



Screenshot van de livestream, met dank aan Alfons van Blaaderen.

“Van Zwart Gat tot Energiezuinige Toepassing”, rede uitgesproken door Rembert Duine bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar “Theory of Nanoscale Systems” aan de Universiteit Utrecht op 5 oktober 2022.

Mijnheer de rector magnificus,
Waarde collega's,
Dames en heren,

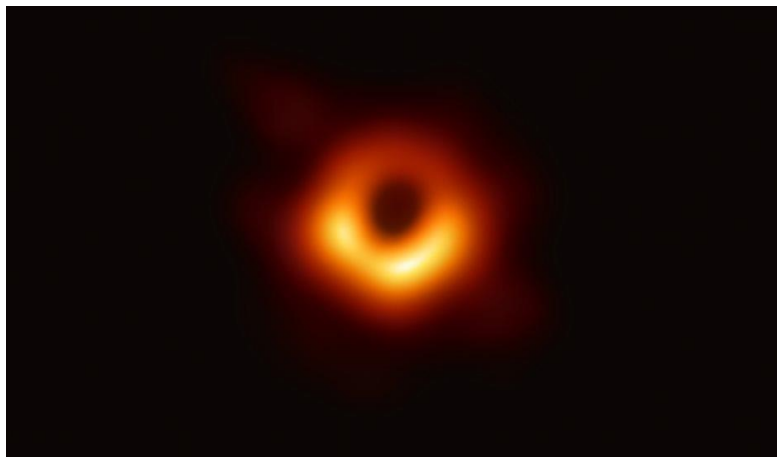
Stelt u zich het volgende experiment voor: pak een willekeurige steen, en gooi deze zo hard mogelijk recht omhoog. Als het u inderdaad lukt om de steen perfect kaarsrecht omhoog te gooien, is het raadzaam om een stapje opzij te doen. U zou zich kunnen bezeren omdat de steen hoogstwaarschijnlijk terugvalt op de grond. Waarom valt de steen terug? Dit komt in de eerste plaats door de zwaartekracht. Deze kracht zorgt ervoor dat alle massa's elkaar aantrekken. In dit specifieke geval trekt de aarde dus aan de steen die u gegooid heeft. Overigens zorgt de zwaartekracht er ook voor dat u - letterlijk maar niet noodzakelijk figuurlijk - met beide benen op de grond blijft staan. De zwaartekracht is sterker als de massa's groter zijn. Als de steen tweemaal groter is, of als de aarde tweemaal groter zou zijn, zou de steen tweemaal harder teruggetrokken worden naar de aarde. Het antwoord op de vraag “Waarom valt de steen terug?” is niet alleen “Vanwege de zwaartekracht”. De steen valt terug omdat het u zeer waarschijnlijk niet gelukt is om de steen sneller te gooien dan de ontsnappingsnelheid. Voor de aarde is deze snelheid ruim 11 km per seconde. De hoogste snelheden die een mens een object mee kan geven door te gooien liggen rond de 160 kilometer per uur. En dan hebben we het over professionele honkballers. Een steen met een snelheid die groter is dan de ontsnappingsnelheid - 11 km per seconde dus – recht omhoog gooien zal u niet lukken. Als het u wel zou lukken, dan zou de steen niet terugvallen op de aarde. Sneller dan de ontsnappingsnelheid betekent namelijk dat de steen zou ontsnappen aan het bereik van de zwaartekracht van de aarde. De steen zou dus de ruimte in vliegen en niet terugvallen.

Laten we nu een ander experiment doen. Schijn 's nacht op een plek waar het flink donker is met een zaklamp recht omhoog. We “gooien” in dit experiment het licht dus als het ware recht omhoog. Wat is nu het verschil met het omhoog gooien van de steen? De lichtbundel uit de zaklamp valt niet terug op de aarde. Hoe komt dit? De lichtsnelheid is zo'n 300000 kilometer per seconde. Veel groter dus dan 11 kilometer per seconde - de ontsnappingsnelheid van de aarde die ik eerder noemde. Het licht ontsnapt dus met gemak aan de aarde. Wanneer zou het licht wel terugvallen? Dit zou gebeuren als u dit experiment zou uitvoeren op een zwart gat. Een zwart gat is heel zwaar. Daardoor

is de zwaartekracht enorm sterk en de ontsnappingsnelheid heel hoog. Voor een zwart gat is de ontsnappingsnelheid per definitie groter dan de lichtsnelheid. Hierdoor kan zelfs licht niet ontsnappen aan de aantrekking door de zwaartekracht van het zwarte gat. Dit is overigens de reden waarom we zwarte gaten zwart noemen: als er geen licht vanaf komt zouden ze zwart moeten zijn. Voor zover we weten is de lichtsnelheid de hoogst mogelijke snelheid die je überhaupt kunt bereiken. Kortom, als licht niet kan ontsnappen aan het zwarte gat, kan niks ontsnappen aan het zwarte gat. Als u eenmaal binnen het bereik van de zwaartekracht van een zwart gat bent, kunt u nooit meer ontsnappen aan het zwarte gat. En niet alleen u kan niet meer ontsnappen. Er is simpelweg niets wat wel kan ontsnappen. Alles wat in het zwarte gat valt komt er nooit meer uit.

Zwarte gaten zijn de afgelopen twee eeuwen veel bestudeerd. Dit begon als puur theoretisch onderzoek. Hierin werden de gevolgen van het experiment met de zaklantaarn dat ik net besproken heb doordacht. Op basis hiervan werd het bestaan van zwarte gaten als theoretische mogelijkheid voorgesteld. In het begin van de twintigste eeuw zijn deze theoretische voorspellingen preciezer gemaakt met behulp van de algemene relativiteitstheorie van Einstein, de inmiddels gangbare theorie voor hoe de zwaartekracht werkt. Nu, een eeuw later, staan zwarte gaten nog steeds volop in de belangstelling. Ze zijn nu meer dan alleen een theoretisch voorstel. We weten uit sterrenkundige waarnemingen dat in het middelpunt van het sterrenstelsel waarin we leven – de Melkweg – zich zeer waarschijnlijk een zwart gat bevindt dat miljoenen keren zwaarder is dan de zon. De projectie op het scherm laat de eerste foto ooit zien van een zwart gat. Deze is een paar jaar geleden genomen. Dit is een zwart gat in het middelpunt van een naburig sterrenstelsel. De foto laat eigenlijk het licht rond het zwarte gat zien, en niet het gat zelf. Dat kunnen we niet direct zien omdat het zwart is. Het licht rond het zwarte gat bevindt zich buiten de zogenaamde horizon van het zwarte gat. Dit is een denkbeeldige bol rond het middelpunt van het zwarte gat. Alles binnen deze bol kan nooit meer naar buiten komen door de te sterke aantrekking door de zwaartekracht van het zwarte gat.

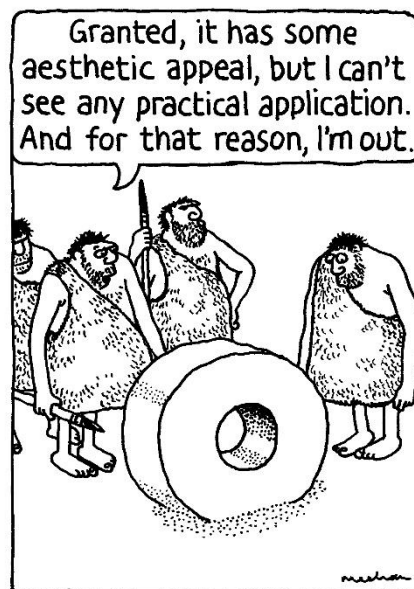
Niet alleen binnen de natuur- en sterrenkunde hebben we het over zwarte gaten. Bijna iedereen zal de term “zwart gat” wel kennen. Wellicht heeft u weleens geklaagd, na afloop van een mooie periode in u leven, dat u zich nu even in een “zwart gat” bevond. Een aantal jaar geleden verdween een oude versie van het populaire computerspel “Fortnite” in een zwart gat. Een aantal dagen later verscheen de nieuwe versie. U heeft wellicht wel eens een film gezien waarin een zwart gat voorkwam. Zwarte gaten spreken zo tot de verbeelding dat ze een plek hebben in onze cultuur. Een aantal van u zal zich wel eens afgevraagd hebben wat er nu precies zou gebeuren als u in een zwart gat zou vallen. Of wellicht heeft u zich afgevraagd wat dat nu precies is, zo’n zwart gat. Dit soort vragen zijn de vragen waarmee fundamenteel niet-direkt-toepasbaar wetenschappelijk onderzoek begint.



<https://www.ru.nl/onderzoek/prijzen-prestaties/eerste-foto-zwart-gat/>

Wellicht hoort u in de loop van deze lezing een antwoord op u persoonlijke vraag over zwarte gaten. De vraag die ik vandaag echter specifiek wil beantwoorden is wellicht niet de eerste vraag die bij u opkomt als het over zwarte gaten gaat. Het is de vraag "Wat hebben we er nu eigenlijk aan?". Dit is een vraag die wel eens aan mij gesteld wordt. Niet alleen als het over zwarte gaten gaat, maar over allerlei wetenschappelijk onderzoek. Deze vraag wordt niet alleen gesteld door niet-wetenschappers, maar de vraag "Wat heeft het voor nut?" is er een die wetenschappers ook regelmatig aan elkaar stellen. Elke vraag mag natuurlijk gesteld worden. Volgens Andre Geim, Nobelprijswinnaar natuurkunde in 2010, is het stellen van de vraag "Wat heeft het voor nut?" bij fundamenteel wetenschappelijk onderzoek hetzelfde als je, na het zien van een groep dolfijnen tijdens een romantische boottocht, afvragen of deze dolfijnen eetbaar zijn en of ze lekker zullen smaken. Het nut van fundamenteel wetenschappelijk onderzoek, zoals het onderzoek naar zwarte gaten, is dus in eerste instantie het onderzoek zelf. Dit bevredigt onze nieuwsgierigheid en kan uiteindelijk onze plek in het grotere geheel wellicht duiding geven.

Verder is fundamenteel onderzoek aan de universiteit verweven met onderwijs. Het nut van fundamenteel onderzoek zit hem dus ook in de bijdragen aan dit onderwijs. Hiermee bedoel ik niet, of in ieder geval niet uitsluitend, het vakinhoudelijke onderwijs. Er zijn immers niet veel banen buiten de academische sector waarbij, om maar een voorbeeld te noemen, "kennis van de algemene relativiteitstheorie en zwarte gaten" een vereiste vaardigheid is voor invulling van de vacature. Wat ik wel bedoel is dat fundamenteel onderzoek van een hoog niveau een sterk wervende aantrekkingskracht heeft op jonge getalenteerde mensen. Deze jonge mensen kunnen dan, bijvoorbeeld als assistent in opleiding, een aantal jaar fundamenteel onderzoek doen op het hoogste niveau. De vaardigheden die ze hierbij opdoen, zoals kritisch en probleemoplossend denken, programmeren, en niet in de laatste plaats, doorzettingsvermogen, zijn vaardigheden die wel belangrijk zijn voor veel vacatures. Ik heb het plezier om jonge mensen te begeleiden bij het doen van wetenschappelijk onderzoek. Van degenen die dit afgerond hebben zit een aantal in de zaal. Ze zijn werkzaam in ziekenhuizen, bij het RIVM, als consultant, en in veel andere sectoren. Ik denk deze jonge mensen zo breed ingezet kunnen worden omdat ze een aantal jaren fundamenteel onderzoek hebben gedaan en de daarvoor vereiste vaardigheden verworven hebben. Dit is intrinsiek aan alle wetenschappelijk onderzoek.



<https://potomacinstitute.org/featured/650-concerns-over-the-continued-health-and-quality-of-the-us-basic-research-enterprise>

Wat er met de vraag "Wat heeft het voor nut?" natuurlijk vaak bedoeld wordt is de vraag of het fundamentele onderzoek in kwestie ook praktische toepassingen heeft. Deze vraag is vaak wat

moeilijker te beantwoorden, zoals de dia laat zien voor de uitvinding van het wiel. Als algemeen antwoord op deze vraag wordt vaak gegeven dat veel fundamenteel onderzoek op de lange termijn toepassingen vindt. Een voorbeeld dat dan veel genoemd wordt is de laser. Deze werd ontwikkeld in 1960 en had destijds niet een duidelijke toepassing. Nu zijn lasers niet meer weg te denken als belangrijk element in allerlei toepassingen. Een van de meest recente is het laten "laseren" van je ogen. Het voorbeeld van de laser heeft veel parallellen. Ik ben een keer door de lijst met Nobelprijzen natuurkunde heengegaan met de vraag "Welke heeft bijgedragen aan de ontwikkeling van de smartphone?" Als je dat doet kom je al gauw op tientallen Nobelprijzen fundamentele natuurkunde. Ook in onze hedendaagse ziekenhuizen, om een ander voorbeeld te noemen, loop je van de ene Nobelprijs natuurkunde naar de andere. Het voorbeeld van de fundamentele ontwikkeling die later een toepassing vindt, zoals de laser, is natuurlijk mooi. Het suggereert dat er een verbinding is tussen fundamenteel onderzoek en toepassing. Hierin wordt dan lineair en stapsgewijs toegewerkt van het fundamentele onderzoek naar die toepassing. Dit kan zeker nuttig zijn om richting te geven aan een onderzoeksveld.

De voornaamste boodschap van mijn betoog is dat er echter ook verbindingen tussen fundamenteel wetenschappelijk onderzoek en toepassingen bestaan die eerder associatief tot stand komen. Deze passen niet in zo'n lineair kader. Ze maken zelfs het onderscheid tussen fundamenteel en toegepast onderzoek niet altijd even zinvol. Wat ik hier vandaag wil bespreken is een voorbeeld hiervan uit mijn eigen onderzoek. Ik zal bespreken hoe de natuurkunde van zwarte gaten in de nabije toekomst een praktische toepassing kan vinden. Hiermee bedoel ik niet dat de sterrenkundige zwarte gaten, die een miljoen keer zwaarder zijn dan de zon, straks een onderdeel zullen zijn van consumentenelektronica. Wat ik zal schetsen is hoe concepten uit de natuurkundige theorieën voor zwarte gaten compleet buiten hun oorspronkelijke context toegepast kunnen worden. En wel op systemen waarvoor toepassingen wel in het verschiet liggen. Om te zien hoe dit werkt gaan we eerst even terug naar de zwarte gaten...

Zoals ik eerder besprak worden zwarte gaten zwart genoemd omdat ze alles, ook alle licht, opslorpen. Ze zenden hierdoor geen licht uit en zouden daarom zwart zijn. Dit is niet het hele verhaal. Het echte verhaal is, bij wijze van spreken, minder zwart-wit. Dit komt doordat de ruimte om ons heen gevuld is met deeltjes. Voorbeelden van deeltjes waar u wellicht wel eens van gehoord hebt zijn fotonen, de deeltjes waaruit licht bestaat. Ook heeft u misschien wel eens gehoord van elektronen. De laatste zijn geladen deeltjes die verantwoordelijk zijn voor het lopen van elektrische stromen in al uw elektrische apparaten. Nu heeft, voor zover we weten, elk deeltje ook een antideeltje. Voor het elektron is dit het positron. Het elektron heeft een negatieve elektrische lading en het positron een positieve lading. Zoals ik zei is de ruimte om ons heen gevuld met deeltjes, ook met elektronen en positronen. Hier merken we niets van, omdat de eigenschappen van deze deeltjes elkaar als het ware opheffen, juist omdat ze elkaars antideeltjes zijn. Dichtbij een zwart gat kunnen we wel merken dat de hele ruimte gevuld is met deeltjes. Dit gaat als volgt. Ik zei eerder dat een zwart gat een horizon heeft. Dit is een soort "point-of-no-return": als je richting een zwart gat reist en je bent voorbij dit punt, kun je nooit meer terug. Nu kan het gebeuren een elektron met zijn antideeltje, een positron dus, te dicht in de buurt komen van een zwart gat. Een van de twee, zeg het positron, kan "per ongeluk" voorbij de horizon vliegen. Deze wordt onherroepelijk opgeslorpt door het zwarte gat. Het elektron blijft nu in zijn eentje over en kan, omdat het nog niet voorbij de horizon was, wegvliegen. De partner van het elektron is dus, om het ietwat dramatisch te brengen, verslonden door het zwarte gat. Hierdoor wordt de negatieve lading van het elektron niet meer opgeheven door deze positieve partner. We kunnen het elektron, en in het bijzonder de negatieve lading van het elektron, hierdoor zien. Door dit soort processen vliegen er continu deeltjes weg van een zwart gat die we in principe zouden kunnen detecteren. Deze deeltjes worden samen Hawkingstraling genoemd, naar de onlangs overleden natuurkundige Stephen Hawking. Door deze straling zijn zwarte gaten niet echt zwart. De straling is voor zwarte gaten in het heelal alleen zo zwak dat ze nog nooit gezien is. Ik kom later terug

op nieuwe ideeën over hoe de Hawkingstraling wel te zien is. Hawking voorspelde de naar hem genoemde straling in de jaren '70 van de vorige eeuw. Wat Hawking dus aantoonde is dat paren van deeltjes met hun antideeltjes, die normaal niet te zien zouden zijn, dicht bij een zwart gat wel te zien zijn. Dit komt doordat het zwarte gat een deeltje opslorpt, waardoor het andere versterkt uitgezonden wordt. Zwarte gaten zijn dus eigenlijk een soort versterkers. Als u de details van hoe het precies werkt niet geheel kon volgen, is dit het enige punt om te onthouden. Zwarte gaten zijn versterkers. Niet precies versterkers zoals in u eigen geluidsinstallatie thuis. Maar versterkers die een zwak signaal kunnen versterken door als het ware een component van het signaal op te slurpen en een andere component versterkt uit te zenden. Dat het te versterken deeltje een antideeltje heeft dat opgegeten wordt door het zwarte gat is hierbij dus cruciaal. En de energiebron van de versterker is de extreem sterke zwaartekracht van het zwarte gat. Het idee dat een zwart gat kan werken als een soort versterker is precies hetgeen waarop de praktische toepassing van het zwart gat die ik zal bespreken gebaseerd is. Zoals ik al aankondigde is deze toepassing volledig buiten de oorspronkelijke context waarvoor Hawking zijn theorie ontwikkelde, namelijk die van zwarte gaten in het heelal,. Om de context waarin we de ideeën van Hawking gaan toepassen te introduceren maak ik nu een sprong: van zwarte gaten in het heelal naar consumentenelektronica.

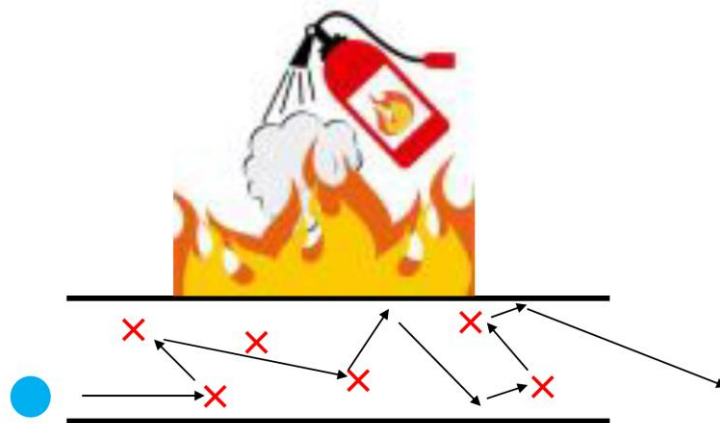


<https://www.coolblue.nl/en/mobile-phones/smartphones>

In het bijzonder gaat het mij om de informatietechnologie, de IT sector dus. De technologie die informatie verwerkt en verspreidt is tegenwoordig een niet meer weg te denken onderdeel van ons leven. De informatietechnologie bestaat niet alleen uit de apparaten bij u thuis, zoals computers en smartphones, maar ook uit de datacenters die deze apparaten laten werken. Dat het niet de meest energiezuinige sector is heeft u wellicht meegekregen naar aanleiding van discussies rondom nieuw te bouwen datacenters. Op het moment verbruikt de IT sector ongeveer 10% van de opgewekte elektrische energie. Er zijn voorspellingen dat dit richting de helft van het totaal kan gaan. Met energiebesparing in informatietechnologie valt dus behoorlijk wat te winnen. Energiezuinig maken zou ook kunnen betekenen dat u uw smartphone nog maar een keer per maand hoeft op te laden, en niet elke dag. Ook u eigen laptop verbruikt relatief veel energie. Het is zelfs zo dat de energiedichtheid van een computerchip, de belangrijkste elektronische component van computers, vergelijkbaar is met de energiedichtheid van de uitlaatpijp van een ruimteraket. De energieverspilling van elektrische apparaten zit hem in het produceren van warmte die nergens voor gebruikt wordt. De elektrische stromen bestaan uit de elektronen die ik al eerder noemde. Als deze deeltjes stromen door een stroomdraad, botsen ze met allerlei onzuiverheden in het materiaal. Bij deze botsingen raken ze hun energie kwijt. Deze verloren energie wordt omgezet in warmte. Hierdoor warmen elektrisch

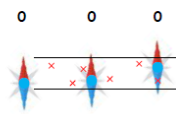
apparaten op. Soms is dat natuurlijk juist de bedoeling, in bijvoorbeeld een waterkoker of een strijkijzer. Voor veel toepassingen is deze opwarming daarentegen ongewenst. Voor computers is het zo dat de geproduceerde warmte een van de redenen is waardoor het moeilijk is om nog snellere computers te ontwikkelen. En voor datacenters is de geproduceerde warmte mede verantwoordelijk voor hun grote energieverbruik en behoefte aan koelwater.

Veel natuurkundig onderzoek is er op gericht om op de lange termijn energiezuinige alternatieven te vinden voor onze huidige elektronica. Een van die alternatieven is het vakgebied waarin ikzelf werkzaam ben: de spintronica. Waar de elektronica gebruik maakt van de elektrische lading van het elektron, maakt de spintronica gebruik van de zogenaamde spin van het elektron – een eigenschap waar u wellicht nooit van gehoord heeft. U kunt over deze eigenschap nadenken als het ingebouwde kompasnaaldje van het elektron. De naam “spin” verwijst naar ronddraaien. Het elektron is een elektrisch geladen deeltje. Als dit ronddraait ontstaat er een magnetisch veld. Dit magnetisch veld is eigenlijk het ingebouwde kompasnaaldje van het elektron. Een disclaimer die ik hier wil toevoegen aan deze uitleg is dat deze niet helemaal, of helemaal niet, correct is. Dit omdat ze is gebaseerd op het vertalen van natuurkunde van het alledaags leven naar de wereld van een extreem klein deeltje zoals het elektron. Desalniettemin geeft het u hopelijk een idee waar de naam “spin” voor het ingebouwde kompasnaaldje van het elektron vandaan komt, en waar dus de naam “spintronica” vandaan komt.

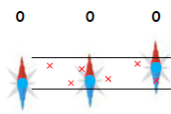


Het bestaan van dit kompasnaaldje heeft het mogelijk gemaakt om de opslagcapaciteit van harde schijven, een veelgebruikte manier om data op te slaan, dramatisch te verhogen sinds begin deze eeuw. Daarmee stond het vakgebied van de spintronica mede aan de wieg van de informatiemaatschappij waarin we nu leven. In de huidige informatietechnologie wordt dus al gebruikt gemaakt van het kompasnaaldje van het elektron. Hierbij bewegen de elektronen echter nog steeds en is er dus nog steeds ongewenst energieverlies. Een van de gevolgen van het ingebouwde kompasnaaldje is ook dat er nu signalen verstuurd kunnen worden *zonder* dat de elektronen bewegen. Als er een gewone elektrische stroom door een draad loopt wordt deze veroorzaakt door elektronen die, zoals op de dia, van links naar rechts bewegen. Als eerder gezegd, botst het elektron met onzuiverheden – de rode kruisjes op de dia – en verliest het zijn energie. Hierdoor warmt de stroomdraad ongewenst op. We kunnen ook informatie versturen door de kompasnaaldjes, de spins, op de elektronen om te laten draaien. In het voorbeeld op de dia is een rood puntje omhoog een “0” en een blauw puntje omhoog een “1”. Zoals u ziet op de dia gaat de informatie, weergegeven de enen en nullen, nu ook van links naar rechts. De informatie verplaatst zich zonder dat de elektronen zelf bewegen. De informatie verplaatst zich doordat de kompasnaaldjes – de spins – van de elektronen omdraaien. Omdat de elektronen niet bewegen, kunnen ze niet botsen en produceren ze dus minder

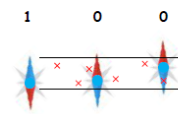
warmte. Ook is het op deze manier mogelijk om informatie te versturen door materialen die geen elektrische stroom kunnen geleiden.



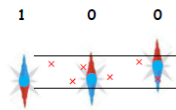
1



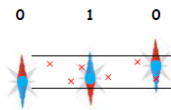
2



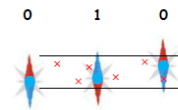
3



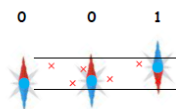
4



5



6



7

De afgelopen paar jaar zijn er een aantal doorbraken geweest waarin er is aangetoond dat het mogelijk is om door gebruik te maken van de spins van de elektronen – die kompasnaaldjes dus – informatie te versturen door materialen die geen elektriciteit geleiden. Het eerste experiment dat dit lukte werd gedaan in de groep van Prof. Bart van Wees te Groningen. Ik was zelf bij dit experiment betrokken om een theoretische beschrijving van het experiment te ontwikkelen. Dit eerste experiment toonde niet alleen aan dat het versturen van informatie mogelijk is, maar ook dat het behoorlijk efficiënt gaat. Inmiddels zijn er meer van dit soort experimenten succesvol uitgevoerd. In een van de meest recente experimenten werd, met behulp van onze theoretische ondersteuning, aangetoond dat het zelfs mogelijk is om informatie te versturen in het materiaal hematiet. Dit is een

van de hoofdbestanddelen van roest, hetgeen ons een leuke invalshoek gaf richting de media, zoals op deze dia te zien is.

20 DE VOLKSKRANT
MAANDAG 17 SEPTEMBER 2018

Wetenschap



Braziliaanse roestige geluidsdempers binnenkort als basismateriaal voor supercomputers?

Foto Getty Images

Roest wordt onderdeel computers

Natuurkundigen onthullen een nieuwe toepassing voor een oud materiaal: roest. Volgens hen opent de roodbruine oxide de deur naar supersnelle computers en stabielere harde schijven.

Dit natuurkundig onderzoek vormt de basis voor een nieuw soort informatietechnologie die gebaseerd is op materialen waarin de elektronen niet langer bewegen en hun energie verliezen. Deze technologie zou dus niet alleen veel energiezuiniger moeten zijn maar ook veel snellere computers moeten leveren. Er is echter een groot probleem: de signalen die gedragen worden door de spins - de kompasnaaldjes - van de elektronen zijn heel erg zwak. We moeten dus een manier vinden om deze te versterken. Omdat het hier niet gaat om gebruikelijke elektrische signalen kunnen we geen alledaagse versterkers gebruiken. De uitdaging is dus om een versterker te ontwikkelen voor signalen die zich voortplanten door de spins van elektronen en niet door de lading. Eerder zei ik dat zwarte gaten eigenlijk een soort versterkers zijn die een deeltje versterken door het bijbehorende antideeltje op te sloppen. Het cruciale ingrediënt hierbij is het bestaan van deeltje en antideeltje. Kunnen we deze ideeën toepassen op de spinsignalen om ze zo te versterken?

Het antwoord op deze vraag is ja, waarmee ik bedoel dat we een concreet theoretisch voorstel hebben om dit te doen. Het eerste ingrediënt hierin is dat de spin van het elektron ook een soort "anti-spin" heeft: een elektron met zijn kompasnaaldje omhoog wijzend, en een elektron met zijn kompasnaaldje naar beneden wijzend, zijn elkaars deeltje en antideeltje als het om spin gaat. Volgens het recept van de zwarte-gat-versterker moeten we nu het antideeltje – het elektron met het kompasnaaldje naar beneden wijzend – op de een of andere manier opsloppen om het spinsignaal te versterken. Let wel: het voorstel is niet om met ons materiaal de ruimte in te vliegen en dit in de buurt van een echt zwart gat te doen. Het voorstel is om dit opsloppen op een andere manier te doen, en zo de situatie van het zwarte gat na te bootsen in een materiaal in een laboratorium. Het gaat me nu te ver om in detail uit te leggen hoe we dit precies voorstellen. Het belangrijkste ingrediënt van ons theoretische voorstel is dat we door het spelen met de afmetingen of combinaties van de materialen een point-of-no-return kunnen nabootsen voor de spin van het elektron die compleet analoog is aan

de horizon van het zwarte gat. Omdat we nog steeds informatietechnologie en computerchips als toepassing in gedachten hebben, is het voorstel dus om een zwart gat op een computerchip na te bootsen.

Computerchip gaat zwart gat nabootsen

Stuur een stroom door een vernauwing in een chip en magnetische golven gedragen als licht bij de rand van een zwart gat. Over twee jaar in een lab, denkt Rembert Duine.



Martijn van Caimhout
Amsterdam

Vergeet de ruimteschepen en de reuzentelescopen: wie een zwart gat wil bestuderen kan binnenkort misschien beter op een speciale microchip kijken. Nederlandse en Chileense fysici publiceren vandaag berekeningen waaruit blijkt dat een levensecht zwart gat ook in het lab te maken is, zij het niet van het type dat zijn fysieke omgeving ook echt zal opslokken.

Het betreffende zwarte gat ontstaat als in de voorgestelde chip een elektrische stroom in een nauw gedeelte een versnelling ondergaat. Daardoor kunnen speciale magnetische golven, zogeheten spingolven, vanaf een bepaald punt niet meer aan de doorgang ontsnappen. 'De vergelijkingen die dat beschrijven zijn dezelfde die een echt astrofysisch zwart gat weer geven', zegt prof Rembert Duine, een van de auteurs van de studie die woensdag in *Physical Review Letters* verschijnt.

Duine is hoogleraar in Eindhoven en ook theoreticus op het instituut van No

Zogenaomde golfparen kunnen van pas komen bij bouw van quantum-computers of supervelgig dataverkeer

belrijtswinnaar Gerard 't Hooft in Utrecht. Hij is gespecialiseerd in spingolfsystemen, die ook in elektronica worden toegepast. In de zogeheten spintronica, jaren geleden hoorde ik een lezing over fysische parallellen met zwarte gaten en had meteen het vermoeden dat zo iets ook in meegesleepte spingolven moest bestaan.

Astronomische zwarte gaten zijn een uitvoersel van Einsteins relativiteitstheorie waarin ruimte en tijd gekromd worden door massa's, bijvoorbeeld van ingestorte oude sterren. Het zijn gebieden in de ruimte waar de zwaartekracht zo sterk is dat objecten - en zelfs licht - er vanaf een bepaald punt niet uit kunnen wegblijven. 'Een beetje als forellen die tegen de stroom inzwemmen, maar vlak bij een waterval onherroepelijk omlaag gesleurd worden', stelt Duine zich zo'n point of no return voor.

De afgelopen jaren zijn in allerlei systemen al zulke fysische horizons ontdekt, van geluidsgolven in stromend water tot roterende diepekoelide atoomwolkjes.

Maar heel diepe fysica was daaraan verder nog niet te onttelen, zegt Duine. Vooral de bekende voorspelling van de Britse theoreticus Stephen Hawking dat zwarte gaten ondanks alles toch zachtes stralen, schreef hij nog steeds om experimenteel bewijs.

Die zogeheten Hawking-straling ontstaat in theorie doordat precies op de rand van de ruimtetijdalgrond spontaan paren deeltjes en antideeltjes ontstaan die uit elkaar worden getrokken voor ze weer kunnen samenkomen. Volgens de berekeningen van Duine en zijn twee Chileense collega's kan precies zo iets ook meegesleepte spingolven overkomen.

De Canadese natuurkundige Bill Unruh, ooit de eerste die over fysische modellen van zwarte gaten publiceerde, is enthousiast over het idee van zwarte gaten op een spin-chip. 'Omdat Hawkings voorspellingen op quantumniveau spelen, is een test op dat niveau nieuw en heel interessant', mailt hij. De Utrechtse theoreticus Henk Stoof noemt de voorstellen realistisch. Hij verheugt zich bovendien op de mogelijkheid van witte gaten: systemen die uit het niets deeltjes of straling spuwen.

Volgens Duine is het voorgestelde chip-systeem niet heel moeilijk te bouwen. 'Binnen een paar jaar moet het mogelijk zijn om er interessante waarnemingen aan te doen', zegt hij.

Nadat zijn paper in een vroege versie online was gepubliceerd, werd hij meteen benaderd door groepen in Oxford, Mainz en ook Eindhoven zelf, die er wel brood in zagen. 'Ik verkeer normaal meer in de wereld van toegepaste elektronica, maar kennelijk spreken zwarte gaten enorm tot de verbeelding', zegt hij nog steeds verbaasd.

Mogelijk is een praktische toepassing van Duines berekeningen niet eens zover gezocht. Bijzonder aan golfparen die door een zwart gat onherroepelijk worden gescheiden, is dat ze quantummechanisch toch met elkaar verbonden blijven. Zulke routinematig verstrengelde deeltjes zouden van pas kunnen komen in quantumcomputers of supervelgige datacommunicatie, denkt Duine.

Illustratie Mark A. Garlick

Volkskrant, 1 Feb 2017

Alhoewel ik dit tot nu toe niet expliciet verteld heb, is ondertussen denk ik duidelijk dat ik een theoretisch natuurkundige ben. Wij bedenken theorieën en modellen voor onbegrepen natuurkundige waarnemingen en experimenten. Ook stellen we nieuwe waarnemingen of experimenten voor. Zoals u in het artikel op de dia kunt lezen gaat het hier dus om een theoretisch voorstel. Zo'n theoretisch voorstel zou weinig waard zijn zonder uiteindelijke experimentele navolging. Ik ben blij dat ruim een jaar geleden de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek – NWO – een subsidie heeft toegekend aan Dr. Lavrijsen van de TU/e en mijzelf om dit voorstel experimenteel te realiseren. Dit onderzoek vindt momenteel plaats in de groep van Prof. Koopmans te Eindhoven waar ik deeltijdhoogleraar ben. Ik hoop dat we over niet al te lange tijd erin slagen om zo'n zwart gat op een computerchip na te bootsen en te gebruiken als versterker. Als extraatje zouden we hiermee in een laboratorium dus een systeem hebben waarin we Hawkingstraling, die voor echte zwarte gaten niet te zien is, wel kunnen zien. Er zijn andere systemen waarin de Hawkingstraling mogelijk te zien is. Maar een waarneming die alle wetenschappers heeft kunnen overtuigen, is echter nog niet gedaan.

Laat ik een stapje terugdoen en kort samenvatten wat ik tot nu toe gezegd heb: de kompasnaaldjes op elektronen, de spins, zijn veelbelovend voor het ontwikkelen van informatietechnologie die veel energiezuiniger is dan de huidige. Het probleem is dat de signalen te zwak zijn en we een conceptueel nieuwe versterker voor deze signalen moeten ontwikkelen. We hebben een versterker voorgesteld die geïnspireerd is op hoe deeltjes en antideeltjes zich gedragen in de buurt van een zwart gat in de ruimte. Waar we nu staan is dat de theoretische ideeën er zijn, en dat we de eerste stappen aan het zetten zijn richting een experimenteel bewijs voor dit theoretische voorstel.

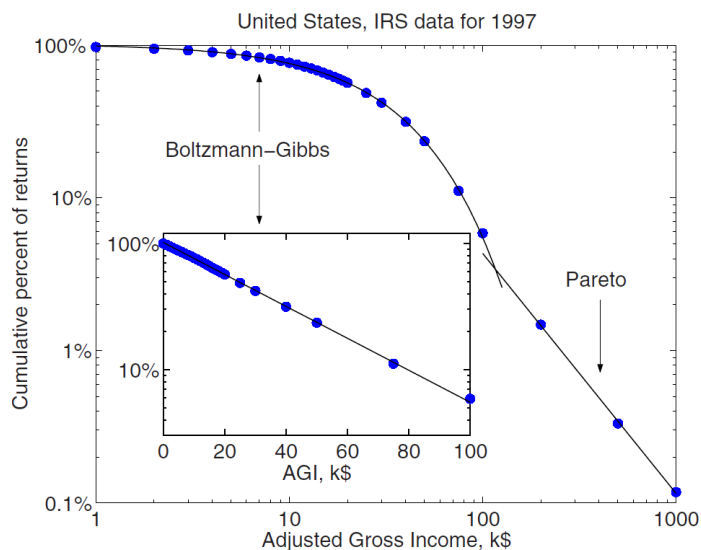
Wat bedoel ik nu precies als ik zeg dat we een zwart gat nabootsen? In de natuurkunde hebben we te maken met wiskundige vergelijkingen. Deze moeten we oplossen om te voorspellen wat er gebeurt – bijvoorbeeld met deeltjes bij een zwart gat of elektronen in een materiaal. Met nabootsen van een zwart gat bedoel ik het volgende. We kunnen een situatie maken die zo is dat de wiskundige vergelijkingen die de spins, de kompasnaaldjes, van de elektronen beschrijven, precies dezelfde wiskundige vergelijkingen zijn als de vergelijkingen waarmee Stephen Hawking aan de slag ging toen hij zijn Hawkingstraling voorspelde. Velen van u hebben denk ik de wiskundige achtergrond niet om zich deze vergelijkingen voor te kunnen stellen. Misschien dat u nu dus denkt: “Het zal wel!” Ongeacht uw wiskundige achtergrond, nodig ik u uit om na te denken over hoe het mogelijk is dat een zwart gat in de ruimte dat – pak hem beet – een miljoen keer zwaarder is dan de zon, ooit iets te maken zou kunnen hebben met een computerchip die een paar grammetjes weegt. Sterker nog: tot nu toe heb ik het gehad over stroomdraden, signalen, et cetera. Voor informatietechnologische toepassingen moet u hierbij niet denken aan de stroomdraden thuis die aan u stekkers in u stopcontacten zitten. Hierbij moet u denken aan stroomdraadjes die de verschillende componentjes op een computerchip verbinden. Deze zijn een paar nanometer klein, een paar miljardste van een meter. Deze “nano” in nanometer verklaart ook de naam van mijn leerstoel “Theory of Nanoscale Systems”. De vraag is dus: hoe is het mogelijk dat een astronomisch object, zoals zo’n zwart gat, iets te maken heeft met een stroomdraadje van een paar miljardste meter in doorsnede?

Dit kan omdat natuurkunde uiteindelijk heel simpel is. Voor degenen hier die het duizelt vanwege zwarte gaten, spins, computerchips, en zo verder, of voor degenen die natuurkunde tijdens de middelbare school zo snel mogelijk hebben laten vallen, is deze laatste opmerking niet als belediging bedoeld. Natuurkunde is niet voor iedereen weggelegd vanwege de vereiste wiskundige vaardigheden en het abstractieniveau. Wat ik bedoel met “simpel” is dat natuurkunde gestoeld is op een beperkt aantal eenvoudige principes. Een voorbeeld hiervan is behoud van energie, iets waarvan u wel eens gehoord zal hebben. Hoe verschillend natuurkundige systemen ook zijn, van zwarte gaten in het heelal tot elektronen in een stroomdraadje en alles daartussen, ze moeten zich aan de wet van behoud van energie houden. Dit beperkt de mogelijkheden voor de wiskundige vergelijkingen. Zo kunnen dezelfde vergelijkingen van toepassing zijn op compleet verschillende systemen. Hierdoor kunnen en willen wij, natuurkundigen, de modellen die we gebruiken zo simpel mogelijk maken zodat ze dan toepasbaar zijn op allerlei verschillende systemen. Een citaat van Einstein is dan ook “Alles moet zo eenvoudig mogelijk gemaakt worden maar niet eenvoudiger”.

Ik denk dat het goed is dat we dit laatste niet uit het oog verliezen. We leven in een tijd van “big data”. De hoeveelheid data die we genereren is enorm groot en om deze te analyseren wordt steeds meer gebruik gemaakt van kunstmatige intelligentie waarvan niet op een eenvoudige manier duidelijk is wat er in de analyse precies gebeurt. In een sessie over “Open Science” op de grote nationale natuurkundeconferentie te Veldhoven een aantal jaar geleden werd geopperd dat een wetenschappelijke publicatie in de toekomst niets meer zal zijn dan een collectie gemeten gegevens, data dus. Iedereen zou dan deze data kunnen gebruiken om te analyseren en voorspellingen te doen direct op basis van de data, zonder modelvorming. Allereerst kun je wiskundig aantonen, met behulp van de Poincaré recursiestelling – ook weer zo’n mooi en simpel principe – dat dit laatste onmogelijk is. Ten tweede gaat het idee dat data alleen al genoeg is om voorspellingen te doen compleet voorbij aan de kunst van het ontwikkelen van modellen. Onze huidige weervoorspellingen zijn alleen mogelijk doordat we weten welke meetgegevens belangrijk zijn en welke niet. We hebben dus modellen voor het weer ontwikkeld die zoals Einstein voorstelde “simpel zijn maar niet te simpel”. Het streven naar een zo simpel mogelijk model wordt ook ondermijnd door de rekenkracht van computers die ons in staat stelt om modellen die niet zo simpel zijn door te rekenen. Dit soort modelleren is zeker nuttig, maar is mijns inziens complementair aan natuurkundige modelvorming waarbij gestreefd wordt naar een zo eenvoudig mogelijk begrip. De focus op “big data” en de rekenkracht van computers hebben mede geleid tot het oprichten van instituten voor zogenaamde “complexe systemen”. Hiermee wordt

van alles bedoeld. Van hoe economieën zich gedragen tot aan klimaatverandering. Ook aan onze eigen universiteit is er een Center for Complex Systems Studies. Het mooie aan dit soort instituten is dat zij vaak allerlei verschillende takken van wetenschap verenigen. Omdat natuurkundigen wiskundig goed onderlegd zijn kunnen zij direct aan de slag met bijvoorbeeld de wiskundige vergelijkingen die economen of virusdeskundigen hebben opgesteld. Ik zou mijn mede-natuurkundigen hier echter willen oproepen dit niet te doen. Ik denk dat de neiging tot versimpeling van modellen die natuurkundigen hebben van meerwaarde kan zijn voor andere disciplines. Kortom, het zou mooi zijn als natuurkundigen hun bijdrage aan complexe systemen vooral richten op het simpel maken van de complexe systemen.

Het mooiste voorbeeld van zo'n versimpeling vind ik de ontwikkeling van de statistische natuurkunde eind 19^e eeuw. Door deze ontwikkeling is het mogelijk om 10-tot-de-24^e wiskundige vergelijkingen (een 1 met 24 nullen, een miljard keer een miljard keer een miljoen dus) tegelijkertijd op te lossen. En wel met potlood op de achterkant van een bierviltje. Even tussendoor: als je erin slaagt om je natuurkundige theorie of model op de achterkant van een bierviltje op te schrijven of af te leiden, dan ben je er wat mij betreft in geslaagd om het voldoende simpel te houden. Het oplossen van de miljard keer een miljard keer een miljoen wiskundige vergelijkingen doe je niet door die vergelijkingen echt op te lossen, maar door je in eerste instantie af te vragen welke informatie die verstopt is in de vergelijkingen nu eigenlijk relevant is. Misschien dat wetenschappers dit destijds deden omdat ze het wel moesten doen: ze hadden immers nog niet de beschikking over computers.



Yakovenko/Barkley Rosser, Rev. Mod. Phys. 81, 1703 (2009)

De methoden van de statistische natuurkunde zijn een aantal jaar geleden toegepast op economische systemen door de natuurkundige Victor Yakovenko. Met mijn collega Prof. Van Roij en afstudeerstudent Jan Mulder heb ik een paar generalisaties van Yakovenko's model bestudeerd. Yakovenko verklaarde met zijn model de ongelijke verdeling van inkomen. In de figuur ziet u de voorspelling van Yakovenko vergeleken met economische data van de belastingdienst van de Verenigde Staten. Op de verticale as staat het percentage van de bevolking dat een inkomen heeft dat meer is dan het inkomen op de x-as. Dat de curve naar beneden loopt geeft dus aan dat een heel kleine fractie van de bevolking een hoog inkomen heeft, en het grootste deel een laag inkomen. Het bijzondere van Yakovenko's voorspelling, naast dat hij goed overeenkomt met de meetgegevens, is dat de ongelijke inkomensverdeling, althans voor de lage tot middeninkomens, komt door toevalligheden. In zijn model zijn alle individuen gelijk. Sterker nog, wat Yakovenko voorspelt is het volgende. Stel, ik geef u hier allemaal ieder tien euromuntjes. Vervolgens gaat u met elkaar gaat handelen, dat willen zeggen elkaar dingen verkopen, en dingen kopen van elkaar. Ik laat even in het

midden wat u precies zou willen verhandelen. Als ik u nu vraag, “Hoeveel euromuntjes heeft u na een tijdje?” dan denkt u waarschijnlijk “ongeveer tien”. Iedere hier aanwezige natuurkundige kan u echter, of zou u moeten kunnen, voorrekenen dat alle euromuntjes naar verloop van tijd in bezit zijn van maar een paar mensen. Dit voorrekenen zou moeten kunnen op de achterkant van een bierviltje - misschien iets voor de receptie? Om precies te zijn, het aantal mensen met weinig euromuntjes is na verloop van tijd exponentieel veel groter van het aantal mensen met veel euromuntjes. Ondanks dat iedereen een gelijke start had en hetzelfde handelsspelletje speelt, is er dus een grote ongelijkheid gekomen. En niet omdat maar een paar mensen dit spelletje heel slim spelen, maar puur vanwege toevalligheden. Uiteindelijk komt deze ongelijkheid namelijk doordat er veel meer mogelijkheden zijn voor ongelijke verdelingen dan voor gelijke. Als twee mensen, zeg Alice en Bob, twee euromuntjes te verdelen hebben, dan zijn er drie mogelijkheden. Of Alice heeft alles, of Bob heeft alles, of ze hebben ieder een muntje. Hierbij zijn er dus twee keer zoveel ongelijke verdelingen als gelijke.

Welke conclusie u verbindt aan het gegeven dat een ongelijke inkomensverdeling kan komen door toevalligheden laat ik aan u over. Ik hoop in ieder geval dat u aan dit voorbeeld terugdenkt als er over ongelijkheid wordt gesproken. Als natuurkundige vind ik dit voorbeeld mooi omdat het laat zien dat zo iets complex als een inkomensverdeling in een echte samenleving op een eenvoudige manier voorspeld kan worden. Een mooie versimpeling dus, die uiteindelijk gebaseerd is om een behoudswet analoog aan het behoud van energie waar ik het eerder over had. Ik hoop ook dat dit voorbeeld de natuurkundigen die aan complexe systemen werken inspireert. Eigenlijk roep ik zulke natuurkundigen, al dan niet hier aanwezig, op te streven naar een naamsverandering van het “Instituut voor Complexe Systemen” naar het “Instituut voor Simpele Systemen”. Ik denk dat de kansen op financiering met deze laatste naam nog niet zo groot zijn, maar wie weet...

Ik nader het einde van mijn betoog. Ik heb u verteld over hoe de theoretische natuurkunde van zwarte gaten vertaald kan worden. En wel naar een context die mogelijkheden biedt voor praktische toepassingen richting energiezuinige informatietechnologie. Zoals ik al eerder zei, zie ik dit zelf als een voorbeeld van een onverwachte associatieve verbinding tussen fundamenteel en toegepast onderzoek. Dat heel exotische fundamentele natuurkunde – zoals de door Hawking voorspelde straling – een rol speelt en kan spelen in toepassingen vind ik zelf het mooiste van de natuurkunde. Laat ik wat andere voorbeelden noemen van exotische natuurkunde in toepassingen. Allereerst, de gisteren uitgereikte Nobelprijs natuurkunde. Deze ging naar fundamentele experimenten in de quantummechanica die nu hun toepassing gaan vinden in de cryptografie en quantumcomputers. Een ander voorbeeld is de MRI scanner in een ziekenhuis. Deze maakt gebruik van supergeleiding, ontdekt begin 20^e eeuw door Kamerlingh Onnes te Leiden. De door deze experimentele ontdekking gemotiveerde theoretische beschrijving van supergeleiding heeft vervolgens als inspiratiebron gediend voor ontwikkelingen in de theorie van elementaire deeltjes, zoals het onlangs ontdekte Higgs boson. Er is dus een verbinding tussen toepassingen van supergeleiding – zoals MRI scanners – en elementaire deeltjes. Het interessant hier is dat de uiteindelijke toepassing, de supergeleiding, eerst ontdekt werd, om vervolgens ontwikkelingen in de fundamentele natuurkunde te stimuleren. De kernboodschap van mijn betoog is dat we dit soort verbanden tussen fundamenteel en toegepast onderzoek – die dus beide kanten op kunnen gaan - moeten koesteren.

De associatieve verbinding tussen fundamenteel onderzoek en toepassing heb ik aan het begin vergeleken met een meer lineaire en planmatige verbinding waarbij het fundamentele onderzoek stap voor stap richting een toepassing wordt gebracht. Is dit echt een tegenstelling? Ik denk het eigenlijk niet, en het is, net zoals zwarte gaten volgens Stephen Hawking niet puur zwart zijn, ook niet zo zwart-wit. Veel stappen die een fundamentele ontdekking richting de toepassing kunnen brengen kunnen voortkomen uit een onverwacht inzicht zoals het voorbeeld uit mijn betoog. En het is zelfs niet zo dat de zwarte gaten in het heelal nooit een directe praktische toepassing zouden kunnen

hebben. Roger Penrose, Nobelprijswinnaar natuurkunde, stelde ooit voor om energie te winnen uit echte zwarte gaten. En het idee om de afvalberg te verkleinen door het afval in een zwart gat te dumpen heb ik een paar keer gehoord van verschillende bronnen.

Het planmatig toewerken van enerzijds fundamentele ontdekking naar anderzijds toepassing is dus niet in tegenspraak met het vinden van onverwachte verbindingen tussen die twee. Wat mij betreft is het niet “of of” maar “en en”. Ik denk alleen wel dat het huidige wetenschaps- en financieringsklimaat de planmatige aanpak stimuleert en de onverwachte verbinding naar de achtergrond verdringt. Er wordt soms over fundamenteel en toegepast onderzoek gesproken alsof het afgebakende en elkaar niet overlappende disciplines zijn. Er wordt veel geld uitgetrokken voor financiering van grote samenwerkingsverbanden die vaak naar een toepassing of oplossing toewerken. Er wordt gesproken over focus en massa, waarmee bedoeld wordt dat veel onderzoekers zich op hetzelfde richten. Ook wordt er onderscheid gemaakt tussen “nieuwsgierigheid gedreven” en toegepast onderzoek – alsof wetenschappers die zich met toepassingen bezig houden niet nieuwsgierig zouden zijn! In de huidige manier van wetenschapsfinanciering staan wetenschappers - en dus ook hun vakgebieden – onderling met elkaar in competitie om de schaarse fondsen te verwerven. Je zou je kunnen afvragen of dit wel bevorderlijk is voor het slaan van onverwachte verbindingen die boven de vakgebieden uitstijgen.

Mijn suggestie is om niet onnodig scheidingsmuren te bouwen tussen fundamenteel en toegepast onderzoek. Deze suggestie staat niet op zichzelf. In de vakliteratuur van de wetenschapsgeschiedenis en -filosofie worden de verschillen en overeenkomsten tussen fundamenteel en toegepast onderzoek, en het nut van dit onderscheid, regelmatig besproken. In het in 2017 uitgekomen boek “Cycles of Invention and Discovery” wordt voorgesteld om sowieso niet meer los te spreken over fundamenteel en toegepast. Dit omdat het innovatie zou kunnen beperken vanwege de redenen zoals ik ze hier vandaag heb uiteengezet. Op zich vind ik het wel een aantrekkelijk idee om het simpelweg alleen te hebben over wetenschap. Allereerst maken we het zo weer wat eenvoudiger, en, zoals u eerder gemerkt zal hebben, ben ik daar een groot voorstander van. Ten tweede, zijn fundamenteel en toegepast onderzoek uiteindelijk de wortels en takken van een-en-dezelfde boom, en toepassingen en onderwijs de vruchten die we uit die boom plukken.

Ik ben dan ook erg blij dat ik de afgelopen jaren werkzaam ben geweest bij het Instituut voor Theoretische Fysica. Dit instituut verenigt theoretisch natuurkundigen die werken aan compleet verschillende onderwerpen. Van het allergrootste wat we kennen, het heelal, tot het allerkleinste, de elementaire deeltjes – en alles er tussenin. Hierbij liggen sommige onderwerpen dicht bij een eventuele toepassing, terwijl andere er op het oog heel ver vandaan liggen. De focus zit hem niet in een gemeenschappelijke toepassing maar in methodes die theoretische natuurkundigen gemeen hebben. De ideeën voor het onderzoek waarover ik hier verteld heb ontstonden nadat een van mijn collega's, Nobelprijswinnaar Prof. Gerard 't Hooft, die zelf veel aan de fundamentele natuurkunde van zwarte gaten werkt, bezoek kreeg van Prof. Bill Unruh. Deze laatste werkt veel aan analogieën van zwarte gaten en zo ontstond het idee om het toe te passen op spinsystemen. Mijn punt is dat de breedte van ons instituut een voorwaarde was voor het onderzoek waarover ik verteld heb. Naast het stimuleren van onderzoek dat een specifieke vraag probeert te beantwoorden hoop ik dus dat er ruimte blijft voor initiatieven waarin verbanden in de breedte worden gestimuleerd.

Bij het noemen van ons instituut wil ik overgaan tot het bedanken van een aantal mensen, en niet in de laatste plaats al mijn collega's van datzelfde instituut. Zij vormen een stimulerende werkomgeving waarbij een verassing nooit uitgesloten is. Ook wil ik mijn collega's in het departement natuurkunde, de bètafaculteit, en de universiteit bedanken voor hun steun en fijne samenwerking. Ik wil ook een aantal mensen in het bijzonder bedanken. In chronologische volgorde van mijn carrière begin ik dan bij mijn afstudeerbegeleider Gerard Barkema, met wie ik nog steeds regelmatig van

gedachten wissel over allerlei zaken binnen en buiten de wetenschap en onderwijs. Henk Stoof, mijn promotor, wil ik bedanken voor zijn voortdurende steun gedurende mijn gehele carrière. Dit begon bij Henk's overdrachtelijke enthousiasme voor onderzoek, gedurende mijn promotie, tot aan vandaag waarbij we nog steeds regelmatig sparren over allerlei zaken. Ik wil ook Allan MacDonald bedanken voor de mooie tijd die ik als post-doc in Austin, Texas heb ervaren en de dingen die me daar zijn bijgebracht. Na deze periode keerde ik in 2006 terug in Nederland als docent-onderzoeker. De Nederlandse spintronica gemeenschap wil ik bedanken voor mijn zachte landing in het Nederlandse onderzoekslandschap. In het bijzonder noem ik Bart van Wees, Gerrit Bauer, Theo Rasing, Andrei Kirilyuk, Ronnie Jansen, Paul Kelly, Bert Koopmans, en Henk Swagten, mede-indieners van een FOM onderzoeksprogramma in 2008. Verder wil ik Reinoud Lavrijsen, samen met de hele groep Fysica van Nanostructuren in Eindhoven bedanken voor de vele samenwerkingen. Mijn Nederlandse collega's, met name degenen die werkzaam zijn binnen de Landelijke Onderzoeksschool Theoretische Natuurkunde – ook een goed voorbeeld van een breed samenwerkingsverband, en het Delta ITP, wil ik ook bedanken voor de vele landelijke initiatieven. Ik heb ook veel internationale samenwerkingen, gemoed met te veel mensen om hier te persoonlijk te bedanken. Ook heb ik het plezier om met jonge getalenteerde mensen te mogen werken en ze te begeleiden. Ook dit zijn er inmiddels teveel om op te noemen. Desalniettemin: bedankt! Tot slot wil ik mijn vrienden, familie, ouders, broertje en zusje, mijn vriendin Geertje en zoon Reijn bedanken. Niet om het een of ander, maar gewoon omdat jullie, er zijn.

Tot slot, wat moet u nu precies meenemen uit dit betoog? Ik begrijp best dat de details van hoe het nu ook alweer zat met die zwarte gaten en die elektronen en hun kompasnaaldjes lastig zijn. Ik vind zelf het gegeven dat wetenschap een diverse bezigheid is met onverwachte verbindingen tussen toepassing en fundamenteel onderzoek veel belangrijker. Deze verbindingen zijn mogelijk als we zo min mogelijk muren optrekken tussen fundament en toepassing. Binnen de natuurkunde kun je allerlei verbindingen leggen als je tot de kern van de natuurkundige beschrijving weet door te dringen. Deze essentie vinden we door, om met Einstein te spreken, "het simpel te houden maar niet te simpel te maken". Het is namelijk altijd makkelijker om het moeilijker te maken. Ik zou u dus in ieder geval willen meegeven "hou het simpel!"

Ik heb gezegd.

Referenties:

<https://arxiv.org/abs/1505.06325> (Eerste observatie van spin transport door een magnetisch isolator.)

<https://arxiv.org/abs/1805.02451> (Observatie van spin transport door hematiet.)

<https://arxiv.org/abs/1610.02313> (Ons voorstel voor zwarte gaten voor spins.)

<https://arxiv.org/abs/1807.07312> (Ons voorstel om met zwarte gaten spinsignalen te versterken.)

<https://arxiv.org/abs/2007.04095> (Over de kunst van eenvoudige modellen versus "Big Data".)

<https://arxiv.org/abs/cond-mat/0001432> (Yakovenko's model voor inkomensverdelingen.)

<https://arxiv.org/abs/2101.04361> (Onze generalisatie van Yakovenko's model.)

