

# Ultrakoude Supersnaren

Snaartheorie wordt algemeen beschouwd als een veelbelovende manier om alle elementaire deeltjes in één samenhangende theorie te verenigen. Dit is mogelijk doordat in snaartheorie elk elementair deeltje gezien wordt als een welbepaalde trilling van één fundamentele snaar. Bovendien worden bosonische en fermionische deeltjes in deze theorie aan elkaar gerelateerd door een zogenaamde supersymmetrie. Een groot probleem van snaartheorie is dat er nog steeds geen experimentele bevestiging voor bestaat. In een recent artikel hebben wij, samen met Masudul Haque en Stefan Vandoren, daarom voorgesteld om een supersnaar in het laboratorium te creëren door gebruik te maken van de verbluffende flexibiliteit van ultrakoude atomaire gassen [1]. Met dit voorstel wordt het mogelijk om sommige voorspellingen van snaartheorie ook experimenteel te toetsen. *Michiel Snoek en Henk Stoof*



Michiel Snoek (1978) studeerde Theoretische Natuurkunde in Utrecht. Zijn afstudeeronderzoek betrof het gedrag van ultrakoude bosonen in een optisch rooster en werd verricht onder leiding van Fei Zhou. Sinds augustus 2002 is hij oio in dienst van FOM aan de Universiteit Utrecht. Hij is onderdeel van de groep Quantum Fluids and Solids onder leiding van Henk Stoof, waar hij werkt aan vortices in Bose-Einstein-gecondenseerde atomaire gassen. Hij hoopt in de zomer van 2006 op dit onderwerp te promoveren.

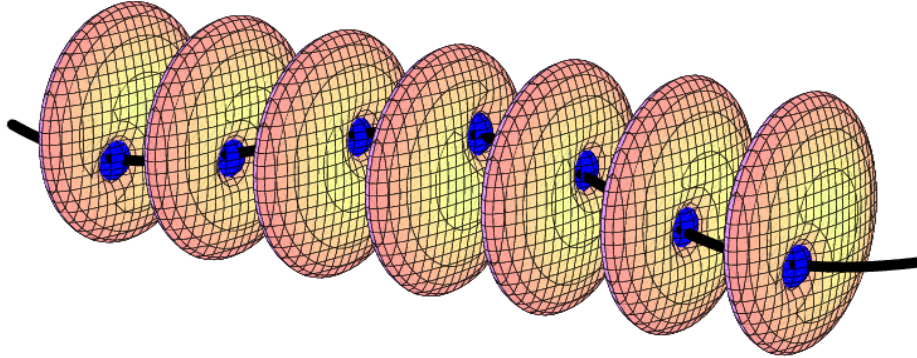


Henk Stoof (1962) studeerde Technische Natuurkunde in Eindhoven. Na zijn promotie in Eindhoven had hij postdoc posities in de groepen van Tony Leggett in Urbana-Champaign en Steve Girvin in Bloomington. Daarna ging hij naar Utrecht, waar hij sinds 1999 hoogleraar is in de theorie van de gecondenseerde materie. Recentelijk kreeg hij een VICI-subsidie toegekend voor theoretisch onderzoek aan exotische quantum gassen.

---

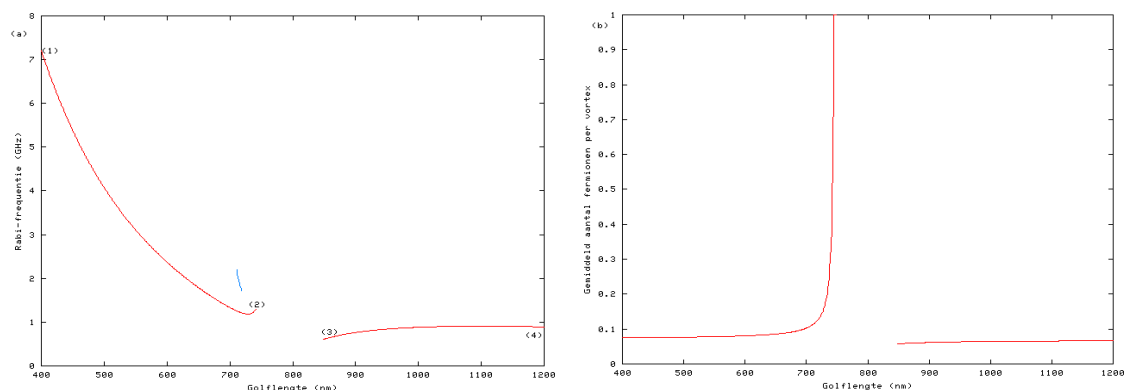
In ons voorstel om een supersnaar in het laboratorium te maken, gaan we uit van een gaswolkje van rubidiumatomen dat zo sterk afgekoeld wordt dat er een Bose-Einstein-condensaat ontstaat. Dit heeft tot gevolg dat alle atomen in het gaswolkje zich op precies dezelfde manier gedragen en we te maken krijgen met een quantumgas van macroscopische afmetingen. Door dit Bose-Einstein-condensaat voldoende snel rond te laten draaien ontstaat er een quantumwervel of vortexlijn in het centrum van het gaswolkje. Deze vortex blijft een lange tijd in het centrum, ook als het roteren gestopt wordt. Om uiteindelijk van deze vortex een supersnaar te maken wordt er vervolgens met twee tegengestelde laserbundels een staande golf gemaakt die een periodieke potentiaal oplevert voor de atomen in het gaswolkje. Deze optische potentiaal verdeelt het Bose-Einstein-condensaat in een stapel tweedimensionale pannenkoeken, met in elke pannenkoek een puntvortex. Het optische rooster is nodig omdat hierdoor de transversale trillingen van de vortex

nu een bandstructuur krijgen die evenredig is met die van een deeltje in een periodieke potentiaal [2, 3], wat straks de gewenste supersymmetrie mogelijk zal maken. De transversale trillingen van de vortex zijn de bosonische excitaties van de supersnaar en worden Kelvin-golven genoemd [4].



Figuur 1: Artistieke impressie van de ultrakoude supersnaar. De schijven representeren de dichtheid van rubidiumatomen in het Bose-Einstein-condensaat. De blauwe bolletjes geven de dichtheid van kaliumatomen aan. De zwarte lijn stelt de vortexlijn voor, waarbij de oscillatie van deze lijn aangeeft dat er een Kelvin-golf aanwezig is.

De fermionische excitaties van de supersnaar worden in ons voorstel gevormd door fermionische kaliumatomen, die gevangen zijn in de kern van de vortex. De kaliumatomen bewegen zich automatisch naar de kern van de vortex omdat zij een afstotende kracht van de rubidiumatomen ondervinden en de dichtheid van het Bose-Einstein-condensaat naar nul gaat in de kern van de vortex, net zoals bij wervels in water of in de atmosfeer. In zijn geheel is de opstelling in figuur 1 schematisch weergegeven. Omdat de bandstructuur van de Kelvin-golven, vanwege het optische rooster, evenredig is met die van een deeltjes, is het nu mogelijk om door het precies instellen van de laserparameters er voor te zorgen dat de energie van een Kelvin-golf en een kaliumatoom altijd precies gelijk aan elkaar zijn. Zoals aangegeven in figuur 2a bestaat er daardoor een groot gebied aan golflengtes waar door het kiezen van de juiste intensiteit van de laserbundels, oftewel de juiste Rabi-frequentie, er supersymmetrie gerealiseerd kan worden. Naast de laserparameters moet ook het aantal kaliumatomen nauwkeurig ingesteld worden. Het aantal kaliumatomen voor de juiste laserparameters is afgebeeld in figuur 2b.

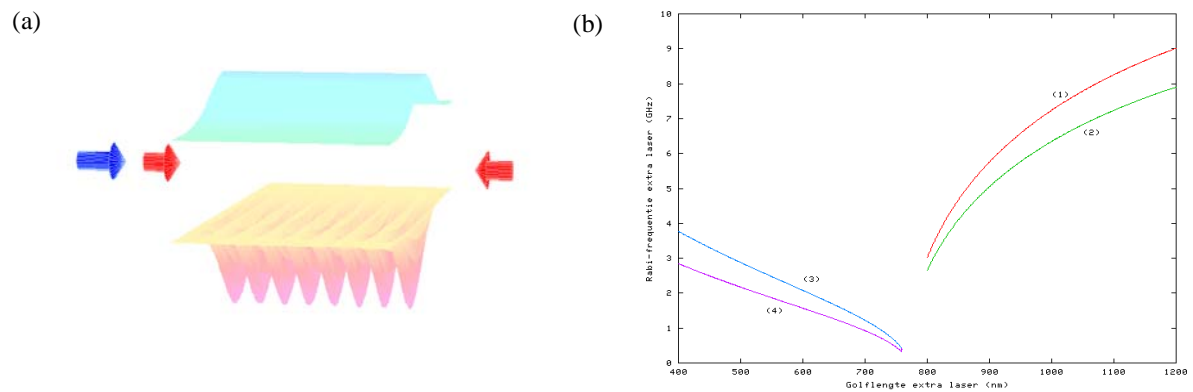


Figuur 2: De experimentele parameters om supersymmetrie te realiseren. (a) De laserparameters. (b) Het gemiddeld aantal kaliumatomen dat zich in een puntvortex bevindt.

## Interacties

De Kelvin-golven en kaliumatomen die samen de elementaire trillingen van de supersnaar vormen hebben in ons voorstel ook interacties met elkaar. Kelvin-golven stoten elkaar af. Kelvin-golven en kaliumatomen stoten elkaar ook af, omdat de aanwezigheid van een Kelvin-golf betekent dat de puntvortices zich uit het centrum bewegen. Doordat het kaliumatoom gevangen is in de kern van een puntvortex, moet hij meebewegen. Vanwege de aanwezigheid van een valkuil die het gehele gaswolkje gevangen houdt, krijgt het kaliumatoom dan echter een hogere energie. Dit mechanisme resulteert dus in een afstotende kracht. Omdat fermionen vanwege het Pauli-principe niet op dezelfde plaats kunnen zijn, bestaat er geen interactie tussen de kaliumatomen onderling.

Het is ook mogelijk om deze interactietermen supersymmetrisch te maken. Daarvoor is het nodig om ook de valkuilpotentiaal in de richting loodrecht op de laserbundels nauwkeurig af te stemmen. Het blijkt dat het nodig is dat de kaliumatomen in deze richting een veel kleinere valkuilpotentiaal voelen dan de rubidiumatomen. Om dit te bereiken is een extra laser nodig. Deze laser produceert een lopende golf met constante intensiteit in dezelfde richting als de laserbundels van het optisch rooster. Dit is aangegeven in figuur 3a. Als deze tweede laser ingesteld wordt volgens de parameters van figuur 3b, zijn ook de interactietermen van de supersnaar supersymmetrisch.



Figuur 3: (a) Schematische opstelling van de extra laser. Deze laser heeft een constante intensiteit langs de laserbundels van het optische rooster en beïnvloedt alleen de valkuilpotentiaal loodrecht op deze laserbundels. (b) Instelling van de extra laser. Voor de punten (1)-(4) uit figuur 2a is weergegeven hoe de extra laser ingesteld kan worden.

## Gevolgen van de supersymmetrie

Voor een supersnaar zijn de verwachtingswaarden van fermionische grootheden gelijk aan de verwachtingswaarden van dezelfde bosonische grootheden. Dit betekent in ons geval dat het aantal kaliumatomen in de supersnaar gerelateerd is aan de quantummechanische onzekerheid in de positie van de supersnaar. Beide grootheden kunnen experimenteel gemeten worden. Het aantal kaliumatomen kan gemeten worden door de gebruikelijke lichtabsorptie experimenten. De onzekerheid in de positie van de supersnaar kan gemeten kan worden door in de richting van de laserbundels te kijken naar de posities van alle individuele puntvortices. Op deze manier krijgen we een uniek experimenteel signaal voor de supersymmetrie van de supersnaar. Een bijkomend gevolg van de supersymmetrie is dat, vergeleken met een vortex, de supersnaar heel stabiel is, d.w.z. de wrijving tijdens de beweging van de supersnaar is sterk gereduceerd vanwege de supersymmetrie. Als de supersnaar zich desalniettemin uit het centrum van het gas beweegt, dan betekent dit fysisch dat de supersymmetrie gebroken wordt. Als gevolg hiervan biedt ons voorstel dan ook de mogelijkheid om experimenteel de dynamica van spontane supersymmetriebreking te bestuderen, wat afgezien van de intrinsieke interesse in zogenaamde quantumfaseovergangen, ook van mogelijk groot belang is voor de hoge-energiefysica.

## Supersnaartheorie

De ultrakoude supersnaar die op bovenstaande manier met een mengsel van atomaire gassen gemaakt kan worden, wordt mathematisch ook beschreven door een snaartheorie, ondanks dat de relevante lengteschaal in ons geval heel erg verschilt van de relevante lengteschaal in de hoge-energiefysica. In plaats van de Planck-lengte van zo'n  $10^{-33}$  cm heeft onze supersnaar een lengte van de orde van grootte van een millimeter. De snaartheorie die correspondeert met onze supersnaar heeft supersymmetrie in de ruimte-tijd waarin de snaar beweegt en wordt een Green-Schwarz-supersnaar genoemd. Interessant genoeg is deze ruimte-tijd zelfs gekromd. Het gedrag van een supersnaar in een gekromde ruimte is een grotendeels onbegrepen probleem in snaartheorie, waar nu dus mogelijkserwijs ook experimenteel meer licht op geworpen kan worden.

## Referenties

- [1] Michiel Snoek, Masudul Haque, S. Vandoren, and H.T.C. Stoof, cond-mat/0505055.
- [2] J.-P. Martikainen and H.T.C. Stoof, Phys. Rev. Lett. **91**, 240403 (2003).
- [3] J.-P. Martikainen and H.T.C. Stoof, Phys. Rev. A **70**, 013604 (2004).
- [4] V. Bretin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 100403 (2003).