

Een geflipt elektron leeft langer

De ontwikkeling van de quantumcomputer is één van de grootste fundamentele en technologische uitdagingen voor fysici in de 21^e eeuw. De elementaire bouwsteen van de quantumcomputer, de qubit, kan bestaan uit de spin van één elektron of één atoomkern. De quantumtoestand van een spin in een vaste stof wordt echter gemakkelijk verstoord door interactie met de omgeving. We zijn er in geslaagd om de quantuminformatie die is opgeslagen in één enkele spin zeer effectief te beschermen met snelle controlepulsen, en zo de ‘quantumleeftijd’ fors te verlengen. We proberen nu om deze techniek te integreren in het quantumrekenen en quantumalgoritmes uit te voeren op een diamanten chip bij kamertemperatuur. Gijs de Lange, Toeno van der Sar en Ronald Hanson

4

Het rekenen in een quantumcomputer wordt niet gedaan met behulp van ‘klassieke’ bits, die óf nul óf één zijn, maar met bits die zich in een quantummechanische superpositie van nul en één kunnen bevinden. Deze bits worden qubits of kortweg qubits genoemd. Rekenen met qubits biedt in principe de mogelijkheid om bepaalde problemen te lijf te gaan die onmogelijk zijn te kraken met rekenmethodes die gebruikt worden in hedendaagse

‘klassieke’ computers. Voorbeelden hiervan zijn het ontbinden van grote getallen in priemfactoren en het simuleren van complexe quantummechanische systemen. Het ontwikkelen van een blauwdruk voor een zogenaamde quantumcomputer is uitgegroeid tot een van de belangrijkste uitdagingen voor fysici in de 21^e eeuw (zie kader quantumalgoritmes).

Decoherentie

Het grootste obstakel om een quantumcomputer te bouwen wordt gevormd door een proces dat decoherentie heet. Dit is een proces waarbij de in een qubit gecodeerde quantuminformatie door ongecontroleerde interactie met de omgeving na verloop van tijd verdwijnt (figuur 1a). Het beschermen van de over het algemeen zeer gevoelige qubits tegen decoherentie is een noodzakelijke voorwaarde voor de ontwikkeling van een quantumcomputer. Decoherentie is tegelijk een fundamenteel in-

teressant fenomeen: het speelt een essentiële rol in de overgang tussen de grote ‘klassieke’ wereld en de microscopische quantumwereld [1], en er zijn theorieën die het beruchte ‘quantummeetprobleem’ trachten te verklaren vanuit decoherentie op microscopische schaal [2].

Een veelbelovende techniek om een qubit te beschermen tegen decoherentie is dynamische ontkoppeling. Hierbij wordt een qubit zo gemanipuleerd dat de interactie met zijn omgeving

Gijs de Lange (1980) studeerde in 2008 af aan de TU Delft op qubits gemaakt van kleine supergeleidende ringen en Josephsonjuncties. Zijn promotieonderzoek in Delft in de groep van Ronald Hanson is gericht op het begrijpen van de mechanismen achter de decoherentie van individuele elektronspins in diamant.



G.deLange@tudelft.nl

Toeno van der Sar (1982) studeerde in 2008, na een onderzoeksstage op Harvard, af aan de TU Delft op supergeleidende fase-slipjuncties. Sindsdien doet hij promotieonderzoek in Delft naar het controleren van de spin en het manipuleren van de optische eigenschappen van individuele atomaire defecten in diamant.



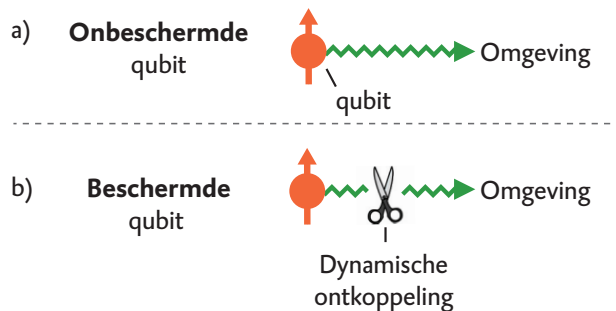
T.vanderSar@tudelft.nl

effectief verdwijnt (figuur 1b). Dynamische ontkoppeling werkt alleen als een qubit zeer snel kan worden gemanipuleerd, want anders tast de omgeving de nauwkeurigheid van de manipulatie te veel aan. In dit artikel beschrijven we hoe we met behulp van korte microgolfpulsen dynamische ontkoppeling voor het eerst succesvol hebben gebruikt om een willekeurige toestand van een qubit te beschermen tegen decoherentie. Verder laten we zien hoe dynamische ontkoppeling is te combineren met het doen van logische bewerkingen, zodat qubits ook tijdens quantumberekeningen beschermd zijn tegen decoherentie.

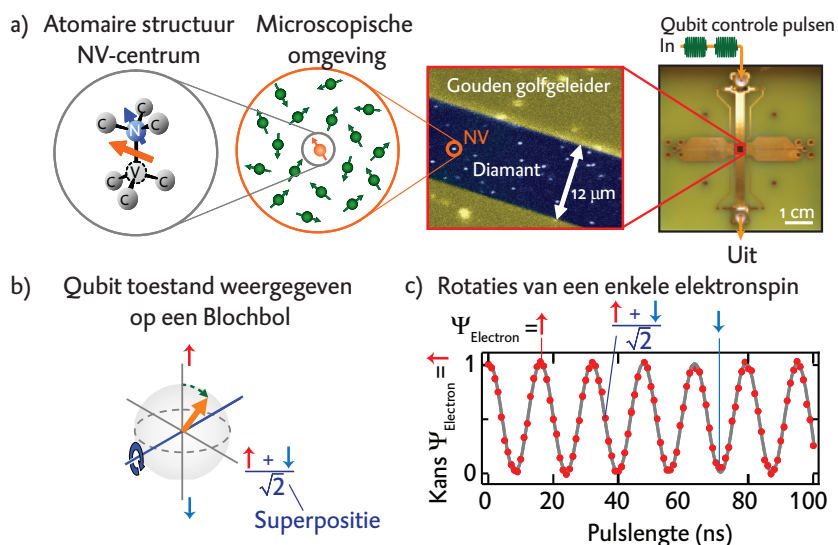
Nitrogen-vacancy-centrum als qubit

We gebruiken de elektronspin van het NV-centrum (nitrogen-vacancy-centrum) in diamant als qubit (figuur 2a). Het NV-centrum is een fluorescerend paramagnetisch defect in het kristalrooster van diamant, bestaande uit een substitusioneel stikstofatoom naast een lege plek in het kristalrooster [3, 4]. Een NV-centrum heeft de bijzondere eigenschap dat de intensiteit waarmee het fluoresceert afhangt van zijn spin-toestand. Hierdoor is het mogelijk om de spintoestand van een enkel NV-centrum uit te lezen met behulp van fluorescentiemicroscopie. Ook is de spin-toestand van het NV-centrum zelfs bij kamertemperatuur stabiel genoeg om het met grootse precisie te manipuleren. Door deze unieke combinatie van eigenschappen geldt het NV-centrum als één van de meest veelbelovende systemen voor toepassing als bouwsteen van de quantumcomputer [5]. Bovendien kan diamant sinds enkele jaren in laboratoria zó worden gegroeid dat het minder verontreinigingen bevat dan de puurste diamant uit de aarde, waardoor ook commerciële quantumtechnologieën op basis van diamant mogelijk zijn geworden.

De NV-centra in onze experimenten zitten in een diamant van enkele millimeters groot die kunstmatig is gegroeid (figuur 2a). Om een enkel NV-centrum te lokaliseren maken we een scan van het sample in een zelfgebouwde fluorescentiemicroscop. Hierin wordt een groene laser (golflengte 532 nm) gescand over ons sample. Wanneer een NV-centrum in de focus van de laser verschijnt, meten we een piek in de fluorescentie (golflengte 600-750 nm) zoals te zien in figuur 2a. Als een NV-centrum gevonden is schakelen we over in gepulste modus. Het manipuleren van de spintoestand van het NV-centrum kan namelijk alleen gebeuren als de laser uitstaat. Een meetsequentie bestaat dus uit een manipulatiefase 'in het donker', gevolgd door een uitleesfase bestaande uit een groene laserpuls van ongeveer 600 ns. Het aantal fotonen gedetecteerd tijdens de laserpuls geeft ons informatie over de spintoestand van het NV-centrum na de spinmanipulatie.



Figuur 1 Beschermen van een qubit tegen decoherentie. a) Een qubit (oranje) verliest coherentie door de interactie met zijn omgeving. Hierdoor gaat de in de qubit opgeslagen quantuminformatie snel verloren. b) Een qubit kan beschermd worden tegen decoherentie door de interactie met de omgeving uit te schakelen met behulp van dynamische ontkoppeling. Hierdoor blijft de in de qubit opgeslagen quantuminformatie langer behouden.

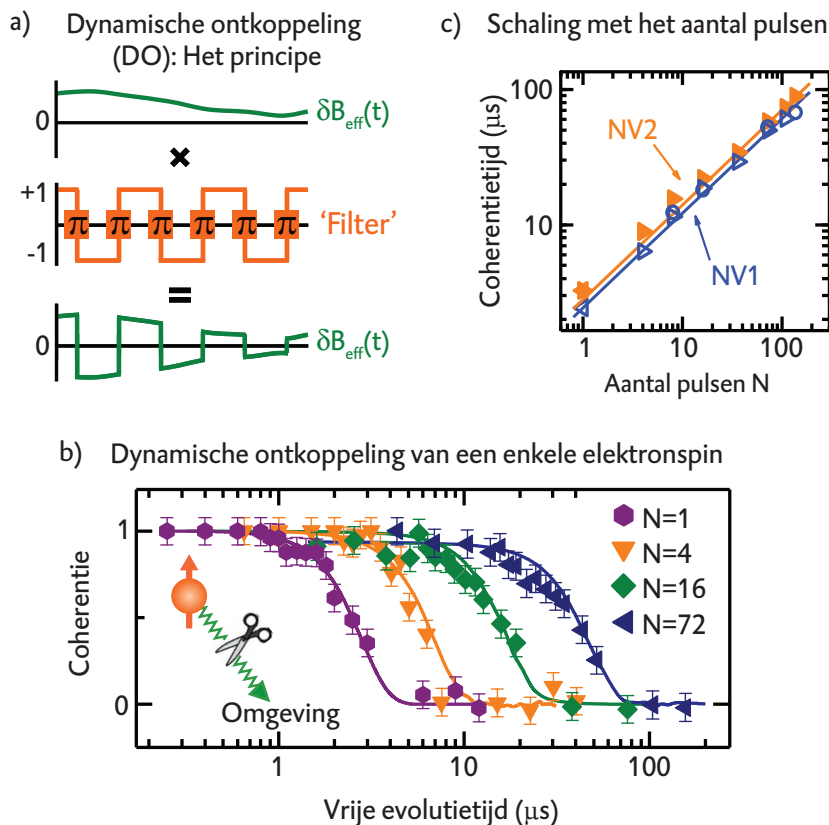


Figuur 2 Controle van een enkele elektronspin. a) Het rechter plaatje toont het printplaatje waarop de kabels worden aangesloten om de pulsen voor controle van de qubit naar het diamant sample toe te leiden dat zich in het midden bevindt. Het tweede plaatje van rechts is verkregen door een laser over het sample te scannen en de fluorescentie te detecteren. Tussen de gouden golfgeleiders is een stukje diamant zichtbaar; de witte stippen hierin zijn NV-centra. De zoom-in geeft een schematisch beeld van een NV-centrum (oranje) en de in zijn omgeving aanwezige spins (groen). Het linker plaatje toont de atomaire structuur van een NV-centrum. b) De spintoestand kan meetkundig worden weergegeven met behulp van een pijl (oranje) in de Blochbol. Het manipuleren van de spintoestand wordt weergegeven door een rotatie om een as (blauw) in de Blochbol. c) Rotaties van de elektronspintoestand (Ψ_{Elektron}) van een enkel NV-centrum.

Ronald Hanson (1976) studeerde aan de RUG en bracht vervolgens met een JPP-beurs een jaar door in Japan. In 2005 promoveerde hij cum laude aan de TUD op onderzoek naar elektronspins in quantumdots bij Leo Kouwenhoven. Na twee jaar postdoc bij David Awschalom aan UCSB, keerde hij in 2007 terug naar Delft waar hij defecten in diamant gebruikt voor onderzoek in de quantum-informatica. Sinds 2010 is hij lid van de Jonge Akademie van de KNAW.

R.Hanson@tudelft.nl





Figuur 3 Dynamische ont koppeling. a) Een fluctuerend magnetisch veld δB zorgt voor decoherentie van de elektronspintoestand van het NV-centrum. Bij dynamische ont koppeling wordt met korte ' π '-pulsen de spintoestand periodiek omgeklapt. Gezien vanuit het perspectief van het NV-centrum wordt bij iedere puls de omgeving ondersteboven gezet, wat een filterende werking op de fluctuaties heeft: Het gemiddelde van het effectieve veld δB_{eff} neigt naar 0 zodat de spintoestand behouden blijft. b) Coherentie vervalcurven als functie van de totale vrije evolutietijd gemeten voor toenemend aantal pulsen N . Een waarde van 1 geeft perfect behoud van de spintoestand aan. Voor een toenemend aantal pulsen blijft de spintoestand steeds langer behouden. c) Schaling van de coherentietijd met het aantal pulsen gemeten voor twee verschillende NV-centra. We vinden een uitstekende overeenkomst tussen data (symbolen) en theorie (doorgetrokken lijn).

Quantumalgoritmes

De ontwikkeling van de quantumcomputer kreeg pas echt vaart in de jaren negentig van de vorige eeuw. Toen werd een aantal quantumalgoritmes bedacht die duidelijk maakten dat we met een quantumcomputer in staat zouden zijn bepaalde problemen veel sneller op te lossen dan met een klassieke computer. Dit komt doordat quantumalgoritmes slim gebruik maken van de superpositietoestand waarin qubits kunnen verkeren. Een qubit in een superpositie is tegelijk 0 en 1, waardoor er parallel aan beide toestanden gerekend kan worden (quantumparallelisme). Met conventionele, klassieke bits is dit onmogelijk.

Één van de bekendste quantumalgoritmes is Grover's zoekalgoritme, waarmee snel een ongesorteerde database kan worden doorzocht. Stel, je hebt een ongeordende lijst van 1.000.000 objecten. Een klassieke computer zou gemiddeld op 500.000 plaatsen moeten kijken om een specifiek object te vinden. Een quantumcomputer zou met Grover's algoritme in staat zijn dit in slechts 1000 keer te doen. De versnelling komt doordat het quantumalgoritme een superpositie van de 1.000.000 objecten kan analyseren, terwijl de klassieke computer de objecten één voor één af moet gaan.

Spintoestand manipuleren

We manipuleren de spintoestand van het NV-centrum met behulp van elektronspinspinresonantie. Hierbij wordt het NV-centrum blootgesteld aan magnetische velden die oscilleren in het microgolfregime met een frequentie die past bij de resonantiefrequentie van de spin (1-3 GHz). De koppeling tussen het extreem kleine magnetische moment van een enkele spin en een extern magnetisch veld is over het algemeen erg zwak. Daarom fabriceren we met nanolithografie gouden golfgeleiders op het diamant die de microgolven naar het NV-centrum toe leiden (figuur 2a). De intense magnetische velden die dit oplevert, stellen ons in staat om met magnetisch veldpulsen van een paar nanoseconden de elektronspin zeer nauwkeurig om te draaien.

Om dit draaien van de spin te visualiseren geven we de spintoestand meetkundig weer met behulp van een pijl op de zogenaamde Blochbol (figuur 2b). Kort gezegd bepaalt de toestand van de elektronspin van het NV-centrum in welke richting zijn magnetisch moment gericht staat. Een superpositie van spintoestanden kan dan eenvoudig worden weergegeven door een pijl die in het horizontale vlak ligt. In deze representatie komen spinrotaties neer op het draaien van de pijl om een as in de Blochbol. Met behulp van nauwkeurig gekalibreerde microgolfpulsen kunnen we de elektronspin van het NV-centrum met grote precisie over een bepaalde hoek en om elke gewenste as roteren. We kunnen zo iedere gewenste quantummechanische superpositie van spintoestanden creëren (figuur 2c). De elektronspin kan nu gebruikt worden als qubit, waarbij we de omhoog gerichte spintoestand $\uparrow$ als logische 0 nemen en de omlaag gerichte spintoestand $\downarrow$ als logische 1. Halverwege een rotatie van 0 naar 1 bevindt de qubit zich in een quantummechanische superpositie, waar de qubit dus tegelijk 0 en 1 is.

Wanneer de spin van het NV-centrum zich in een superpositie bevindt is deze zeer gevoelig voor decoherentie veroorzaakt door fluctuaties in het lokale magnetisch veld. Net als een klein magneetje gaat een spin roteren onder invloed van een magnetisch veld, met een snelheid die afhankelijk is van de sterkte van het magnetisch veld (zogenaamde Larmorprecessie). Als het magnetisch veld op een onvoorspel-

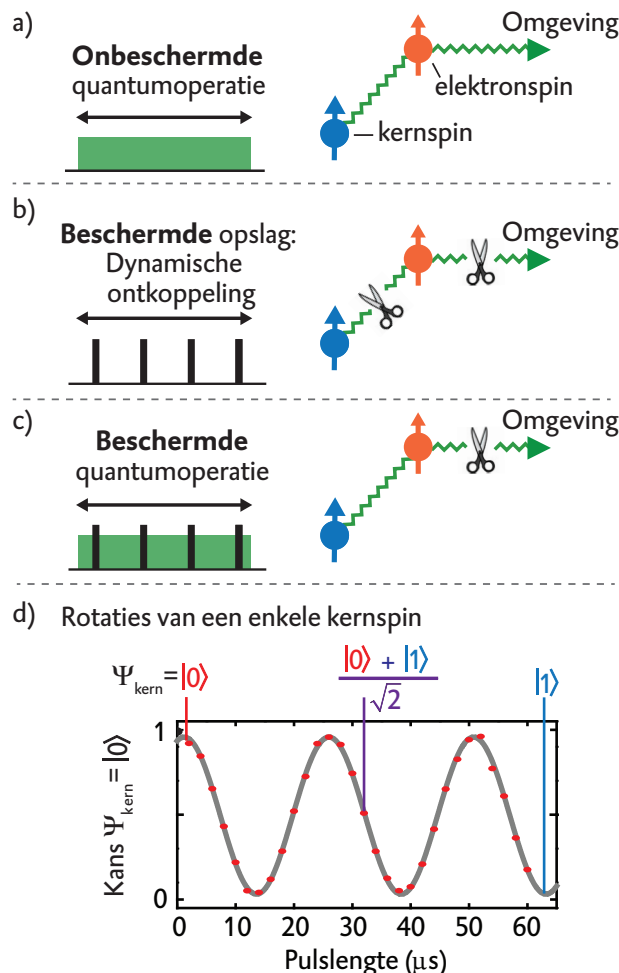
bare manier fluctueert, weten we na verloop van tijd niet meer in welke toestand de spin zich bevindt. De in de spin opgeslagen quantuminformatie is dan verloren. Men spreekt dan van decoherentie van de quantumtoestand. Onvoorspelbare fluctuaties in het lokale magneetveld van een NV-centrum worden voornamelijk veroorzaakt door de dynamiek van andere spins in de diamant. Dit kunnen kernspins van ^{13}C -atomen zijn of elektronspins van andere verontreinigingen in de diamant die zich in de directe omgeving van het NV-centrum bevinden (figuur 2a).

Dynamische ont koppeling

Het idee van dynamische ont koppeling is om het effect van de fluctuaties in de magnetische omgeving van het NV-centrum uit te middelen door de NV-spintoestand snel en regelmatig om te klappen met korte microgolfpulsjes (figuur 3a). Bekijken we dit vanuit het perspectief van de NV-spin, dan is het de magnetische omgeving die omklapt met elke puls. Het lokale magneetveld, gezien vanuit het perspectief van de NV-spin, zal hierdoor uitmiddelen tot nul. Dit werkt alleen als de omgeving niet al teveel is veranderd. Het ont koppelen is dus het meest effectief als de tijd tussen twee pulsen korter is dan de typische tijdschaal waarop de omgeving verandert. Figuren 3b en 3c laten het resultaat zien van experimenten op NV-centra bij kamertemperatuur. Het is goed te zien hoe de coherentie langer behouden blijft als het aantal pulsen N wordt opgevoerd [6]. Voor een omgeving gedomineerd door ongecontroleerde interactie met naburige elektronspins voorspelt de theorie dat de coherentietijd schaal met $N^{2/3}$. De gemeten data laten een nagenoeg perfecte overeenkomst zien met deze voorspelde schaling.

Rekenen met qubits

Zoals we hebben laten zien werkt dynamische ont koppeling uitstekend om een enkele elektronspin te beschermen tegen decoherentie. Hierdoor is deze veel beter als geheugenqubit te gebruiken. In een volgende stap willen we een qubit echter niet alleen gebruiken om informatie te bewaren, maar ook om mee te rekenen. Hierbij is de toepassing van dynamische ont koppeling echter problematisch. Om



Figuur 4 a - c) Principe van coherentie-beschermende quantumoperaties op een hybride twee-qubit quantumregister bestaande uit een elektronspin (oranje) en een kernspin (blauw). a) Zonder bescherming tijdens de operatie is het systeem gevoelig voor decoherentie doordat de elektronspin sterk koppelt met de omgeving. b) Als dynamische ont koppeling wordt toegepast op één van de qubits wordt ook de inter-qubitinteractie uitgeschakeld terwijl deze nodig is voor het doen van twee-qubit operaties. c) Door de ont koppelingspulsjes op het elektron synchroon te laten lopen met de interne resonantiefrequentie kan de koppeling behouden blijven terwijl het systeem beschermd is tegen decoherentie. d) Coherente rotatie van de kernspintoestand (Ψ_{kern}) van het stikstofatoom van het NV-centrum. Door zijn kleine magnetisch moment gaat het roteren van een kernspin ongeveer 1000 keer zo langzaam als voor de elektronspin (vergelijk de tijdschaal met die van figuur 2).

te kunnen rekenen met qubits is het namelijk noodzakelijk dat ze elkaar kunnen 'voelen' (figuur 4a). Bij twee spins betekent dit bijvoorbeeld dat ze wederzijds beïnvloed worden door elkaars magneetveld. Dynamische ont koppeling schakelt echter alle interactie tussen een qubit en de omgeving uit, dus ook de interactie tussen verschillende qubits (figuur 4b). Hierdoor is dynamische ont koppeling over het algemeen onverenigbaar met het doen van operaties op meerdere qubits. Toch zouden we dynamische ont koppeling willen toepassen tijdens quantumoperaties, zodat de qubits ook tijdens een berekening beschermd zijn tegen decoherentie (figuur 4c). We willen graag ons quantumregister

uitbreiden met kernspins die dicht bij de elektronspin in het rooster zitten, te beginnen met de kernspin van het stikstofatoom dat altijd in een NV-centrum zit (figuur 2a). We zijn al in staat om de quantumtoestand van deze kernspin zeer nauwkeurig te controleren (figuur 4d) en uit te lezen [7]. Nu werken we aan het ontwikkelen van een techniek waarmee dynamische ont koppeling kan worden gecombineerd met het doen van quantumoperaties in dit hybride elektronspin-kernspin quantumstelsel. Ons idee is om de tijd tussen de ont koppelingspulsjes op het elektron synchroon te laten lopen met de precessie van de kernspin, waardoor de interactie tussen de qubits behouden

kan blijven en de quantumoperaties beschermd zijn tegen decoherentie (figuur 4c).

Als eerste toepassing van de coherentie-beschermende operaties willen we Grovers quantumzoekalgoritme (zie kader *Quantumalgoritmes*) toepassen op ons hybride elektronspin-kernspin quantumregister. Deze twee qubits kunnen samen in vier verschillende toestanden zijn en vormen zodoende een database met vier objecten. Met Grovers algoritme zouden we in één keer het gewenste object in deze database kunnen vinden terwijl een klassieke computer er gemiddeld twee keer over zou doen. Ook met deze bescheiden database zou een quantumcomputer dus al sneller zijn dan een klassieke computer.

Toekomst

Onze experimenten hebben aange-toond dat dynamische ontkoppeling een zeer effectieve manier is om in qubits opgeslagen quantuminformatie te beschermen. Dit is een belangrijke mijlpaal, omdat decoherentie

wordt gezien als een van de grootste uitdagingen voor de ontwikkeling van de quantumcomputer. Ondertussen hebben onze resultaten navolging gekregen in supergeleidende qubits en quantumdots [8, 9]. Ook hebben wij en anderen laten zien dat dynamische ontkoppeling de gevoeligheid van magneetveldmetingen met spins flink verhoogt [10, 11]. Onze resultaten stellen bovendien een scala aan nieuwe spectaculaire experimenten in het vooruitzicht, zoals het uitvoeren van quantumalgoritmes op hybride quantumsystemen. Met deze nieuwe ideeën gaan we de komende tijd verder met het onderzoek naar quantumrekenen in diamant.

Referenties

- 1 W. H. Zurek, *Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical*, Rev. Mod. Phys. **75** (2003) 715-775.
- 2 W. H. Zurek, *Quantum Darwinism*, Nature Physics **5** (2009) 181.
- 3 T. van der Sar, E. Heeres, T. Oosterkamp, R. Hanson, *Quantumcircuitjes bouwen in een elektronenmicroscop*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde **75** (2009) 408-410.
- 4 D. D. Awschalom, R. J. Epstein, and R. Hanson, *The Diamond Age of Spintronics*, Scientific American **297** (2007) 84-91.
- 5 T. D. Ladd et al., *Quantum computers*, Nature **464** (2010) 45-53.
- 6 G. de Lange, Z.H. Wang, D. Ristè, V.V. Dobrovitski, and R. Hanson, *Universal dynamical decoupling of a single solid-state spin from a spin bath*, Science, **330** (2010) 60.
- 7 L. Robledo, L. Childress, H. Bernien, B. Hensen, P. F. A. Alkemade en R. Hanson, *High-fidelity projective read-out of a solid-state spin quantum register*, Nature **477** (2011) 574-578.
- 8 J. Bylander et al., *Noise spectroscopy through dynamical decoupling with a superconducting flux qubit*, Nature Physics **7** (2011) 565-570.
- 9 H. Bluhm et al., *Dephasing time of GaAs electron-spin qubits coupled to a nuclear bath exceeding 200 μ s*, Nature Physics **7** (2011) 109-113.
- 10 G. de Lange, D. Ristè, V. V. Dobrovitski, en R. Hanson, *Single-spin magnetometry with multipulse dynamical decoupling sequences*, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 080802.
- 11 S. Kotler, N. Akerman, Y. Glickman, A. Keselman en R. Ozeri, *Single-ion quantum lock-in amplifier*, Nature **473** (2011) 61-65.



De voorzitter van de NNV schrijft geregeld een column in het NTvN over een markante ontwikkeling in natuurkundig Nederland.

Frauderende neutrino's

Een jaar of tien geleden moest ik namens ons internationale onderzoeksteam de redactie van Physics Letters melden dat wij een zeer complexe correctiefactor in een kort daarvoor gepubliceerd artikel over het hoofd hadden gezien. Ik voerde dat gesprek met een zekere schroom, maar de redacteur reageerde tot mijn verrassing met enthousiasme. Hij stelde dat dit juist de manier was waarop goede wetenschap diende te werken: je publiceert je resultaten en als voortschrijdend inzicht tot een erratum of vervolgpublishatie leidt, wordt daarmee in alle openheid het kritisch vermogen van wetenschappelijk onderzoek fraai geïllustreerd.

Dit enthousiasme van de Physics Letters-redacteur is wat mij betreft ook van toepassing op de recente publicatie van CERN waarin bericht wordt over de mogelijke observatie van neutrino's die zich voortbewegen met een snelheid groter dan die van het licht. Vele natuurkundigen houden dit met mij voor onmogelijk, omdat er immers vele metingen zijn die direct of indirect aangetoond hebben dat neutrino's zich met de lichtsnelheid voortbewegen. Het fraaiste voorbeeld daarvan is de waarneming van neutrino's die uitgezonden zijn bij de ontploffing van supernova SN1987A. De waarnemingen in het zichtbare deel van het spectrum en die van de neu-

trino's waren vrijwel simultaan, terwijl een afstand van 168.000 lichtjaren is afgelegd – toch net iets meer dan de 730 km tussen CERN en het ondergrondse laboratorium Gran Sasso waar de neutrino's zijn geklokt. Toch ben ik enthousiast over de CERN-publicatie, omdat daarmee voorkomen wordt dat de wetenschap beschuldigd wordt van het achterhouden van meetgegevens en andere frauduleuze activiteiten om zogenaamd de gevestigde belangen te dienen. Deze keus van CERN is veel beter: laat je eigen twijfel maar zien. Dit is de snelste manier om de ontbrekende correctiefactor boven water te laten komen en andere teams in staat te stellen tijd en