

Populärvetenskaplig sammanfattning

En samling av partiklar som interagerar med varandra är ett komplicerat system att försöka beskriva. Hur en enskild partikel uppför sig beror på hur de resterande partiklarna beter sig. Detta gör att det blir väldigt svårt att förutbestämma vad som kommer att hända med hela systemet även om vi har en mycket god uppfattning om hur de fundamentala rörelseekvationerna ser ut. Särskilt komplicerat blir kvantmekaniska system där vi, till skillnad från i klassisk mekanik, i någon mening måste ta hänsyn till alla möjliga händelser samtidigt. Det är dock viktigt att studera hela samlingen av dessa växelverkande partiklar då mycket av deras beteende kommer från just växelverkan. Nya fenomen kan uppkomma som inte alltid inses direkt från rörelseekvationerna för de enskilda partiklarna och vars behandling kan kräva nya koncept, regler och angreppssätt. Helheten kan helt enkelt vara mer än summan av dess delar.

Det finns många system av växelverkande partiklar i naturen som måste beskrivas med hjälp av kvantmekanik och vars beteende påverkar oss dagligen. Atomkärnor, elektroner som är bundna till kärnan, molekyler och metaller är några exempel. Vi människor har även skapat våra egna kvantsystem, både för att lättare kunna undersöka de naturliga motsvarigheterna, men även dess tekniska tillämpningar. Exempel är bland annat små kluster av metallatomer som uppför sig liknande atomkärnor och nanometerstora strukturer av halvledarmaterial som fångar in ett fåtal elektroner vilka kan fås att efterlikna elektronerna i en atom.

Ett annat artificiellt mångpartikelsystem som på senare tid blivit mycket populärt att undersöka är atomer som hålls infångade med hjälp av laserljus. Det har visat sig, kanske något överraskande, att atomerna i en gas går att stoppa och hålla kvar

på en specifik plats genom att lysa med en väl vald laser på dem. Några fördelar med dessa ljusbaserade infångningsmetoder är bland annat att atomerna är väldigt isolerade från omgivningen och att de kan kylas ner till otroligt låga temperaturer, så att de kvantmekaniska aspekterna blir direkt synliga. De kalla atomsystemen är dessutom väldigt anpassningsbara så till den grad att det nästan bara är fantasin hos forskarna som sätter gränsen. Än så länge saknas vardagliga tillämpningar av de kalla atomsystemen. Istället har de används till att öka den grundläggande förståelsen av kalla atomsystem i synnerhet och mångpartikelsystem i allmänhet. En möjlig framtida tillämpning är att med hjälp av kalla atomer bygga komponenter som använder något mångpartikelfenomen för att efterlikna dagens elektronik, men som kan användas snabbare och mer effektivt. Då dagens elektronik inte verkar gå att skala upp så mycket mer kan detta vara en möjlig väg för fortsatt teknisk utveckling.

I den här avhandlingen har vi studerat hur några fenomen som är välkända i laserinfångade gaser av många atomer påverkas av antalet partiklar i gasen. Vi har i många fall jämfört egenskaper hos gaser med väldigt många partiklar mot en gas med färre atomer. I gasen med väldigt många partiklar är det rimligt att bara använda medelvärdet av påverkan mellan partiklarna, medan de exakta kvantmekaniska rörelseekvationerna kan lösas för systemet med få partiklar. Vi härledde bland annat en exakt formel för hur en ensam vågfront i partikeltätheten färdas runt i en ring. Utifrån det bestämde vi olika tidsskalor för hur vågfronten försvinner och sedan dyker upp igen, samt hur dessa tidsskalor beror på antalet partiklar i ringen.

Kvantiserade virvlar är en annan karaktäristisk egenskap hos ett kvantmekaniskt system och vi har studerat dessa på flera olika sätt. En av undersökningarna gällde hur virvlarna skapas när en samling partiklar roteras. Beroende på formen av behållaren som innesluter partiklarna kunde vi observera två olika sätt som dessa virvlar uppstår. Det krävs dock ett större antal partiklar innan de olika sätten kan särskiljas och beteendet är då mycket annorlunda från fallet när antalet partiklar är väldigt litet. Vi fann också att dessa två typer av virvelbildningar bestämmer om systemet uppvisar hysteres, fenomenet att övergången inte sker på samma plats beroende på om man ökar eller minskar rotationen, eller inte. Virvlar kan också skapas när partiklarna växelverkar som dipoler, vilket vi visade i en annan studie. Dessa dipoler kan liknas vid små stavmagneter som repellerar eller attraherar varandra beroende på deras orientering. En sådan växelverkan har nyligen blivit möjlig att ha i experiment med kalla atomgaser.

Kalla atomer kan också uppvisa skalstruktur, ett fenomen som kommer från en underliggande symmetri hos systemet och är känt från många naturliga system såsom hur atomernas elektroniska struktur samt atomkärnan är uppbyggda. Vi undersökte hur denna skalstruktur påverkades av växelverkan mellan dipoler och hur egenskaperna hos systemet kunde ändras med hjälp av egenskaper hos denna växelverkan.

Popular science summary

A collection of particles that interacts with each other is a complicated system to try to describe. How a single particle behaves depends on how the remaining particles behave. This makes it very difficult to predict what will happen with the whole system even if we have a very good understanding of how the fundamental equations of motion look like. Especially complicated becomes quantum mechanical systems where we, unlike in classical mechanics, in some sense need to take into account all possible events at the same time. It is however important to study the whole collection of these interacting particles as much of their behavior precisely comes from the interactions. New phenomena can arise that can not always be realized directly from the equations of motion and whose treatment can demand new concepts, rules and approaches. The whole can simply be more than the sum of its parts.

There exist many systems of interacting particles in nature that have to be described with the help of quantum mechanics and whose behavior affects us daily. Atomic nucleus, electrons that are bound to the nuclei, molecules and metals are some examples. We humans have also created our own quantum systems, both to easier be able to investigate the natural counterparts, but also their technical applications. Examples are among other small clusters of metal atoms that behave like atomic nucleus and nanometer sized structures of semiconductors that traps a few electrons which can be made to mimic the electrons in an atom.

Another artificial many-particle system that lately has become very popular to study is atoms that are trapped with the help of laser light. It has been shown, maybe somewhat counterintuitively, that the atoms in a gas can be stopped and kept at a specific place by shining a cleverly chosen laser on them. Some advantages with these light based trapping methods are among other that the atoms are

very isolated from the environment and that they can be cooled down to incredibly low temperatures, such that the quantum mechanical aspects become directly observable. The cold atom systems are also very customizable to such a degree that only the scientist's imagination sets the limit. So far no everyday application exists for these cold atomic systems. Instead, they have been used to advance the basic knowledge of cold atoms systems in particular and many-particle systems in general. A possible future application is with the help of cold atoms to build devices that utilize some many particle phenomenon to imitate today's electronics, but can be used faster and more efficient. As today's technology does not seem to be able to scale up much more this can be a possible way for continued technological advancement.

In this thesis we have studied how some phenomena that are well known in laser trapped gases of many atoms are affected by the number of particles in the gas. We have in many cases compared properties of the gases with very many particles to a gas with less atoms. In the gas with very many particles it is reasonable to only use the mean value of the influence between the particles, while the exact quantum mechanical equations of motion can be solved for the system with few particles. Among other we derived an exact formula for how a solitary wavefront in the particle density traveled around in a ring. From this we determined different time scales for how the wavefront disappears and then comes back, as well as how these time scales depend on the number of particles in the ring.

Quantized vortices is another characteristic property of a quantum mechanical system and we have studied these in a number of different ways. One of the investigations were concerned about how vortices are created when a collection of particles is rotated. Depending on the shape of the container that encloses the particles we could observe two different ways these vortices can be created. However, it requires a larger number of particles before the different ways can be distinguished and the behavior is then much different from the case when the number of particles is very small. We also found that these two types of vortex formations determine if the system exhibit hysteresis, the phenomenon that the transition does not happen at the same place depending on if one increases or decreases the rotation, or not. Vortices can also form when the particles interact as dipoles, which we showed in another study. These dipoles can be seen as small bar magnets that repel or attract each other depending on their orientation. Such an interaction has recently become possible to attain in experiments with cold atomic gases.

Cold atoms can also exhibit shell structure, a phenomenon that comes from an underlying symmetry of the system and is known from many natural systems such as the electronic structure of atoms as well as how atomic nuclei are structured. We investigated how this shell structure was affected by the interaction between dipoles and how the properties of the system could be changed with the help of properties of this type of interactions.