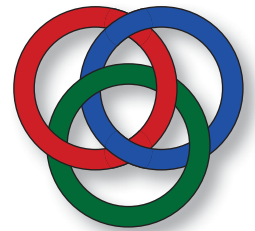


Fysikkens forunderlige trekløver

I 40 år har fysikerne ledt efter en forunderlig opførsel af tre identiske partikler, hvor de tre partikler kan danne uendelig mange ens former, der hver er 22,7 gange større end den foregående. Nu er en række konsekvenser af dette fænomen endelig observeret for ultrakolde atomer.



Af Martin Thøgersen, Dmitri V. Fedorov,
og Aksel S. Jensen

■ I 1970 postulerede den russiske fysiker V. Efimov ud fra rent teoretiske argumenter, at tre partikler kan vise sig i forskellige formationer, der ligesom russiske dukker kun afviger fra hinanden ved deres størrelse. Disse gigantiske systemer blev i første omgang betragtet med mistro som problematiske, derpå som patologiske og meget eksotiske. Med nye teknologier fra ekstremt kolde atomgasser er det nu lykkedes at finde afslørende spor for præcis denne opførsel af tre atomer.

Denne type af egenskaber er blevet et meget varmt forskningsområde i stærk udvikling. Man taler ligefrem om *Efimov-fysik*, der nu er blevet en betegnelse for en hel klasse af kvantemekaniske fænomener.

Værdifuld ny indsigt

De nye resultater fortæller først og fremmest, at det er teknisk muligt at kontrollere disse ekstremt kolde atomare gasser overordentligt præcist. I frem-

tiden vil eksperimenter med kolde atomare gasser få adskillige anvendelser, formentlig på niveau med, hvor laseren er i dag. Efimov-fysikken er nu direkte medvirkende til, at man både kan stabilisere og studere disse gasser.

Det er endvidere meget tilfredsstillende at få bekræftet rigtigheden af den bagvedliggende teoretiske beskrivelse. Derved bliver andre forudsigelser med samme grundlag meget mere troværdige, f.eks. at de samme egenskaber og fænomener vil kunne findes ved tilsyneladende helt andre fysiske systemer som f.eks. atomkerner eller molekyler. Den nye indsigt, der opnås ved at anvende begreber og redskaber fra ét fysikområde (kemisk-, faststof-, molekyl-, atom-, kerne-, partikel-, eller matematisk fysik) på et andet, må ikke undervurderes. Der er mange eksempler i fysikkens historie på, at dette har givet store og hurtige fremskridt.



De tre Borromeanske ringe, der kan tages fra hinanden hvis en af dem bliver klippet over. Man finder dette symbol mange steder – bl.a. i symboler for Borromeo-familien fra Milano og Lago Maggiore i Norditalien.

Uafhængig af skala og rumlige detaljer

De centrale begreber, der begrunder interessen for fænomenerne er *universalitet* og *skala-invarians*. En partikel beskrives i kvantemekanikken som en tilstand med en bestemt sandsynlighed for at befinde sig

bestemte steder i rummet med bestemte hastigheder. Hver tilstand har en energi, hvor kun bestemte værdier er tilladte; de er *kvantiserede*. En partikel i en kvantemekanisk tilstand kan opholde sig i et område af rummet, der er forbudt i klassisk fysik (se boks 1).

Hvis en hård lille gummibold bevæger sig frem og tilbage mellem to vægge vil den i klassisk fysik altid befinde sig i rummet mellem disse vægge. Ser man kvantemekanisk på systemet vil gummibolden også trænge lidt ind i væggene, og i ekstreme tilfælde vil den med altovervejende sandsynlighed kunne befinde sig inde i væggene. I denne situation er det ikke overraskende, at det bliver ligegyldigt, hvordan kassen ser ud indeni, bare der er en eller anden form for hulrum, der kan virke tiltrækkende. Når strukturen er uafhængig af hulrummets detaljer, kaldes den *universel*. Endvidere er kassens størrelse ligegyldig, idet strukturernes

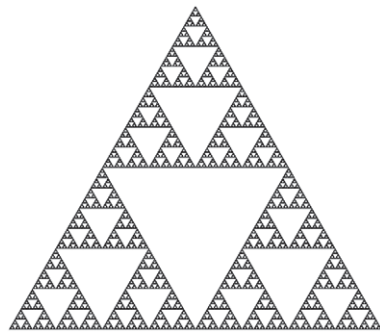
størrelse bare forøges tilsvarende, således at for eksempel et dobbelt så stort hulrum giver et dobbelt så stort system. Dette kaldes *skala-invarians*.

Kerner, atomer og molekyler på lige fod

To partikler kan både bevæge sig i forhold til hinanden og samlet uden at ændre deres indbyrdes afstand. Kun den relative bevægelse er interessant her. Derfor forestiller vi os, at en af partiklerne sidder fast i centrum og tiltrækker den anden på en måde, der kan beskrives ved et lille hulrum. Hvis de to partikler er svagt bundne kan afstanden mellem dem være langt større end hulletrummets udstrækning svarende til, at gummibolden befinder sig langt inde i væggen. Afstandene kan derfor blive gigantstore, og partiklerne befinde sig i klassisk forbudte områder, og dermed være ekstremt kvantemekaniske. Strukturerne bliver universelle, så detaljerne og oprindelsen til den nødvendige tiltrækning er uden betydning. De er skala-invariante, fordi de mindste af størrelserne kan findes ved alle længdeskalaer som for eksempel størrelsen af atomkerner (10^{-12} cm), atomer (10^{-8} cm) og molekyler (10^{-6} cm). Det er også muligt at de to partikler slet ikke kan hænge sammen, fordi hulletrummet ikke er dybt eller stort nok. Kvantemekanikken siger nemlig, at en partikel ikke kan ligge helt stille i et bestemt punkt. Den vil altid sitre en smule, og hvis hulletrummet er for lille vil partiklen ikke kunne blive liggende inde i hullet.

Tre partikler giver sammenhæng

Nu ser vi på tre partikler, hvor hvert par lige netop *ikke* kan hænge sammen, fordi tiltrækningen er lidt for svag. Alligevel kan de tre partikler hænge sammen. Hvert par behøver den tredje partikel som en slags lim. Efimov viste endvidere, at der kan være uendeligt mange trepartikkelformationer, der ligner hinanden til forveksling, idet hver fremkommer fra den foregående ved at gange størrelsen med et bestemt faktor. For tre ens par-

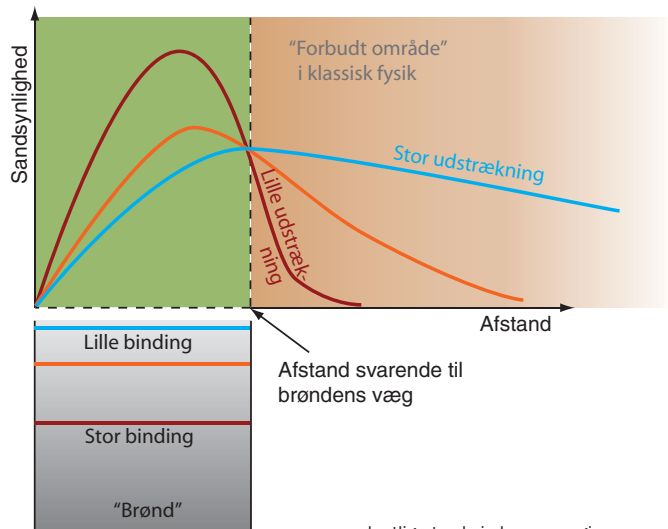


Figur 1. Fænomenet skala-invarians kan findes i mange sammenhænge, hvor en struktur gentages når man zoomer ind. For eksempel for de russiske matryoshka-dukker, visse typer blomkål og den trekantede Sierpinski-fraktal. Dette forekommer også inden for fysikken med tre atomkerner, atomer eller molekyler, hvor zoom-faktoren er 22,7. Dette kaldes for Efimov-effekten.

Boks 1. Afstand mellem to partikler

Figuren viser kurver over sandsynligheder for at finde en partikel i en given afstand fra en anden partikel i et system, hvor de to partikler tiltrækker hinanden. Tiltrækningen mellem de to partikler symboliseres ved en "brønd" (den firkantede kasse nederst), hvor bindingen mellem de to partikler er større, jo længere partiklerne er nede i brønden. Partikler tæt på brøndens væg er meget løst bundne, men kan ikke komme ud af brønden uden at få tilført energi.

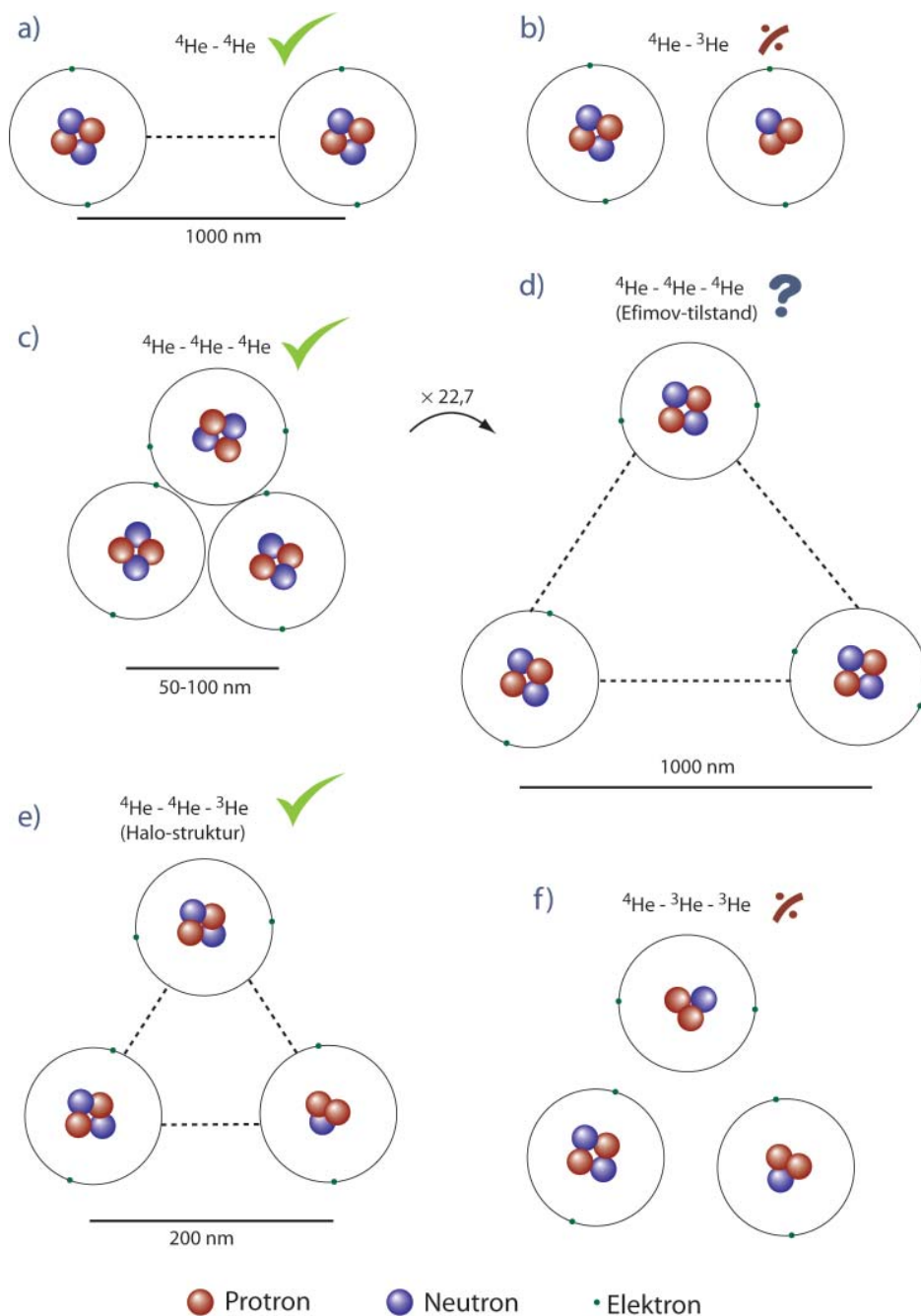
Ser man klassisk på systemet, forhindrer brøndens vægge, at afstanden mellem de to partikler bliver større end brøndens bredde. Imidlertid kan partiklen have bølgeegenskaber, der skal beskrives ved kvanteteorien. Og så er der en sandsynlighed for at finde partiklen udenfor



brønden, som illustreret ved de tre kurver. Faktisk kan afstanden mellem partiklerne blive overor-

dentlig stor, hvis bare energien bliver tilsvarende lille. De tre kurver svarer til forskellige bindingsenergier og dermed til forskellige afstande.

Boks 2. Helium som trepartikelsystem



Et normalt helium-atom består af to negativt ladede elektroner, som kredser omkring atomkernen, der består af to neutrale neutroner og to positivt ladede protoner. Elektronerne kredser om kernen i en afstand, der er omkring 100.000 gange større end kernens udstrækning. Det samlede atom er neutralt.

To sådanne heliumatomer tiltrækker hinanden meget svagt, men lige netop tilstrækkeligt til, at de kan hænge sammen i en løs struktur med en unaturlig stor diameter på omkring 1000 nanometer (a). Kraften mellem atomerne hidrører fra den elektriske

tiltrækning mellem de modsat ladede elektroner og protoner. Hvis et af disse to heliumatomer erstattes af et andet med kun en neutron (b), falder de fra hinanden. Dette skyldes udelukkende ændringen af massen.

Tre normale heliumatomer kan ligeledes hænge sammen (c), men størrelsen er nu kun cirka 50-100 nanometer – dvs. almindelig størrelse for små molekyler. Imidlertid viste teoretiske beregninger, at dette trepartikel system også burde findes i yderligere netop en anden kvantetilstand (d) på omkring 1000 nanometer dvs. ikke helt

22,7 gange (større). I 1986 blev denne foreslået som en Efimov-tilstand. Et meget vanskeligt bekræftende eksperiment er for søgt flere gange uden held.

Hvis et af de tre normale helium-atomer erstattes af et med kun en neutron (e), kan det nye tre-partikel system stadig hænge sammen, men kun i en tilstand med diameter på omkring 200 nanometer og tilsvarende svag binding. Det er en tydelig såkaldt halo-struktur. Hvis endnu et af de normale atomer erstattes med et en-neutron heliumatom (f), bliver tre-partikel systemet ustabil og er slet ikke bundet mere.

tikler er denne faktor 22,7. Disse strukturer bliver således hurtigt store, idet allerede nummer 4 er omkring 10.000 gange større end den første (se figur 1).

Et tilbageblik

Trepartikel-systemets magiske karakter har en lang historie, der afspejles i mange klassiske symboler. Det gamle mundheld om, at sammenhold giver styrke, er symboliseret ved tre sammenhængende ringe, der alle falder fra hinanden, hvis en af dem fjernes. Dette er brugt i våbenskjoldet for Borromeo-familien, der har givet navn (Borromean) til trepartikel-systemer med denne egenskab. Lignende symboler er blevet brugt andre steder, blandt andet i den nordiske mytologi som Odins knude og i den kristne treenighed.

De nuværende forskningsaktiviteter er resultat af en udvikling, der meget fint illustrerer både universalitet og skala-invarians. Historien viser også, hvordan forskellige fysik-discipliner kan inspirere hinanden, simpelthen fordi de har meget tilfælles, når overflødig og overfladisk jargon fjernes, og det væsentlige afdækkes.

De første tilløb kom omkring 1960, hvor det teoretisk blev vist, at systemet af to meget løst bundne kerne-partikler kan være meget stort, især hvis den ene partikel er den neutrale neutron. I 1972 viste den kendte russiske fysiker Migdal, at tre partikler (to neutroner og en tungere atomkerne) kan have en sekvens af mange bundne kvantetilstande. I 1973 blev det vist eksperimentelt, at radius er exceptionelt stor for atomkernen ${}^{17}\text{F}$, som har en struktur svarende til en proton svagt bundet til atomkernen ${}^{16}\text{O}$. I 1983 vistes eksperimentelt, at atomkernen ${}^{11}\text{Be}$ med struktur som ${}^{10}\text{Be}^+$ neutron også har stor rumlig udtrækning i de to eneste forekommende bundne kvantetilstande.

Halosystemer

I 1985 målte man systematisk størrelserne af atomkernerne i de eksisterende lithium-isotoper

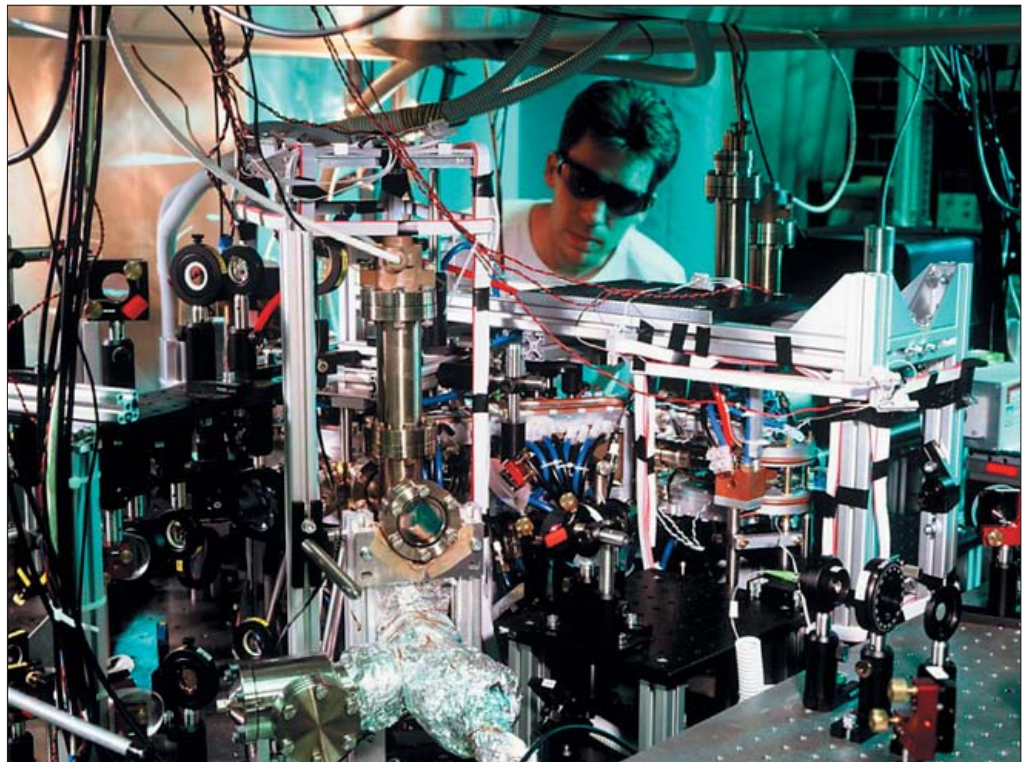
${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$ og ${}^{11}\text{Li}$ (se figur 2). Isotopen ${}^{10}\text{Li}$ er ikke med, da det er en ustabil atomkerne – tilsættes en neutron til atomkernen ${}^9\text{Li}$ kan dette system ikke hænge sammen. Tilføjes yderligere en neutron fås ${}^{11}\text{Li}$, som overraskende nok er et bundet trepartikel-system bestående af ${}^9\text{Li}$ + to neutroner. Da hverken to neutroner eller ${}^9\text{Li}$ + neutron kan hænge sammen hver for sig, betyder det, at ${}^{11}\text{Li}$ er et Bor-romeansk system. Dvs. fjerner man en af partiklerne falder de to andre fra hinanden.

Til stor overraskelse fandt man, at ${}^{11}\text{Li}$ er meget større end alle de andre nævnte isotoper. Den rigtige forklaring blev fremlagt i 1987 af P. G. Hansen fra Aarhus Universitet og B. Jonson fra Chalmers Tekniske Universitet i Göteborg. De konkluderede, at den usædvanligt lille bindingsenergi var ansvarlig for den store rumlige udstrækning. De kaldte denne struktur en *halo* inspireret af det engelske ord for en glorie, der omkranser hovedet på en helgen. For ${}^{11}\text{Li}$ er det to neutroner, der omkranser ${}^9\text{Li}$. Dette nye begreb, haloer, gav efterfølgende stærke argumenter for at udvide eksperimenterne af det kernefysiske landskab til undersøgelser udenfor de kendte stabile områder. Gigantiske halokerner som ${}^{11}\text{Li}$ kan være starten på en sekvens af de forudsagte Efimov-strukturer med stadig stigende størrelser. Desværre er to (neutronerne) af de tre partikler meget lettere end den sidste (${}^9\text{Li}$) og skalafaktoren på 22,7 bliver ændret til et utroligt meget større tal. Dette betyder, at allerede den anden Efimov-tilstand vil være så gigantisk, at den ikke kan eksistere, og naturligvis ligeledes er umulig at fabricere.

Gennembrud i laboratoriet

Efimov-effekten om universalitet og skala-invarians for tre partikler blev som nævnt formuleret af Efimov i 1970. Derefter søgte man efter kandidater til denne specielle trepartikelstruktur med meget store og meget løst bundne systemer.

Med halokernerne forelå en

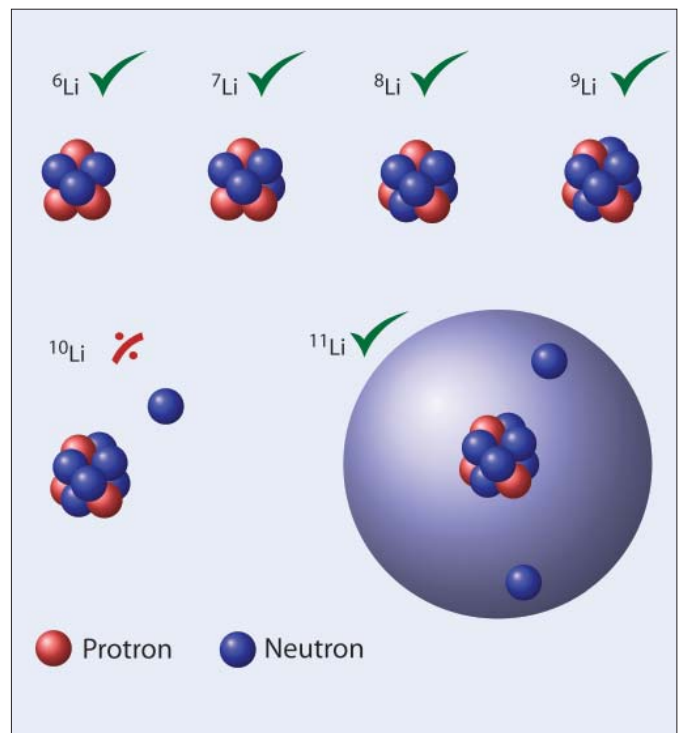


Figur 3. Foto af forsøg i Innsbruck med ultrakolde atomgasser samt målinger af de skabte Bose-Einstein kondensater.

type af realistiske kandidater som mulige Efimov-strukturer. I løbet af 1990'erne blev både universalitet og skala-invarians etableret som en holdbar forklaring på strukturen af de mange nye observerede halokerner. Igennem teorien blev det dog klart, at halo-kerner ikke er det rigtige sted at lede efter Efimovs skalering på 22,7. Der blev samtidig søgt efter lignende strukturer på skalaerne for atom- og molekyl-systemer (se boks 2). Det store eksperimentelle gennembrud kom, da det blev muligt at ændre vekselvirkningen mellem to atomer med et magnetfelt i laboratoriet. Dermed kan man finjustere systemet, så de to partikler er præcist på grænsen til at være bundne. Efimov-effekten kan således studeres i laboratoriet.

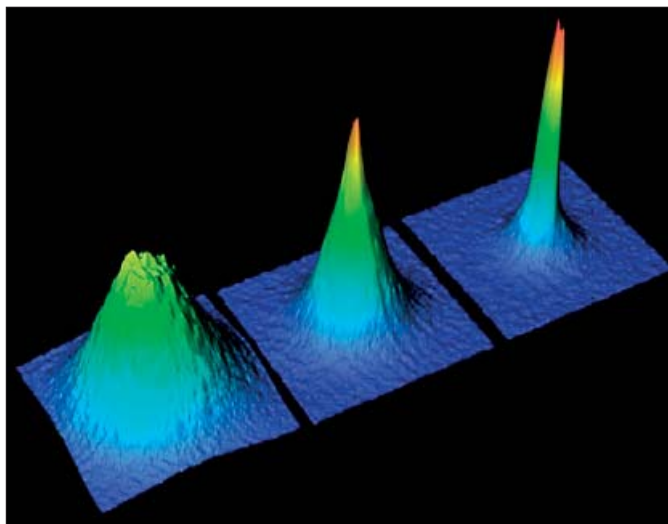
Kolde gasser giver svaret

Efimovs teoretiske forudsigelse for de identiske men skalerede systemer er nu bekræftet ved laboratorieforsøg. Eksperimenterne er foretaget på ekstremt kolde atomare gasser, såkaldte Bose-Einstein-kondensater. Et



Figur 2. Geometrisk illustration af strukturerne af en serie Litium-atomkerner (isotoper), der består af tre protoner og henholdsvis 3, 4, 5, 6 og 8 neutroner. Isotoper med andre neutronantal (heriblandt 7) er ustabile.

Alle neutroner findes normalt indenfor samme radius som protonerne, men de sidste to af de i alt 8 neutroner i ${}^{11}\text{Li}$ er så løst bundne, at de placerer sig langt udenfor alle de andre partikler. Dette er et stærkt unormalt fænomen, som kun kvantemekanik kan forklare.



Måledata for overgangen fra en normal kold gas ^{87}Rb (tv) til et Bose-Einstein kondensat (th). Fra ETH Zurich.

sådant kondensat er en samling identiske atomer i præcis den samme kvantemekaniske tilstand, der fastholdes i en fælde, dvs. en slags kasse lavet af magnetiske felter og lasere (figur 3). Strukturen kan kun realiseres, hvis temperaturen er meget lav ca. 0,000.000.001 grader over det absolutte nulpunkt ved $-273,15$ grader Celsius. Forskellen på et kondensat og en almindelig gas svarer nogenlunde til forskellen mellem en laser og en lommelygte.

Den ekstremt lave temperatur bevirker, at tre af atomerne i kondensatet kan befinde sig tæt på hinanden, næsten uden at de bevæger sig. Denne egenskab kan kun vanskeligt realiseres på andre måder end gennem en ultra-kold atom-gas.

Den dominerende meka-

nisme for henfald af kondensatet sker med tre atomer af gangen: Når tre atomer mødes, kan to af dem danne et stærk bundet di-atomigt molekyle. Den frigivne bindings-energi omsættes til bevægelse, hvorved molekylet og det resterende atom forlader eksperimentet i høj fart, i modsat-rettede retninger. Når man måler levetiden af kondensatet kender man derfor raten for denne tre-atom *rekombinations*-process.

I midlertid kan tilstedeværelsen af de gigantiske Efimov-strukturer for tre atomer virke som en katalysator for tre-atom processen. Efimov-strukturerne gentager sig, som omtalt tidligere, med en faktor 22,7. Denne faktor vil derfor også optræde i kondensat-gassens henfald.

I praksis justerer man et mag-

netfelt i eksperimentet, således at bindings-energien mellem to atomer bliver lille, og størrelsen tilsvarende stor (som i boks 1). Hver gang man skruer afstanden op med en faktor 22,7 vil måle-resultaterne gentage sig. I 2009 målte fysikere i Firenze endeligt sådanne gentagelser i en kold kalium-gas (boks 3). Eksistensen af de gigantiske tre-partikel Efimov-systemer og deres indbyrdes gentagelse på 22,7 er derfor nu en realitet, 40 år efter deres forudsigelse.

Nysgerrigheden driver værket

Der er nu en masse aktivitet i at udvide teori og eksperimenter til flere end tre partikler for at afgrænse anvendelserne af universalitet og skala-invarians. Der har også været spekuleret i mulige kernefysikanvendelser, idet det er foreslået, at tre deuteriumatomer kunne komme tæt nok på hinanden til, at deres kerner kunne fusionere til alfa-partikler og derved skabe adgang til uanede mængder af energi. Man kan forestille sig en slags katalysator-effekt, hvor rumligt meget store strukturer kan formidle en tiltrækning mellem systemer, der ved tættere kontakt kan fusionere og levere den overskydende energi til omgivelserne. Imidlertid er det ikke de praktiske anvendelser, der driver forskningen, men mere den rene nysgerrighed efter at forstå, hvor forunderlig naturen faktisk kan være. ■

Om forfatterne



Martin Thøgersen er ph.d. og fysiker, nu ansat i Vestas.
Tlf.: 2670 2243
E-mail: martint@martint.dk



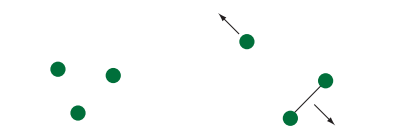
Dmitri V. Fedorov er lektor
Tlf: 8942 3651
E-mail: fedorov@phys.au.dk



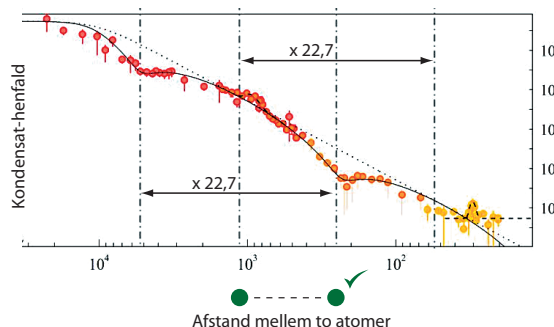
Aksel S. Jensen er docent
Tlf.: 8942 3655
E-mail: asj@phys.au.dk

Begge ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Boks 3: Måling af Efimov-strukturer i et kondensat



Et Bose-Einstein kondensat (ultra-kold gas) henfalder ved at tre atomer reagerer af gangen og forlader gassen. Afstanden mellem to svagt bundne atomer kan justeres med høj præcision i nuværende eksperimenter ved at ændre et magnetfelt. Med disse teknikker har man målt den universelle skalering 22,7, og dermed bevist eksistensen af de gigantiske Efimov-formationer for tre atomer.



Videre læsning:

B. D. Esry and C. H. Greene, *Quantum physics: A ménage à trois laid bare*, *Nature*, 440 (2006) 289.

M. Zaccanti, B. Deissler, C. D'Errico, M. Fattori, M. Jonas-Lasinio, S. Müller, G. Roati, M. Inguscio, and G. Modugno, *Observation of an Efimov spectrum in an atomic system*, *Nature Physics*, 5 (2009) 586.

V. Efimov, *Few-body physics: Giant trimers true to scale*, *Nature Physics*, 5 (2009) 533.