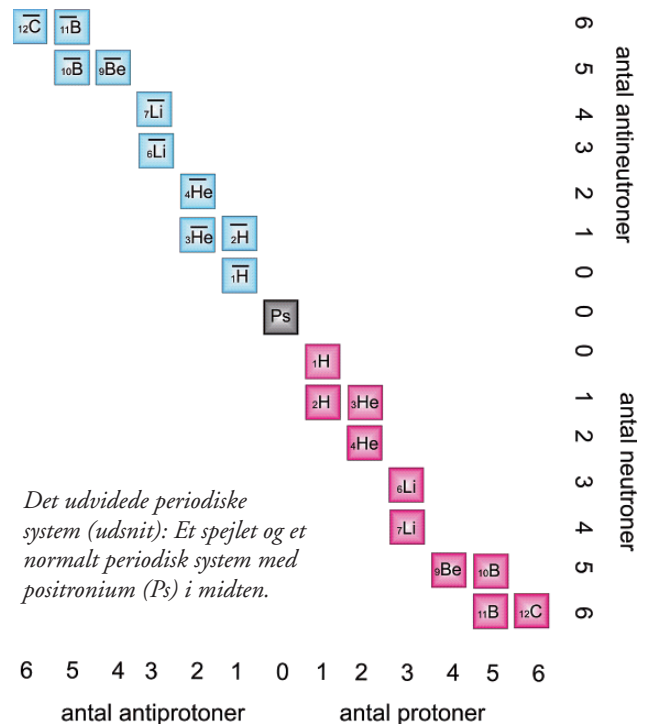


Atom nummer nul

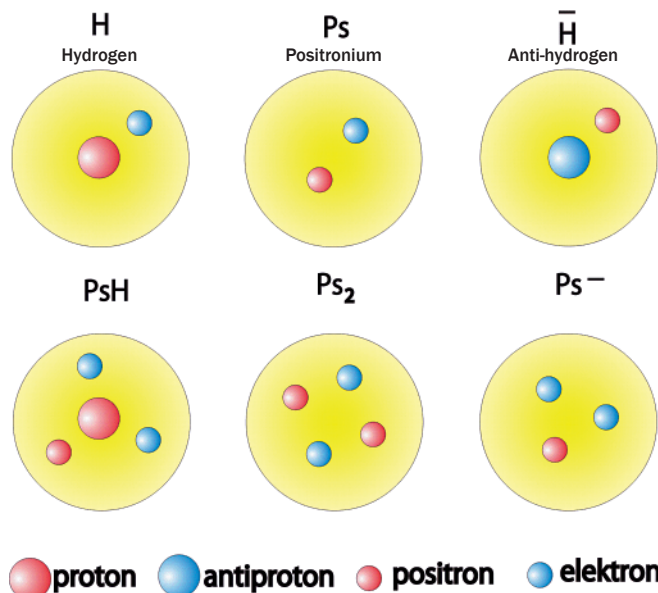
Efter opdagelsen af antibrint har vi begyndelsen til en udvidelse af det normale periodiske system, nemlig med antiatomerne. De har negativt atomnummer, og danner således i princippet et anti-periodisk system. Midt imellem disse to systemer finder vi det fascinerende atom nummer 0.



Af Mikkel D. Lund, Heine D. Thomsen, Ulrik I. Uggerhøj og Helge Knudsen

Siden opdagelsen af antibrint i 1995 har det af og til været diskuteret om det også er muligt at producere tungere antigrundstoffer ud fra antipartikler. Teknisk set vil det være uhyre krævende, men der er intet principielt, der taler imod det. Vi kan således betragte antibrint som det første element fra antistoffets periodiske system.

Eftersom antiprotonen har negativ ladning (modsat protonen) vil dette periodiske system udgøres af atomer med negativt atomnummer, f.eks. vil element nummer -26 være antijern. Antijern vil udgøres af 26 antiprotoner og 30 antineutroner omgivet af 26 positroner. Der søges i disse år intenst efter signaler i den kosmiske stråling, der stammer fra kerner af antiatomer med et negativt elementnummer større end 3. Dette skyldes, at der ikke er andre måder, man kan forestille



Positronium og dets "søskende": Et skematisk billede af brint, Ps, Ps⁻, PsH, Ps₂ og antibrint.

sig deres produktion på, end ved at de på et tidspunkt har været en del af en antistjerne, altså en stjerne bestående af antistof. Bare *en* (med sikkerhed påvist) kosmisk anti-kerne, f.eks. anti-

kul vil signalere, at der findes antistjerner og dermed formentlig antigalakser og måske antiplaneter og anti-dig og -mig.

Atom nummer nul

Hvis der findes elementer med både positive atomnumre og negative atomnumre er det nærliggende at stille spørgsmålet, om der også findes et element nummer nul? Svaret er: ja, det gør der! Og det har været kendt i over 50 år. Det tekniske navn for atom nummer nul er *positronium*, der, som det må kræves af atom nummer nul, ikke har nogen atomkerne. Derudover er det et symmetrisk overgangsled mellem stof og antistof, idet der indgår en partikel og en antipartikel i en bundet tilstand, der minder meget om brint eller antibrint – dvs. element nummer 1 og -1. Positronium består af en elektron og dens

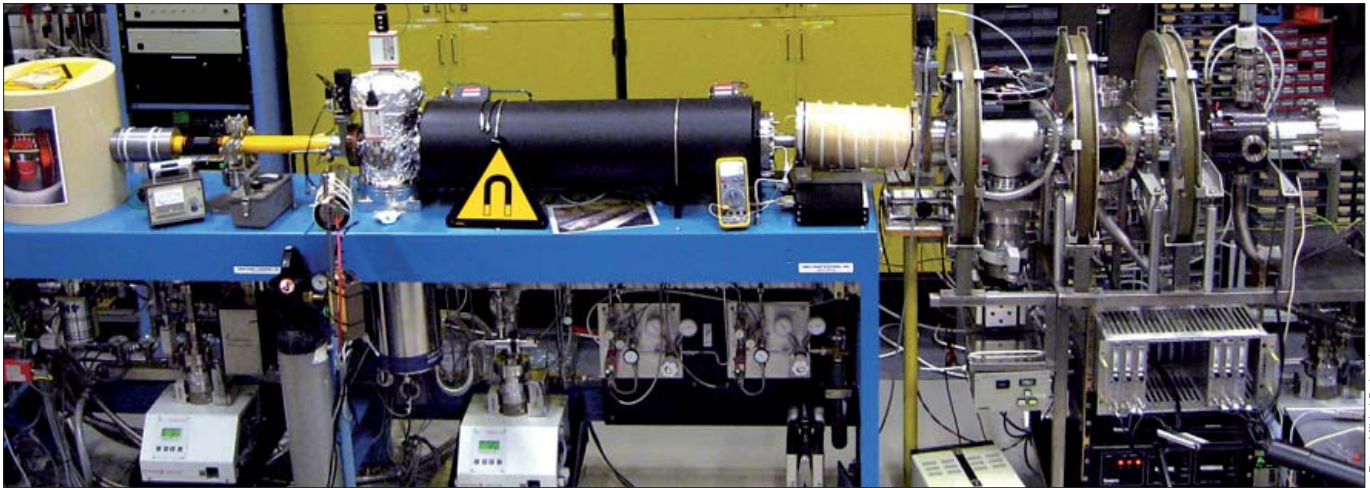


Foto: Mikkel D. Lund

Forsøgsopstilling på Aarhus Universitet, som producerer en stråle af langsomme positroner. Positronerne dannes fra en radioaktiv natrium-22 kilde, og et apparat kan indfange og gemme positronerne, så de kan anvendes til forsøg. Positronerne sendes herfra ind i et porøst materiale, hvor de løsrives en elektron og danner positronium. Positroniumatomerne kan derefter blive beskudt af en kraftig laser, så man kan måle sandsynligheden for, at atomerne ioniseres.

antipartikel, positronen, der pga. deres modsatte ladninger har en indbyrdes tiltrækning. De kan således binde sig til hinanden, men med den katastrofale følge, at de efter relativt kort tid vil udslutte hinanden og blive til ren stråling. Det er således et grundlæggende ustabil atom, hvilket dog ikke adskiller det afgørende fra f.eks. uran. Positronium blev første gang postuleret teoretisk af den kroatisk fysiker Stjepan Mohorovičić under navnet "electrum" i 1934 og fundet eksperimentelt i 1951 af Martin Deutsch.

En teoretisk perle

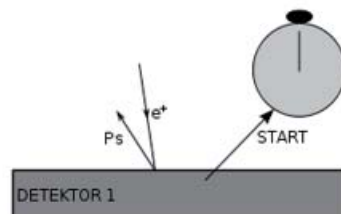
Positroniums levetid afhænger af den indbyrdes orientering af spinnen af de to partikler, positronium består af (spin kan beskrives som partiklernes indre kompasnål). Kortlivet positronium forsvinder efter 125 pikosekunder (0,125 milliarddele sekund) og den langlivede udgave lever 142 nanosekunder (142 milliarddele sekund). Grunden til forskellen er løst sagt, at den langlivede del behøver tid for at kunne vende en af partiklernes spin, så atomet kan henfalde som en kortlivet udgave.

Positronen og elektronen er eksempler på ægte elementarpartikler, dvs. de kan ikke deles

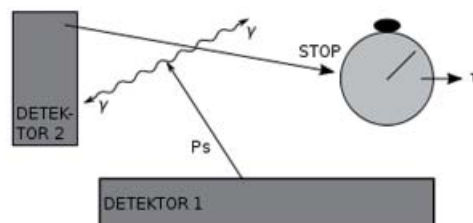
Måling af positroniums levetid

Selvom levetiden af den langlivede udgave af positronium kun er 142 nanosekunder, kan man måle det i et moderne fysiklaboratorium.

Hvor lang tid det ustabile system lever, er bestemt af kvantemekanikkens verden af sandsynligheder. Nogle gange lever det kortere end 142 nanosekunder og nogle gange længere. Hvis man ser på en stor mængde Positronium-atomer, vil for-



På figuren ses en positron, som rammer en detektor kaldet 1. Da denne består af stof, vil positronen herfra kunne samle en elektron op og danne positronium.



Detektor 1 starter samtidigt stopuret, som stoppes igen, når detektor 2 rammes af den stråling, der dannes ved positroniums henfald, jævnfør figuren (th). Stopuret vil nu angive, hvor længe hvert enkelt positronium-atom har levet.

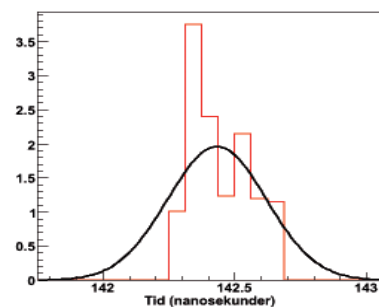
delingen af forskellige tider fra dannelse til henfald give et fingeraftryk for, hvor længe tilstanden lever. Dette fingeraftryk er levetiden på 142 nanosekunder – en vigtig egenskab ved atom nummer 0.

Med vores positronkilde på Institut for Fysik og Astronomi er det for nyligt lykkedes at måle dette fingeraftryk ved hjælp af, hvad der kan minde om et sofistikeret stopur.



Foto: Mikkel D. Lund

Fotoet viser detektor 1. Den lysende cirkel stammer fra positroner, der rammer detektoren, hvorved lys udsendes fra en fosfor-skærm.



Et eksempel på måling af tider – den langlivede tilstand af positronium er på 142,4 nanosekunder.

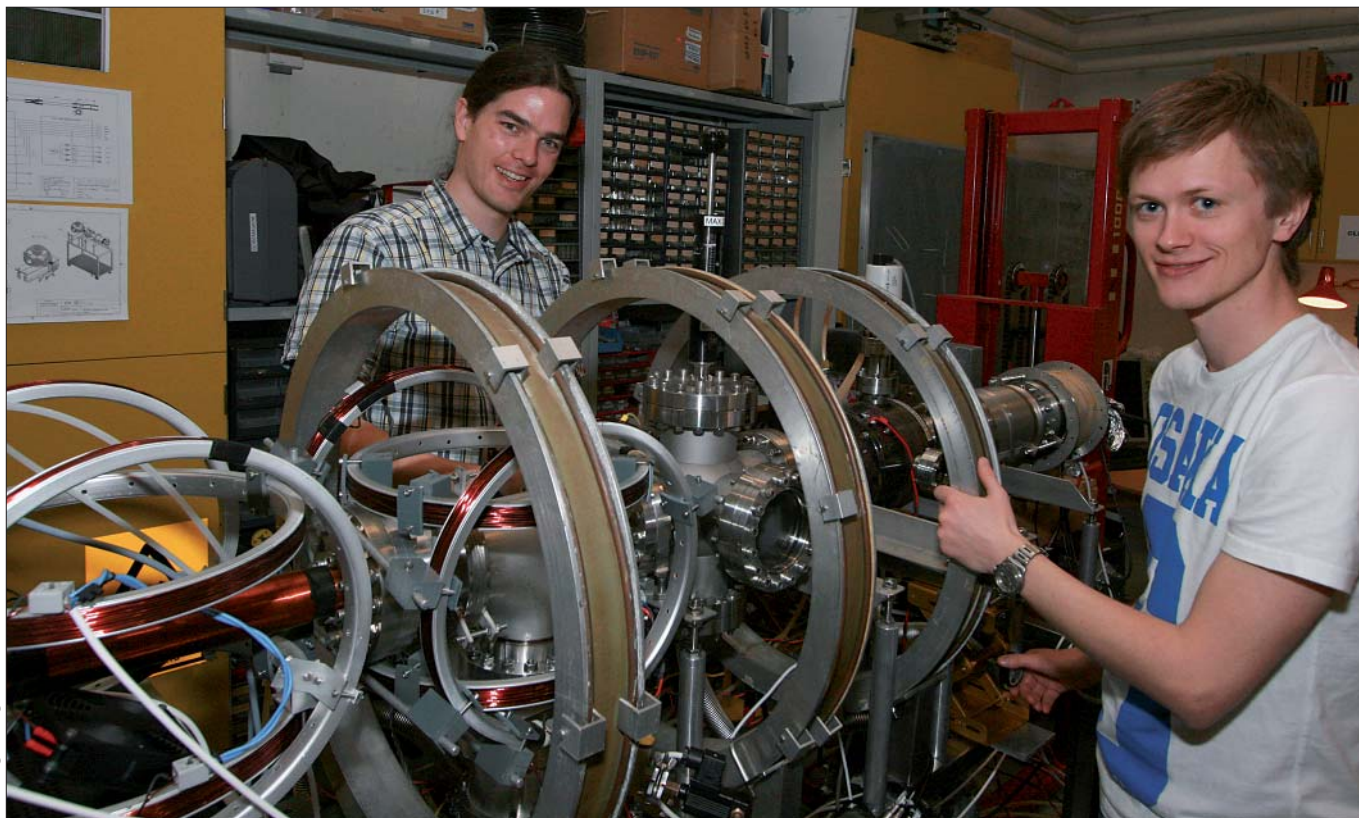
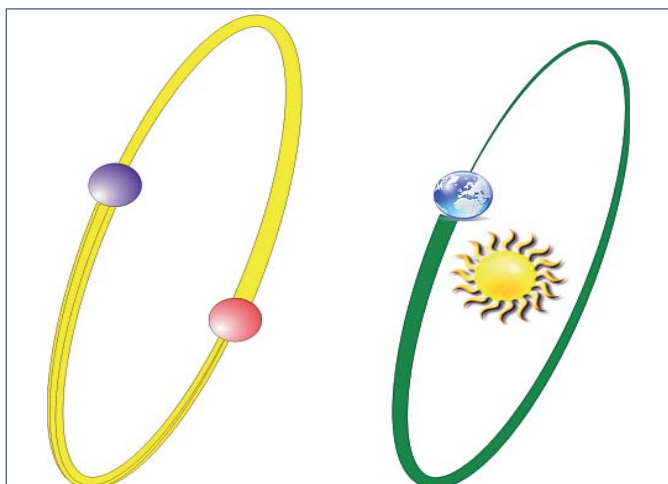


Foto: Jørgen Dahlggaard

Mikkel Lund og Heine Thomsen ved forsøgsopstillingen på Aarhus Universitet. Her er strømspolerne synlige, som skaber magnetfelterne til styring af positronerne. Positronium-atomerne dannes for enden af apparatet, til højre i billedet.

yderligere og er således en af naturens mindste lego-klodser, hvoraf alt andet er opbygget. Derudover tiltrækker de hinanden med en kraft, der er ret let at beskrive teoretisk. Man kan

således f.eks. regne bindingsenergi og levetid ud med meget stor nøjagtighed. Positronium kan kaldes en "teoretisk perle" ca. på lige fod med brintatomet, der også er et ret simpelt system.



Selvom den "langlevende" slags Positronium kun i middel består i 142 nanosekunder, kan den faktisk anses for at være langlivet. Vi ved, at Jorden har cirklet rundt om Solen i nogle milliarder år, altså nogle milliarder gange, og vil nok kalde dette system for stabilt. Bruger vi imidlertid vores viden om Positroniums størrelse og dens elektrons og positrons hastighed kan vi udregne, at i løbet af middellevetiden på 142 nanosekunder "kredser" de om hinanden nogle milliarder gange. I dette perspektiv kan man altså anse Positronium for at være et meget stabilt system.

Jitterbug for atomer

Det billede de fleste mennesker – inklusive mange fysikere – bruger, når de forestiller sig et brintatom, er en "planetmodel", hvor elektronen kredser om protonen i bestemte baner. At dette billede ikke altid er tilstrækkeligt ses bl.a. af, at planetbaner er flade, mens atomer er kugleformede – en effekt, der kun kan forklares ved hjælp af teorien for meget små systemer, kvantemekanikken. Lidt groft kan man sige, at hvis ikke kvantemekanikken havde tilført denne ekstra "bevægelse", ville vi have været meget små, ca. 100.000 gange mindre, i hvert fald i én retning. Tilføres atomet med en elektron i en bestemt bane mere energi, f.eks. i form af en indkommende lyspartikel, vil elektronen bevæge sig ud til en bane lidt længere væk fra protonen. Dette billede bygger på den fundamentale antagelse (som er temmelig god for brintatomet), at protonen er uendeligt tung i forhold til elektronen, hvorfor protonen

kan ligge stille mens elektronen kredser eller evt. skifter bane.

Men lad os nu i stedet betragte positronium. Her er det to lige tunge partikler, der kredser om hinanden, lidt a la to jitterbug-dansere, der holder hinanden i hænderne. Eller måske en engel og en dæmon, for nu at beskrive det i den filmaktuelle Dan Brown-terminologi. På denne måde bevæger de sig omkring deres fælles midte og ingen af dem vil ligge stille. Det har den afgørende forskel, at positronium bliver dobbelt så stort et atom som brint og med den halve bindingsenergi. Desuden vil afstandene mellem "banerne" være reduceret til det halve i forhold til brint.

Kemi med atom nummer nul

Udover positronium, som i sig selv er eksotisk, findes der adskillige andre systemer med positronium som grundlag. Et atom må jo kunne indgå i molekyler, og dette gælder også for atom nummer nul. For eksempel har amerikanske forskere

for nyligt påvist, at der findes et positroniummolekyle, der ligner brintmolekylet lidt – dvs. to positroniumatomer, der tiltrækker hinanden, ligesom to brintatomer kan danne et brintmolekyle. Det er dog meget vanskeligt at producere og detektere et sådant positronium-molekyle. Desuden findes en bundet tilstand af almindelig brint og positronium, dvs. en hybrid af de to ovennævnte. Dette molekyle, som kaldes positroniumhydrid, blev fundet i et eksperiment udført af tre danske fysikere (deriblandt en af denne artikels forfattere, UIU) og en amerikansk fysiker i 1992.

Fremtiden:

“positronium-minus”

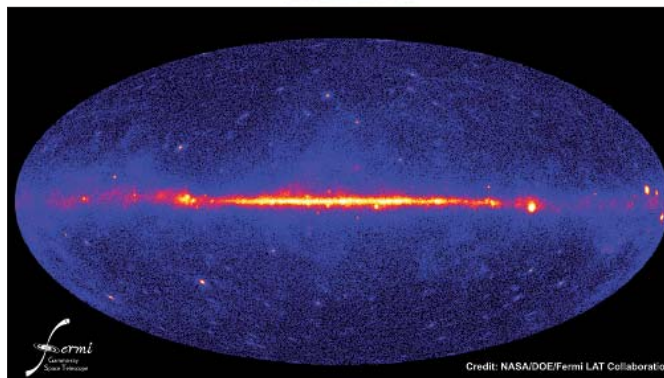
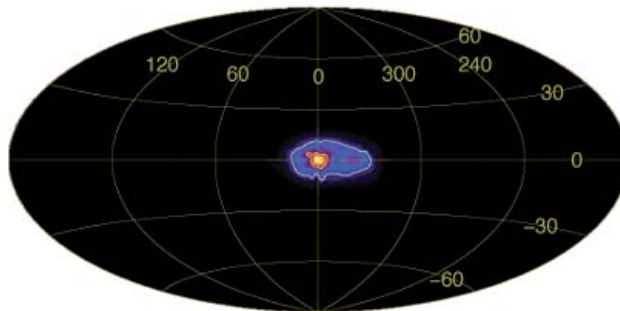
Ganske som det er tilfældet for brint, kan man “hæfte” en ekstra elektron på positronium, så atomet bliver negativt ladet. Det har imidlertid den pris, at levetiden kun vil have én værdi, idet positronen altid vil kunne finde en elektron med den rette orientering af spinnets, som den kan tilintetgøres med. Denne ions levetid er meget nær levetiderne af de to positroniumtyper midlet på passende vis, hvilket giver ca. 0,5 nanosekund eller en halv milliarddel sekund. Det er meget kort tid, men formentlig længe nok til, at man kan nå at skyde en laser på positronium-minus og derved undersøge dette eksotiske system i detalje. Det er håbet, at vi vil kunne måle bindingsenergi, levetid og sandsynligheden for løsrivelsen af en af elektronerne. Bindingsenergien og levetiden har været målt i et banebrydende eksperiment i 1982, men med relativt dårlig præcision.

En af grundene til, at dette negativt ladede atom er interessant, er dets lighed med protonen. De kræfter, der binder tre kvarker sammen til at danne en proton er langt dårligere kendt end de elektriske, der holder de 3 partikler i positronium-minus sammen. Så ved at studere det elektrisk bundne system, kan man få indblik i, om det er kendskabet til kræfterne mellem kvarkerne, eller det er såkaldt

Trelegeme-problemet

Er Solsystemet stabilt? Nej, svarede den berømte franske fysiker og matematiker, Henri Poincaré, i 1889, med henvisning til det, der senere udviklede sig til kaosteori. Det er almindeligt kendt, at Jorden er bundet til en bane omkring Solen, og at Månen tilsvarende er bundet til en bane omkring Jorden. Begge disse tilfælde beskrives nogenlunde let teoretisk. Men ser man på systemet bestående af 3 legemer – Sol, Jord og Måne – kompliceres beskrivelsen overordentlig meget. Faktisk så meget, at man ikke kan være helt sikker på, at Månen forbliver i sin bane omkring Jorden! Komplikationerne stammer ikke fra beskrivelsen af de indgående tyngdekræfter, der holder sammen på tingene – de er kendt til meget stor præcision. Nej, problemet er et klassisk generelt problem, nemlig at selvom man kan beskrive to legemers vekselvirkning og relative bevægelse næsten vilkårligt præcist, så kan “tre-legeme problemer” ikke løses eksakt udover i nogle ganske få tilfælde.

I vores gruppe i Århus studerer vi bl.a. sådanne få-legeme problemer ved at benytte elementarpartikler hvorimellem kræfterne på samme vis er velkendte – i nogle tilfælde med 12-13 cifres præcision.



Et foto af himlen taget med et kamera på INTEGRAL satellitten, der er følsomt for den stråling, der opstår når en positron møder en elektron. Fra denne og lignende målinger vides det, at der i Mælkevejens centrum, med koordinaterne (0,0) i figuren, findes relativt store mængder af positroner og positronium. Til sammenligning er vist et foto taget med et kamera på Fermi satellitten, der er følsomt for stråling af endnu højere energi, såkaldt hård gamma-stråling. Her ses galaksens plan som en lysende stribe.

tre-legeme problemer (se boks), der er den begrænsende faktor i beskrivelsen af protonen.

Udover de spændende aspekter i fundamentale studier af de kræfter, der virker mellem ganske få partikler, øger vi

også kendskabet til detektionsmetoder på meget kort tidskala – milliarddele sekunder. Sådanne teknikker er bl.a. grundlæggende i positron-baseret diagnostisk apparatur (PET-scannere) inden for medicin. ■

Om forfatterne



Mikkel D. Lund er forskningsassistent
E-mail: mikkell@phys.au.dk



Heine D. Thomsen er ph.d.-studerende
E-mail: heine@phys.au.dk



Ulrik I. Uggerhøj er lektor
E-mail: ulrik@phys.au.dk



Helge Knudsen er lektor
E-mail: hk@phys.au.dk

Alle ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet
www.phys.au.dk

Videre læsning

En forklaring af levetidsmålingen kan findes på: www.phys.au.dk/~ulrik/ps_levetid.htm

Uggerhøj, U.I. & Knudsen, H.: Antipartikler. *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6/2001

Dan Browns bestseller: *Engle og demoner* – filmen har dansk biografpremiere i maj 2009.