

Fast brint – Universets mærkeligste stof

Af Jørgen Schou, DTU Fotonik, Risø Campus.

Kan man forestille sig et fast stof, der er så flygtigt, at det ikke findes i selv de koldeste interstellare, tætte skyer? Et stof, der kun kan eksistere i vakuum ved nogle få grader kelvin, og som alligevel skydes ind i de varmeste eksperimenter i fusionsenergi, og et stof, der kan bringe store accelerator eksperimenter i katastrofale vanskeligheder?

Indledning

Stoffet er fast brint, der først gang blev bragt i fast form i 1899 af James Dewar, der også er kendt for den beholder til opbevaring af kolde væsker, som han lagde navn til, en Dewar-beholder [1]. Ironisk nok blev fast brint kondenseret ud fra afkøling af brint i hans egen kølemaskine uden brug af flydende helium, da det på dette tidspunkt var vanskeligt at skaffe tilstrækkelige mængder af heliumgas.



Figur 1. James Dewar (1842-1923) var skotsk kemiker og fysiker.

Brint i sig selv er Universets mest almindelige grundstof, men da det er så flygtigt, havde man ikke før flydende helium kunne håndteres som kølemiddel, nogen realistisk chance for rutinemæssigt at kondensere brint. Skal brint lægges på en flade til overfladeundersøgelser i vakuum, skal fladen ned på en temperatur omkring 2,5 K. Det kræver typisk at det flydende helium pumpes ned til 20-50 mbar, hvilket gør nedkølingsprocessen endnu vanskeligere. Faktisk har de fleste fysikere, der arbejder med fast brint, aldrig eller sjældent set selve stoffet, da det må beskyttes bag strålingsskærme, så at den termiske stråling fra omgivelserne ikke får stoffet til at fordampe. Brint findes i tre isotoper, H med kerne af en proton (vi kalder det her hydrogen for at skelne det fra fællesbegrebet, brint, af alle brintisotoper), deuterium D med kerne af en proton og en neutron, og Tritium T, der i øvrigt er radioaktivt med en halveringstid på 12,3 år, med en kerne af en proton og to neutroner (se tabel 1). Da atomar brint lynhurtigt forener sig med et andet atom til et brintmolekyle, har vi altså seks kombinationer af forskellige molekyler.

Isotop af brint (symbol)	Hydrogen (H)	Deuterium (D)	Tritium (T)
Atomar masse (amu)	1,008	2,014	3,016
Forekomst (relativt til H)	1	0,00015	Radioaktiv Halveringstid = 12,3 år

Tabel 1. Brintisotoper.

Molekyle	H ₂	HD	D ₂
Molekylær masse (amu)	2,016	3,021	4,028
Triplepunkt temperatur (K)	13,96	16,6	18,7
Bindingsenergi/molekyle i det faste stof (meV/molekyle)	8,65	10,8	12,65
Sublimationstryk ved 2,7 K (mbar)	$2,0 \cdot 10^{-12}$	$6,0 \cdot 10^{-16}$	$1,7 \cdot 10^{-19}$
Massetæthed ved 0 K (g/cm ³)	0,089	0,14	0,20

Tabel 2. Stabile molekyl-kombinationer, fra [4]. Triplepunktet er temperaturen (og trykket), hvor stoffet i ligevægt eksisterer både som gas, væske og fast stof. For vand er triplepunkt temperaturen 273,16 K og 0,01° C. 1 meV = 0,001 eV = $1,60 \cdot 10^{-19}$ J.



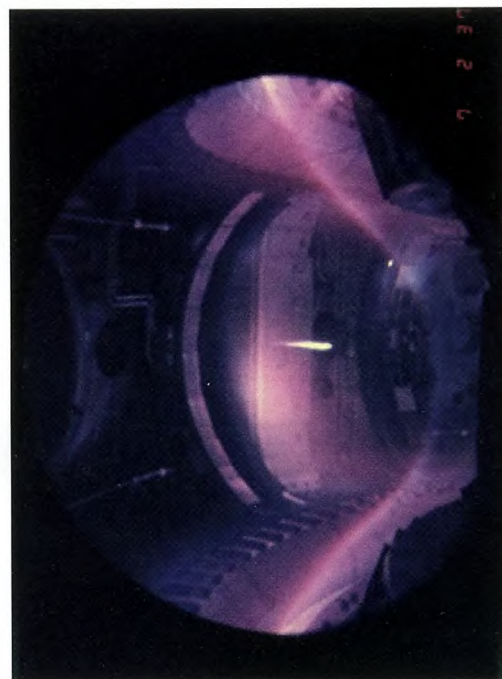
Figur 3. Verdens længste vakuumkammer (med et tryk på under 10^{-12} mbar) har en omkreds på 27 km. Røret i midten indeholder et indre rør for protonstrømmen på 7 TeV, der holdes på plads af superledende magneter med en temperatur på 1,9 K [3].

Alle egenskaber, som er bestemt af elektronstrukturen, dvs. de kemiske og optiske egenskaber, er praktisk talt ens for alle brintmolekyler, men alt hvad der har med massen at gøre, afhænger stærkt af den specielle isotop kombination. I øvrigt blev deuterium først entydigt påvist af den amerikanske kemiker Harold Urey, som for dette arbejde fik Nobelprisen i kemi 1934. Urey kaldte så den nye isotop for deuterium, inspireret af de græske og latinske ord for "to", svarende til et brintatom med massetallet 2 [2]. Vi har så at gøre med det faste stof med de største forskelle fra den ene til den anden isotopkombination. De molekyllære faste stoffer H_2 , D_2 og HD har for eksempel så vidt forskellige krystalstruktur, smeltepunkter og kondenseringstemperatur i vakuum (tabel 2), og består alle af molekyler, der er ordnet i et gitter.

Da molekylerne kan rotere selv, når de sidder i gitteret, afhænger krystalstrukturen af hvor hurtigt molekylet roterer, dvs. med hvilket kvantetal rotationen er beskrevet. Brintmolekylet H_2 er så let, at det på grund af Heisenbergs usikkerhedsrelationer kun vanskeligt kan fastholdes på en given gitterplads i krystallen, og denne såkaldte nulpunktsenergi gør den allerede svage bindingsenergi mellem molekylerne i den faste form endnu mindre. De ca. 9 meV, hvormed et H_2 -molekyle er bundet til det faste stof er ca. 50 gange mindre end den energi, hvormed et vandmolekyle er bundet til is. Umiddelbart er der også kun en faktor 1,5 mellem bindingsenergien i fast H_2 og fast D_2 , men da bindingsenergien indgår eksponentielt i fordampningstrykket – her er det så sublimationstrykket, da det foregår fra et fast stof – er der 7 størrelsesordeners forskel i tryk for isotopkombinationer af samme element. Det er i sandhed en utrolig forskel for det samme grundstof!

De koldeste og mest flygtige piller skydes ind i det "varmeste" eksperiment

Små piller af fast brint er efterhånden blevet en vigtig ingrediens i fusionseksperimenter, der på lang sigt skal gøre menneskeheden uafhængig af fossile brændstoffer. På alle eksisterende store fusionseksperimenter, f.eks. JET (Joint European Torus), kan der mangle brintkerner i centrum af plasmaet, så fusionsprocesserne går i stå, eller man kan blot ønske at hæve tætheden i centrum af plasmaet. En umiddelbar løsning var at omgive plasmaet med brintgas, men gassen diffunderer simpelthen ikke ind i plasmaet.



Figur 2. Pilleindskydning i fusionsplasma ved eksperimentet ASDEX i Garching ved München. Man ser den vandrette hvide stribe, der er et lysende brintspor fra pillen indskudt fra den ene side. Pillehastighederne i det pågældende eksperiment varierede fra 240 til 1200 m/s og pille massen fra 0,5 til 1,2 mg D_2 .

Da idéen om at skyde piller af fast brint ind i plasmaet i fusionseksperimenter, kom frem i 1960'erne, troede ingen lavtemperatur- eller plasmafysikere på at det ville være muligt. Dels er det ikke ligetil at fremstille piller af det flygtige brint og dels skulle pillerne skydes ind med en hastighed på mange km i sekundet. Endeligt forventede man, at så snart plasmapartiklerne i udkanten af plasmaet ramte pillen, ville den gå i stykker eller fordampe! Men virkeligheden viste sig at være anderledes. Så snart den hurtige pille trænger ind i plasmaet, bliver den omgivet af en sky af fordampet brint, der beskytter pillen. Resultater fra fusionseksperimenter viser, at piller på 0,1g kan trænge 20-30 cm ind i plasmaet (se figur 2), og både fremstillingen såvel som indskydningen fungerer nu rutinemæssigt ved alle store plasmaeksperimenter. Der er således også planlagt pilleindskydning ved det kommende internationale fusionseksperiment ITER. Vi er så ved at komme i den paradoksale situation, at det mest flygtige faste stof skydes ind i det varmeste eksisterende eksperiment.

Det mest ødelæggende stof for LHCs vakuum

Modsat fusionsplasma eksperimenter, hvor fast brint fungerer som "ekstra brændstof" i plasmakernen, er fast brint et farligt stof for vakuummet i verdens største menneskabte eksperiment, Large Hadron Collider (LHC) på CERN [3]. I LHC sendes stråler af protoner af sted med en energi på 7 TeV i en ring med omkreds ca. 27 km. Denne protonstråle, der bevæger sig med en hastighed lige under lysets, holdes på plads af et magnetfelt fra superledende magneter, der skal være på ca. 2 K for at give et tilstrækkeligt stærkt felt. Protonstrålernes gennemløb forstyrres af restgasser i vakuumkammeret, der holdes på 10^{-12} mbar – en teknologisk bedrift uden lige at have et så godt vakuum i en så stor ring.

Restgasser er typisk vand- og brintmolekyler. Brint er normalt den sværeste gas at få pumpet ud, da molekylerne bevæger sig med stor hastighed. I de sektioner af vakuumkammeret, der har termisk forbindelse til afkølede supermagneter, kan der komme kolde flader i kontakt med vakuummet. Nøjagtigt som vandmolekyler sætter sig på en kold forrude på en bil som is en vintermorgen, kan fast brint også kondensere på en kold flade. Det ville under andre omstændigheder blot virke som et kryopanel og ekstra "pumpekraft", men da fast brint er utroligt flygtigt, kan en enkelt vildfaren elektron eller proton frigøre mere end 10^3 brintmolekyler ved at ramme laget af fast brint. Bindingsenergien i fast brint er jo ca. 50 gange mindre end for is, og dermed er vakuummet i langt højere grad truet af flader med fast brint end med is. Her er det brints flygtighed, der er den afgørende faktor. I praksis er strategien derfor at have et vakuum, der er så godt som muligt, og samtidigt med at man har så få kolde flader, der kan være udsat for stråling, som muligt.

Litteratur

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/James_Dewar
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Deuterium>
- [3] <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [4] "Hydrogen Properties for Fusion Energy", P. Clark Souers, University of California Press, 1986.



Jørgen Schou, dr. scient. Ansat ved DTU Fotonik, Risø Campus. Arbejder med intens laserbestråling af overflader, bl.a. for at lave tyndfilm af nye materialer. Formand for DFS siden 2005.

KVANTE-stigen

– meddelelser om stort og småt

'Kvantestigen' bruges her som overskrift på en spalte der kan rumme stort og småt f.eks. læserbreve og redaktionelle kommentarer. I fysikken benyttes ordet til at anskueliggøre en lagdeling af kvantefænomener i naturen, hvor de enkelte lag eller trin placeres efter deres karakteristiske energi.

Kommentar til "Mørkets hastighed"

Spørgsmålet om 'mørkets hastighed' i forhold til lysets blev stillet i KVANT nr. 3, 2007 og diskuteret yderligere i nr. 4. Det har affødt endnu en kommentar fra en læser:

"Man kan ikke sammenligne lys og mørke på den måde. Lys er energi, og man kan sende en lysstråle, men hvis du 'kaster en skygge', er det lyset, du fjerner, og du kan ikke købe mørkebatterier til din stavlygte og sende en mørke- eller skyggestråle. Lys og mørke følges ad og at tale om 'mørkets hastighed' som noget selvstændigt er vrøvl.

Matematiklærerens opstilling med trekanter er i enhver henseende korrekt. Af ovennævnte grunde kan vi undvære skyggen og nøjes med at betragte hans lysplet, og den bevæger sig ganske rigtigt med en overlyshastighed, som endda kan forøges vilkårligt ved at gøre forholdet mellem trekanterne større.

Forklaringen er rørende simpel: En lysplet er ikke en 'ting', som man kan flytte. Der er tale om et synsbedrag. Det eneste, som bevæges er lyskilden, der drejes. Når man mener at se en lysplet flytte sig, dannes der i virkeligheden en NY lysplet (og fjernes en gammel) på det sted hvor lyset fra lyskilden netop ankommer."

Kay Akselbo

Videnskab.dk åbnet

Danmark har fået et nationalt webmedie for videnskab: www.videnskab.dk. Siden har været planlagt igennem nogle år og er inspireret af to lignende sider i Norge og Sverige, der begge har været en succes, bl.a. fordi de har tiltrukket mange unge læsere. Tanken er dels at offentligt støttet forskning skal komme befolkningen til gode og hvis befolkningen bliver bedre informeret om forskning, kan politikerne bedre argumentere for øgede bevillinger til forskning. I sidste ende handler det også om økonomi, idet politikerne håber at forskningen kan anvendes af virksomhederne og derved bidrage til en bedre national økonomi.

Historierne samles bl.a. fra alle landets universiteter og redigeres af en lille gruppe videnskabsjournalister, der også finder historier fra udlandet. To fysikere fra Niels Bohr Institutet, der er på feltarbejde, skriver en blog om det. Det er Morten Bo Madsen, som deltager i Mars-forskningen og isforskeren Jørgen Peder Stefensen, der opbygger en base på Grønland. Det er en fin måde at få personerne bag forskningen frem. Følg selv med på www.videnskab.dk.

Michael Cramer Andersen