



Rydberg Atoms on a Chip and in a Cell
F.A. Tauschinsky

POPULAIRE SAMENVATTING

QUANTUM INFORMATIE VERWERKING

Een Quantumcomputer is een apparaat dat de quantummechanische eigenschappen van fysische systemen gebruikt om berekeningen uit te voeren, net zo als een klassieke computer gebruik maakt van klassieke eigenschappen. Quantumcomputers kunnen in theorie aanzienlijke voordelen hebben ten opzichte van klassieke computers: er zijn problemen (zoals factorizeren van grote gehele getallen) die door een quantum computer veel sneller kunnen worden opgelost dan door enig denkbare klassieke computer. Quantumcomputers kunnen ook veel efficiënter andere fysische systemen simuleren dan conventionele computers. Dat is van groot belang in veel velden van zowel fundamenteel en toegepast onderzoek.

De basiseenheid van de quantumcomputer is de *qubit*. Net als bij zijn klassieke equivalent, de *bit*, dient de qubit ertoe om informatie op te slaan. In tegenstelling tot klassieke bits die of de waarde 0 of de waarde 1 kunnen hebben, kan een qubit in een zogeheten *superpositietoestand* van beide 0 en 1 tegelijkertijd zijn. Bovendien kunnen twee verschillende qubits worden *verstrengeld*, of tewel ze kunnen beschikken over sterke niet-klassieke correlaties — de één kan dus niet worden beschreven zonder ook de ander meeterekenen. Dit zijn de eigenschappen die quantum informatieverwerking interessant maken — maar ze maken het tegelijkertijd heel moeilijk. Deze effecten zijn helaas zeer gevoelig voor externe storingen — zodra een qubit in wisselwerking met de omgeving staat zet *decoherentie* in, dus word de quantum toestand van de qubit gewijzigd of vernietigd. Anderzijds zijn *gecontroleerde* interacties met andere qubits wel nodig om berekeningen uit te kunnen voeren.

Daarom is een van de grootste uitdagingen bij het bouwen van een quantum computer enerzijds gecontroleerde interacties tussen qubits te vervaardigen, terwijl anderzijds ongewenste interacties met de omgeving tot een minimum te beperken. Bovendien moet men dit op een manier ontwerpen die op te schalen is tot een groot aantal qubits, men moet elke qubit afzonderlijk coherent kunnen manipuleren en men moet in staat zijn de toestand van de qubits nauwkeurig te bepalen aan het eind van een berekening.

Onze visie voor het ontwikkelen van een dergelijke quantumcomputer is gebaseerd op de sterke interactie tussen Rydbergatomen boven een atoomchip met een permanent magnetische roosterstructuur. Hier worden qubits gedefinieerd op kleine wolken van ultrakoude Rubidium atomen, gevangen in een regelmatige reeks van magnetische microtraps gevormd door de magnetische velden van de atoomchip en externe spoelen. De qubit toestand wordt gecodeerd in twee verschillende hyperfijn grond toestanden van de atomen. Deze wisselwerken slechts

zwak met de omgeving, waardoor ze goed bestand zijn tegen decoherentie. Om de interacties tussen verschillende wolken mogelijk te maken kunnen atoomen naar sterk wisselwerkende hooggelegen Rydbergtoestanden kunnen worden gebracht. Dit gebeurt alleen tijdens *poort operaties*, en de atoomen worden zo snel mogelijk weer terug gebracht naar de grondtoestand om problemen met decoherentie te beperken. Op deze manier zijn de atoomen alleen, wanneer nodig, sterk wisselwerkend, terwijl de opslag van informatie plaats vindt in goed beschermde grondtoestanden. Enkele qubit rotaties kunnen afzonderlijk worden uitgevoerd via één paar Raman lasers, of collectief via gecombineerde rf-en microgolf pulsen. Elke qubit kan makkelijk optisch worden aangesproken dankzij de relatief grote rooster afstand met behulp van relatief eenvoudige optische systemen. Ook kan elke qubit afzonderlijk worden afgebeeld op een CCD camera om de toestand van de qubit te bepalen.

DIT WERK

In dit proefschrift worden de bouwstenen van een dergelijke quantumcomputer ontwikkeld. In hoofdstuk 4 wordt het ontwerp en de implementatie van de volgende generatie atoomchip voor quantum informatie verwerking ontwikkeld in Amsterdam besproken. Deze chip is voorzien van geoptimaliseerde roosters met zowel vierkante als zeshoekige geometrie met een roosterafstand van 10 μm , diepe vallen en symmetrische barrières. Verder is de toplaag geoptimaliseerd om het dipoolmoment van geadsorbeerde rubidium atoomen te minimaliseren. Tenslotte bevat de chip constructie een lens met hoge numerieke apertuur voor gevoelige absorptie afbeelding van de atoomen die gevangen zijn op de chip.

De grenzen van het afbeeld systeem zijn in theorie onderzocht in hoofdstuk 5. Met name onderzoeken we de betrouwbaarheid waarmee een enkel atoom in een van onze microvallen kan worden gedetecteerd met absorptie afbeelding en bepalen we optimale beeldparameters. We kunnen aantonen dat absorptie beeldvorming in een staande golf net als het van nature in ons experiment het geval is, gevoeliger is dan traditionele single-pass absorptie afbeelding. In de huidige opstelling is de aanwezigheid van één enkel atoom waarneembaar met een nauwkeurigheid van 81% in een enkele meting.

In hoofdstuk 6 kijken we zorgvuldig naar het effect van elektrische velden op Rydbergtoestanden in een goed gecontroleerde omgeving, onafhankelijk van de atoomchip. Een juist begrip van deze effecten is zeer belangrijk voor toekomstige experimenten op de atoomchip vanwege de hoge gevoeligheid van Rydbergatoomen voor elektrische velden.

De eerste stappen in die richting worden genomen in hoofdstuk 7 waarin we de productie van Rydberg-atoomen aan de oppervlakte van onze permanent magnetische atoomchip (maar nog niet gevangen in het rooster) onderzoeken. Wij vinden dat, terwijl elektrische velden hier aanwezig zijn, ze alleen de energieën van de Rydberg toestand verschuiven, maar niet tot extra decoherentie leiden.

Terwijl de experimenten van dit hoofdstuk werden uitgevoerd op een oudere generatie atoomchip, laden we in hoofdstuk 8 atoomen in het magnetische rooster microvallen van de in hoofdstuk 4 beschreven chip. We tonen eerste resultaten van atoomgetallen, temperatuur en val homogeniteit in dit systeem voor zowel vierkante als zeshoekige geometrieën en we presenteren indicaties van de aanwezigheid van sterk drie-deeltjes verlies wat leidt tot sub-poisonische fluctuaties van het aantal atoomen in de vallen.