

Neutronstjerner i laboratoriet

Hvordan opfører en elektron sig i nærheden af en neutronstjernes overflade - dvs. i et ekstremt stærkt magnetfelt? Det er i sagens natur svært at afgøre i et laboratorieeksperiment, men alligevel er et internationalt forskerhold med en ny teknik nået et skridt nærmere svaret.

Af Ulrik I. Uggerhøj

Man har i dag kendskab til talrige astronomiske objekter og fænomener som f.eks. stjerner, hvide dværge, supernoaer, neutronstjerner, quasarer og sorte huller. Med ganske få undtagelser baseres kendskabet til disse objekter på den information, man opnår gennem den elektromagnetiske stråling (som f.eks. synligt lys), der bliver udsendt enten fra objektet selv eller fra en "partner", som er bundet dertil af tyngdekraften. Hvis man vil beskrive disse astrofysiske objekter præcist, er det derfor vigtigt at studere denne strålingsudsendelse i laboratoriet. Den stråling, man observerer, afhænger imidlertid af processer, som er følsomme for ændringer i de felter, der omgiver objekterne, f.eks. magnetfelternes styrke.

Ved neutronstjerner optræder der så stærke magnetfelter, at man hidtil har været meget langt fra at kunne producere felter af sammenlignelige styrker i laboratoriet. Det har imidlertid vist sig, at de ekstremt stærke felter tæt ved atomkernerne i en krystal, under visse betingelser "virker samtidig", så man i realiteten har simuleret et magnetfelt af neutronstjernestyrke i laboratoriet. Denne nye teknik åbner mulighed for at studere proces-



ser, som sker tæt på overfladen af en neutronstjerne.

Universets fyrtårne

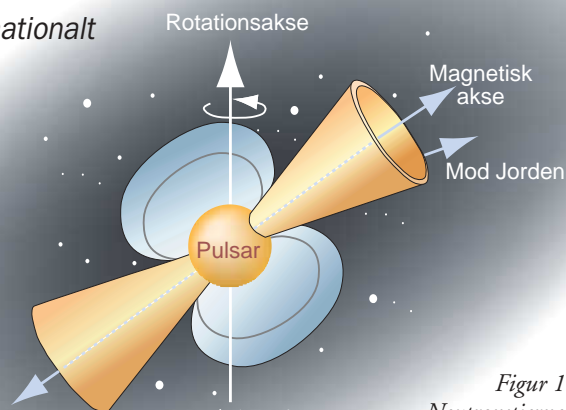
Neutronstjerner er ufatteligt kompakte objekter, der, som navnet siger, antages at bestå hovedsageligt af neutroner. Massefylden af en neutronstjerne er således omtrent den samme som for en atomkerne, hvilket vil sige, at en teskefuld "neutronstjernestof" vejer omkring en milliard tons.

Neutronstjerner afslører sig selv ved at udsende stråling i en kegle, der roterer pga. stjer-

nens rotation. Keglen er dannet af neutronstjernes overordentligt kraftige magnetfelt, der, ligesom på Jorden, har en bestemt retning. Når strålingskeglen roterer, kan den i visse tilfælde "fej" hen over Jorden, ganske som lyset fra et fyrtårn kan ramme et skib. Dette giver anledning til "strålingsblink", som har givet denne type stjerner tilnavnet pulsarer. Enkelte kendte neutronstjerner har så jævn en rotation, at de principielt kan benyttes som en frekvensstandard, dvs. intervallerne mellem deres "blink" er så at sige helt ens.

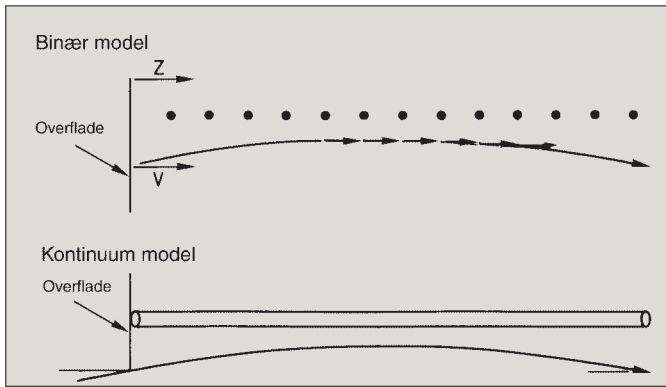
Det kritiske felt

Set fra Jorden pulserer nogle neutronstjerner med en helt speciel frekvens, hvis svage variation fortæller noget om styrken af det magnetiske felt. Man har således fundet ud af, at styrken af de stærkeste magnetfelter, der hidtil er observeret på neutronstjerner, er sammenlignelige med det såkaldte kritiske felt. Dette betegner et magnetfelt, der er så stærkt, at det spontant kan omdannes til elementarpartikler (se boks næste side). Omvendt er disse felter sammenlignelige med felterne tæt



Figur 1. Neutronstjerner har et kraftigt magnetfelt, som styrer strålingen i bestemte retninger. Rotationen giver anledning til de typiske blink.

Til venstre: Et billede taget med Hubble Space Telescope af den til dato bedst kendte supernova, SN1987A, der på billedet er 7 år "gammel". Til højre vises et forstørret udsnit.



Figur 2. Superhurtige – relativistiske – elektroner oplever atomkerne i en krystal som en samlet enhed og ikke som kugler i et krystalgitter

på overfladen af en atomkerne, hvilket måske ikke er så overraskende, hvis man betragter en neutronstjerne som en gigantisk atomkerne.

Til sammenligning er de stærkeste magnetfelter, der kan laves i laboratoriet, kun omkring en ti-milliontedel af det kritiske felt, og det endda kun for magneter, der bringes til kollaps for at øge feltstyrken. Superledende laboratoriemagneter er endnu en faktor hundrede svagere, og Jordens magnetiske felt, der får en kompasnål til at dreje, er svagere endnu med ca. 100 millioner millioner gange mindre feltstyrke end i det kritiske felt.

En yderligere sammenligning finder man ved at betragte det elektriske felt, der skal til for at påvirke en hurtig elektron med den samme kraft som det kritiske magnetfelt. Dette elektriske felt er lidt mere end 10^{18} Volt per meter og altså godt og vel 10 milliarder gange stærkere end de stærkeste elektriske felter, man kan frembringe kunstigt.

Krystalfelter og elektronbaner

Forskerne har altså et problem, hvis de gerne vil studere, hvordan partikler opfører sig, når de påvirkes af et magnetfelt af en størrelse nær det kritiske felt. Men som nævnt har en ny teknik rådet bod på dette.

Det har nemlig vist sig, at meget hurtige, såkaldt ultra-relativistiske elektroner (se boks), der passerer en krystal vil

opleve et felt, som under visse betingelser er af samme styrke som – eller op til hundrede gange stærkere end – det kritiske felt. Denne effekt svarer groft sagt til at slå smut med en sten på stillestående vand: I stedet for at synke i vandet, "preller" stenen af på vandoverfladen som om vandmolekylerne virker samtidigt på stenen som en hård plade. I tilfældet med elektronen og krystallen, tiltrækker atomkerne elektronen med en kraft, som er den samme overalt i krystallen. Det er som om atomkerne er "smurt ud" langs elektronbanen og ikke befinder sig i de ganske bestemte positioner som krystalgitteret angiver (se figur 2).

En sådan situation – med felter af styrke over den kritiske – kan skabes i de store acceleratore ved det fælles europæiske forskningslaboratorium, CERN. Det forskerhold, jeg deltager i, har på baggrund af sådanne forsøg benyttet den nævnte effekt til at undersøge opførslen af elektroner i meget stærke felter som f.eks. ved overfladen af en neutronstjerne, og i det hele taget i felter af astronomisk størrelse.

I eksperimentet observeres det meget energirige lys, som udsendes af elektroner, når de accelereres, som det f.eks. sker, når de beskriver en cirkelbane under passagen af krystallen.

En ny type stråling

Når en elektron f.eks. passerer et magnetfelt vil den blive accelereret og udsende stråling, såkaldt

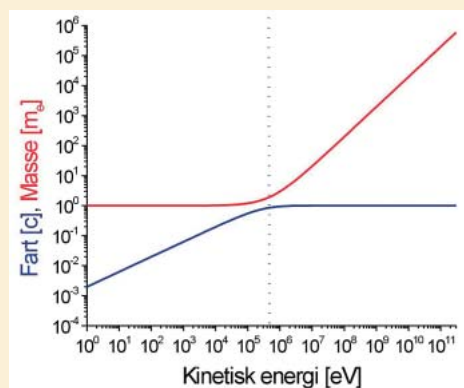
Det kritiske felt

I elementarpartikelfysikken indgår fire fundamentale størrelser, som traditionelt benævnes m , e , h og c – elektronens masse og ladning, Plancks (reducerede) konstant og lysets fart, hvoraf de sidste tre signalerer tilstedeværelsen af elektromagnetisme, kvantemekanik og relativitetsteori. Kombinerer man disse fire størrelser på passende måde, finder man et elektrisk felt, som benævnes det kritiske felt, ($E = m^2c^3/eh = 1,3 \times 10^{18}$ V/m eller $B = 4,4 \times 10^9$ T). Allerede sidst i 1920'erne – længe før synchrotronstråling osv. blev observeret – fandt man ud af, at en elektron, der bliver sendt ind i et kritisk felt, vil blive reflekteret med en sandsynlighed større end 1 – det såkaldte "Kleins paradoks"! På dette tidspunkt var antipartikler (se nr. 6, 2001) endnu ikke opdaget, og man ved nu, at Kleins paradoks skyldes, at elektronen producerer et partikel-antipartikel par i et kritisk felt, således at der kan reflekteres to elektroner fra kun en indkommende elektron.

Relativistiske elektroner

Et af de basale fænomener i relativitetsteorien er, at intet kan bevæge sig hurtigere end lyset i vakuum. Nu er lysets fart imidlertid kolossalt høj, så dette fænomen berører ikke vores dagligdag direkte. Faktisk var den første, der målte lysets fart, danskeren Ole Rømer, som observerede Jupiters måner og tiden for deres forsvinden bag Jupiter som funktion af afstanden dertil. Derved fandt han "lysets tøven" med en værdi, som ligger meget tæt på vore dages målinger, ca. 300.000 km/s.

For biler, flyvere og personer er det en umulighed at nærme sig så store hastigheder, men elementarpartikler kan man let accelerere så meget, at deres fart nærmer sig lysets. Fortsætter man med at tilføre dem energi, når de nærmer sig denne grænse, vil energiforøgelsen kun give ganske lidt højere fart, men partiklerne vil derimod blive tungere! Når denne masseforøgelse er af samme størrelse som deres masse i hvile kaldes partiklerne 'relativistiske', og når masseforøgelsen er mange gange større taler man om ultrarelativistiske partikler. Således har de i denne artikel omtalte elektroner en masse, der er forøget 500.000 gange og en fart, der er 99.99999995% af lysets (se figur). De vejer således ca. det samme som en atomkerne i guld.



På figuren vises med blåt farten af en elektron i enheder af lysets fart og med rødt dens relativistiske masse i enheder af elektronmassen, begge som funktion af den kinetiske energi i elektronvolt. Den lodrette, stiplede linie angiver den kinetiske energi svarende til en elektronmasse (fra $E=mc^2$) og markerer således en skillelinje mellem urelativistiske og relativistiske elektroner. Til venstre for skillelinjen er massen lig elektronmassen, og farten øges med kvadratroden af energien (den velkendte $E=\frac{1}{2}mv^2$), mens på højresiden er farten næsten lig lysets fart, hvorimod massen tiltager lineært med energien. Bemærk, at figuren er dobbelt-logaritmisk.



Foto af Krabbetågen i stjernebilledet Tyren. Tågen er resterne af en supernova fra 1054, og det blå lys, der udsendes, er synkrotronstråling. I centrum befinder sig en pulsar: Rotationen bevirker, at lyset observeres som blink eller pulser 30 gange i sekundet.

Foto: ©ESO (European Southern Observatory)

synkrotronstråling (se boks). Billedligt talt kan man se dette som en proces, hvor elektronens ladning "rammer" de felt-linier, der udgør magnetfeltet, og "skyder" dem ud i form af stråling. Energien af denne stråling afhænger dels af elektronens fart, dels af magnetfeltets

styrke. Derudover kan elektronens såkaldte spin vekselvirke med magnetfeltet og give anledning til stråling. Den sidstnævnte type stråling har været meget lidt udforsket, idet den er af alt for lav energi for de konventionelle magnetfelter, man kan skabe i et laboratorium.

Med den nye teknik har vi nu kunnet studere denne stråling, som kan kaldes spin-stråling.

Elektronens indre kompasnål

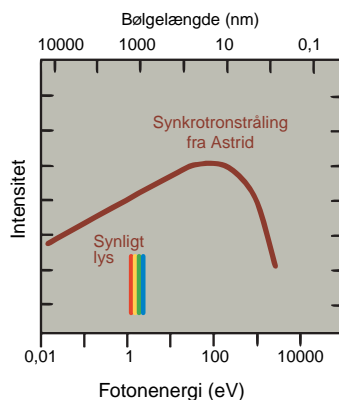
I visse sammenhænge kan man betragte elektronens spin som en rotation om dens egen akse.

Da elektronen er elektrisk ladet, vil dette give anledning til et fænomen, der minder om en strøm i en lille spole, som vil være omgivet af et magnetfelt. Dette felt kan vekselvirke med et ydre felt, og afhængig af retningen af det ydre felt vil der være en foretrukket retning af elektronens spin eller dens "egenrotation". Man kan således kalde elektronens spin for dens "indre kompasnål".

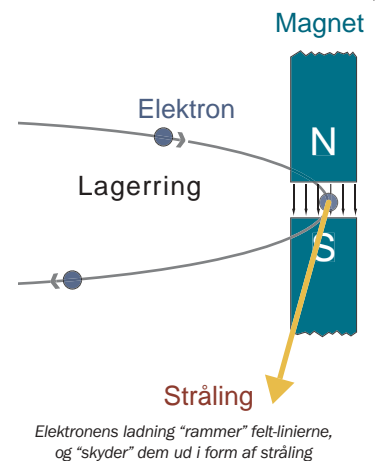
I mange situationer er det en fordel at kunne "ensrette" eller polarisere partiklernes spin i acceleratorerne. Dette sker så at sige "af sig selv", idet en elektron, der passerer en magnet, vil vende sin spin-retning, hvis ikke den i forvejen er rettet mod magnetfeltet, ganske som en kompasnål vil rette sig efter nord- og sydpolen. I acceleratoren sker processen under udsen-

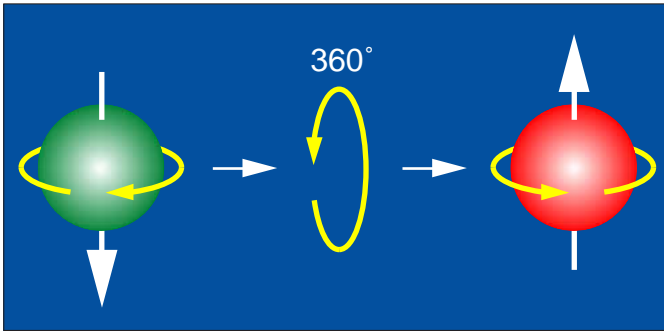
Synchrotron-stråling

I slutningen af 1940'erne gennemgik udviklingen af teknologien til acceleration af elementarpartikler et stort spring: I stedet for at fastholde de magnetiske felter, der skal til for at frembringe en cirkulær bane, fandt man på at øge magnetfelterne i takt (synkront) med partikelenergien. Imidlertid optrådte der et fænomen, som man i første omgang fandt meget generende: De accelererede partikler, som nu havde nået hidtil usete energier, begyndte at udsende synlig stråling, der straks fik



navnet synchrotronstråling. Dette var generende, idet den energi, man møjsommeligt havde oparbejdet, hurtigt gik tabt under udsendelse af lys. Senere blev denne ulempe vendt til en fordel, idet man indså, at man med synchrotron-stråling kan danne meget intenst lys med bølglængder, der varierer fra infra-rød til hård røntgen-stråling. På den danske synchrotronstrålingsfacilitet, ASTRID, benyttes f.eks. røntgenstråling til biologiske undersøgelser i et såkaldt røntgenmikroskop.





Figur 3. I visse sammenhænge kan man betragte elektronens spin som en rotation om dens egen akse. Den skal imidlertid rotere to hele omgange, inden den kommer tilbage til udgangssituationen. Der er således tale om om et kvantemekanisk fænomen, som ikke kan beskrives (eller afbildes) præcist med hverdagens sprogbrug.

delse af stråling med en meget lille energi, og den tid, det tager at polarisere (ensrette) elektronernes spin i en sådan kæmpe-maskine, er sædvanligvis nogle timer. Som en ekstragevinst er det udsendte lys polariseret, dvs. dets svingninger finder sted i et bestemt plan.

Et velkendt eksempel på polariseret lys kan man observere ved at kigge ud over havet på en solrig dag: En del af sollyset, der reflekteres i vandet, bliver polariseret og tvinges til at svinge i det lodrette plan, vinkelret på vandet. Denne del kan let filtreres fra, f.eks. med polaroidsolbriller (prøv at dreje brillerne 90 grader – så slipper den del af lyset igen igennem).

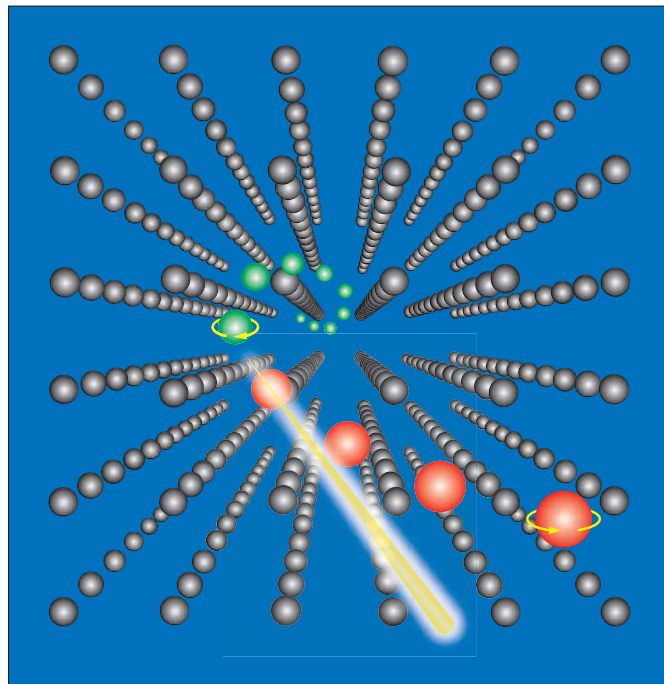
Fra overlydsfly til snegl

Det nye resultat, som vores forskerhold har opnået, viser, at i krystalfelter, der er sammenlignelige med de kritiske felter, vil ensretningen af elektronens spin finde sted i løbet af mindre end en milliardtedel sekund (et nanosekund), og den stråling, der bliver udsendt, vil være usædvanligt kraftig. Faktisk vil den dominerende del af strålingen være så kraftig, at elektronen mister stort set al sin energi på én gang, svarende til, at et overlydsfly slukker for motoren og fra det ene øjeblik til det andet bevæger sig som en snegl.

Som yderligere en sammenligning af konventionelle magnetfelter og kritiske felter ser man her, at i de store accelerators ensrettes elektronerne i løbet

af timer, mens det i krystallen højst tager et nanosekund. Magnetfeltet i en kæmpeaccelerator sammenlignet med et krystalfelt forholder sig således som timer til nanosekunder.

Denne krystal-proces giver ny viden om uhyre stærke elektriske og magnetiske felter – som om man havde en mini-neutronstjerne på Jorden. I denne forbindelse er krystaller unikke, idet sådanne processer hidtil ikke har kunnet studeres på andre måder.



Figur 4: Her befinder elektronen med rotationsretning med uret (den grønne) sig i en krystal (vist som grå atomer) og vil mere eller mindre øjeblikkeligt ændre rotationsretning (til den røde) under udsendelse af stråling i en fremadrettet kegle (markeret med gul).

Fremtidige perspektiver

Vore resultater har stor betydning for forståelsen af strålingen udsendt fra neutronstjerner samt for konstruktionen af den kommende generation af partikelacceleratorer. Dette skyldes, at når elektroner accelereres til så høj energi, som det er planlagt, vil deres elektriske felter påvirke modgående elektroner med en styrke, der er sammenlignelig med styrken fra det kritiske felt. Således vil elektronerne tabe energi under udsendelse af stråling, der bl.a. vil afhænge af deres indbyrdes orientering af spinnets.

Også inden for astronomien har man i den senere tid i langt højere grad forsøgt at udnytte polarisationen af det udsendte lys til at sige noget om de observerede processer. Hvis man således vil udvide kendskabet til neutronstjerner til at omfatte polarisationsgraden af lyset udsendt fra dem, vil det være nødvendigt at inkludere den nye viden, man har opnået fra vores studier af elektroner i krystaller. ©

Om forfatteren



Ulrik I. Uggerhøj er Steno-stipendiat ved Institut for Fysik og Astronomi
Tlf.: 8942 3738
E-post: ulrik@ifa.au.dk
www.ifa.au.dk/~ulrik

Yderligere læsning

Om neutronstjerner o.l.:
Jan Teuber: Kosmiske katastrofer, Teknisk Forlag 1997.
M. Begelman and M. Rees: Gravity's Fatal Attraction, Scientific American Library, NY. 1998.