

Hoogtepunten uit het onderzoek

Hoofdstuk 2

Inleiding

FOM is een programma-organisatie. Eind 2008 waren er in totaal 69 goedgekeurde onderzoeksprogramma's waaraan met inbegrip van de missiebudgetten van de instituten rond 70% van het totale exploitatiebudget wordt besteed. FOM kent twee soorten programma's: de Vrije FOM-programma's en de Industrial Partnership Programmes. De 'vrije' programma's ontstaan op basis van ideeën van onderzoekers. Zij ontwikkelen een aanvraag en kunnen die eenmaal per jaar bij FOM indienen. De beoordelings- en selectieprocedure bestaat uit twee stappen. De eerste is gebaseerd op vooraanmeldingen. Mede op basis van de adviezen van werkgemeenschapscommissies en dergelijke brengt het Uitvoerend Bestuur van FOM het totaal aan aanvragen terug tot ruwweg twee keer het beschikbare budget. De uitverkoren vooraanmeldingen worden vervolgens door de indieners uitgewerkt en door onafhankelijke buitenlandse experts beoordeeld. Op basis van die beoordelingen en het weerwoord van de indieners (samen het zogeheten protocol), en het beschikbare budget wordt een deel van de

aanvragen gehonoreerd. FOM streeft met haar vrije programma's twee doelen na: een zo hoog mogelijke kwaliteit van het natuurkundig onderzoek in Nederland plus focus op wetenschappelijke onderwerpen en samenbundeling van onderzoeksactiviteiten (massa) realiseren. Met de vrije programma's voert FOM via haar subgebieden ook strategisch onderzoeksbeleid.

In de Industrial Partnership Programmes (IPP's) doet FOM in gezamenlijke financiering met bedrijven fundamenteel onderzoek op die gebieden waar de kans op economische innovaties groot is. FOM gaat hierbij actief op zoek naar mogelijke onderzoekspartners en formuleert met hen samen onderwerpen van onderzoek. Ook in deze programma's is kwaliteit van het onderzoek het 'sluis'-criterium voor honorering.

Naast de programma's is er de FOM-projectruimte. Deze is bedoeld voor risicovol grensverleggend onderzoek. Er is geen enkele beperking aan te kiezen onderwer-

pen. In de praktijk is de FOM-projectruimte vaak de kraamkamer voor nieuwe ideeën.

Tenslotte lopen er altijd allerlei onderzoeksprojecten binnen FOM die in geen van de vorige categorieën passen.

Het FOM-onderzoek wordt verricht op twee soorten locaties: instituten en werkgroepen aan universiteiten. Alle universitaire groepen zijn beheersmatig ondergebracht onder één eenheid, de Beheerseenheid Universitaire Werkgroepen (BUW).

Dit hoofdstuk volgt de verschillende onderzoeksactiviteiten van FOM. Eerst komen per subgebied de vrije programma's aan bod, vervolgens de IPP's en daarna enkele aansprekende projecten uit de FOM-projectruimte; het hoofdstuk sluit af met een kleine keuze uit de overige onderzoeksactiviteiten. Het hoofdstuk bevat in tabelvorm ook een overzicht van de belangrijkste gegevens van alle goedgekeurde programma's.

Vrije FOM-programma's

Subatomaire fysica | 40

Nanofysica/-technologie | 51

Gecondenseerde materie en optische fysica | 59

Fysica van levensprocessen | 69

Fusiefysica | 74

Fenomenologische fysica | 75

Industrial Partnership Programmes | 86

FOM-projectruimte | 96

Overige onderzoeksactiviteiten | 102

Tabel 1. Goedgekeurde Vrije FOM-programma's per 31 december 2008

nr.	titel	periode	totaal gemiddeld		organisatie-eenheid
			FOM-budget ¹⁾	budget/jaar ¹⁾	
Subatomaire fysica					
7.	Physics at the TeV scale: ATLAS	1997-2015	47,9	2,5	SAF/NIKHEF + BUW
21.	Relativistic heavy-ion physics: ALICE	1998-2013	13,4	0,8	BUW + SAF/NIKHEF
23.	Physics with b-quarks: LHCb	1999-2014	31,6	2,0	SAF/NIKHEF + BUW
24.	Operation, development and improvement of the AGOR cyclotron	1999-2013	5,0	0,3	KVI
31.	Fundamental interactions	1999-2008	4,2	0,4	BUW
47.	ANTARES: A cosmic neutrino observatory	2001-2008	9,2	1,1	SAF/NIKHEF
48.	Trapped radioactive isotopes: micro-laboratories for fundamental physics	2001-2013	9,7	0,7	KVI
52.	Theoretical subatomic physics	2000-2008	5,4	0,6	SAF/NIKHEF
57.	String theory and quantum gravity	2002-2010	4,2	0,5	BUW
104.	Theoretical particle physics in the era of the LHC	2008-2013	2,5	0,4	BUW+KVI+SAF/NIKHEF
106.	The origin of cosmic rays	2008-2013	3,4	0,6	SAF/NIKHEF+KVI+BUW
Nanofysica/technologie					
32.	Photon physics in optical materials	1999-2008	3,4	0,3	BUW
69.	Self-organised nanostructures (together with CW and ESF)	2003-2008	0,8	0,1	BUW
73.	Solid state quantum information processing	2004-2013	9,7	10,0	BUW
86.	Atomic and molecular nanophysics	2007-2014	3,9	0,5	BUW
88.	Materials-specific theory for interface physics and nanophysics	2004-2014	3,6	0,3	BUW
95.	ERA-NET Nanoscience	2006-2012	1,4	0,2	BUW
101.	Graphene-based electronics	2008-2012	3,5	0,7	BUW
105.	Plasmonics	2008-2012	3,3	0,7	AMOLF+BUW
109.	Controlling spin dynamics in magnetic nanostructures: combining fast time and short length scales for tomorrow's technology	2009-2014	3,0	0,5	BUW
111.	Control of functional nanoparticle solids	2009-2014	2,4	0,4	BUW
113.	Nano-photovoltaics	2009-2013	2,1	0,4	AMOLF
Gecondenseerde materie en optische fysica					
34.	Strongly interacting condensed matter	1999-2008	7,3	0,7	BUW
38.	Physics of electronic and magnetic structures and devices	1999-2008	8,6	0,9	BUW
39.	Fundamental properties of surfaces and interfaces	1999-2008	5,0	0,5	BUW
45.	Photons in complex media	2002-2012	4,7	0,4	BUW
46.	Collective and cooperative statistical physical phenomena	2001-2010	5,7	0,6	BUW
58.	The IR user facility FELIX, expanded with FELICE	2003-2012	12,6	1,3	Rijnhuizen
59.	Molecular dynamics studies with intense IR radiation	2003-2008	1,5	0,3	Rijnhuizen
61.	Physics of colloidal dispersions in external fields (together with DFG)	2002-2013	2,0	0,2	BUW
66.	Ultrafast molecular dynamics	2003-2009	7,0	1,0	AMOLF
78.	The user facility for high magnetic fields	2004-2013	3,5	0,4	BUW
87.	Quantum gases	2004-2010	3,0	0,4	BUW
108.	Inter-phase - New electronic and magnetic states at interfaces in complex oxide heterostructures	2009-2013	3,0	0,6	BUW

Tabel 1. Goedgekeurde Vrije FOM-programma's per 31 december 2008

nr.	titel	periode	totaal gemiddeld		organisatie-eenheid
			FOM-budget ¹⁾	budget/jaar ¹⁾	
Fysica van levensprocessen					
14.	Physical biology (together with ALW)	1998-2006	2,9	0,3	BUW
27.	Structure, function and flow of soft materials	1999-2008	15,9	1,6	AMOLF + BUW
49.	Mass spectrometric imaging and structural analysis of biomacromolecules	2001-2008	9,4	1,2	AMOLF
51.	Physics for medical technology	2001-2009	2,3	0,3	BUW
56.	Physical biology II (together with ALW)	2001-2006	1,8	0,3	BUW
60.	Biomolecular physics	2003-2010	4,1	0,5	BUW
90.	Material properties of biological assemblies	2005-2010	2,1	0,4	BUW
103.	DNA in action: physics of the genome	2008-2012	4,2	0,8	BUW
107.	New physics instrument for health care	2008-2014	1,0	0,1	BUW
110.	Spatial design of biochemical regulation networks	2009-2013	3,1	0,6	AMOLF + BUW
Fusiefysica					
74.	Manipulation of meso-scale structures in hot, magnetised plasmas	2004-2008	4,7	0,9	Rijnhuizen
Fenomenologische fysica					
10.	Physics for technology	1997-2011	20,9	1,4	BUW
36.	Two-dimensional turbulence	1998-2009	1,0	0,1	BUW
53.	Turbulence and its role in energy conversion processes	2002-2010	3,6	0,4	BUW
55.	Laser wakefield accelerators	2001-2009	3,7	0,4	BUW
63.	Physics of granular matter	2004-2013	4,0	0,4	BUW
75.	PSI-lab: an integrated laboratory on plasma-surface interaction	2004-2015	19,0	1,6	Rijnhuizen
79.	Dynamics of patterns	2005-2010	0,8	0,1	BUW
102.	Rheophysics: connecting jamming and rheology	2008-2013	2,8	0,5	BUW
112.	Droplets in turbulent flow	2009-2014	2,6	0,4	BUW
Overige fysica					
11.	Mathematical physics (together with EW)	1999-2006	2,0	0,2	BUW

1) bedragen in M€

Opmerkingen.

1. Het getal vóór de titel van elk programma is het programmanummer. Hoe hoger het getal, hoe jonger in de regel het programma.

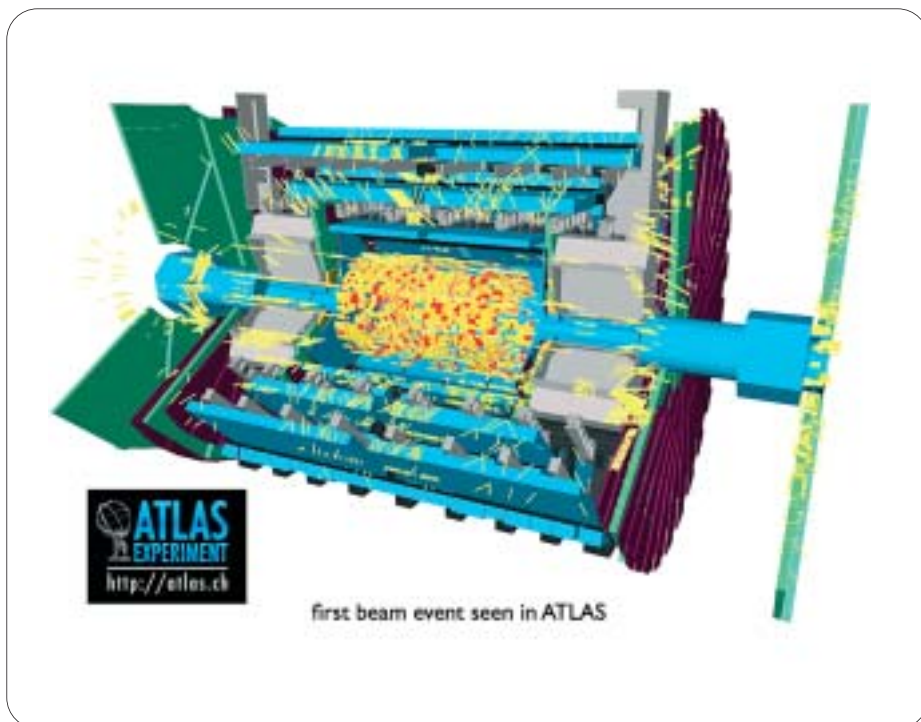
2. Uit een enkel programma dat in de loop van 2008 van start is gegaan, zijn nog geen resultaten te melden.

ATLAS: de eerste LHC bundels smaken naar meer...

Toen op 10 september 2008 de eerste proton bundels in de LHC werden geïnjecteerd stond de ATLAS-detector gretig te wachten. Jaren van voorbereiding, aangevuld met wat last-minute improvisatie, hebben een detector opgeleverd die af is, maar die nog goed gebruik kan maken van enige tijd met of zonder bundels, voor onderlinge synchronisatie, calibratie, en uitlijning van de verschillende detector elementen. Binnen ATLAS is het Nikhef verantwoordelijk voor een deel van de muon spectrometer, een deel van de silicium strip detector, trigger, data acquisitie en detector controle software, alsmede reconstructie en analyse software. De detector als geheel is beschreven in een uitgebreide publicatie in 2008.

De eerste LHC-events in ATLAS op 10 september waren het gevolg van het bewust schieten van de bundel op een collimator, 140 meter voor ATLAS. Zelfs bij de initiële lage bundel stroom gaan na zo'n botsing op een collimator tienduizenden muonen door ATLAS, zoals te zien op figuur 1. Na dit eerste teken van leven is de LHC echt begonnen met het in bedrijf stellen van de gehele machine, en is voor één bundel een stabiele baan gerealiseerd. In deze condities blijkt ATLAS weinig bundel-gerelateerde ruis te zien, een goed teken. Op 19 september is het voorziene programma helaas tot stilstand gekomen door een ongeluk in LHC sector 3-4, en zal naar het zich laat aanzien pas in de tweede helft van 2009 vervolgd worden.

ATLAS heeft tussen september en november in vrijwel volledige configuratie zo'n 220 miljoen gebeurtenissen met muonen uit kosmische straling gedetecteerd en opgeslagen voor verdere analyse. Deze gebeurtenissen zijn enorm waardevol voor vrijwel alle subdetectoren van ATLAS. De uitlijning van de binnenste detector elementen van ATLAS (silicium pixel en strip



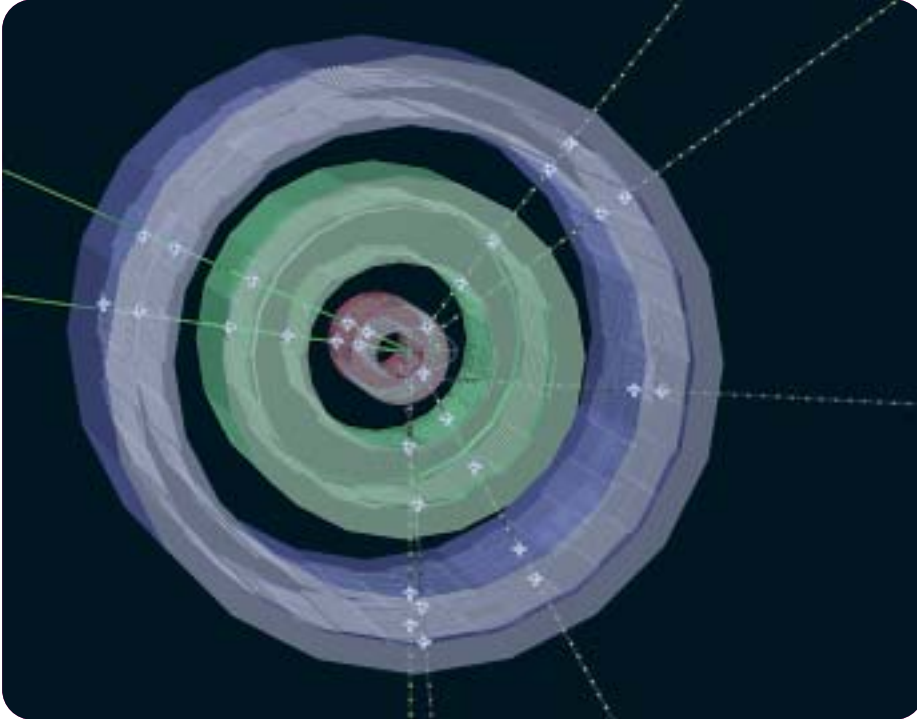
detectoren, en transition radiation detector) is al met succes begonnen, en ook de reconstructie van sporen in muon kamers en inner tracker profiteert van deze data. Meer dan 98% van alle detector kanalen is in gebruik, een getal dat na reparaties in de winter shutdown nog omhoog zal gaan. De voorbereidingen voor fysica analyse hebben zich gericht op ingebruikname van de computing infrastructuur en met name de distributie en analyse van data via het grid. Daarnaast publiceerde ATLAS in 2008 een uitgebreide (1800 pagina's!) analyse note met de nieuwste inzichten in

de fysica capaciteiten van de detector, en de vooruitzichten op analyse van eerste data. Eén ding is duidelijk: de collaboratie smacht naar eerste proton-proton botsingen in 2009.

Het doel van het FOM-programma "Physics at the TeV scale: ATLAS" is het vinden van het Higgsdeeltje of de Higgsdeeltjes en het zoeken naar supersymmetrie, plus het ontwikkelen en construeren van een detector voor deze en andere doeleinden.

De looptijd van het programma is 1997-2015 en het budget voor die periode bedraagt 47,1 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. S. Bentvelsen (SAF/NIKHEF).

Het ALICE-programma



Het hart van de ALICE-detector

De ons omringende materie bestaat uit atomen waarvan de kern weer bestaat uit protonen en neutronen. Deze protonen en neutronen zijn op hun beurt weer opgebouwd uit quarks en gluonen die bijeengehouden worden door de sterke wisselwerking. Uit de Quantum Chromo Dynamica (QCD), de theorie van de sterke wisselwerking, volgt dat deze quarks en gluonen niet kunnen voorkomen als vrije deeltjes. Dit opsluitingsmechanisme is één van de meest intrigerende en theoretisch minst begrepen aspecten van QCD. Tevens volgt uit de theorie dat bij zeer hoge tem-

peratuur of druk het opsluitingsmechanisme wordt opgeheven zodat de quarks en gluonen zich effectief als vrije deeltjes gaan gedragen. Deze nieuwe aggregatie toestand, waarvan wij denken dat deze in het heelal bestond in de eerste microseconden na de oerknal, wordt het quark-gluonplasma genoemd. In botsingen van zware atoomkernen bij de LHC wordt verwacht dat temperatuur en druk zo hoog oplopen dat het quark-gluonplasma in het laboratorium wordt gecreëerd.

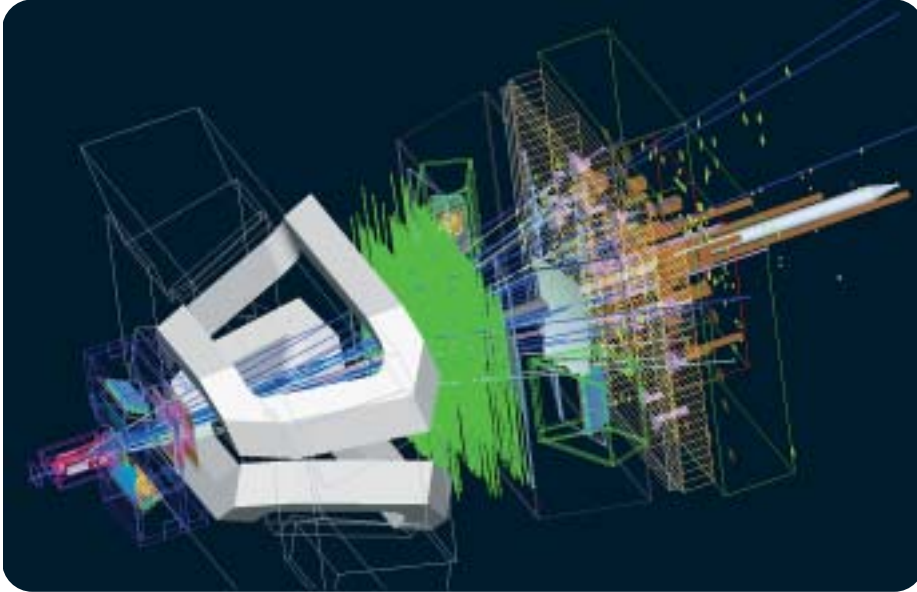
Het doel van het ALICE-experiment aan de

LHC is het bestuderen en karakteriseren van dit quark-gluonplasma. De ALICE-detector is speciaal gebouwd om de maar liefst 40000 deeltjes te registreren die naar verwachting zullen worden geproduceerd in loodkern botsingen in de LHC.

In 2008 is de LHC opgestart waarbij eerste signalen zijn gedetecteerd in de ALICE-detector. De figuur laat een gebeurtenis zien in de zes cilindrische lagen van de silicium detector die met een diameter van ongeveer een meter het hart vormt van de ALICE-detector die een totale diameter heeft van tien meter. Nikhef heeft in belangrijke mate aan de constructie van deze silicium detector bijgedragen. In de getoonde gebeurtenis heeft een deeltje de binnenste laag geraakt en acht nieuwe deeltjes geproduceerd. We verwachten dat de eerste loodkernbotsingen over ongeveer een jaar in de LHC plaatsvinden.

Het doel van het FOM-programma "Relativistic heavy-ion physics: ALICE" is het vinden van de faseovergang van hadronische materie naar een vrij quark-gluonplasma en het ontwikkelen en construeren van een detector om botsingen met zware ionen te bestuderen. De looptijd van het programma is 1998-2013 en het budget voor die periode bedraagt 13,4 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. T. Peitzmann (UU).

Het LHCb-experiment is klaar voor B-mesonen



Computersimulatie van een proton-proton botsing in de LHC waarbij B-mesonen geproduceerd worden. De interactie vindt geheel links in de figuur plaats en de gebogen blauwe lijnen geven aan hoe de geproduceerde deeltjes van links naar rechts door het detectorvolume bewegen. De detector contouren zijn weergegeven en ook de hits van de deeltjes.

Met het registreren van de eerste data 'in situ' is er in 2008 voor het LHCb experiment een nieuwe fase aangebroken: de jaren van planning, ontwerp, constructie, installatie zijn afgesloten, en een periode van opstarten is begonnen.

Wanneer de LHC versneller de geplande energie en intensiteit zal halen, dan zullen de protonen in de twee bundels elke 25 ns botsen binnen de LHCb detector en zal er ongeveer één interactie per botsing zijn. De verwachting is dat, onder deze omstandigheden, bij één op de 160 inter-

acties B-mesonen zullen worden geproduceerd.

Om de geplande metingen te doen zullen zeldzame gebeurtenissen uit de achtergrond gefilterd moeten worden.

Er zijn twee belangrijke eigenschappen om B-mesonen dit te doen:

B-mesonen zijn ongeveer vijf maal zo zwaar als een proton en ze hebben een levensduur van 1,5 ps. De massa resulteert in vervalsproducten met een (transversale) impuls (p_t) die hoger is dan de achtergrond.

De observatie van een vervalsproduct met hoge p_t wordt gebruikt om binnen 4 μ s te beslissen of de data van de hele detector zal worden uitgelezen, hetgeen leidt tot ongeveer 30 KB aan informatie.

Omdat het verwachte tempo van 1 MHz van positieve beslissingen ongeveer 30 GB/s oplevert, zal deze eerst verder gereduceerd moeten worden voordat ze kan worden opgeslagen.

Met behulp van 8000 CPUs wordt in deze data gezocht naar een tweede belangrijke observabele:

B-mesonen vliegen typisch zo'n 7 millimeter voordat ze vervallen. Door de sporen van deze vervalsproducten in 'real-time' te reconstrueren, kan het tempo verder gereduceerd worden tot ongeveer 30 KHz. Op dit punt is er voldoende (reken)capaciteit om te zoeken naar de gezochte specifieke B-vervallen. Uiteindelijk zal gemiddeld 2 KHz aan botsingsinformatie worden opgeslagen, wat resulteert in 60 MB/s aan data.

Al met al zal uiteindelijk de data van 2×10^{10} interacties per jaar worden opgeslagen, ofwel 6000 TB aan data. Deze data zal op het 'grid' verwerkt en geanalyseerd worden. In 2008 is de infrastructuur voor de distributie van deze data naar de gridsites getest, en wordt er reikhalzend uitgekeken naar de stortvloed van data die de LHC de komende jaren zal opleveren!

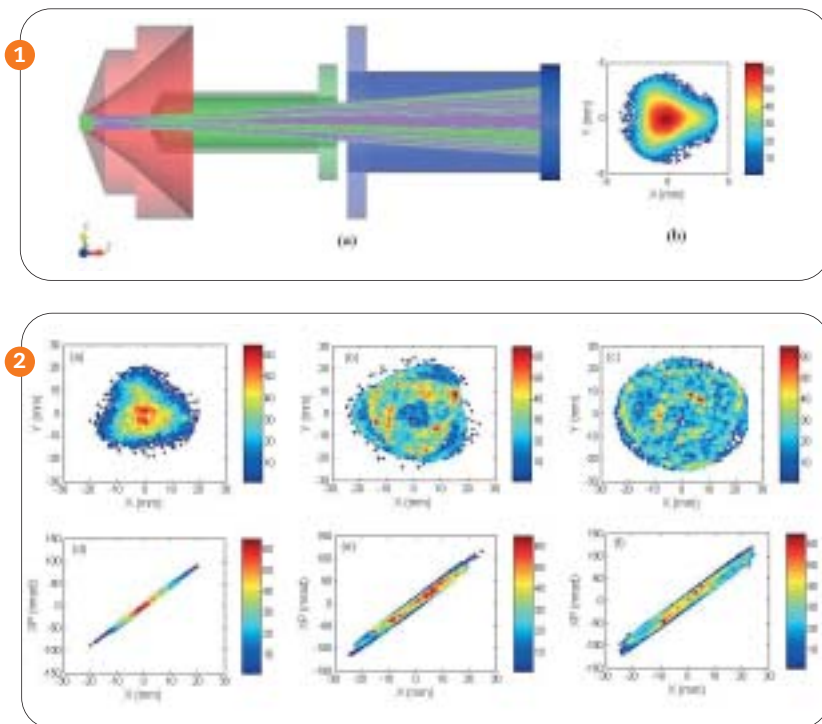
Het doel van het FOM-programma "Physics with b-quarks: LHCb" is het zoeken naar zeldzame vervallen van B-mesonen, het meten van CP-schending in het verval van B-mesonen, en het vaststellen van de elementen van de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-matrix. De looptijd van het programma is 1999-2014 en het budget voor die periode bedraagt 31,6 miljoen euro. Het management is in handen van prof.dr. M.H.M. Merk (SAF/NIKHEF).

Ruimteladingseffecten in intense ionenbundels voor het AGOR-cyclotron

Voor de experimenten met de TRIuP-faciliteit op het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) worden intense zware-ionenbundels met het AGOR-cyclotron versneld om kortlevende radioactieve isotopen te maken. De hiervoor benodigde bundelintensiteit uit de ECR-bron voor hooggeladen ionen is rond 10^{14} ionen per seconde (~ 1 mA), terwijl de totale ionenstroom uit de bron in de orde van 10 mA is. Ruimteladingseffecten bij de extractie van de ionenbundel leiden tot een forse verslechtering van de bundelkwaliteit, waardoor bundelverlies optreedt bij het transport van de bundel het cyclotron in. Voor een beter begrip van deze ruimteladingseffecten zijn gedetailleerde simulaties, waarbij alle componenten van de bundel worden meegenomen, nodig. Om de simulaties te kunnen valideren zijn in eerste instantie berekeningen gedaan voor de extractie van een eenvoudig systeem: een heliumbundel bestaande uit He^{1+} - en He^{2+} -ionen.

Het bestaande extractiesysteem is geschetst in figuur 1a. De ionen worden geëxtraheerd uit een klein gaatje in de linker elektrode en versneld naar de rechter elektrode. In de figuur zijn ook de ionenbanen in het extractiesysteem, berekend met een tracking code die ook de krachten op de ionen ten gevolge van de andere ionen zelf-consistent uitrekent, weergegeven. De benodigde startposities en snelheden van de ionen zijn bepaald met een drie-dimensionale particle-in-cell code waarmee de productie van de ionen en hun transport in het plasma van de bron worden gesimuleerd; ter illustratie is de ruimtelijke intensiteitsverdeling van de ionen in het extractievlak geschetst in figuur 1b. De drievoudige symmetrie is een gevolg van de magnetische structuur van de ECR ionenbron.

Het effect van ruimtelading is bestudeerd met simulaties bij drie verschillende bun-



Figuur 1. (a) Banen van de uit de ECR ionenbron geëxtraheerde He-ionen. (b) Ruimtelijke intensiteitsverdeling van de He-ionen in het vlak van de plasma-elektrode.

Figuur 2. Ruimtelijke intensiteitsverdeling van de He-ionen aan het einde van de gearde elektrode voor een bundelstroom van 0 mA (a), 0,6 mA (b) en 1,0 mA (c). Horizontale emittantie op dezelfde positie voor een bundelstroom van 0 mA (d), 0,6 mA (e) en 1,0 mA (f).

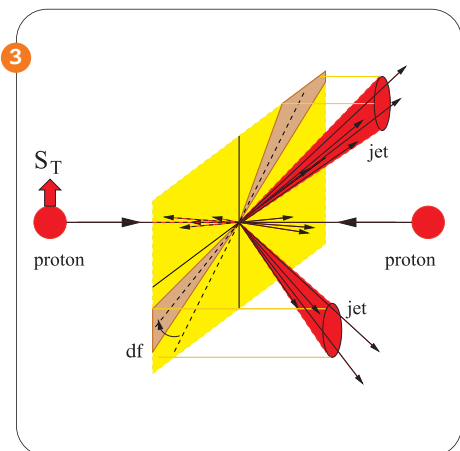
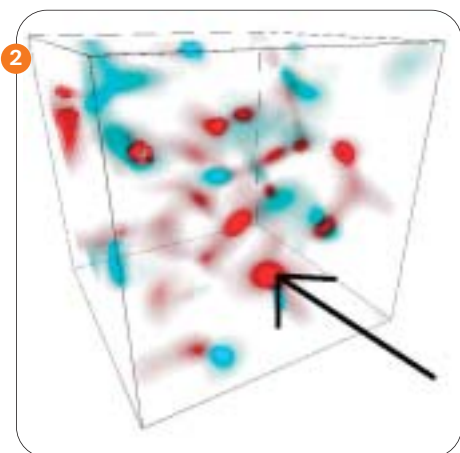
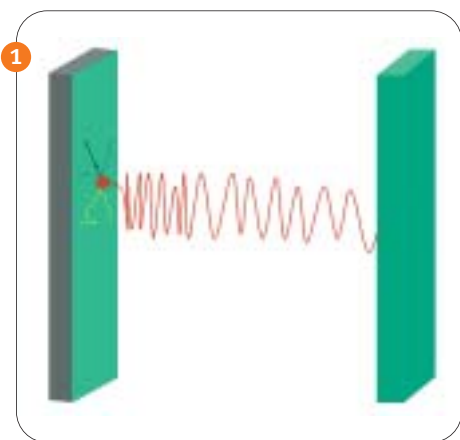
delstromen, i.e. 0 mA (geen ruimtelading), 0,6 mA en 1,0 mA. De resultaten zijn weergegeven in figuur 2. Ruimtelading heeft een duidelijk negatief effect op de kwaliteit van de bundel, deze breekt op in filamenten rondom een min of meer holle kern. Ook neemt de bundelemittantie toe

met een factor 7. De volgende stap is het zoeken naar methoden om deze negatieve effecten (gedeeltelijk) te kunnen compenseren, bijvoorbeeld door middel van het invangen van laag-energetische elektronen in de ionenbundel of het installeren van additionele focuseringselementen.

Het doel van het FOM-programma "Operation, development and improvement of the AGOR cyclotron" is het leveren van bundels aan in- en externe gebruikers en aan gebruikers uit andere vakgebieden, het verruimen van de wetenschappelijke mogelijkheden van AGOR door het ontwikkelen van nieuwe bundels en het verbeteren van de bedrijfsvoering van AGOR door een grondige kennis van relevante versnellertechnologie.

De looptijd van het programma is 1999-2013 en het budget bedraagt 5,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. S. Brandenburg (KVI).

Van standaardmodel naar verder



In het FOM-programma *Fundamental Interactions* (FP31), afgesloten op 1 september 2008, zijn sinds 1998 zo'n 35 promovendi en postdocs actief geweest, soms samenwerkend in andere projecten uit de FOM-projectruimte, EU- of universitaire programma's. De tastbare output van het programma bestaat uit honderden onderzoekspublicaties met over het algemeen een tot vier auteurs, waaronder begeleiders en wetenschappers vanuit internationale samenwerkingsverbanden. Het aantal citaties loopt in de duizenden met verschillende artikelen met meer dan honderd citaties. Deze zichtbaarheid en productiviteit in het FOM-programma FP31 was al bevestigd in de midterm-evaluatie in 2002. In het programma lag de nadruk op het standaardmodel van de elementaire deeltjesfysica, dat een zeer succesvolle beschrijving geeft van de elektrozwakke en sterke wisselwerkingen, maar waarvan al in 1998 duidelijk was dat het ingebed en uitgebreid moest worden om alle theoretische problemen te overwinnen. Naast de fenomenologie van het standaardmodel waren daarom supersymmetrie, stringtheorie en pogingen om gravitatie aan te pakken belangrijke velden van onderzoek. Deze laatste onderwerpen werden na 2002 de focus van een

apart programma *String Theory and Quantum Gravity* (FP57). In de tweede helft van het FP31-programma bleef de nadruk op fenomenologie, dit in samenwerking met het Nikhef theorieprogramma FP52. Daarnaast kwam de astrodeeltjesfysica als nieuw aandachtsveld, een logisch gevolg van de vele verbanden tussen kosmologie, 'early universe physics' en de deeltjesfysica. De fenomenologen binnen het programma waren ook betrokken bij lopende experimenten bij onderzoekfaciliteiten als DESY (Hamburg) of Fermilab en Brookhaven in de VS, maar ook bij de voorbereiding van LHC experimenten bij CERN. Theoretici betrokken bij FP31 (universitaire groepen) en FP52 (Nikhef) zijn in 2008 van start gegaan in het recentelijk goedgekeurde FOM-programma *Theoretical Physics in the LHC Era*, terwijl een aantal van hen ook betrokken is bij initiatieven op het gebied van de astrodeeltjesfysica. De promovendi en postdocs die bij het programma betrokken zijn geweest, zijn uitgestroomd naar een diversiteit van posities in de maatschappij, aantonend dat theoretische fysica gericht op fundamentele fysica een solide basis vormt voor posities in bedrijfsleven, bij overheidsinstellingen en bij universiteiten en onderzoekslaboratoria, zowel in Nederland als in het buitenland.

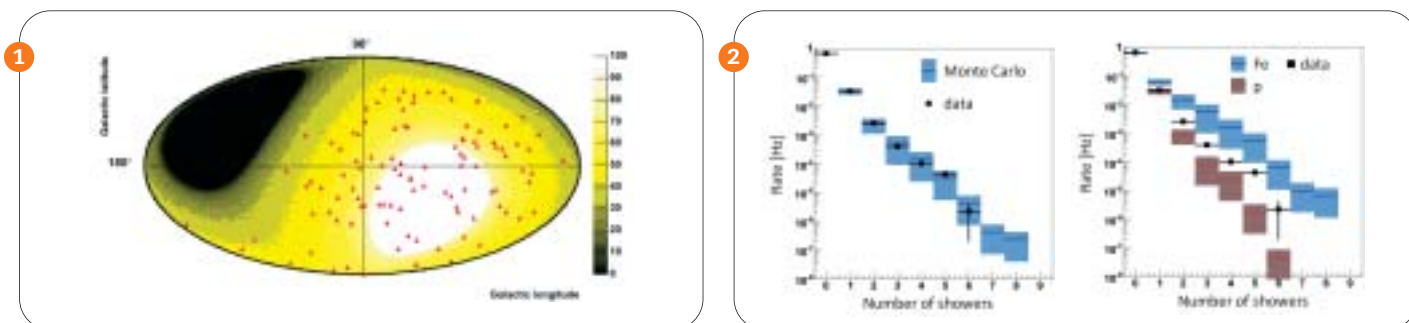
Figuur 1. Braneworld-scenario waarin alleen zwaartekracht extra dimensies voelt.

Figuur 2. Topologische structuren in een vroeg stadium van een zogenaamde 'tachyonic' elektrozwakke faseovergang, waarbij de specifieke 'blob' (pijl) verder onderzocht is.

Figuur 3. Zoeken van experimentele observabelen om specifieke asymmetrieën te meten.

Het doel van het FOM-programma "Fundamental interactions" is het bestuderen van theoretische modellen die gericht zijn op het voorspellen en beschrijven van nieuwe en bestaande experimentele resultaten, het begrijpen van de conceptuele basis van de quantumveldentheorie en zijn symmetrie-eigenschappen in het bijzonder en het bestuderen van de quantummechanische beschrijving van zwaartekracht en de aard van ruimte en tijd. De looptijd van het programma is 1999-2008; het budget voor die periode bedraagt 4,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. P.J.G. Mulders (VU).

Neutrino telescoop Antares



Figuur 1. Afbeelding van neutrino's gemeten met de eerste vijf lijnen van de Antares-detector in 2007 op de hemel.

Figuur 2. De gemeten telsnelheid van gebeurtenissen als functie van het aantal Bremsstrahlung. De aangegeven meetfout komt overeen met de statistiek, het gekleurde oppervlak van de Monte Carlo punten komt overeen met de totale systematische onzekerheid. De Monte Carlo simulatie bevat bijdragen van verschillende atoomkernen. In de linkerfiguur zijn alle bijdragen bij elkaar opgeteld. In de rechterfiguur zijn de bijdragen van protonen en ijzerkernen apart weergegeven.

In mei 2008 is de Antares-detector gereed gekomen. In totaal zijn 12 lijnen geïnstalleerd op de bodem van de Middellandse zee, met 900 zeer gevoelige camera's, de zogenaamde 'ogen' van de neutrino telescoop. De neutrino telescoop Antares omvat een volume van 0.05 km^3 zeewater, wat Antares tot de grootste neutrino telescoop maakt op het noordelijk halfrond. Een afbeelding van neutrino's die met de eerste vijf lijnen van de Antares-detector zijn gemeten in 2007 op de hemel is te zien in figuur 1.

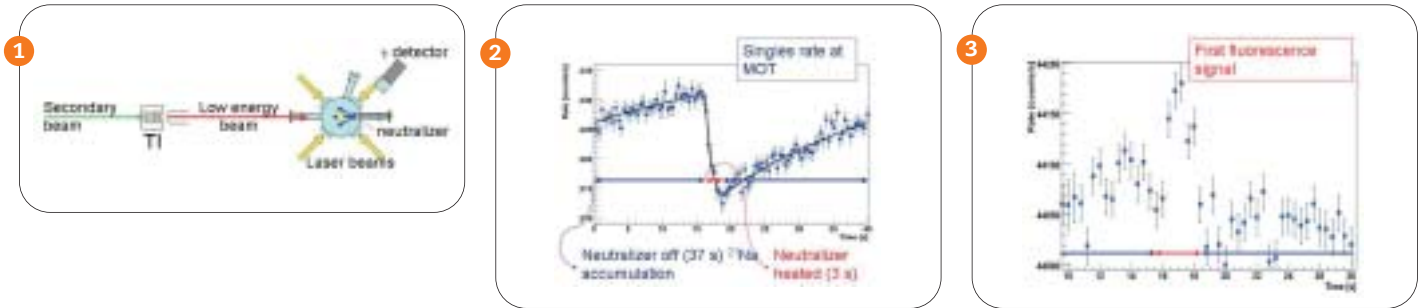
Het aantal gemeten neutrino's komt overeen met ongeveer 20% van de tot nu toe verzamelde statistiek. Met deze gegevens is er nog geen neutrino bron gevonden. Het zwarte stuk in figuur 1 komt overeen met dat gedeelte van de hemel dat onzichtbaar blijft voor Antares. Ten gevolge van een achtergrond van muonen, die gemaakt worden door interacties van de kosmische stralen met de atmosfeer boven de detector, is het gezichtsveld beperkt tot beneden de horizon. De neutrino telescoop

Antares kijkt dus naar beneden en niet naar boven! De kosmische stralen bestaan voornamelijk uit protonen. Daarnaast dragen ook atoomkernen bij. Een toevallige bijkomstigheid van de Antares-detector, ontdekt op het Nikhef, is de mogelijkheid om de bijdragen van de verschillende atoomkernen aan de kosmische straling te meten. De resultaten van een eerste studie, waarin de Bremsstrahlung van energetische muonen wordt geïdentificeerd en gemeten, zijn te zien in figuur 2.

Zoals te zien is in figuur 2, zijn de metingen en de Monte Carlo simulatie redelijk in overeenstemming. Het is ook goed te zien dat de meetgegevens gebruikt kunnen worden om de (relatieve) bijdragen van de verschillende atoomkernen te kwantificeren. De Antares-detector zal operationeel blijven tot in 2013. Voor het uitvoeren van het wetenschappelijk onderzoek is geld beschikbaar gekomen door goedkeuring van het FOM-programma 'The origin of cosmic rays'.

Het doel van het FOM-programma "ANTARES: a cosmic neutrino observatory" is aan te tonen dat een $0,1 \text{ km}^2$ grote neutrino detector in de Middellandse Zee werkt, er het spectrum van hoog-energetische kosmische neutrino's mee te meten en mogelijk astrofysische verschijnselen als gammaflitsen waar te nemen. De looptijd van het programma is 2001-2007 en het budget voor die periode bedraagt 9,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. M. de Jong (SAF/NIKHEF).

Radioactieve atomen gevangen



Een van de belangrijke stappen in het TRIMP-programma van het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) is het invangen van radioactieve isotopen in een atoomval. In 2008 was het voor eerst mogelijk de fluorescentie van de ^{21}Na -atomen in een val aan te tonen. Een atoomval heeft een aantal voordelige eigenschappen waardoor bijvoorbeeld vervalsprocessen nauwkeurig bestudeerd kunnen worden. In het bijzonder wordt onderzoek gedaan aan schending van de symmetrie van tijdsomkering. Op het KVI wordt hier ondermeer naar gezocht in het β -verval van ^{21}Na .

De isotopen worden gemaakt met behulp van de versneller AGOR. Met versnelde ^{20}Ne -ionen (460 MeV) op een doelwit van deuterium wordt ^{21}Na geproduceerd; de snelle natriumisotopen worden afgeremd en gestopt in heet wolframfolie (*thermal ionizer*). Het ^{21}Na diffundeert uit de folies en wordt geïoniseerd. Vanuit de *thermal ionizer* wordt het als laag-energetische ionenbundel (2,8 keV) getransporteerd naar een glascel. Hier worden de ionen opgevangen op een Zr-folie. Wanneer het folie wordt verhit komen ^{21}Na -atomen vrij. Dit is goed te zien in figuur 1: in cycli van 40 seconden bouwt de activiteit op van de β^+ -deeltjes uit het verval van ^{21}Na (halfwaardetijd 22,5 s) die annihilieren in het materiaal van b.v. de glascel. Als het folie verhit wordt en ^{21}Na vrijkomt, speelt een gedeelte van de annihilatieprocessen zich buiten het gezichtsveld van de g-detector af, waardoor een dip in de activi-

teit gezien wordt. De vrijgekomen atomen passeren het actieve volume van een Magneto-Optical Trap (MOT), waar een fractie ingevangen kan worden. De niet-gevangen atomen kunnen botsen met de wanden van de glascel die voorzien zijn van een non-stick coating. Zo zijn er meerdere kansen om ze in te vangen. De fluorescentie van de ^{21}Na -atomen wordt gemeten na een hittepuls in het Zr-folie

zoals te zien is in figuur 2. De beperking is hier de levensduur van de MOT-wolk en niet de levensduur van ^{21}Na . Deze eerste observatie van de fluorescentie maakt het mogelijk de efficiëntie van de MOT te verhogen en de radioactieve atomen verder te transporteren naar een MOT waar het β -verval geobserveerd kan worden. De opstelling daarvoor is al gereed.

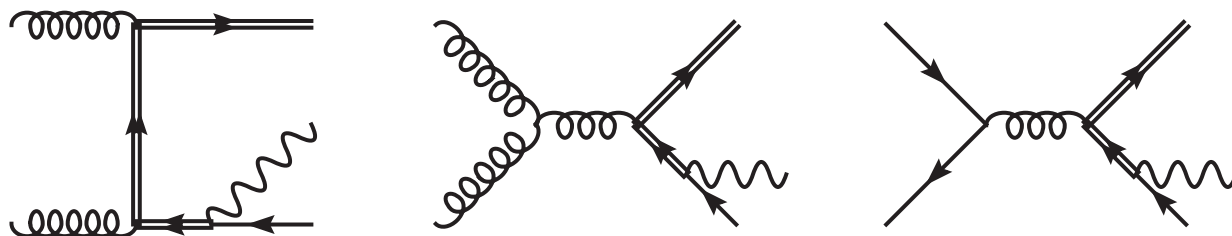
Figuur 1. Schema voor het vangen van de radioactieve bundel. De secondary beam wordt in de Thermal Ionizer (TI) gebracht en geëxtraheerd als een low-energy beam. In de MOT-cel valt deze op een neutralizer waardoor de atomen ingevangen kunnen worden met de laserbundels (aangeduid in geel).

Figuur 2. Opbrengst van annihilatiestraling gemeten met een g-detector als functie van tijd in repetitieve cycli van 40 seconden. Blauwe (rode) pijlen geven aan wanneer het Zr-folie (neutralizer) koud (heet) is. Wanneer de neutralizer koud is, bouwt de activiteit op, als de neutralizer heet is, worden de radioactieve atomen in de MOT-cel gebracht.

Figuur 3. Wanneer de neutralizer aan gaat, wordt een aantal van de atomen ingevangen waardoor een fluorescentiesignaal boven de achtergrond zichtbaar wordt. De condities in de cel zijn zodanig dat het MOT-signaal maar kort zichtbaar blijft (≈ 1 s).

Het doel van het FOM-programma "Trapped radioactive isotopes: micro-laboratories for fundamental physics" is het bouwen en bedienen van de faciliteit TRIMP. Die gebruikt kortlevende radioactieve isotopen, gemaakt m.b.v. bundels uit AGOR. De isotopen worden afgeremd en gevangen in vallen. Daar worden vervalsstudies gedaan waarmee aspecten van het Standaardmodel kunnen worden getoetst en atoomfysische experimenten uitgevoerd. De looptijd van het programma is 2001-2013 en het budget voor die periode bedraagt 9,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. K.-P. Jungmann (KVI).

Topquarkparen en losse topquarks van elkaar onderscheiden



Feynmandiagrammen voor single-top productie in gluon of quark-anti-quark botsingen die de interferentie met paar productie weergeven. De dubbele lijnen stellen top of anti-top quarks voor. In deze diagrammen wordt, behalve een top quark ook tijdelijk een anti-top quark gemaakt dat vervalst naar een W-deeltje en een quark. Ze beschrijven dus zowel single-top productie als paarproductie met verval.

In metingen bij de deeltjesversnellers zijn er vele interessante signalen die elk iets anders over de interacties van bepaalde deeltjes vertellen. Eén van de meest interessante klassen van signalen betreft eindtoestanden die een top quark bevatten. Meest voorkomend bij de Tevatron en LHC-versnellers zullen processen zijn die of een top-antitop paar, of een enkel top quark produceren. Paarproductie is gevoelig voor nieuwe resonanties, terwijl enkelvoudige productie nieuwe ijkkrachten zou kunnen tonen. Noodzakelijk voor een goede bestudering van deze signalen

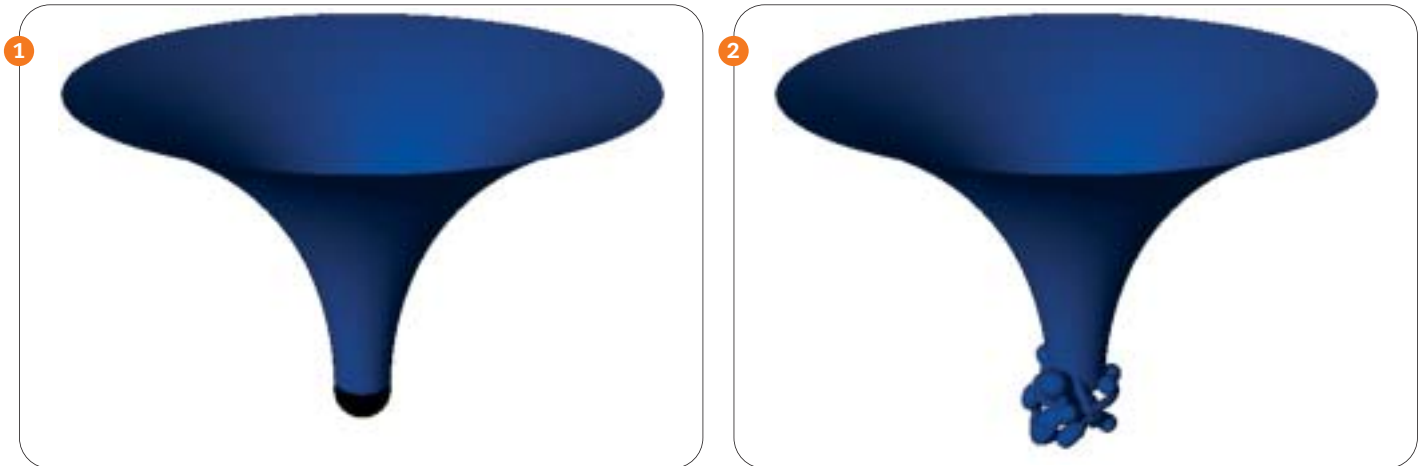
zijn, in de eerste plaats, een goede theoretische beschrijving, en, ten tweede, de mogelijkheid om een bepaald signaal goed te isoleren.

Deze twee criteria kunnen elkaar dwarsliggen. Paarproductie kan zodanig sterk interfereren met één van de “single-top” productieprocessen, (namelijk waarin het samen met een W-deeltje gemaakt wordt) dat het laatste signaal niet meer zichtbaar is. Sommige correcties op single-top productie bestaan uit processen waar tijdelijk een top-antitop gemaakt wordt, waarna het anti-top vervalst naar een W-deeltje en

een quark (zie figuur). In dit FOM-programma is in 2008 het “single-top plus W process”-proces in het Monte Carlo simulatieprogramma MC@NLO ingebouwd. Omdat ook paarproductie er al in zit, kon het interferentieprobleem grondig onderzocht worden. Het bleek dat een maximum stellen aan de transversale impuls van een secundair bottom quark (dat bij paarproductie nogal hoog is, en bij single-top niet), erg effectief is in het onderdrukken van de interferentie, mits gedaan in combinatie met een manier om de paarproductie contaminatie te verwijderen. In het onderzoek zijn twee verwijderingsmechanismen ontworpen en met elkaar vergeleken. Het verschil van beide mechanismen is juist de interferentie en omdat de overeenkomst uitstekend is, is de interferentie klein en het beschrijven van het single-top proces met storingstheorie an sich consistent. Een open vraag blijft nog hoe de signaal/ruis verhouding voor dit single-top proces zo goed mogelijk gemaakt kan worden, en is onderwerp van huidig onderzoek.

Het doel van het FOM-programma “Theoretical subatomic physics” is het beschrijven en verklaren van de eigenschappen en interacties van subatomaire deeltjes. De nadruk ligt hierbij op de constructie en evaluatie van modellen binnen het raamwerk van de quantumveldentheorie. De ontwikkeling van analytische en computationele instrumenten voor dit onderzoek is ook onderdeel van het programma. De looptijd van het programma is 2000-2008 en het budget voor die periode bedraagt 5,4 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. E.M.L.P. Laenen (SAF/NIKHEF).

Een nieuw perspectief op zwarte gaten



Een van de uitdagingen voor iedere theorie van quantumzwaartekracht is om een bevredigende beschrijving van zwarte gaten te geven. Sinds het baanbrekende werk van Hawking en anderen in de jaren '70 is het bekend dat zwarte gaten systemen zijn met thermodynamische eigenschappen zoals entropie en temperatuur. Bij veel thermodynamische systemen kunnen we macroscopische grootheden en eigenschappen afleiden uit een onderliggende microscopische beschrijving. Bij een gas is dat bijvoorbeeld de beschrijving in termen van bewegende moleculen. Het was lange tijd onduidelijk of een dergelijke beschrijving ook voor zwarte gaten zou moeten bestaan, en zo ja, hoe die er dan uit zou moeten zien. Zodra iets in een zwart gat verdwijnt, lijkt een zwart gat namelijk onmiddellijk alle informatie over het object wat er inviel te vergeten, wat aanleiding geeft tot de zogenaamde "information loss paradox". Als dit juist zou zijn kunnen zwarte gaten niet worden beschreven in termen van onderliggende microscopische vrijheidsgraden. Sterker nog, de quantummechanica zelf zou aan herziening toe zijn.

Gelukkig is een dergelijke dramatische stap op dit moment nog niet aan de orde.

Dankzij recent werk is het duidelijk geworden, in een aantal eenvoudige gevallen, dat men een zwart gat wel degelijk kan beschrijven in termen van microscopische vrijheidsgraden. Die vrijheidsgraden bestaan uit alle ruimtetijd geometrieën die voor een waarnemer op afstand vrijwel niet te onderscheiden zijn van een zwart gat. Een cruciaal verschil met een zwart gat is echter dat deze geometrieën geen horizon kennen. Er is geen grens waar je doorheen kunt vallen en waarna geen enkele terugkeer mogelijk is. In dit beeld is het zwarte gat geen fundamentele, maar een effectieve thermodynamische beschrijving van de onderliggende vrijheidsgraden. Tevens is er geen sprake meer van een "information loss paradox" en is er geen reden om de wetten van de quantummechanica los te laten.

Dit onderzoek, waaraan onderzoekers in de werkgroep FOM-A-20 een essentiële

Figuur 1. De gekromde ruimtetijd rondom een zwart gat, voorgesteld door een zwarte bol.

Figuur 2. Illustratie van een microscopische vrijheidsgraad: de ruimtetijd lijkt veel op die van een zwart gat, het zwarte gat zelf is echter vervangen door een veel ingewikkeldere geometrie die geen horizon meer heeft.

bijdrage geleverd hebben, gaat zich in de toekomst onder andere richten op het identificeren van de vrijheidsgraden voor meer algemene zwarte gaten, waarin ook de vrijheidsgraden van trillende snaren een belangrijke rol lijken te gaan spelen. Tevens zal worden gekeken naar andere fysische consequenties van dit nieuwe perspectief op zwarte gaten.

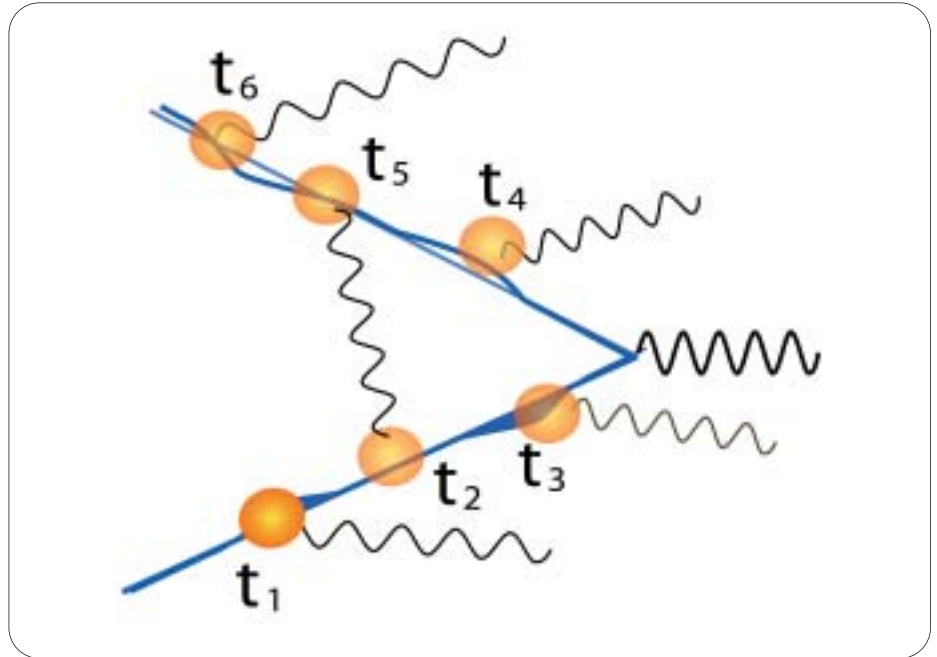
Het doel van het FOM-programma "String theory and quantum gravity" is significante vooruitgang te boeken op de onderzoeksthema's quantumzwaartekracht en zwarte gaten, supersymmetrie en superzwaartekracht, stringtheorie en M-theorie, en conforme-veldentheorie. De looptijd van het programma is 2002-2010 en het budget voor die periode bedraagt 4,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. E.P. Verlinde (UvA).

LHC-metingen veel nauwkeuriger te voorspellen

Nu de LHC bijna (weer) gebruiksklaar is kunnen we uitkijken naar vele metingen aan een grote verscheidenheid aan processen. Omdat deze metingen veelal nauwkeurig zullen zijn, is het van evident belang dezelfde nauwkeurigheid te bereiken in de theoretische beschrijving van deze metingen. Hierin hebben theoretici in Nederland een wereldwijd erkende expertise. Het is dan ook een van de drie thema's in het nieuwe FOM programma "Theoretical Particle Physics in the Era of the LHC".

Het algemene raamwerk waarin men voorspellingen voor botsingsprocessen alsmaar nauwkeuriger kan maken heet storingstheorie, waarbij elke hogere orde met een extra foton- of gluonemissie correspondeert. Na een laagste orde schatting kan men volgens welgedefinieerde regels, die gebruik maken van Feynman-diagrammen, de volgende correctie uitrekenen, en daarmee een preciezer resultaat behalen. Een tweede-orde correctie zal dit nog verder verbeteren. Echter, elke volgende orde brengt een buitensporige toename in rekenkundige moeilijkheden mee, zodat effectief deze aanpak niet snel verder dan de tweede orde zal gaan. Nu is dat voor de meeste metingen ruim voldoende, maar er zijn ook veel situaties waarin geen enkele eindige orde zal volstaan, omdat in feite elke volgende correctie even groot zal zijn als de vorige. Toch is het ook hier mogelijk een nauwkeurige voorspellende kracht te bereiken omdat de grootste termen in elke orde een herkenbare wiskundige structuur vormen, en dus "gehersommeerd" kunnen worden. Hoe dit te doen voor de dominante ("eikonale") termen in storingstheorie is nu vrij goed bekend.

Onlangs zijn we erin geslaagd voor het eerst ook bij de subdominante ("subeikonale") termen structuur te herkennen, en wel in twee benaderingen. In de eerste

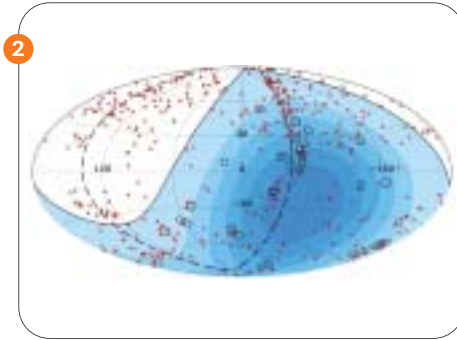


zijn bestaande eikonale structuren uitgebreid door inzichten verkregen uit eindige orde berekeningen. Testen aan de hand van bekende resultaten toonden een goede overeenkomst. Goed, maar niet volledig. Vervolgens hebben we de structuur voor subeikonale termen op steviger voet kunnen zetten door het probleem eerst in een andere vorm te gieten, namelijk die van 1-deeltjes padintegralen. Verrassenderwijs rolt er na deze vertaling ook voor deze subeikonale termen snel een exponentiële structuur uit. We verwachten deze inzichten in verder onderzoek direct te kunnen vertalen in veel nauwkeurigere voorspellingen voor LHC-metingen.

Een geladen deeltje beweegt langs een pad en zendt op verschillende tijden t_i zachte fotonen of gluonen uit, en ook één hard foton waardoor het van richting verandert. Fluctuaties rondom een recht pad geven subeikonale correcties. De som van alle paden geeft een exponentiële vorm voor de verstrooiingsamplitude.

Waarnemingen en theoretische overwegingen geven aan dat er onbekende deeltjes moeten bestaan bij energieën van meer dan 100 GeV, en nieuwe krachten bij afstanden kleiner dan 10^{18} m, ofwel nieuwe fysica voorbij het Standaardmodel. Met de nieuwe deeltjesversneller LHC gaat het FOM-programma "Theoretical particle physics in the era of the LHC" deeltjestheorie op deze gebieden verkennen. De looptijd van het programma is 2008-2013, het budget voor die periode bedraagt 2,5 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. E.L.M.P. Laenen, Nikhef.

Astronomie met geladen deeltjes: het Pierre Auger Observatorium



Figuur 1. Water Cherenkov tank op de voorgrond en het gebouw met zes fluorescentie telescopen op de achtergrond bij het Pierre Auger Observatorium in Argentinië.

Figuur 2. Richting van herkomst van de hoogst energetische kosmische straling in galactische coördinaten als open cirkels en de in de Véron-Cetty-Véron catalogus bekende actieve centra van melkwegstelsels in onze omgeving als rode kruisjes. De stippelijijn is het supergalactisch vlak.

Het Pierre Auger Observatorium op de Pampa Amarilla in Argentinië is een hybride detector voor ultra hoge energie kosmische straling, geladen deeltjes die uit het heelal op aarde komen. Kosmische straling bij de hoogste energieën is extreem zeldzaam en raken de aardatmosfeer eens per vierkante kilometer per eeuw. Het Pierre Auger Observatorium beslaat 3000 km² met water Cherenkov detectoren en 24 fluorescentie telescopen die dezelfde oppervlakte overdekken. Wanneer een hoog energetisch deeltje in de atmosfeer komt ontstaat een lawine van secundaire deeltjes door botsingen met de lucht moleculen. De Cherenkov detectoren registreren de positie en aankomsttijden van deze secundaire deeltjes in het aardvlak. Bij de botsingen van de secundaire deeltjes met stikstof moleculen in de atmosfeer ontstaat fluorescentielicht, dat door de fluorescentietelescopen voor de hele lawine wordt geregistreerd. Met beide technieken zijn de energie en de richting van herkomst van de kosmische straling te meten. Het vergelijken en combineren van de uitkomsten van de twee technieken is cruciaal voor een correcte meting. Figuur 1 toont een water Cherenkov detector op de voorgrond en een gebouw met zes fluorescentietelescopen in de achtergrond.

In 2007 is de eerste observatie van ultra hoog-energetische kosmische straling gepubliceerd, waarbij werd aangetoond dat

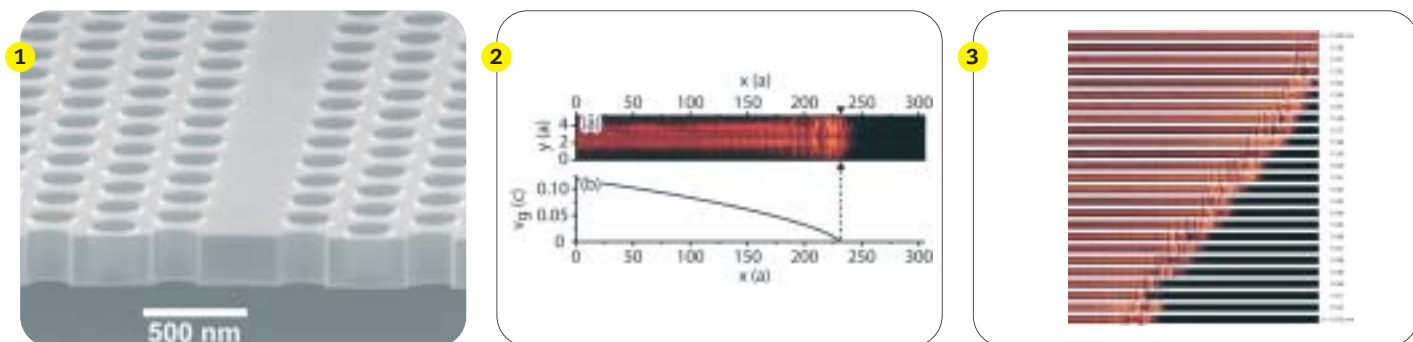
deze deeltjes niet uniform uit de ruimte komen, maar alleen uit welbepaalde richtingen. Er is een correlatie gemeten met de positie van actieve kernen van melkwegstelsels in de buurt van ons eigen melkwegstelsel, waarbij met name de grotere dichtheid van deze stelsels in het supergalactisch vlak zich goed aftekent. Inmiddels is ook duidelijk geworden dat de fractie van de deeltjes die uit kernen van zwaardere elementen bestaat, zoals ijzer, toeneemt met de energie van de deeltjes.

Het Pierre Auger Observatorium is inmiddels geheel werkend en dit is gevierd met een inauguratiebijeenkomst in november 2008 op het observatorium, waar ook FOM als Nederlandse partner was vertegenwoordigd. Bij de inauguratie zijn plannen gepresenteerd voor het completeren van het observatorium met een Noordelijke Auger detector in de VS en voor verbeteringen aan het Zuidelijk observatorium in Argentinië. Onderdeel van de verbeterin-

gen aan het bestaande observatorium in Argentinië is de detectie van kosmische straling met radio-ontvangers. De Nederlandse Auger deelname van de FOM instituten KVI en Nikhef en van de Radboud Universiteit Nijmegen bouwen prototypes van deze radiodetectoren. In de zomer van 2007 zijn daarmee de eerste correlaties gemaakt tussen de kosmische straling die met de radiodetectoren is gemeten en meting van dezelfde gebeurtenissen met de Cherenkov tanks van het observatorium. Het is de verwachting dat combinatie van de Cherenkov en radiodetectie dezelfde of betere precisie geeft als de combinatie van Cherenkov en fluorescentie detectie, maar de fluorescentie telescopen kunnen alleen maar worden gebruikt op heldere, maanloze nachten, circa 10% van de totale tijd, terwijl radiodetectie altijd werkt. Dit geeft potentieel een orde van grootte meer gemeten gebeurtenissen bij de hoogste energieën, een cruciaal gegeven om puntbronnen van deze deeltjes te kunnen bestuderen.

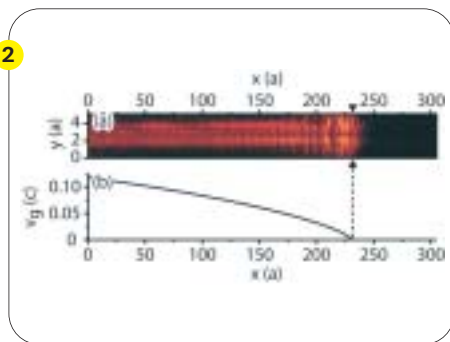
Het doel van het FOM-programma "The origin of cosmic rays" is het zoeken naar de bronnen van kosmische straling, het bestuderen van de primaire samenstelling van de straling en het meten van het energiespectrum van die straling tot de hoogst mogelijke waarden. Gemeten zal worden aan neutrino's met energieën tot 10^{16} eV (en mogelijk hoger) en deeltjeslawines in de dampkring veroorzaakt door protonen of zware atoomkernen voor energieën boven 10^{18} eV. De looptijd van het programma is 2008-2013, het budget voor die periode bedraagt 3,4 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. M.J.G. de Jong, Nikhef.

Langzaam licht is gevoeliger voor nanowereld



Het lijkt paradoxaal, maar langzaam licht in nanostructuren kan telecommunicatie juist sneller maken. Met langzaam licht kunnen optische schakelingen compacter, energie-efficiënter en sneller worden gemaakt door de sterkere wisselwerking van langzaam licht met zijn omgeving. Licht kan doeltreffend worden vertraagd in zogeheten fotonische kristallen. Voorwaarde is wel dat alleen de snelheid van het licht mag veranderen. Het licht moet zich niet opeens heel anders gaan gedragen bij lagere snelheden.

Onderzoekers van het FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica (AMOLF) in Amsterdam hebben in samenwerking met de Universiteit van Yokohama aangetoond dat als je licht in een fotonisch kristal te veel vertraagt, het zich op een andere manier gaat voortplanten. De onderzoekers gebruikten een speciale fotonische kristalstructuur die bestaat uit een dunne (200 nm) plak silicium waarin een periodiek rooster van gaten is gefabriceerd. Eén rij gaten is niet geboord, waardoor een lichtgeleider ontstaat waarlangs licht kan worden vertraagd. Steeds dieper in het kristal worden de gaten naast de lichtgeleider steeds iets groter. Hierdoor neemt de snelheid van het licht geleidelijk af terwijl het zich door de structuur voortplant totdat de snelheid op een bepaalde plek (theoretisch) nul wordt. Op deze manier kan het gedrag van licht voor verschillende snelheden makkelijk worden bestu-



Figuur 1. Opname met een elektronenmicroscop van een fotonisch kristal met een golfgeleider (de baan zonder gaatjes).

Figuur 2. (a) Opname met een nabije-vel-microscop van licht in een fotonische kristal golfgeleider, waarin het licht voortbeweegt van links naar rechts. De snelheid van het licht (b) neemt af als functie van afgelegde afstand. Bij het pijltje is de snelheid (theoretisch) nul. Vlak voor dit punt is de wisselwerking van het licht met zijn nano omgeving zo groot dat het zich grillig gaat gedragen. De x-as in beide figuren geeft de positie binnen de structuur in eenheden van de afstand tussen de gaatjes. De y-as in figuur 2b geeft de groepssnelheid van het licht - dit is de snelheid waarmee lichtflitsen zich voorplanten - als fractie van de lichtsnelheid in vacuüm.

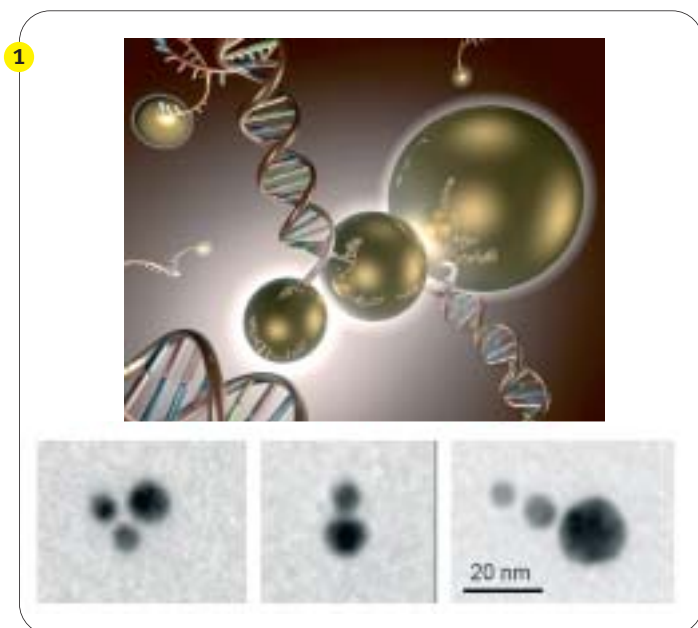
Figuur 3. Opname met een nabije-vel-microscop van licht in dezelfde getijpte golfgeleider voor verschillende kleuren (op golflengten in het infrarood die gebruikelijk zijn voor optische telecommunicatie). Voor iedere kleur wordt het licht op een andere positie in de golfgeleider langzaam. Het is ook duidelijk dat het grillige patroon voor iedere kleur anders is.

deerd door het op verschillende plaatsen in de structuur te bekijken. Hiertoe wordt een unieke microscoop gebruikt die de beweging van licht binnenin de structuur zichtbaar kan maken. Het blijkt dat het licht tot aan een vertraging met een factor 30 zich nog volgens theoretische voorspellingen voortplant: het licht volgt de lichtgeleider gewoon en wordt steeds iets trager naarmate het verder in de structuur is doorgedrongen. Voor nog lagere snelheden verandert het gedrag dramatisch: het lichtpatroon wordt grillig en het licht

gedraagt zich alsof het zich door een wanordelijk materiaal heen worstelt. Deze verandering van gedrag is een direct gevolg van de grotere wisselwerking van het licht met zijn omgeving waardoor het gevoeliger wordt voor minieme veranderingen in de nanogeometrie. Dit werk laat voor het eerst zien dat er grenzen bestaan aan het nuttig vertragen van licht. Gelukkig kan de energie-efficiëntie van de volgende generatie optische chips bij deze vertragingen al worden verhoogd met een factor 100.

Het NOEM programma, dat is gestart in 1999, is in 2007 formeel afgesloten. De programmeleiders waren prof.dr. A. Polman (1999-2005) en prof.dr. L. Kuipers (2006-2007). Vanaf 2008 wordt het onderzoek op AMOLF voortgezet met financiering vanuit het missiebudget onder leiding van prof.dr. L. Kuipers.

Met DNA geassembleerde plasmon nanolens



Figuur 1. Transmissie-elektronenmicroscopieopnamen van een gouden plasmonlens bestaande uit gouddeeltjes van 5, 8 en 18 nm, die zijn geassembleerd door middel van DNA-moleculen. De DNA-zelfassemblagegeometrie is schematisch weergegeven.

Figuur 2. Berekeningen van de versterking van de lichtintensiteit in de plasmonlens bestaande uit gouddeeltjes van 5, 8 en 15 nm. De kleurenschaal is logaritmisch. De intensiteit tussen de twee kleinste deeltjes is bijna met een factor 10.000 vergroot.

Metaal nanodeeltjes staan in de belangstelling omdat ze licht kunnen concentreren tot een lengteschaal die veel kleiner is dan de golflengte van het licht. De lichtconcentratie vindt plaats door middel van een collectieve resonantie van de geleidingselektronen in het metaal, de plasmon resonantie. Metaaldeeltjes met een diameter van 10-100 nm hebben een werkzame doorsnede voor het invangen van licht die veel groter is dan de afmeting van het deeltje. Het licht wordt vervolgens geconcentreerd in een volume dat wordt bepaald door de grootte van het deeltje, waarbij het elektromagnetische veld nog zo'n 10 nm buiten het deeltje uitsteekt. De concentratie van licht kan nog verder worden verhoogd wanneer metaaldeeltjes bij elkaar in de buurt worden gebracht, met een kleine afstand (1-5 nm) er tussen. Berekeningen laten zien dat de lichtintensiteit tussen twee nanodeeltjes zo met een factor 10.000 kan worden vergroot.

De grote uitdaging is om zulke structuren te maken. Met standaard nanofabricage-technieken is het niet mogelijk de afstand

tussen metaaldeeltjes op de nanometer nauwkeurig te bepalen. Onderzoekers op het FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica (AMOLF) hebben laten zien hoe door gebruik te maken van DNA-moleculen gouden nanodeeltjes op een gecontroleerde manier aan elkaar kunnen worden geregen. Goudbolletjes met een diameter van 5, 8, en 18 nm werden met chemische methodes aan het oppervlak voorzien van fosfine moleculen. Vervolgens werden deze gebonden aan een vooraf bepaald basepaar op een speciaal ontworpen DNA-molecuul, dat van een zwavelgroep was voorzien. Door vervolgens twee enkelstrengs DNA-moleculen

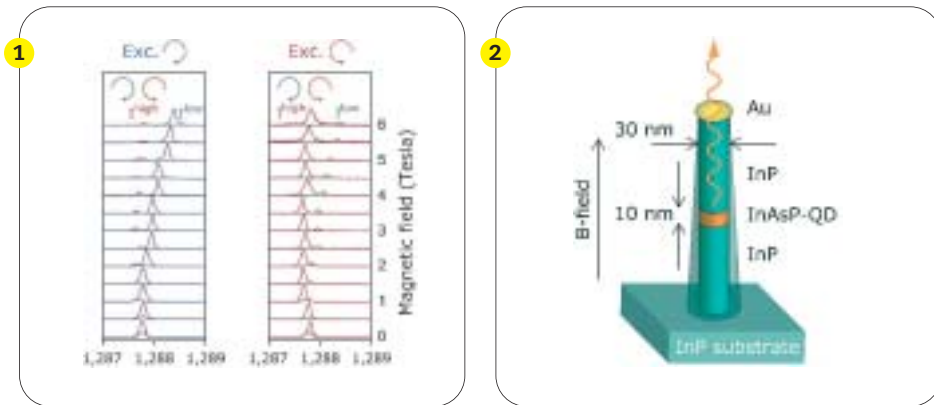
met elkaar te laten binden werden de gouddeeltjes bij elkaar gebonden. Dit resulteerde onder meer in een ketting van drie gouden nanodeeltjes met een aflopende diameter: 18-8-5 nm. Berekeningen laten zien dat zo'n plasmon nanolens licht zeer sterk concentreert in het gat tussen de twee kleinste deeltjes. De nanolensen kunnen toepassing vinden in biosensoren, waarbij te analyseren moleculen selectief aan het DNA gebonden worden. En ze maken fundamentele optische studies mogelijk, bijvoorbeeld naar de vraag in welke mate di-elektrische constanten op een nanoschaal nog overeenkomen met bulkwaarden.

Het doel van het FOM-programma "Photon physics in optical materials" is het bestuderen van de fysica van nieuwe optische verschijnselen in nieuwe optische materialen en het toepassen van deze materialen in fotonische devices. Verder beoogt het programma het onderzoek op dit terrein in Nederland te versterken en samenwerking van onderzoeksgroepen te stimuleren.

De looptijd is 1999-2008 en het budget voor die periode bedraagt 3,4 miljoen euro.

De leiding van het programma is in handen van prof.dr. A. Polman (AMOLF).

Een enkel-spin geheugen

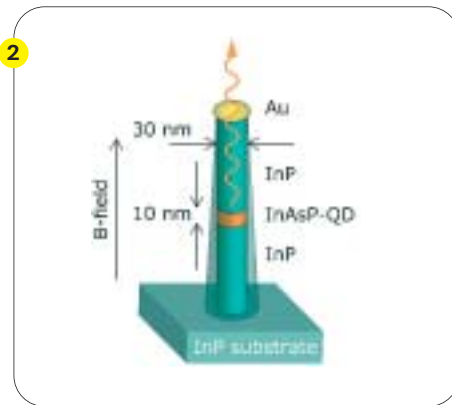


Figuur 1. Fotoluminescence spectra van een enkele quantum dot onder een magnetisch veld (0-6 T). In de linkergrafiek is de excitatiepolarisatie linksom circulair gepolariseerd en in de rechtergrafiek rechtsom circulair gepolariseerd. De emissie van de dot wordt geanalyseerd voor de beide circulaire polarisaties (in blauw en rood).

De spin van het elektron is het meest geschikt voor quantum *informatieverwerking*, terwijl de polarisatie van het foton het meest geschikt is voor quantum *communicatie*. Echter zowel een spin geheugen als een quantum interface voor elektronen en fotonen ontbreken nog steeds.

Nanodraden zijn hiervoor zeer goede kandidaten: door de *bottom-up* benadering hebben zij een ongekende ontwerprijheid en kunnen er optisch actieve quantum dots van uitstekende kwaliteit in gegroeid worden. De nanodraadfabricage wordt gedaan bij Philips Research in Eindhoven.

Onze twee grootste uitdagingen waren het fabriceren van quantum dots met uitstekende optische kwaliteit en de volledige toegang tot de intrinsieke polariseigenschappen van de quantum dots. Door parallel aan de draadas te exciteren en de quantum dot emissive parallel aan de nanodraadas te meten kunnen wij elke polarisatie meten.



Figuur 2. Nanodraad heterostructuur: InAsP quantum dot in een InP nanodraad. Het magnetisch veld is parallel aan de nanodraad. Het goudbolletje is de katalysator voor de groei.

De nanodraad quantum dots tonen zeer smalle en heldere spectra, zo smal als 30 μeV , waardoor spectroscopie aan één enkele dot mogelijk wordt. Door het exciton te splitsen middels het Zeeman effect, kunnen we de twee verschillende spintoe-standen bij verschillende energieën meten. Door de smalle emissielijnen kunnen de spintoe-standen bij ongeveer 1 Tesla al volledig gesplitst zijn.

Vervolgens hebben wij een exciton spin-geheugen in één enkele quantum dot in een nanodraad gerealiseerd. Wij creëren een exciton met een welbepaalde spintoe-stand door de dot met circulair gepolariseerd laserlicht te exciteren. De gemeten

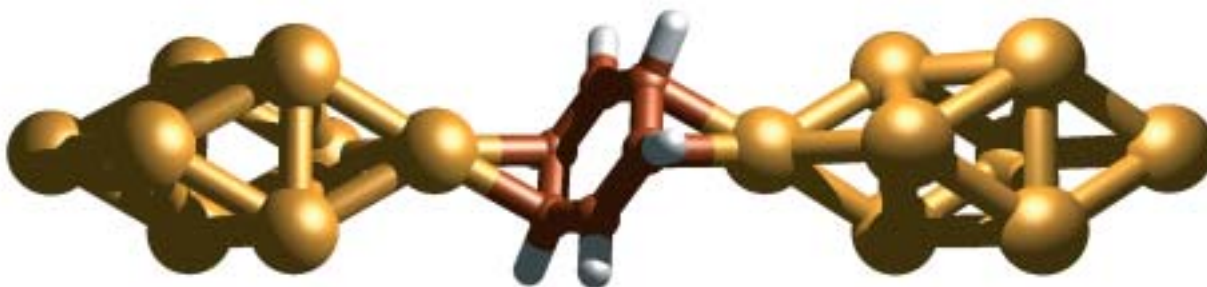
luminescentie heeft dezelfde polarisatie als het ingekomen laserlicht. Dit toont aan dat de exciton spin behouden blijft gedurende de exciton levensduur. Deze resultaten tonen aan dat nanodraad heterostructuren uiterst geschikt zijn voor quantum informatieverwerking.

De toekomstige experimenten omvatten ladingscontrole van de quantum dots en elektroluminescentie van één enkele quantum dot nanodraad. Momenteel wordt er veel inspanning gestopt om de nanodraden elektrisch te contacteren.

Het doel van het FOM-programma "Solid state quantum information processing" is het ontwikkelen van experimentele en theoretische technieken om gecontroleerd veeldeeltjes-verstrengeling in vaste-stofsystemen te creëren en te detecteren. Het doel op de lange termijn is systemen te bouwen voor quantuminformatie en quantumrekenen. Het programma wordt uitgevoerd in de gelijknamige FOM-focusgroep.

De looptijd van het programma is 2004-2013 en het budget voor die periode is 9,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. L.P. Kouwenhoven (TUDelft).

Elektrische contacten aangebracht op een enkel molecuul



Een benzeenmolecuul vormt een goed geleidende brug tussen platina metaalelektroden

De wereld van micro-elektronica en die van koolstofchemie worden bij elkaar gebracht door een recente ontwikkeling in de FOM groep L22. Organische moleculen vormen stabiele eenheden die naar wens vele eigenschappen kunnen krijgen door gerichte synthese met chemische methoden. Het is denkbaar dat een enkel molecuul de functies krijgt van een transistor of diode en als zodanig opgenomen wordt in een elektronische chip. De moleculen kunnen in massale hoeveelheden zeer goedkoop worden geproduceerd, ze bieden een weg naar veel verder gaande miniaturisering, en bovendien zijn nieuwe functies in te bouwen die mogelijkheden van hedendaagse elektronica te boven gaan. Een van de belangrijkste problemen waarmee het onderzoek naar deze 'moleculaire

elektronica' werd geconfronteerd is het vormen van een betrouwbare en goed geleidende verbinding tussen het molecuul en metallische geleiders. Ten eerste dient het bijzonder kleine molecuul aangesloten te worden op de contacten en vervolgens moeten we kunnen verifiëren of het gelukt is. Een enkel organisch molecuul in een configuratie tussen twee geleiders is met de huidige technieken niet zichtbaar te maken.

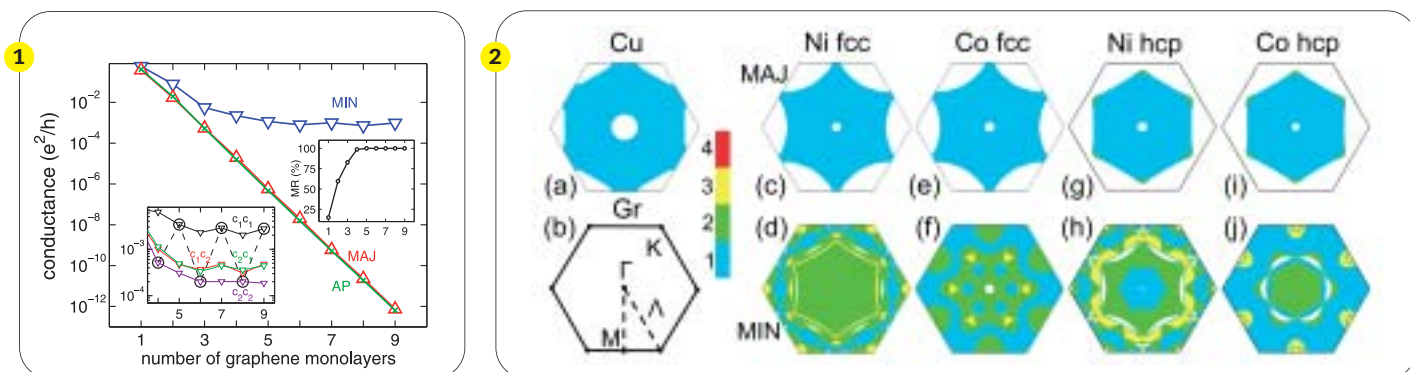
Het eerste probleem werd opgelost door gebruik te maken van zelforganisatie. Door geschikte keuze van de combinatie van een eenvoudig test molecuul (benzeen) en een metaaloppervlak waarmee het een sterke binding wil aangaan (platina) kon de verbinding spontaan tot stand komen. De afstand tussen twee platina-

elektroden werd ingesteld op de afmeting van het molecuul met behulp van de zogenaamde Mechanisch Controleerbare Breekjunctie techniek.

De aanwezigheid van het molecuul in de geleidende brug kon onomstotelijk worden aangetoond door gebruik te maken van de karakteristieke trillingstoestanden van het molecuul, die zichtbaar zijn als kleine correcties in de geleiding bij een elektrische spanning die overeenkomt met de energie van de trilling. Dit werd verder bevestigd door het molecuul te vervangen door een zwaardere isotoop (koolstof-13). Vervolgens werd de intrinsieke ruis in de stroom gemeten (hagelruis), waaruit kon worden aangetoond dat de brug door slechts één enkel molecuul werd gevormd. Op deze manier is de eerste directe goed geleidende binding aan een enkel organisch molecuul gevormd en dit maakt de weg vrij naar verdere studie van moleculen met een ingebouwde functie.

Het doel van het FOM-programma "Atomic and molecular nanophysics" is het tegelijkertijd met diverse probes onderzoeken van de eigenschappen van systemen van een afzonderlijk molecuul in een sterke wisselwerking, bijvoorbeeld een elektromagnetisch veld. Dit moet meer fundamentele inzichten in de processen in kwestie opleveren, en op termijn mogelijk nieuwe moleculaire devices. De looptijd van het programma is 2007-2014, het budget voor die periode bedraagt 3,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. J.M. van Ruitenbeek, LEI.

Perfekte spinfilters



Optische polarisatiefilters laten één polarisatie-richting van licht door. Sinds lang is het een droom om analoog hieraan een filter voor elektronenstromen te maken dat slechts één richting van de elektronenspin doorlaat. Half-metallische ferromagneten, 25 jaar geleden voorspeld door de Nijmeegse werkgroep FOM-N-16, lijken hiervoor de ideale materialen, aangezien ze geleiders zijn voor elektronen met één spinrichting en isolatoren voor elektronen

met de andere spinrichting. In de praktijk is het moeilijk om spinfilters van deze materialen te maken, omdat hun ideale gedrag verstoord wordt door oppervlakte-effecten. De droom blijft, gemotiveerd door de enorme toepassingsmogelijkheden van een spinfilter, getuige de verlening van de Nobelprijs natuurkunde in 2007 aan de observatie van gedeeltelijke spinfiltering in spinvalves gebaseerd op Fe en Cr.

met een bepaalde impuls. Die elektronen worden doorgelaten, en elektronen met een andere impuls worden gereflecteerd. Co en Ni zijn ferromagnetische metalen, wat betekent dat er meer elektronen zijn van de ene spinrichting dan van de andere, en dat die beide soorten ook verschillende toestanden bezetten. Bij de Fermi energie hebben alleen toestanden voor elektronen met de minderheidsspin een impuls die past bij grafiet, zie figuur 1. Alleen die spinrichting wordt dus doorgelaten door grafiet, met andere woorden een grensvlak tussen Ni of Co en grafiet is een perfect spinfilter.

Figuur 1. Projecties van het Fermi-oppervlak op de dichtstgepakte vlakken van (a) fcc Cu(111); (c) meerderheids- en (d) minderheidsspin fcc Ni(111); (e) meerderheids- en (f) minderheidsspin fcc Co(111); (g) meerderheids- en (h) minderheidsspin hcp Ni(0001); (i) meerderheids- en (j) minderheidsspin hcp Co(0001). Het aantal toestanden wordt gegeven door de kleur. De toegestane toestanden voor grafiet (grafiet) bevinden zich op (rond) de hoekpunten (K) van het hexagon (b).

In het onderzoek naar de absorptie van grafeen op metaaloppervlakken, is het onderzoekers van de Twentse werkgroep FOM-T-09 opgevallen dat grafeen en grafiet bijna dezelfde roosterconstante hebben als dichtstgepakte oppervlakken van Co en Ni. Als gevolg hiervan hebben die materialen een gemeenschappelijk reciprook oppervlakteroster, en is de component van de kristalimpuls parallel aan het grensvlak een behouden grootte bij elektrontransport door het grensvlak. Bij de Fermi energie heeft grafiet alleen toestanden ter beschikking voor elektronen

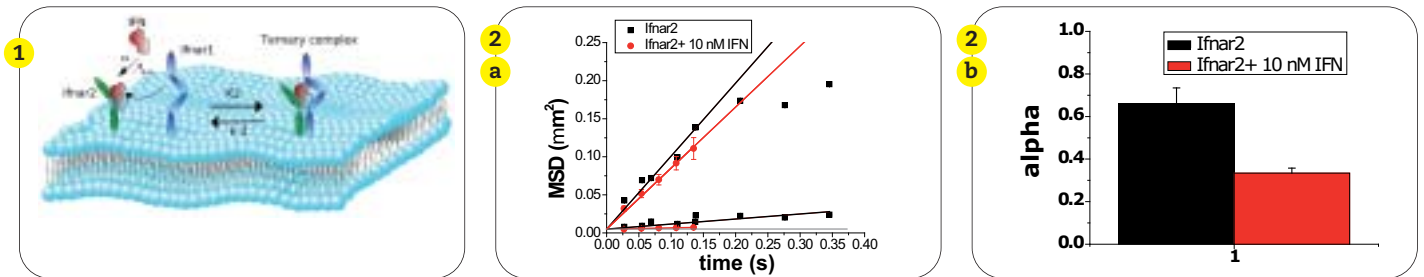
Wanneer we een grafietlaag tussen twee Ni of Co elektrodes zetten, dan hebben we het spin analogon van twee optische polarisatiefilters. De relatieve oriëntatie van die filters kunnen we manipuleren door de relatieve magnetisatie-richtingen van de twee elektrodes te veranderen. Figuur 2 demonstreert de perfecte werking van dit spin filtering device. Bovendien is de werking ervan niet gevoelig voor wanorde aan de grensvlakken.

Figuur 2. Geleidingen voor de minderheids- G_{\min} (▼) en de meerderheidsspinelektronen G_{\max} (▲) bij parallel magnetisatie van de elektrodes, en $G_{\text{AP}}(X)$ bij anti-parallel magnetisatie, van een NiGr_nNi junctie als functie van het aantal grafeen (Gr) lagen n . Inset rechts: de magnetowerstand als functie van n . Inset links: G_{\min} voor vier verschillende grensvlakconfiguraties.

Het doel van het FOM-programma "Materials-specific theory for interface physics and nanophysics" is het begrijpen van de elektronische, optische, magnetische en structurele eigenschappen van materialen en devices die zijn gestructureerd op een lengteschaal in de orde van nanometers.

De looptijd van het programma is 2004-2014 en het budget voor die periode bedraagt 3,6 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. R.A. de Groot (RU).

Manipulatie van individuele type I interferon signalleringscomplexen



Figuur 1. Vorming van ternaire complexen.

Figuur 2. Ifnar2-dynamica vóór (zwart) en ná toevoeging van 10 nM IFN α 2.

Het overbrengen van signalen in cellen verloopt grotendeels via multi-eiwitcomplexen en wordt vaak op gang gebracht doordat membraanreceptoren op de buitenkant van de cel een molecuul, het ligand, herkennen en eraan binden. Dit leidt tot activering van signalen binnen de cel. Begrip van het dynamische gedrag van receptoren in het celmembraan en de ruimtelijke structuur van het membraan op nanoschaal zijn essentieel om de signaalprocessen van de cel te doorgronden. De Leidse werkgroep FOM-L-17 bestudeert de type I interferon (IFN) receptor, een lid van de cytokinefamilie, die een sleutelrol speelt in de reacties van het immuunsysteem op besmetting door ziekteverwekkers. Het is een raadsel hoe verschillende leden van de ligand type-1 IFN familie verschillende soorten respons op de ziekteverwekker oproepen terwijl ze aan dezelfde receptor binden. Die receptor bestaat uit twee eiwitten, ifnar1 en ifnar2, die aan het membraanoppervlak in zeer lage concentraties voorkomen (100 tot 1000 moleculen per cel). Na binding van het ligand ontstaat een ternair complex en worden signaalpaden geactiveerd (zie figuur 1).

Ondanks de geringe hoeveelheid receptor op het membraan (een paar duizend

receptoren, ofwel $\sim 1,6$ Ifnar/ μm^2 bij een gelijkmatige verdeling), reageren de cellen na de ligandbinding snel en effectief. Dit suggereert dat de receptorcomplexen op het membraan van tevoren al in zekere mate georganiseerd zijn, leidend tot plaatselijke concentratieverhoging, wat essentieel zou kunnen voor een effectieve signaalfunctie.

De onderzoekers volgen met gebruikmaking van *single-molecule wide-field* fluorescentiemicroscopie de diffusie van receptoren in het plasmamembraan van levende HeLa-cellen (een veelgebruikt type modelcellen in het kankeronderzoek). Zo kunnen de onderzoekers metingen doen aan zowel afzonderlijke componenten als gevormde ternaire complexen na IFN-binding. Door analyse van de mobiliteit van ifnar1 en ifnar2 kunnen de onderzoekers direct associatie/dissociatiegebeurtenissen van het ternaire complex zichtbaar maken. Vóór ligandbinding diffundeert rond 70% van de receptor ifnar2 vrij in het plasmamembraan, met een diffusiecoëfficiënt van $0,96 \pm 0,005 \mu\text{m}^2/\text{s}$. Na binding

van IFN α 2 schakelt 40% van de ifnar2 over op een tragere diffusie, met een diffusiecoëfficiënt van $0,0162 \pm 0,001 \mu\text{m}^2/\text{s}$ (zie figuur 2). Deze langzamere fractie kon geïdentificeerd worden als het ternaire complex.

De mobiliteit van de receptor ifnar1 leverde vergelijkbare resultaten. Bovendien vonden de onderzoekers membraandoornen met een afmeting van 500 nanometer, hetgeen functionele platforms voor celsignalering suggereert. Opsluiting in domeinen leidt tot een significant hogere plaatselijke receptorconcentratie (~ 600 receptors/ μm^2) en een efficiëntere selectie van componenten van de ternaire complexen. Voor de receptor ifnar2 konden de onderzoekers na ligandbinding een tragere mobiliteit waarnemen.

Deze gegevens suggereren een rol van de nanostructuur van het membraan in het herkennen van ifnarcomponenten. De onderzoekers werken momenteel aan een modelmatige beschrijving van ternaire complexen.

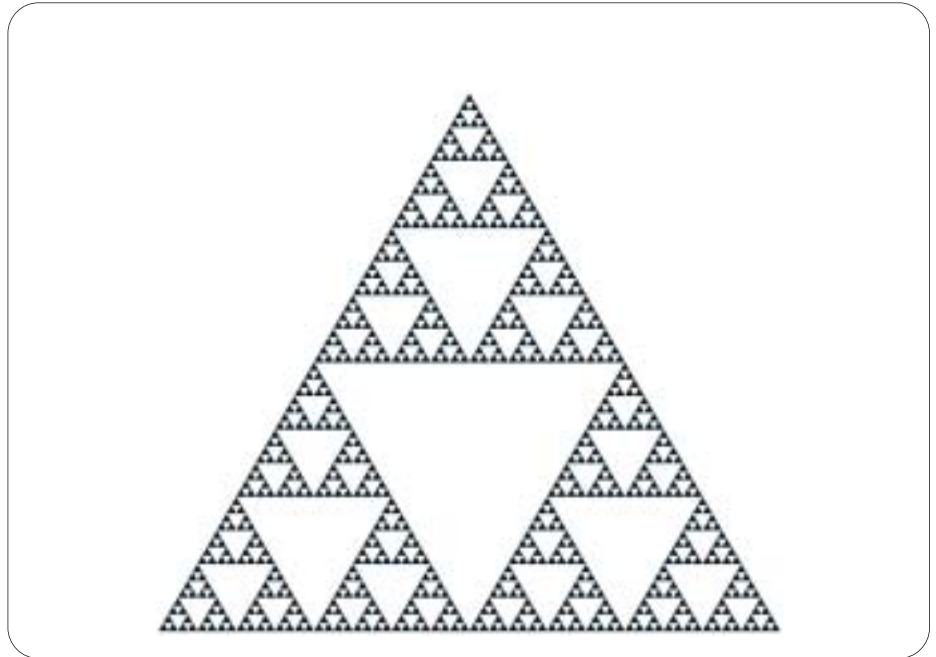
Het FOM-programma "ERA-NET Nanoscience" maakt deel uit van het gelijknamige ERA-NET Nanoscience. Doel daarvan is de samenwerking en integratie van de nationale onderzoeksgemeenschappen in het nano-onderzoek in Europa te vergroten door transnationale onderzoeksprojecten. Een tweede doel is nationale systemen mogelijkheden te bieden gezamenlijk zaken aan te pakken die men afzonderlijk niet zou hebben kunnen doen. De looptijd van het programma is 2006-2012 en het FOM-budget voor die periode bedraagt 1,4 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van de Coordination Board ERA-NET Nanoscience.

Raadselachtige ruis in grafeen

Het in 2004 ontdekte materiaal grafeen blijft verrassen. Grafeen is het dunste geleidende materiaal ter wereld, bestaande uit een enkele laag koolstofatomen. Al bij de eerste metingen bleek dat dit materiaal een elektrische stroom kan geleiden zelfs als de gemiddelde dichtheid van ladingsdragers gelijk is aan nul. Kort na die ontdekking berekenden de FOM-groepen van Mikhail Katsnelson in Nijmegen en van Carlo Beenakker in Leiden dat het geleidingsvermogen van het ladingsneutrale grafeen gelijk is aan $4e^2/\pi h$. De berekende waarde was echter ongeveer drie keer kleiner dan in de eerste metingen. (Men sprak van het "vermiste pi-raadsel".) In 2008 gepubliceerde vervolgmetingen hebben uiteindelijk de berekende waarde gemeten, inclusief de factor π .

Het ene probleem was opgelost, maar dezelfde metingen wierpen een nieuw probleem op: de ruis op de elektrische stroom bleek een factor drie kleiner dan verwacht voor onafhankelijke ladingsdragers. De Leidse FOM-groep heeft nu berekend dat quantummechanische correlaties tussen de ladingsdragers de stroomfluctuaties met 1/3 verkleinen.

De berekening was eenvoudig onder de veronderstelling dat het grafeen volstrekt zuiver is, zonder enige wanorde die de ladingsdragers zou kunnen verstrooien. Dit is een ideaal dat in de praktijk moeilijk te realiseren is. Ladingsneutraal grafeen bestaat in werkelijkheid uit een wanordelijk netwerk van positief en negatief geladen eilandjes. De structuur van het net-



Voorbeeld van een netwerk met een fractale dimensie van 1.58, tussen dimensie 1 en 2 in. Het netwerk van positief en negatief geladen eilandjes in grafeen zou een iets grotere fractale dimensie hebben, maar nog steeds kleiner dan 2. Geheel onafhankelijk van de waarde van de fractale dimensie, is het ruisvermogen drie keer zo klein als de gemiddelde stroom.

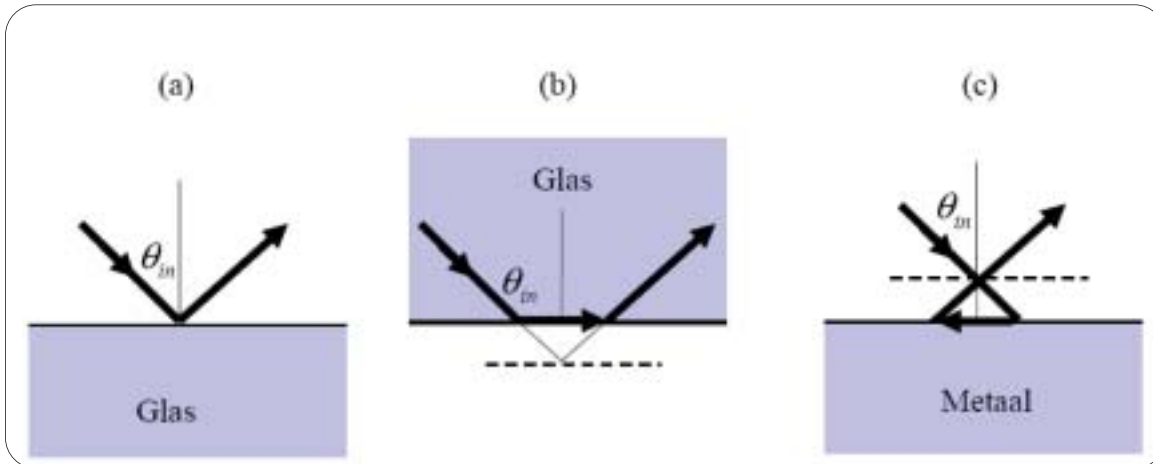
werk kan zeer ingewikkeld zijn, met een dimensie die geen geheel getal is maar tussen 1 en 2 in ligt. Men spreekt van een fractale dimensie.

Diffusie in een fractale dimensie is trager dan in een heeltallige dimensie, en de gemiddelde stroom is daarom kleiner. De Leidse onderzoekers konden uitrekenen dat de quantummechanische correlaties

tussen de ladingsdragers in een fractale dimensie dezelfde 1/3 vermindering van de ruis veroorzaken als in een heeltallige dimensie. Grafeen zou het eerste materiaal zijn waarin quantummechanische effecten op elektrische geleiding in een fractale dimensie onderzocht kunnen worden.

Het doel van het FOM-programma "Graphene-based electronics" is het doorgronden van de fundamentele elektronische eigenschappen van grafeen, met het oog op toepassingen in de elektronica. De looptijd van het programma is 2008-2012 en het budget voor die periode is 3.5 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van Prof.dr.ir. L.M.K. Vandersypen (TU Delft).

Spiegels die staan waar ze niet staan



(a) Een lichtbundel wordt gereflecteerd aan een lucht-glas grensvlak.

(b) Totale interne reflectie van een lichtbundel aan een glas-lucht grensvlak leidt tot een schijnbaar spiegelvlak (aangegeven als stippellijn) dat achter het grensvlak staat.

(c) Reflectie van een lichtbundel aan een metaaloppervlak leidt tot een schijnbaar spiegelvlak dat voor het grensvlak staat.

Een vlakke spiegel is zo ongeveer het eenvoudigst denkbare optische element. Figuur a laat een voorbeeld zien: een inkomende lichtbundel wordt deels gereflecteerd door de bovenkant van een glazen plaat (de rest wordt doorgelaten). Figuur b laat zien dat het anders gaat bij interne reflectie aan het glasoppervlak, in het bijzonder als die reflectie totaal wordt bij voldoende scheve inval: er treedt dan een laterale, positieve verschuiving van de gereflecteerde bundel op, ter grootte van een fractie van de golflengte. Het is alsof het spiegelende oppervlak achter het fysieke grensvlak ligt. Dit zogenaamde Goos-Hänchen effect is uitvoerig onderzocht.

Het Goos-Hänchen effect van een metaal spiegel is echter nog niet geëxploreerd en dit was aanleiding voor de werkgroep L-02 om eens na te gaan hoe dit geval uitpakt. Er is een experimentele opstelling gebouwd op basis van een goudspiegel en een extreem gevoelige optische positiedetector. Het resultaat is dat er weer een

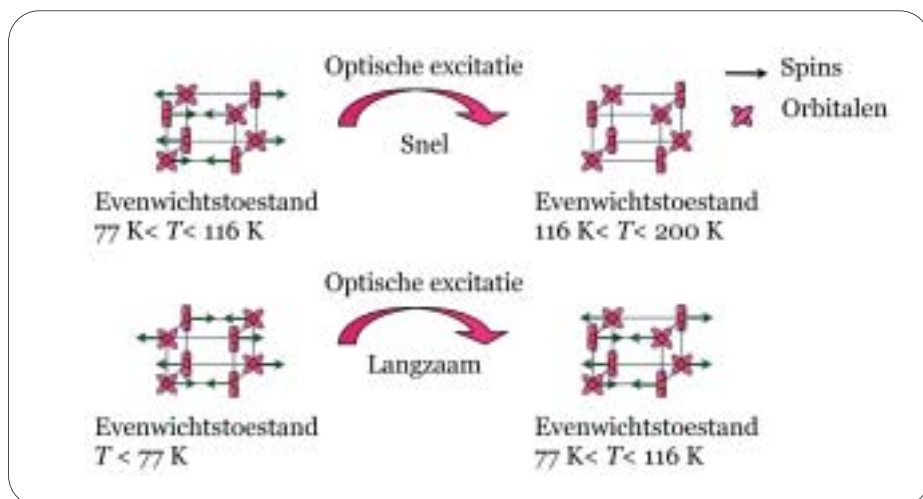
verschuiving optreedt, echter in de negatieve richting; dit correspondeert met een spiegelend oppervlak voor het fysieke grensvlak (zie figuur c). De verschuiving varieert typisch tussen 10 en 1000 nm. Het negatieve teken is het gevolg van het feit dat de optische brekingsindex van een metaal imaginair is. Microscopisch betekent dit dat vrije elektronen in tegenfase oscilleren met het elektromagnetische veld dat hierdoor nauwelijks in het metaal kan binnendringen. In de grenslaag van het metaal organiseert het optische veld zich zodanig dat het schijnbare spiegelvlak iets naar voren schuift.

Inmiddels is het onderzoek uitgebreid naar ruwe metaalspiegels; de tot dusver

gebruikte Au spiegels waren superglad. De ruwheid maakt het mogelijk dat de invalende lichtbundel propagerende oppervlakte-plasmonen genereert, die weer hun eigen stempel kunnen drukken op het Goos-Hänchen effect. Eerste resultaten laten zien dat het Goos-Hänchen effect inderdaad van karakter verandert bij reflectie aan *microscopisch* ruwe Au spiegels; *macroscopische* afwijkingen van de vlakheid hebben geen gevolgen. De combinatie van Goos-Hänchen effect en oppervlakte-plasmonen is ook interessant vanuit het perspectief van toepassing in sensoren; in beide gevallen gaat het om ruimtelijke effecten die gebruikt kunnen worden voor detectie van zeer kleine verschillen in de brekingsindex.

Het doel van het FOM-programma "Plasmonics" is het manipuleren van licht op de kleinst mogelijke lengte- en tijdschalen door het benutten van metalen nanostructuren. De looptijd van het programma is 2008-2012 en het budget is 3,3 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. L. Kuipers.

De rol van symmetrie in de dynamica van fase-overgangen



Boven: Het optisch geïnduceerd 'smelten' van de spin ordening in YVO₃ gaat gepaard met een toename van de symmetrie en vindt plaats op een ultrasnelle tijdschaal.

Onder: Een optisch geïnduceerde verandering van de orbitale ordening leidt tot een afname van de macroscopische symmetrie, en vindt daarom intrinsiek langzaam plaats.

Fase-overgangen spelen een cruciale rol in moderne data-opslagstechnieken. Het bekendste voorbeeld hiervan wordt gevonden in de faseveranderingsmedia gebruikt in dvd's en cd's waar een optisch geïnduceerde fase-overgang tussen een amorf en een kristallijne toestand bepaalt of een bit de waarde 1 of 0 heeft. De snelheid van data-opslag van deze media wordt uiteindelijk bepaald door de snelheid waarmee de fase-overgang kan plaatsvinden. Het is al lang bekend dat sommige fase-overgangen sneller dan andere zijn, maar de onderliggende redenen hiervoor zijn niet altijd duidelijk. Binnen de werkgroep FOM-G-10 (Van Loosdrecht) is, in samenwerking met FOM-G-14 (Palstra), dit jaar onderzoek gedaan naar de onderliggende redenen van de beperkte snelheid waarmee bepaalde fase-overgangen plaatsvinden.

De perovskiet YVO₃ vertoont een interessante opeenvolging van orbitale- en spin-fase-overgangen. Bij kamertemperatuur

bevindt dit materiaal zich in een toestand waarbij zowel de spin als de orbitale vrijheidsgraden wanordelijk zijn. Bij het verlagen van de temperatuur ordenen de orbitalen zich als eerste bij 200K, vervolgens ordenen de spins zich antiferromagnetisch bij 116K. Tenslotte vindt er nog een gelijktijdige verandering van de orbitale- en spin-ordening plaats bij 77K.

In verschillende experimenten zijn deze fase-overgangen optisch geïnduceerd, waarbij de dynamica van de fase-overgang bestudeerd is met tijdsopgeloste optische technieken en röntgendiffractie. Het blijkt dat het 'smelten' van de spin-ordening bijzonder snel plaatsvindt en in een paar picoseconden voltooid is. Het 'smelten' of

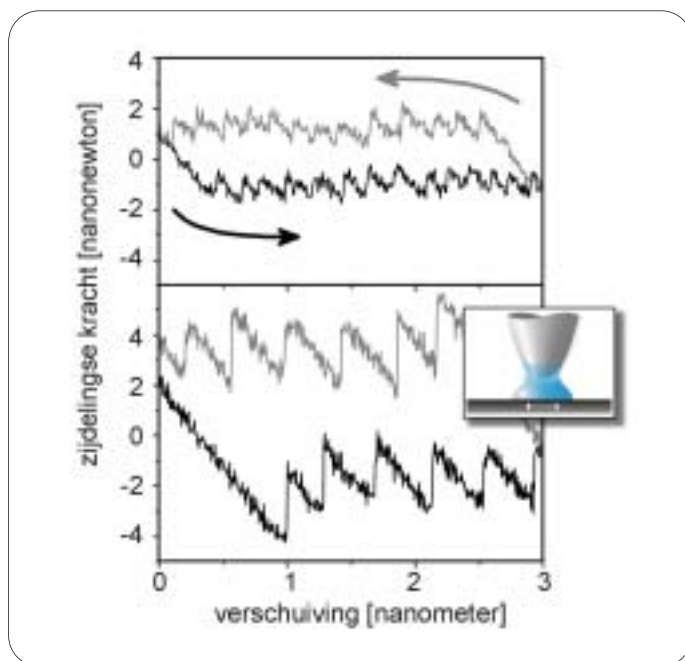
zelfs maar herordenen van de orbitale ordening duurt aanzienlijk langer, en vindt plaats via een niet-thermische tusentoestand die een aantal nanoseconden bestaat. Deze, en andere resultaten suggereren dat symmetrirelaties tussen de toestanden, waartussen optisch geïnduceerde faseovergangen plaatsvinden, een cruciale rol spelen. Generaliserend kunnen faseovergangen waarbij de initiële fase een lagere symmetrie heeft dan de geïnduceerde fase, zeer snel plaatsvinden, terwijl in het omgekeerde geval de fase-overgang intrinsiek langzaam zal zijn. Deze symmetrieregels hebben stringente consequenties voor de ontwikkeling van ultrasnelle herschrijfbaar data-opslagmedia.

Het doel van het FOM-programma "Strongly interacting condensed matter" is gezamenlijk onderzoek van theoretici en experimentatoren te verrichten aan de fysica van sterk wisselwerkende gecondenseerde materie.

De looptijd is 1999-2008, het budget over die periode bedraagt 7,3 miljoen euro.

De leiding van het programma is in handen van prof.dr. T.T.M. Palstra (RuG).

Ijs bij kamertemperatuur



Twee metingen van de zijdelingse kracht wanneer een wolframnaald voorzichtig over een grafietoppervlak wordt geschoven. Boven: onder droge omstandigheden vertoont de hort-en-stoot beweging de grafietperiode van 0.24 nanometer. Onder: bij hogere luchtvochtigheid treedt een nieuwe periode op van 0.38 nanometer, die karakteristiek is voor een bevroren waterlaagje tussen de naald en het oppervlak (ingezette schets).

Schaatsliefhebbers zouden het prachtig vinden als we ijs zouden kunnen maken boven 0°C. Uiteraard hoort ijs dan te smelten, maar met een geschikte truc kan het toch. Als een vloeistof namelijk wordt opgesloten in een zeer beperkte ruimte, kan de nabijheid van de wanden zoveel orde opleggen aan de moleculen dat er spontane bevroering optreedt. Of dit ook voor water geldt, is vele jaren een twistpunt geweest. Recente experimenten in de Leidse groep FOM-L-14 laten zien dat ijs zich zelfs bij kamertemperatuur kan vormen, dus ver boven 0°C.

Met een gevoelige krachtmicroscopie werden metingen uitgevoerd aan de krachten tussen een scherpe wolframnaald en een grafietoppervlak. De naald werd voorzich-

tig met het oppervlak in contact gebracht. Vervolgens werd de zijdelingse kracht op de naald gemeten terwijl het vlakke oppervlak atoomafstand-voor-atoomafstand werd opgeschoven. De atoomstructuur van het grafietoppervlak was duidelijk herkenbaar in de regelmatige variaties van deze wrijvingskracht (zie figuur).

Als de meting echter werd uitgevoerd bij een relatief hoge luchtvochtigheidsgraad werd de wrijvingskracht hoger en ver-

dween de atomaire signatuur van het grafietoppervlak. De grote verrassing was dat de zijdelingse kracht opnieuw periodieke variaties vertoonde als de bewegingssnelheid voldoende laag werd gekozen. Deze krachtvariaties hadden een nieuwe periode, die niet overeenkwam met roosterafstanden in het grafiet (zie figuur).

De verklaring is dat de contactgeometrie van nature leidt tot capillaire condensatie. Spontaan vormt zich een ultradun laagje/kraagje van water, met een dikte van circa 1 nanometer (4 watermoleculen). Onder invloed van deze benauwende geometrie kristalliseert het water en vormt het zelfs bij kamertemperatuur een stevige ijsverbinding.

Als de naald vastgevroren zit aan het oppervlak, is zijdelings bewegen uitsluitend mogelijk wanneer het ijs voortdurend wordt gebroken. Dit vereist een grote kracht. De nieuwe regelmaat duidt erop dat de kristalstructuur van het ijs zich telkens na het breken helemaal herstelt, als het daarvoor maar voldoende tijd krijgt.

Dit is slecht nieuws voor schaatsers, want we weten nu dat het dunne laagje bevroerend condenswater zich zeker niet gedraagt als een smeermiddel maar juist als een keiharde cementlaag tussen de oppervlakken. Mogelijk vormt dit ook de verklaring voor hoge wrijving en slijtage in veel andere praktijksituaties.

Het doel van het FOM-programma "Fundamental properties of surfaces and interfaces" is het onderzoeken van de wisselwerking tussen de geometrische structuur op nanometerschaal en fysische eigenschappen van oppervlakken en grensvlakken.

De looptijd van het programma is 1999-2008, het budget voor die periode bedraagt 5,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. J.W.M. Frenken (LEI).

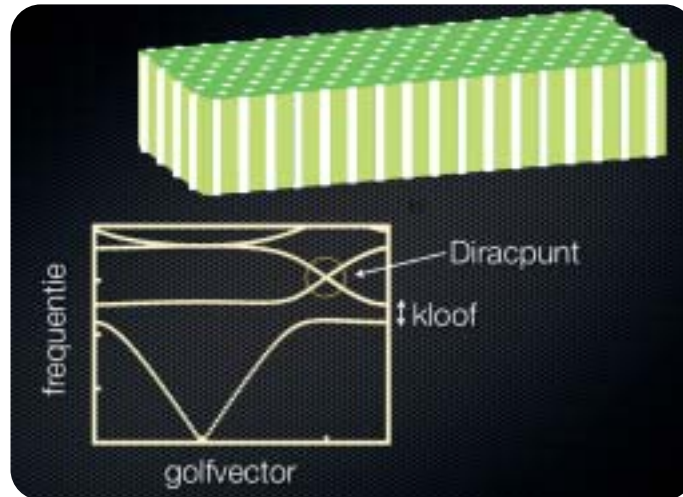
Fotonen met halftallige spin

Eén van de doelen van het FOM-programma “Photons in Complex Media” is het veranderen van de eigenschappen van lichtdeeltjes, fotonen, door ze op te sluiten in een materiaal met bijzondere eigenschappen. Een fotonisch kristal is zo’n bijzonder materiaal, geïnspireerd op kristallen die in de natuur voorkomen. Er zijn allerlei soorten fotonische kristallen, maar de driehoekige variant is de meest bekende. In een blok worden gaatjes geboord op regelmatige afstand, in een driehoekig patroon. De grafiek van frequentie uitgezet tegen golfvector laat een kloof zien. Fotonen met een frequentie in die kloof kunnen niet door het materiaal heen.

De grafiek laat nog een eigenaardigheid zien, die tot voor kort onopgemerkt was gebleven: er is een kruispunt waar slechts één enkele golfvector is toegestaan. In de vrije ruimte bevindt zo’n kruispunt zich uitsluitend bij frequentie nul. In het fotonische kristal is een tweede kruispunt ontstaan, bij frequentie ongelijk aan nul.

In een koolstofkristal bestaat ook zo’n kruispunt. Daar noemt men het een “Diracpunt”, omdat de golfvergelijking er de vorm aanneemt van de Diracvergelijking uit de relativistische quantumfysica. De Leidse groep FOM-L-15 heeft zich laten inspireren door het koolstofkristal en is op zoek gegaan naar het effect van een Diracpunt op de eigenschappen van fotonen.

Ze ontdekten dat de doorlaatbaarheid van het fotonische kristal, bij frequenties in de



driehoekig fotonisch kristal en de bijbehorende grafiek van frequentie als functie van golfvector. Frequenties in de kloof kunnen niet door het kristal heen. Boven de kloof bevindt zich een kruispunt waar slechts een enkele golfvector is toegestaan. Dit zogenaamde Diracpunt zorgt ervoor dat de fotonen bijzondere eigenschappen krijgen, waaronder een halftallige spin.

buurt van het Diracpunt, op een bijzondere wijze van de dikte van het kristal afhangt. Het product van doorlaatbaarheid en kristaldikte is constant, onafhankelijk van materiaaleigenschappen. Hetzelfde effect is bekend voor de doorlaatbaarheid van het koolstofkristal voor elektronen, en er zijn meer parallellen tussen beide systemen.

Het meest verrassende effect is dat het

foton zich gedraagt alsof het een halftallige spin heeft, net als een elektron. De Leidse onderzoekers hebben berekend dat de halftallige spin kan worden waargenomen door de verschuiving van interferentiepatronen, zodat constructieve interferentie destructief wordt – en vice versa. Het Diracpunt voegt zo een nieuwe reeks van mogelijkheden toe aan de manipulatie van licht in fotonische kristallen.

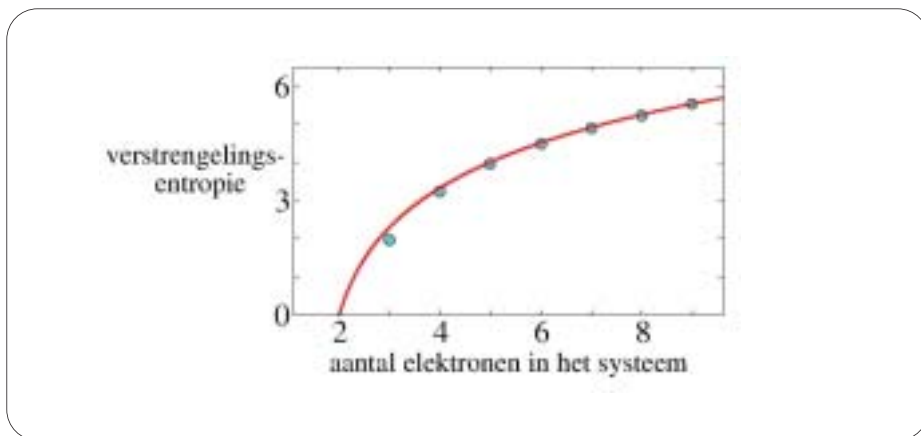
Het doel van het FOM-programma “Photons in complex media” is een grondig begrip te krijgen van de voortplanting, verstrooiing en diffractie van golven in media die in hoge mate complex zijn. Bovendien beoogt het programma een multidisciplinair platform te zijn dat nieuw onderzoek stimuleert en synergie creëert tussen al bestaande activiteiten in verschillende gebieden.

De looptijd van het programma is 2002-2012 en het budget voor die periode bedraagt 4,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. A. Lagendijk (AMOLF/UT).

Verstrengelde elektronen

Als we proberen aan te geven op welke manier quantumfysica verschilt van de klassieke natuurkunde, komen we al snel op een lijstje kernbegrippen van de quantumtheorie: onzekerheid, superpositie en het uitsluitingsprincipe van Pauli. Passend in dit lijstje en historisch gezien wellicht het sluitstuk is *verstrengeling* (Duits: *Verschränkung*, Engels: *entanglement*). Dit begrip werd in 1935 ingevoerd door Schrödinger, in een serie publicaties waarin hij ook de 'kat van Schrödinger' ten tonele voerde. Twee verstrengelde deeltjes kunnen in de quantumtheorie niet apart van elkaar worden beschreven, ook niet als ze ver van elkaar verwijderd zijn, en metingen aan zulke deeltjes geven resultaten die binnen de klassieke fysica niet mogelijk zijn.

De analyse van verstrengeling is lange tijd veelal beperkt gebleven tot situaties met twee of drie deeltjes, maar recentelijk is er ruim aandacht voor verstrengeling in gecondenseerde materie, waarbij heel veel deeltjes een collectieve quantumtoestand vormen. Er zijn allerlei manieren om de mate van verstrengeling van die deeltjes te kwantificeren. Je kunt bijvoorbeeld bekijken in hoeverre de toestand van de deeltjes in een deelsysteem (deel A) verstrengeld is met die van de overige deeltjes (deel B). De grootheid die dit meet wordt 'entropie van verstrengeling van A met B' genoemd. Het blijkt nu dat de manier waarop deze entropie afhangt van de keuze van het A-deel en van het totale



aantal deeltjes als het ware verraadt wat de karakteristieken zijn van de quantumtoestand van het gehele systeem.

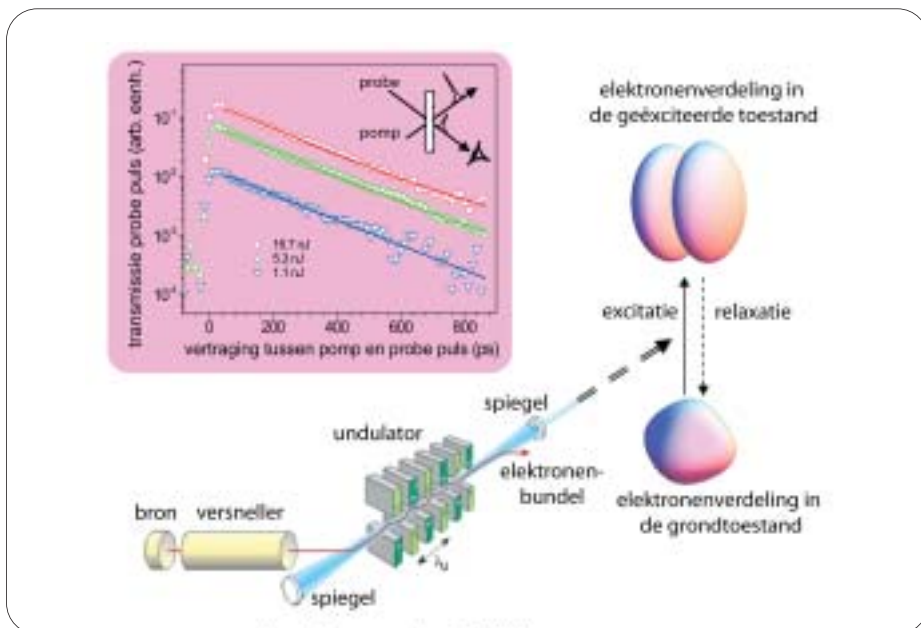
In de groep FOM-A-25 is het onlangs gelukt om voor een ingewikkelde verstrengelde toestand van elektronen in het fractionele quantum Hall effect de verstrengelingsentropie te berekenen. Een voorbeeld van deze resultaten wordt getoond in de grafiek, waarin de verstrengelingsentropie van een deelsysteem van 2 elektronen is weergegeven voor een systeem met in totaal 3, 4, 5, ... elektronen (blauwe datapunten). De rode lijn is een theoretische bovengrens die is afgeleid

door de specifieke quantumorde in dit systeem in rekening te brengen. Het feit dat deze lijn vlakbij de numeriek bepaalde punten ligt geeft aan de verstrengeling van de elektronen in deze toestand bijzonder goed begrepen is.

Het doel van het FOM-programma "Collective and cooperative statistical physical phenomena" is het coördineren en versterken van het fundamenteel experimenteel en theoretisch onderzoek naar de genoemde verschijnselen, door onderzoekers uit uiteenlopende disciplines bijeen te brengen aan het front van dat onderzoek waar coöperatieve effecten voor nieuwe verschijnselen zorgen.

De looptijd van het programma is 2001-2010 en het budget voor die periode bedraagt 5,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. W. van Saarloos (LEI).

Fosforgedoteerd silicium bruikbaar als quantumgeheugen



De infrarood fotonen van de vrije elektronen laser exciteren het elektron in het fosfor atoom naar de eerste aangeslagen toestand, de verandering in de elektronenverdeling is weergegeven. Gemeten wordt de transmissie van de probe puls als functie van de vertraging tussen de pomp en de probe puls bij verschillende intensiteiten. Hieruit kan de tijdsconstante voor de terugkeer naar de grondtoestand berekend worden. De levensduur van de aangeslagen toestand van fosfor in silicium bedraagt 200 picoseconden.

Toekomstige quantumcomputers kunnen sommige rekenproblemen aanzienlijk sneller oplossen dan conventionele computers. Dat doen ze onder andere door de veel grotere informatiecapaciteit van quantumtoestanden, hun geheugenelementen. In laboratoria zijn al proof-of-principle versies van zulke systemen gebouwd, maar die zijn complex en maar moeilijk op te schalen. In dat opzicht biedt silicium, waarop de huidige elektronische industrie is gebaseerd, volgens Britse wetenschappers grote voordelen. Ze onderzochten de bruikbaarheid van silicium met de vrije elektronen laser FELIX van FOM-Instituut Rijnhuizen.

Quantumtoestanden, zoals de interne energietoestanden van atomen, kunnen veel meer informatie opslaan dan een regulier computerbit. Omdat zulke toestanden heel fragiel zijn, is het verre van triviaal de voor een berekening vereiste bewerkingen uit te voeren zonder de opgeslagen informatie te verstoren. Het Britse team denkt dat de energietoestanden van een gevangen fosforatoom in een

bulk silicium te gebruiken zijn in een quantumcomputer. Alleen de laagste van die energietoestanden is stabiel; of de hogere (aangeslagen) toestanden bruikbaar zijn als quantuminformatiedragers, hangt af van hun levensduur.

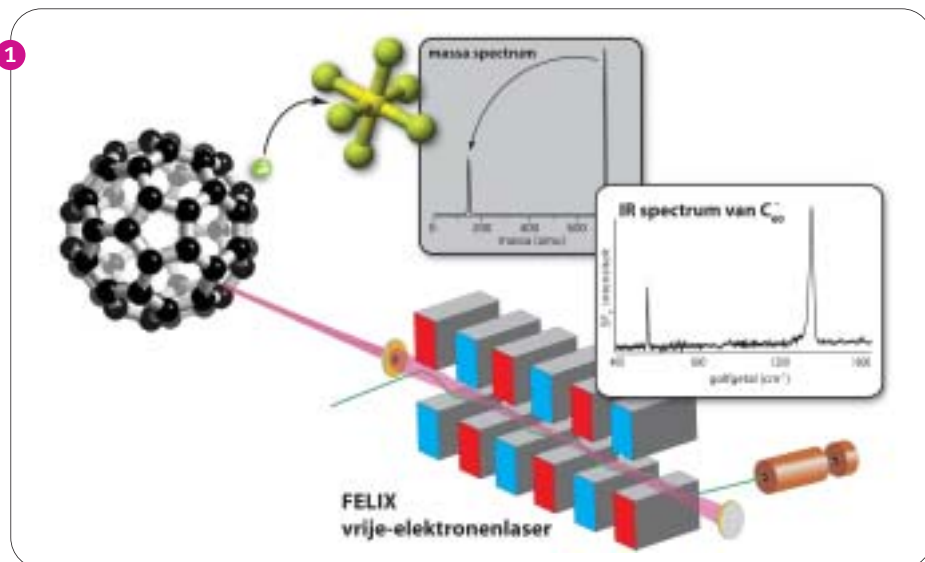
De onderzoekers bepaalden de levensduur van aangeslagen fosfortoestanden in silicium recent met behulp van de vrije elektronen laser FELIX. De eerste aangeslagen toestand van fosfor heeft een levensduur van 200 picoseconden (biljoenste seconde), een waarde die correspondeert met een bepaalde lijnbreedte in het infrarood-absorptiespectrum van silicium. De meeste monsters van fosforverontreinigd silici-

um vertonen een duidelijk grotere lijnbreedte vanwege inhomogeniteit op atomaire schaal. In de beste monsters vallen de berekende en experimentele lijnbreedte bijna samen, wat wijst op minimale versterking van het fosfor door zijn siliciumomgeving. Die lage versterking maakt zulke monsters geschikt om stabiele quantumgeheugens op te baseren; reden tot optimisme bij de ontwikkeling van een nieuwe generatie quantumelektronica. Experimenten in deze richting worden bij FELIX vervolgd.

Het doel van het FOM-programma "The IR user facility FELIX, expanded with FELICE" is de internationale onderzoeksgemeenschap met FELIX een zeer heldere afstembare bron in het midden- en ver-IR ter beschikking te stellen en FELIX uit te breiden met FELICE, die experimenten met een 7 T FTICR en/of een moleculaire bundel in de trilholtte mogelijk maakt. De looptijd van het programma is 2003-2012 en het budget voor die periode bedraagt 12,6 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van dr. A.F.G. van der Meer (Rijnhuizen) en prof.dr. G.J.M. Meijer (Rijnhuizen/Fritz-Haber-Instituut, Berlijn).

Action spectroscopy door elektronoverdracht

De dichtheid van gasvormige ionen, bijvoorbeeld in een ionenval, is door hun onderlinge afstoting zo klein dat het meestal onmogelijk is er een absorptiespectrum van op te nemen. Een infrarood spectrum van de ionen is echter wel vaak gewenst, bijvoorbeeld om de structuur van geïoniseerde moleculen in een massaspectrometer te bepalen. In plaats van absorptiespectroscopie worden er daarom vaak *action spectroscopy* technieken toegepast. Hierbij wordt niet gekeken naar de verzwakking van het invallende licht maar naar het door het licht geïnduceerde effect op de moleculen; fotodissociatie spectroscopie is bijvoorbeeld een bekende vorm van *action spectroscopy*.



Voor negatieve ionen (anionen) kan door absorptie van meerdere infrarood fotonen behalve dissociatie ook verlies van een elektron (*detachment*) geïnduceerd worden. Het resulterende neutrale molecuul kan echter in de massaspectrometer niet waargenomen worden en ook het vrijgekomen elektron kan in een Fourier Transform massaspectrometer (FTMS) niet gedetecteerd worden. In een FTMS wordt de massa bepaald op basis van de cyclotronfrequentie van het ion in een homogeen magnetisch veld. De frequentie behorende bij de elektronmassa is zo hoog dat die niet gedetecteerd kan worden met het FTMS-datasysteem, maar de elektronen blijven wel opgesloten in de ionenval. Met een neutrale elektronenvanger (*scavenger*) kunnen die elektronen ingevangen worden; de nu geïoniseerde scavenger-moleculen kunnen vervolgens gedetecteerd worden in de FTMS.

Deze methode is vooral handig wanneer fotodissociatie spectroscopie niet toegepast kan worden. Het C_{60} anion is bijvoorbeeld te stabiel om te dissociëren met de vrije-elektronenlaser FELIX, maar elektron detachment kan wel geïnduceerd worden met resonante infraroodstraling van

In de ionenval van de FT massaspectrometer zijn C_{60} anionen opgesloten. Ze worden bestraald met het laserlicht van FELIX, dat afstembaar is over een groot gedeelte van het infrarode frequentiebereik. Wanneer de frequentie van FELIX in resonantie is met een actieve vibratie in het anion, treedt er multifoton absorptie op. Door de hoge stabiliteit van fullerenen leidt dit echter niet tot dissociatie. Wel kan detachment van het elektron waargenomen worden: een neutrale elektronenvanger, in dit geval SF_6 , bindt het elektron en wordt in de FTMS als anion gedetecteerd. Naast de massapijk op 720 amu laat het massaspectrum dan een piek bij 146 amu zien. Door de intensiteit van deze massapijk te plotten als functie van de golflengte van het ingestraalde infrarode licht wordt een infrarood spectrum van C_{60}^- verkregen.

FELIX. Andere voorbeelden zijn anionen die bij dissociatie uiteenvallen in fragmenten met een zeer lage elektronenaffiniteit, zodat dissociatie altijd gepaard gaat met detachment. Multifoton IR absorptie doet het acetaat anion (CH_3COO^-) bijvoorbeeld uiteenvallen in koolstofdioxide en een methylradicaal, die

beide een te lage elektronenaffiniteit hebben om het vrijkomende elektron te binden:

Dankzij deze nieuwe methode, *electron detachment action spectroscopy*, zijn de eerste infraroodspectra van gasvormig C_{60}^- en acetaat opgenomen met FELIX.

Het doel van het FOM-programma "Molecular dynamics studies with intense IR radiation" is de unieke mogelijkheden die de gebruikersfaciliteit FELIX in het infrarood biedt te verkennen en te benutten. Daarvoor zullen twee experimentele opstellingen gebouwd worden waarmee in de trilherte van FELIX optische studies aan moleculen, clusters en nanodeeltjes kunnen worden uitgevoerd. De looptijd van het programma is 2003-2008 en het budget voor die periode bedraagt 1,5 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van dr. J. Oomens (Rijnhuizen) en prof.dr. G.J.M. Meijer (Rijnhuizen/Fritz-Haber-Institut, Berlijn).

Kijken hoe colloïden kristalliseren in en door een vloeistofstroming



Zeer vlakke polymeerlaagjes worden o.a. gebruikt bij allerlei lithografische processen. Op industriële schaal wordt voor het vervaardigen hiervan gebruik gemaakt van een zogenaamde 'spincoater'. Hierop wordt de te polymeriseren vloeistof snel rondgedraaid en is een grote controle over de dikte zelfs tot in het nanobereik vrij eenvoudig te verkrijgen. Onlangs is gebleken dat het met een dergelijk proces ook lukt om deeltjes met afmetingen van een paar nanometer tot een paar micrometer die opgelost zitten in een oplosmiddel, colloïdale deeltjes, films te laten vormen waarin de deeltjes op driedimensionale roosters liggen. Hoe precies de vloeistofstroming de kristallisatie van colloïdale deeltjes beïnvloedt is nog niet goed begrepen en is nu voor het eerst kwantitatief bestudeerd door het ontwerp van een speciale *shear-cell*, naar het Engelse woord voor een afschuifstroming, *shear*. Een dergelijk regelmatig stromingsprofiel ontstaat wanneer twee vlakke platen met een

dun laagje vloeistof ertussen, parallel langs elkaar worden bewogen. Het lineaire profiel blijft exact gelijk als de relatieve snelheid tussen de platen gelijk blijft. Wat wel verandert is de locatie in het stromingsprofiel waar de vloeistof stilstaat ten opzichte van de buitenwereld. De in de Utrechtse groep FOM-U-09 gepatenteerde truc is nu om alleen met een speciale microscoop, een confocale microscoop, op dit vlak te focuseren, terwijl de positie van het vlak naar boven en onder bewogen kan worden door verandering van de snelheden van de platen. Met confocale microscopie kunnen namelijk dunne optische coupes worden gemaakt. Terwijl de vloeistof met de deeltjes erin boven en onder het dunne speciale vlak naar links en rechts bewegen zijn nu duidelijk opnames te maken van de dispersie-structuur in het speciale vlak in focus. In de drie plaatjes, enige tijd na elkaar genomen, is de kristallisatie van de met een fluorescente kleurstof gelabelde deel-

tjes met een afmeting van een micrometer voor het eerst goed te volgen. De vloeistofstroming, die kan worden opgevat als een extern veld, maakt dat de kristallisatie plaatsvindt ver uit evenwicht. In tegenstelling tot kristallisatie dicht bij evenwicht wordt dit proces niet gekenmerkt door een kiem die nucleëert en groeit, maar door een continue toename van orde door de hele dispersie.

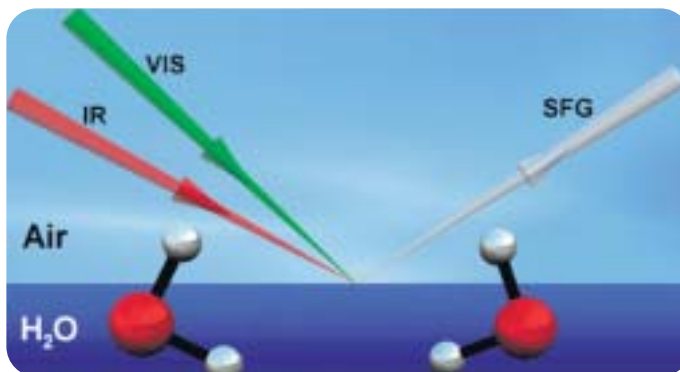
In de figuur zijn de in Utrecht ontworpen *shear-cell* als foto en tekening te zien, samen met drie confocale microscopie-opnamen van een kristalliserende dispersie in een vloeistofstroming na 8 s, 36 s en 80 s.

Het doel van het DFG/FOM-programma "Physics of colloidal dispersions in external fields" is op microscopische schaal te begrijpen hoe colloïdalen zich gedragen onder externe invloed. Daarvoor zijn een systematische ontwikkeling van theoretische benaderingen, nieuwe simulatietechnieken en experimenten buiten-evenwicht noodzakelijk. De looptijd van het programma is 2002-2013 en het FOM-aandeel in het budget is 2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. A. van Blaaderen (UU).

Wateroppervlakken hebben een homogene structuur

Wateroppervlakken zijn alomtegenwoordig in ons dagelijks leven, maar spelen ook een belangrijke rol in technologieën zoals electrochemie en in de eigenschappen van celmembranen. Aan het oppervlak is het waterstofbrugnetwerk onderbroken, en een belangrijke vraag is hoe de waterstofbruggen er vlakbij het oppervlak uitzien. Dit is in het verleden onderzocht met een speciale techniek waarin specifiek de frequenties van de O-H strekvibraties ($\sim 10^{14}$ Hz) van de bovenste laag watermoleculen wordt gemeten. Deze O-H frequenties zijn namelijk uitstekende 'reporters' van de lokale waterstofbrugsterkte.

Waar er voor bulk water maar één enkele OH-frequentie bestaat, bleken er voor oppervlaktewater maar liefst drie verschillende frequenties te zijn: één daarvan correspondeert met de frequentie van niet-gebonden OH-groepen (dangling bonds), de tweede komt overeen met de frequentie waarmee water in de bulk trilt, en de derde lijkt op de frequentie van water in ijs. Jarenlang was daarom de gedachte dat oppervlaktewater meer structuur zou hebben dan bulk water: er zouden waterachtige en ijsachtige structuren zijn, die respectievelijk zwak en sterk waterstofgebrugd zijn. Dit impliceert dat het oppervlak gedeeltelijk ijsachtig zou zijn, en dus meer geordend dan de vloeibare bulk. Deze conclusie lijkt echter strijdig met het fenomeen van oppervlaktesmelten: op een geordend, kristallijn ijsklontje – zelfs ver onder het vriespunt – zit een wanordelijk laagje water. Dit wijst er dus op dat



Door infrarood (IR) met zichtbaar (VIS) licht te mengen aan het water-lucht oppervlak, kunnen de frequenties van de O-H strek vibraties van de buitenste monolaag watermoleculen gemeten worden. Het gegenereerde somfrequentie generatie (SFG) licht wordt intenser als het IR licht resonant is met de oppervlakte vibraties. De resultaten laten zien dat twee van de waargenomen frequenties opgaan in één enkele frequentie als H_2O vervangen wordt door HDO, wat betekent dat de twee frequenties niets te maken hebben met de waterstofbrugstructuur van het oppervlak.

het oppervlak juist wanordelijker zou zijn dan de bulk.

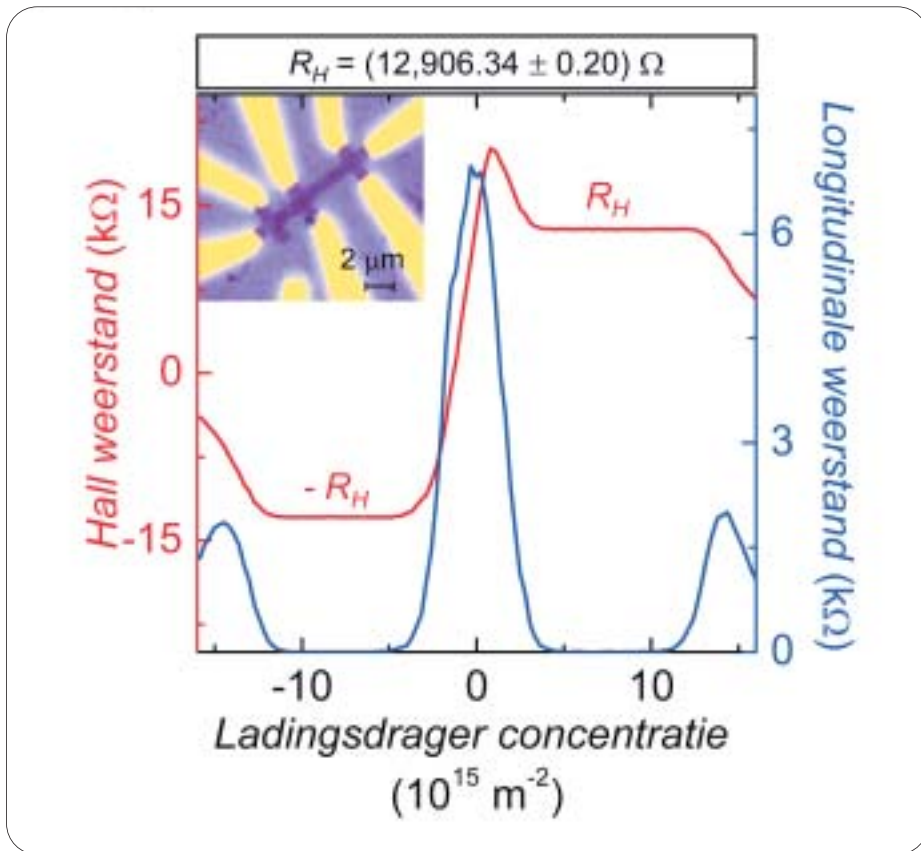
Onderzoekers van het FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica in Amsterdam laten nu zien dat er geen geordende ijsachtige structuren aan het wateroppervlak zitten. Het sleutelexperiment was de vervanging van H_2O door het met het isotoop deuterium gesubstitueerde HDO. Voor HDO bleken de "ijs-" en de "water-" frequentie op te gaan in één enkele frequentie. Dat betekent dat er geen water- en ijsachtige structuren aan het oppervlak zijn: als er zwakke en sterke waterstofbruggen zouden zijn voor H_2O , zouden die er namelijk ook moeten zijn voor HDO. De

tweeklank voor het H_2O -oppervlak blijkt het gevolg van de koppeling van de buigvibraties van water met de strekvibraties; die koppeling wordt 'uitgezet' voor HDO. Wat betreft waterstofbruggen gedraagt oppervlaktewater zich dus net als de bulk.

Het doel van het FOM-programma "Ultrafast molecular dynamics" is de dynamica van moleculen op ultrakorte tijdschalen te bepalen en te beïnvloeden. Het programma kijkt naar laagfrequente vrijheidsgraden zoals waterstofbindingen, conformatiebewegingen en moleculaire rotaties. Daarvoor zullen geavanceerde technieken om femtosecondenpulsen te vormen en afbeeldingen te maken worden ontwikkeld en toegepast.

De looptijd van het programma is 2003-2009 en het budget voor die periode bedraagt 7,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. H.J. Bakker (AMOLF).

Quantum-weerstandsmetrologie in grafeen



Quantum Hall effect in grafeen met een elektronenmicroscopie-opname van een grafeen-sample.

De prestaties van elektronica hangen ondermeer af van een nauwkeurige elektrische weerstandsbepaling van de onderdelen. Zulke weerstandskalibraties worden bij een handvol nationale meetinstututen, met behulp van het quantum-Hall-effect uitgevoerd. Tot op heden

gebeurt dat in tweedimensionale halfgeleiders, zoals silicium en galiumarsenide, bij extreem lage temperaturen.

Recentelijk is een nieuw materiaal, grafeen, op het toneel van de vastestof fysica verschenen. Deze puur tweedimen-

sionale vorm van koolstof laat een nieuw type van een halfvallig quantum Hall effect zien, dat bij hoge magneetvelden zelfs bij kamertemperatuur zichtbaar blijft. Dit feit alleen al is een veelbelovend uitgangspunt om te onderzoeken of ook grafeen als weerstandsstandaard te gebruiken is.

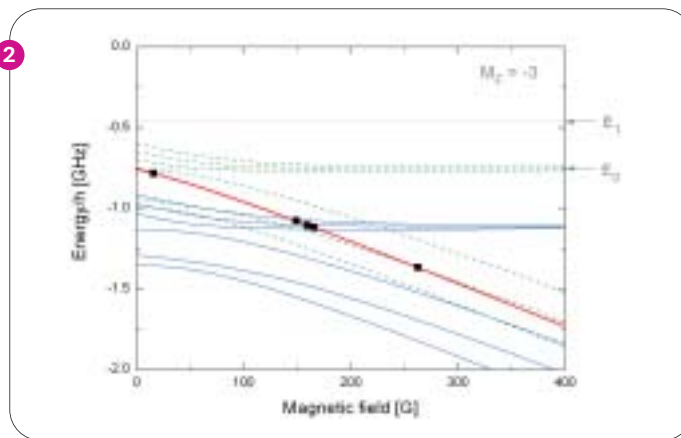
Een samenwerking van het NMI van Swinden Laboratorium in Delft, het High Field Magnet Laboratory in Nijmegen en de Universiteit van Manchester heeft laten zien dat dit inderdaad mogelijk is. De metingen tonen aan dat de quantisatie van de quantum Hall plateaus in grafeen binnen (-5 ± 15) ppm overeenstemt met de in conventionele halfgeleiders gevonden resultaten, $R_H = 12.906,41 \Omega = h/2e^2$; een waarde die alleen door de natuurconstanten h (constante van Planck) and e (elementaire lading) bepaald wordt.

De beperkingen in de nauwkeurigheid van het quantum Hall effect in grafeen worden hoofdzakelijk door de relatief hoge contactweerstand en de kleine dimensie van het specimen veroorzaakt. Een extrapolatie naar bredere samples met lagere contactweerstand zal zonder twijfel precisie metingen in grafeen met een ppb-nauwkeurigheid mogelijk maken. Op termijn is grafeen dan ook bij uitstek geschikt als (hoogtemperatuur) weerstandsstandaard.

Het doel van het FOM-programma "The user facility for high magnetic fields" is het voor gekwalificeerde Nederlandse gebruikers toegankelijk maken van het High Field Magnetic Laboratory (HFML) in Nijmegen. De looptijd van het programma is 2004-2013 en het budget voor die periode bedraagt 3,5 miljoen euro.

De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. J.C. Maan (RU).

Instelbare atomaire krachten



Er zijn maar weinig stoffen waarbij de wisselwerking tussen de atomen naar wens instelbaar is. Deze bijzondere mogelijkheid bestaat in de atomaire quantumgassen. Hierdoor kunnen stoffen gemaakt worden die normaal niet voorkomen. Ook kunnen deze gassen daardoor model staan voor vele fysische systemen, variërend van het elektronengas in vaste stoffen tot quantumvloeistoffen zoals helium en tot op zekere hoogte zelfs voor neutronensterren en kernmaterie. De uitzonderingspositie van de quantumgassen is het gevolg van de extreme gevoeligheid van de elastische botsingen tussen de atomen in zo'n gas voor magneetvelden. Afhankelijk van het magneetveld worden de botsingen al dan niet beïnvloed door kortlevende resonante moleculaire structuren waarbij de atomen korter of langer bij elkaar blijven. Hoewel dit soort resonanties, Feshbach-resonanties genaamd, bekend zijn uit de kernfysica is de rol die zij spelen in de quantumgassen totaal anders. Het grote verschil is dat in de kernfysica de resonantie alleen te exciteren is door keuze van de juiste botsingsenergie, terwijl in de quantumgassen dit mogelijk is bij constante botsingsenergie, door kleine variaties van de wisselwerkingspotentiaal te induceren met een magneetveld. Bij bepaalde velden, de resonantievelden, is verandering van het veld

met (vaak niet meer dan) een Gauss voldoende om de wisselwerking te veranderen van sterk aantrekkend tot sterk afstotend.

In het FOM-programma Quantumgassen richten onderzoekers zich op mengsels van fermionische quantumgassen van lithium-6 en kalium-40, een analogon van het elektronengas in vaste stoffen. Omdat gassen van langzaambewegende identieke fermionen niet thermaliseren is het vinden van Feshbach-resonanties tussen de twee componenten van het mengsel van cruciaal belang om experimenten te kunnen doen bij thermisch evenwicht. Het

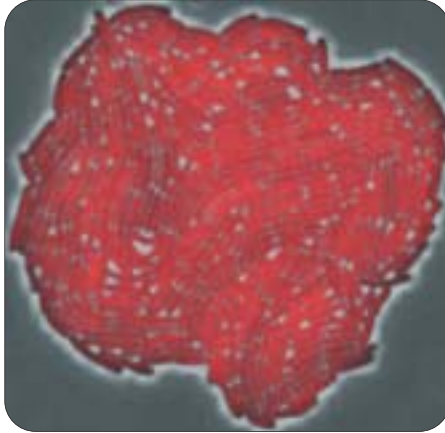
opsporen van deze resonanties is daarom een hoge prioriteit geweest van alle groepen die aan dit mengsel werken. In een internationale samenwerking met het Instituut voor Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI) in Innsbruck en theoriegroepen van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e) en het National Institute for Science and Technology (NIST) in Gaithersburg zijn de onderzoekers erin geslaagd om de Feshbach-resonanties voor het lithium-kaliummengsel in kaart te brengen, waarbij hun bijdrage vooral het karakteriseren van waargenomen resonanties en het voorspellen van nieuwe resonanties was.

Figuur 1. Berekende en gemeten Feshbach-resonanties van het lithium-kalium quantumgas. Blauwe getrokken lijnen, moleculaire s-toestanden; groene onderbroken lijnen, moleculaire p-toestanden. De resonanties (zwarte punten) zijn gemeten daar waar de magnetische energie van de botsende atomen (rode lijn) gelijk is aan die van de moleculaire toestanden.

Figuur 2. Detail van een precisiemagneet voor het meten van Feshbach-resonanties.

Het doel van het FOM-programma "Quantum gases" is het experimenteel en theoretisch bestuderen van eigenschappen van quantumgassen, en het ontwikkelen van nieuwe methoden om met extern aangelegde velden deze gassen te manipuleren en te beheersen. De looptijd van het programma is 2004-2010 en het budget voor die periode bedraagt 3,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. J.T.M. Walraven (UvA).

De kosten en baten van biochemische ruis



De concentratie van een fluorescent eiwit verschilt van cel tot cel in een populatie van *E. Colli* cellen (met dank aan Daan Kiviet en Sander Tans, AMOLF)

Biochemische netwerken, bestaande uit eiwitten en DNA moleculen die chemische en fysische interacties met elkaar aangaan, voeren in levende cellen allerlei taken uit. Metabole netwerken stellen cellen in staat voedsel in bruikbare energie om te zetten, terwijl signaaltransductie- en genetische netwerken het cellen mogelijk maakt allerlei beslissingen te nemen. Recente experimenten hebben laten zien dat deze netwerken vaak veel ruis vertonen: de concentraties van de eiwitten fluctueren vaak sterk. Veel theoretische en experimentele studies hebben de afgelopen jaren in kaart gebracht wat de bronnen van deze ruis zijn. Wat de consequenties van “biochemische ruis” voor de fitness van een organisme zijn, was echter nog niet begrepen.

De groep van Ten Wolde van het FOM-Instituut AMOLF heeft een statistisch fysisch model ontwikkeld dat het mogelijk maakt het effect van biochemische ruis op de groeisnelheid van een populatie van cellen te voorspellen. Het model voorspelt dat wanneer de gemiddelde concentratie van een eiwit op een niveau is dat de groeisnelheid maximaliseert, biochemische ruis de groeisnelheid van de populatie verlaagt: fluctuaties in de eiwitconcentratie drijven het systeem dan bij het optimum vandaan. Verrassender is wellicht

dat ruis ook een positief effect op de fitness van een populatie kan hebben: wanneer de gemiddelde eiwitconcentratie suboptimaal is, zal ruis de groeisnelheid van de populatie verhogen. Dit komt doordat cellen die door een spontane fluctuatie een eiwitconcentratie hebben waarmee ze sneller groeien, zich eerder zullen delen; de dochtercellen erven de eiwitcompositie van hun moeder en zullen daardoor ook sneller groeien en zich eerder delen. Sneller groeiende cellen raken door dit mechanisme oververtegenwoordigd in de populatie, en dit verhoogt de groeisnelheid van de populatie als geheel.

De onderzoekers hebben ook onderzocht wat deze observaties nu betekenen voor het ontwerp van zogenaamde regulatienetwerken – biochemische netwerken die andere netwerken aansturen. Een belangrijk voorbeeld zijn genetische netwerken

die de activiteit van metabole netwerken reguleren. De onderzoekers vonden dat er een *trade off* bestaat tussen de baten van het zo nauwkeurig mogelijk aansturen van het te reguleren netwerk en de kosten die gemoeid zijn met het synthetiseren van het meest optimale regulatienetwerk.

Het doel van het FOM-programma “Structure, function and flow of soft materials” is het versterken van onderzoek in de natuurkunde van zachte gecondenseerde materialen door het bestuderen van structuur en dynamica van zachte materie, het ontwikkelen van theoretische en numerieke methoden om zachte materie te modelleren en macroscopische eigenschappen te voorspellen en door het bestuderen van fysische processen die een rol spelen in de organisatie in ruimte en tijd in bijvoorbeeld levende cellen.

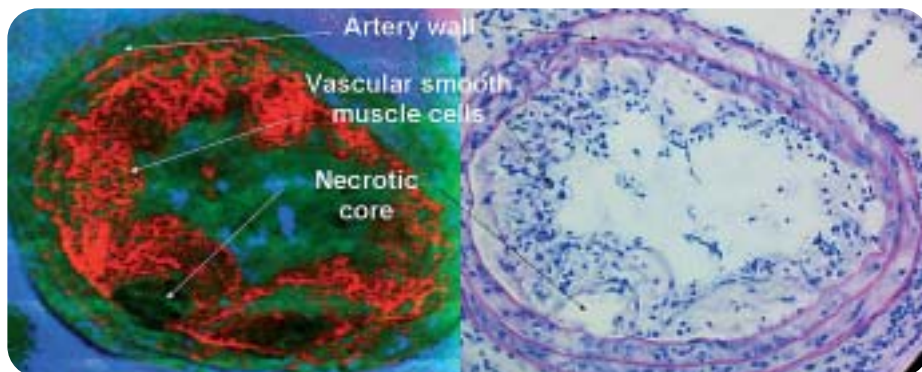
De looptijd is 1999-2008; het budget voor die periode bedraagt 15,9 miljoen euro.

De leiding van het programma is in handen van prof.dr. D. Frenkel (AMOLF).

Atherosclerose in beeld

Atherosclerose is één van de meest voorkomende vaatziekten die gekenmerkt wordt door een verstopping van een bloedvat en vaak een beschadiging van de vaatwand. Jaarlijks heeft deze aandoening een enorme financiële impact op het Nederlandse gezondheidszorgsysteem door de vele hoog-technologische behandelingen en medicatie die bij deze aandoening worden toegepast. In het bijzonder in een gevorderd stadium kunnen bepaalde lipiden (cholesterol e.d.) een risico vormen dat resulteert in het loslaten van een plaque of dat er toe kan leiden dat een vat scheurt. Een gedetailleerde analyse van de lipide samenstelling en de verdeling over de plaque kan een beter inzicht verschaffen in de processen die leiden tot instabiele plaques.

In samenwerking met de afdeling experimentele pathologie van het Academisch ziekenhuis in Maastricht hebben onderzoekers van het FOM-Instituut AMOLF een methode ontwikkeld om de aard en verdeling van de atherosclerotische lipiden direct, zonder gebruik te maken van fluorescente labels, op moleculair niveau in kaart te brengen op histologische weefselcoupes. Op cellulair niveau worden met behulp van imaging massaspectrometrie opnames gemaakt van de verschillende moleculen die zich aan de vaatwand van de halsslagader van een muis hebben vastgezet. Deze moleculaire opnames laten eenduidig zien welke schadelijke lipiden in de verschillende lagen van de plaque zijn opgehoopt. Op basis van de moleculaire markers kunnen de onderzoekers de spiercellen in de vaatwand, een necrotische kern in de plaque, die veel cholesterol en lysofosfatide zuur bevat, direct onderscheiden van de actief groeiende plaque. Door deze studie begrijpen we nu beter welke lipiden op welke plaats in de bloedvaten een rol spelen in de verschillende stadia van atherosclerose.



Een vergelijking tussen een massaspectrometrisch moleculair beeld (links) en een histologisch beeld (rechts) van twee aanliggende weefselcoupes van de halsslagader van een muis. Links zijn de morfologische en distributies in de vaatwand met grote atherosclerotische lesies goed zichtbaar. De verdelingen worden gekarakteriseerd door natrium (blauw), choline (rood) en cholesterol (groen), deze morfologie wordt bevestigd door het histologische beeld.

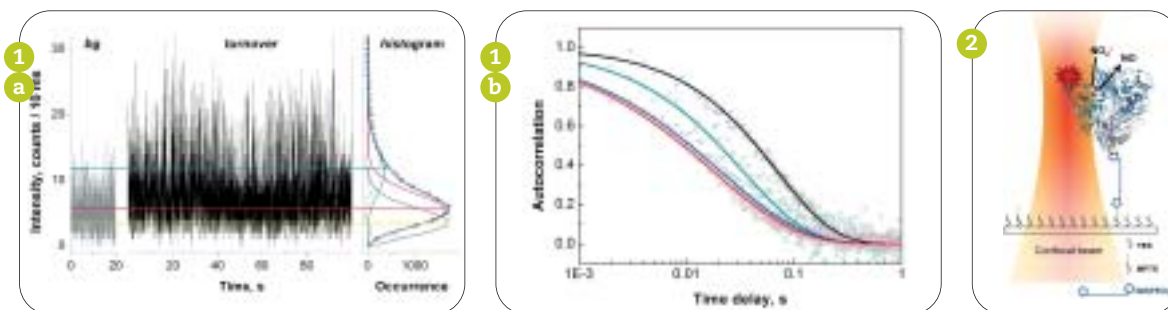
Deze studie was mogelijk door het toepassen van een energetische micro gefocuseerde deeltjes bundel die lokaal een aantal intacte biomoleculen uit het weefsel losmaakt en ioniseert. De ionen worden op hun beurt geanalyseerd met een hoge resolutie massaspectrometer. Door elk punt van de weefselcoupe op deze manier te analyseren kan een lipide-atlas van de vaatwand worden gemaakt. Dit unieke

instrument maakt deel uit van de massaspectrometrische imaging faciliteit op AMOLF. Het onderzoek zoals hier beschreven is een voorbeeld van innovaties in de natuurkunde die direct nuttig kunnen worden toegepast in het biomedische onderzoek, een schoolvoorbeeld van translationeel onderzoek.

Het doel van het FOM-programma "Mass spectrometric imaging and structural analysis of biomacromolecules" is het ontwikkelen van een 'massamicroscoop' als afbeeldend systeem, en het gebruik van laser- en ionenbundels daarbij om structuur van en energierelaties in macromoleculaire complexen te bepalen. Deze nieuwe methode wordt toepasbaar gemaakt voor multidisciplinair onderzoek in celbiochemie, oceanografie en moleculaire studies van kunstvoorwerpen.

De looptijd van het programma is 2001-2008 en het budget voor die periode bedraagt 9,4 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. J.J. Boon (AMOLF).

Een moleculair knipperlicht



Figuur 1. Demonstratie van "single-molecule" detectie van de enzymeactiviteit van nitrietreductase. Figuur 1a. Het tijdverloop van de fluorescentie-intensiteit van één enkel nitrietreductase molecuul zoals het door de microscoop wordt waargenomen. Het laat scherpe fluctuaties zien die worden veroorzaakt door het knippen van de fluorescentie, synchroon met de werking van het enzym, in aanwezigheid van nitriet en ascorbaat als electronacceptor en -donor, respectievelijk; *bg* = achtergrondniveau. Het histogram geeft een fit van de fotonstatistiek met Poisson verdelingen. Het enzym schakelt tussen de geoxideerde en de gereduceerde toestand onder invloed van reacties met nitriet en ascorbaat. Figuur 1b. Autocorrelatie van de fluorescentie bij verschillende nitrietconcentraties. Het effect werd geverifieerd met een inactieve mutant (H145A).

Figuur 2: Een fluorescerend label wordt via een chemische reactie vastgezet aan het enzym, en dit enzym wordt vervolgens door een moleculaire linker (BM(PEO)₃, 1,11-bis-Maleimidotriethyleenglycol) verankerd op een glasplaatje. Vervolgens wordt één nitrietreductase-molecuul in een microscoop beschenen met een sterk gefocuseerde laserbundel. De fluorescentie van het label wordt door het objectief van de microscoop afgebeeld op een supergevoelige licht-detector.

De groep van Aartsma en Canters (LION/LIC, Universiteit Leiden) heeft een nieuw basisprincipe (FluoRox principe) ontwikkeld voor de detectie van de activiteit van redoxenzymen met hoge gevoeligheid. Het berust op het gegeven dat de meeste redoxenzymen een actief centrum bezitten, waarvan de kleur verandert in de aanwezigheid van substraat. Wanneer het enzym gelabeld wordt met een fluorescente kleurstof, blijkt de fluorescentie-intensiteit af te hangen van de kleur van het actieve centrum: het licht gaat aan of uit met respectievelijk de opname of het afgeven van een elektron. Dit effect kan worden toegeschreven aan Förster energieoverdracht (FRET) van het kleurstof molecuul naar het katalytische centrum. Door nu de fluorescentie-intensiteit te meten kan de omzetting van substraat en de enzymeactiviteit worden gevolgd.

Het unieke aspect van de ontwikkelde methode is dat deze zo gevoelig is dat een enzyme-molecuul in zijn eentje waargenomen kan worden terwijl het aan het werk is. Het onderzoek richtte zich op het enzym nitrietreductase, een metaaleiwit dat onder meer een belangrijke rol speelt in de stikstofhuishouding in biosystemen: het zet nitriet (NO₂⁻) om in stikstofmonoxide (NO), één van de stappen in de stikstofcyclus.

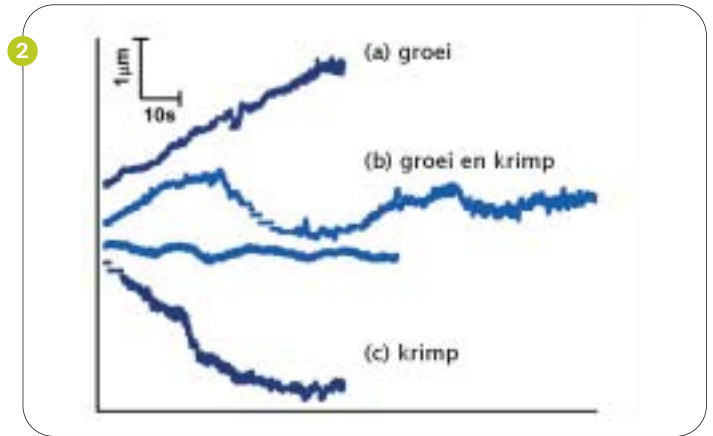
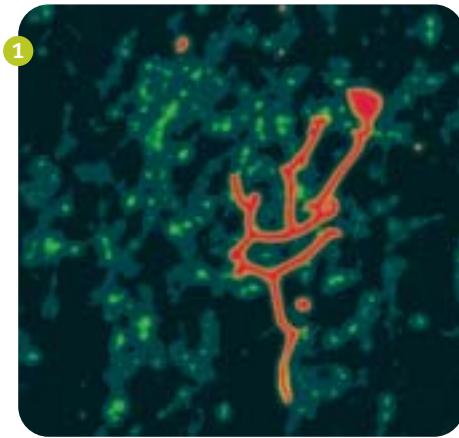
Het doel van het FOM-programma "Biomolecular physics" is vanuit natuurkundig perspectief de werking van biomacromoleculen en hun aggregaten beter te begrijpen. Het programma bestrijkt het gebied van de eigenschappen van afzonderlijke geïsoleerde biomoleculen tot die van spontaan of door sturing gevormde aggregaten en complexen tot op de schaal van de cel. De looptijd van het programma is 2003-2010 en het budget voor die periode bedraagt 4,1 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. B.M. Mulder (AMOLF).

Een typisch resultaat van een dergelijke meting is weergegeven in bijgaande figuur: het tijdverloop van de fluorescentie geeft essentiële informatie over de dynamiek van de enzymeactiviteit. Deze

kan worden gerelateerd aan een gedetailleerd kinetisch model dat het gedrag van het enzym beschrijft. Met name de snelheid van electronoverdracht tussen de twee Cu-centra in het eiwit kon worden bepaald, informatie die niet op een andere manier kan worden verkregen. De waargenomen verdeling van reactiesnelheden is verbonden met variaties in structuur en conformatie rond het katalytische centrum

Patenten voor deze vinding zijn aangevraagd, want het meetprincipe beperkt zich niet tot het model-enzym nitrietreductase. Het is een generieke methode voor het aflezen van de activiteit van alle enzymen die daarbij een verandering van het absorptiespectrum vertonen: de absorptieverandering wordt getransformeerd naar het fluorescentiedomein. Toepassingen in biosensoren zijn in ontwikkeling: fluorescentiedetectie, die bovendien tegen een donkere achtergrond plaatsvindt, blijkt zeer veel gevoeliger dan de gebruikelijke amperometrische meetmethoden.

In één richting stappende moleculaire motoren zorgen voor tweerichtingsverkeer in de cel



Het succesvol transporteren van signalen en vracht door levende cellen is essentieel voor hun functioneren. Deze transporttaak wordt uitgevoerd door moleculaire motoren, eiwitten die maar enkele nanometers groot zijn en die zich in enkele richting over 'snelwegen' (zogenaamde microtubuli) in de cel voortbewegen. Moleculaire motoren transporteren ladingen die bestaan uit materiaal gemaakt van biologische membranen. Dat kan zijn in de vorm van kleine bolvormige membraanblaasjes (met een diameter variërend van enkele tientallen tot enkele honderden nanometers) maar ook in de vorm van lange buisvormige structuren: membraantubes met een diameter van zo'n 25-50 nm en lengte die kan groeien tot enkele

micrometers. In het algemeen kunnen we motoren in twee klassen indelen: processieve en niet-processieve. Processieve motoren kunnen een groot aantal stappen nemen over de microtubule waar ze op lopen voordat ze die loslaten. Er zijn verschillende typen processieve motoren bekend, die in verschillende richtingen kunnen lopen. Niet-processieve motoren zijn inefficiënt en kunnen slechts een enkele stap nemen voordat ze hun microtubule weer moeten loslaten. Wij hebben onderzocht hoe de dynamica van membraantubes die door zulke niet-processieve motoren worden getrokken afhangen van de collectieve dynamica en statistiek van de motoren.

Uit het onderzoek van groep FOM-U-13 bleek dat niet-processieve motoren ook in staat zijn om netto verplaatsingen te creëren

en membraantubes uit grote reservoirs te trekken, terwijl ze lopen over microtubuli. In tegenstelling tot tubes die door processieve motoren getrokken worden blijken deze tubes echter een typisch oscillerend gedrag te vertonen, waarin periodes van groei en krimp elkaar afwisselen. We hebben een model ontwikkeld om dit gedrag te verklaren, waarin we uitgaan van spontane fluctuaties in de dichtheid van de motoren terwijl ze langs de membraantube bewegen. Dat leidt tot de vorming van clusters van motoren, die zowel de snelheid als de lengte van de membraantube reguleren. In combinatie met de spanning in het membraan van de tube zelf kan ons model de experimentele resultaten reproduceren en voorspellen dat het systeem zich altijd zal ontwikkelen in de richting van een gereguleerde tubelengte met fluctuaties.

Figuur 1. Netwerk van membraantubes (rood) gevormd door niet-processieve moleculaire motoren die lopen langs microtubuli (groen).

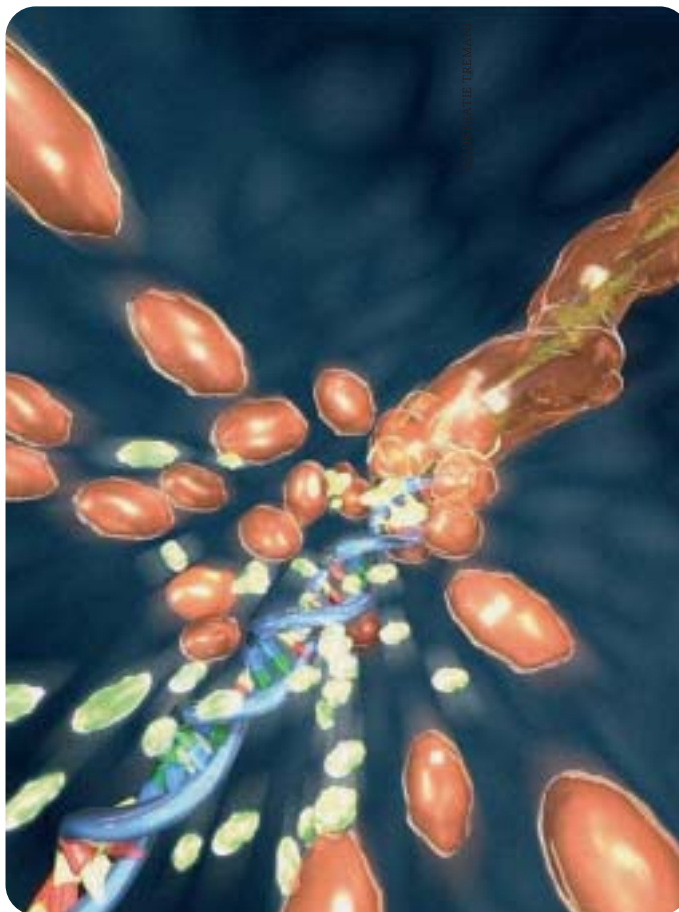
Figuur 2. Zoals te zien is aan de "traces" in de figuur, de beweging van het einde van de tube aangegeven kunnen de tubes groeien (a), krimpen (c) of zich verplaatsen de tubes in twee richtingen (b). De dynamica van dit systeem kan verklaard worden aan de hand van een eenvoudig model waarin clusters van motoren, in combinatie met een (spannings-)kracht in de tube de lengte en snelheid van de tube reguleren.

Het doel van het FOM-programma "Material properties of biological assemblies" is het bestuderen van zulke elementaire cellulaire/biologische materialen als membranen, bouwstenen van het cytoskelet en andere biopolymeren, en in het bijzonder materialen die zijn opgebouwd uit combinaties hiervan. Het programma moet leidende Nederlandse onderzoeksgroepen in de biofysica met elkaar aanvullende expertise bijeenbrengen om het begrip van de onderliggende fysische principes van biologische bouwwerken en hiërarchische materialen te vergroten. De looptijd van het programma is 2005-2010; het budget voor die periode bedraagt 2,1 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. F.C. MacKintosh (VU).

Gipsverband voor gebroken DNA ontrafeld

Onderzoekers van het Physics of the Genome programma van de Vrije Universiteit en het Erasmus MC hebben een essentieel deel van het herstelproces bij DNA-schade weten te doorgronden. Met een unieke combinatie van technieken konden ze het gedrag van reparatie-eiwitten zien onder de microscoop, terwijl ze het DNA stevig vasthielden. De bevindingen stellen de onderzoekers in staat om beter te begrijpen hoe Rad51 beschadigd DNA kan repareren.

Dagelijks raakt ons DNA op miljoenen plekken beschadigd. Gelukkig worden vanuit de meeste beschadigingen tijdig hersteld door een soort mobiel reparatieteam van speciale eiwitten. Gebreken in dit natuurlijke DNA-reparatiesysteem kunnen leiden tot ziektes zoals kanker. De eiwitten die een centrale stap van het herstelproces voor hun rekening nemen, Rad51 genaamd, worden als een soort verband om het beschadigde DNA gewikkeld. Vervolgens gaan zij op zoek naar de 'backup' informatie van het aangetaste DNA-segment. Zodra de backup is gevonden, wordt de DNA-code hiervan gebruikt voor het herstel. Cruciaal daarbij is echter wel dat eerst het aangelegde verband van Rad51-eiwitten weer losgehaald wordt. Hoe dat gebeurt hebben de onderzoekers kunnen ontrafelen door een drietal geavanceerde technieken gelijktijdig toe te passen. Ten eerste maakten ze de minuscule eiwitten onder de microscoop zichtbaar, door ze te laten oplichten met fluorescentie. Daarnaast waren ze in staat om een DNA-streng, met de daaromheen gewikkelde ketens van fluorescente Rad51-eiwitten, aan weerszijden vast te pakken en strak te trekken met zogeheten 'optische pincetten'. Tenslotte hadden de onderzoekers volledige controle over het proces van het uiteenvallen van de Rad51-ketens, doordat ze het DNA vliegensvlug naar een andere vloeistofomgeving konden slepen. Afhankelijk van de vloeistof waarin het DNA zich bevindt, wordt het



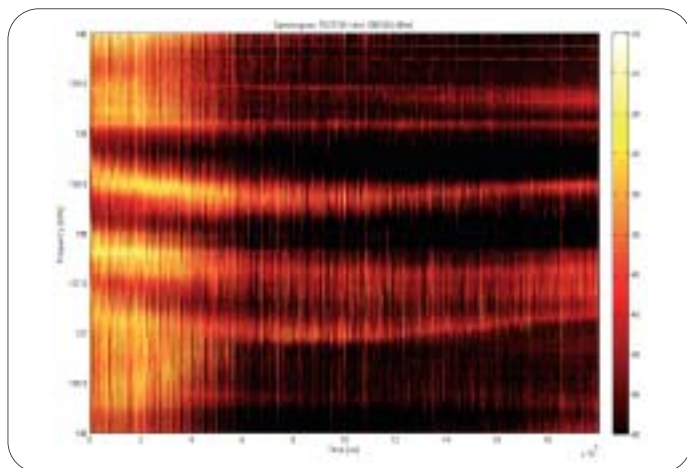
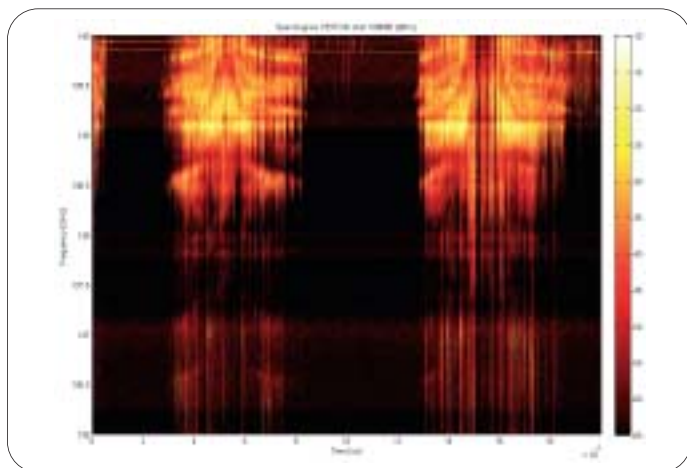
Artistieke impressie van het DNA-gipsverband gevormd door het Rad51-eiwit dat van het uiteinde van strakgetrokken DNA afvalt.

uiteenvallen namelijk gestart of stopgezet. De onderzoeksteams hebben zo ontdekt dat een keten van Rad51-eiwitten alleen vanaf de uiteinden uiteen kan vallen. Verrassend genoeg bleek dat de snelheid waarmee de keten uit elkaar viel afhing

van de trekspanning op het DNA. Deze bevindingen stellen de onderzoekers in staat om beter te begrijpen hoe beschadigd DNA gerepareerd kan worden en zo ernstige gevolgen als kanker kan helpen voorkomen.

Het doel van het FOM-programma "Physics of the genome" is het doorgronden van de fysische mechanismen die DNA organiseren, reguleren en kopiëren. De looptijd van het programma is 2008-2012 en het budget voor die periode is 4,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van dr.ir. G.J.L. Wuite (VU Amsterdam).

Innovatief meet- en controlesysteem vindt nieuw verschijnsel in fusieplasma



Stabilisatie van een magnetisch eiland in de Duitse onderzoeksinstallatie TEXTOR (Forschungszentrum Jülich). Het plasma converteert een deel van de millimetergolven die het eiland moeten stabiliseren naar straling van onverwachte frequentie. Het is nog onduidelijk hoe dit proces wordt veroorzaakt.

Om de prestaties van een fusiereactor te optimaliseren is het belangrijk om turbulente verstoringen in het hete plasma te kunnen opsporen en beïnvloeden. De groep Tokamak Physics van FOM-Rijnhuizen ontwikkelde een techniek om zulke verstoringen met één geïntegreerd apparaat te vinden en te beheersen. En passant ontdekten de onderzoekers een compleet nieuwe interactie tussen het plasma en de millimetergolven die het plasma onder controle houden.

Rijnhuizen heeft een lange traditie in de ontwikkeling van meettechnieken om verstoringen in fusieplasma's op te sporen, zoals waarneming van de karakteristieke infraroodstraling die het plasma uitzendt (ECE - electron cyclotron emission). Ook in het beïnvloeden en beheersen van verstoringen is expertise opgebouwd. Magnetische eilanden, gebieden die door magneetvelden topologisch zijn gescheiden van de rest van het plasma, zijn bijvoorbeeld volledig te beheersen door nauwkeurig gestuurde verhitting en

stroomopwekking in het plasma (ECRH - electron cyclotron resonant heating en ECCD - electron cyclotron current drive).

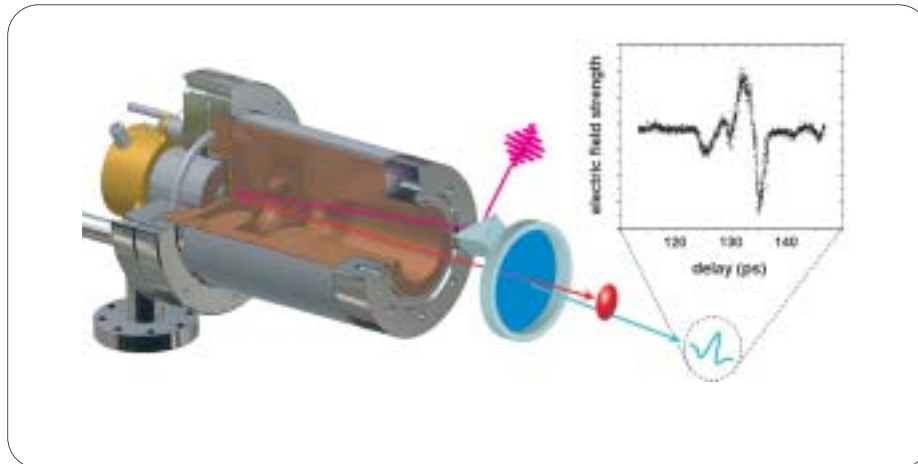
Terwijl de ECRH tot een megawatt het plasma inpompt, probeert de ECE-meting een signaal van honderd picowatt te zien. Onderzoekers van FOM-Rijnhuizen ontwikkelden een subsysteem dat via dezelfde antenne zowel stabiliseert als meet. Dat heeft als voordeel dat het ECRH- en het ECE-sigitaal langs hetzelfde pad door het plasma reizen, zodat het effect van de stabilisatiebundel direct meetbaar is. Om dit te realiseren werd extreem scherpe filtering ontwikkeld waardoor de gevoelige

ECE-radiometer op golflengtes vlak naast de vijftien ordegroottes sterkere ECRH-piek kan meten. De gecombineerde apparatuur is een technisch hoogstandje. In 2008 werd het systeem succesvol getest in de TEXTOR-tokamak van het Duitse Forschungszentrum Jülich.

Als bonus ontdekten de wetenschappers tijdens hun tests van de gecombineerde ECE/ECRH een nieuwe soort interactie van millimetergolven met het plasma. Ze manipuleerden een magnetisch eiland met een bundel millimetergolven en ontdekten dat de bundel daarbij geconverteerd werd naar onverwachte golflengtes. Het verschijnsel hangt sterk af van de eilandlocatie en dat wijst op een nog onbekend effect in het plasma. Het onderzoek van deze nieuwe interactie van magnetische eilanden en millimeterstraling is in volle gang.

Het doel van het FOM-programma "Manipulation of meso-scale structures in hot, magnetised plasmas" is het verkennen en het ontwikkelen van het concept dat hete gemagnetiseerde plasma's op mesoschaal een rijke structuur kennen, en het manipuleren van deze structuur om de macroscopische eigenschappen van het plasma te beheersen. De looptijd van het programma is 2004-2008 en het budget voor die periode bedraagt 4,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. N.J. Lopes Cardozo (Rijnhuizen).

Intense terahertzpulsen uit een compacte elektronenversneller



Ultrakorte elektronenbunch wordt door een folie geschoten en genereert een intense 'single-cycle' terahertzpuls.

Het gebied in het elektromagnetische spectrum met golflengtes van 10 micron tot 1 mm (frequenties tussen 0,3 en 30 THz, aangeduid als terahertz straling of "T-rays") staat momenteel erg in de belangstelling. Vele materialen zijn transparant in dit golflengtegebied, maar metalen en waterhoudende substanties juist niet. Hierdoor zijn er vele interessante, maatschappelijk relevante toepassingen denkbaar: "T-rays" als vriendelijk alternatief voor "X-rays". Te denken valt aan beveiligingsdoeleinden maar ook vroegtijdige diagnose van cariës en van huidkanker. Door tijdopgeloste spectroscopie met breedbandige 'single-cycle' terahertzpulsen kan zowel de identiteit van complexe moleculen vastgesteld worden als dynamica van ladingsdragers in vaste stoffen bestudeerd worden. Terahertzpulsen van voldoende intensiteit bieden bovendien de fascinerende mogelijkheid niet-lineaire quantumverschijnselen te onderzoeken.

Helaas kunnen terahertzpulsen van het gewenste vermogen op het moment alleen geproduceerd worden in grote deeltjesversnellerinstituten of met kostbare terawatt lasersystemen. In de werkgroep FOM-E-04 (TU/e) wordt in het kader van het programma 'Physics for Technology' een compacte alternatieve

techniek onderzocht, waarbij door middel van foto-emissie met femtoseconde laserpulsen ultrakorte elektronenbunches worden opgewekt. Deze bunches worden in een radiofrequente deeltjesversneller van keukentafelmaat naar 99% van de lichtsnelheid gebracht en vervolgens door een dun folie gestuurd, zoals geïllustreerd in de figuur. Als voldoende elektronen samengepakt binnen een (terahertz) golflengte de folie passeren, dan wordt vanwege het coherent optellen van de dan geproduceerde velden een zeer intense terahertzpuls uitgezonden. Dit vereist geavanceerde technieken voor de gecontroleerde versnelling van elektronenbunches met zeer hoge ladingsdichtheid. De Figuur toont een elektro-optische meting van een terahertzpuls, opgewekt met een 70 picocoulomb, 1 picoseconde elektronenbunch. Focussing van dergelijke pulsen tot een spot van de orde van

de golflengte maakt in principe niet-lineaire terahertz experimenten mogelijk.

Onlangs is in Eindhoven een andere veelbelovende methode bedacht. Door elektronenbunches op de punt van een metalen draad te schieten worden hoogvermogen terahertz oppervlaktegolven ('oppervlakteplasmonen') opgewekt, die langs de draad propageren. Als de andere kant van de draad weer in een scherpe punt eindigt, dan worden deze oppervlakteplasmonen daar tot een spot veel kleiner dan de golflengte gefocuseerd. Dit zal leiden tot ongekend hoge terahertz intensiteiten.

Het doel van het FOM-programma "Physics for technology" is het creëren van nieuwe opties voor toekomstige technologieën door het ondersteunen van uitmuntend technisch-fysisch onderzoek, gericht op het verwerven van voldoende controle over fysische processen om deze tot heil van de samenleving te gebruiken.

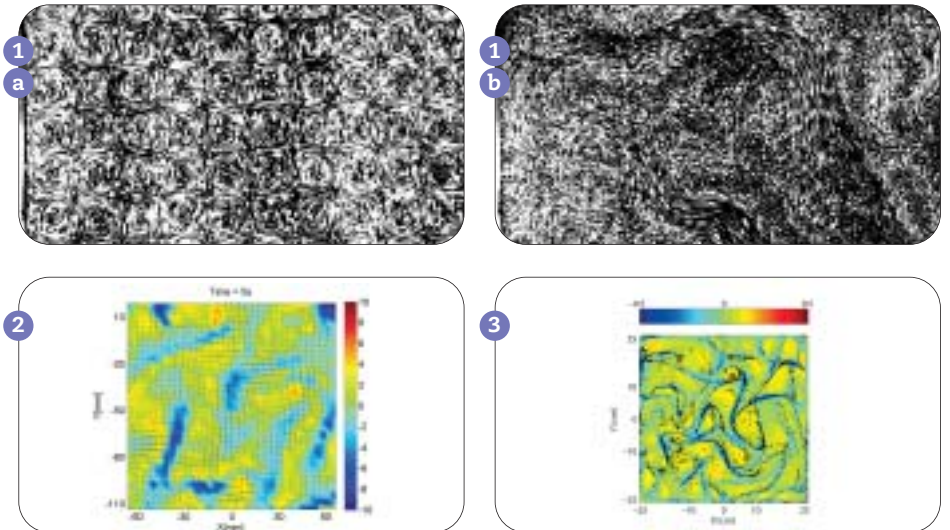
De looptijd van het programma is 1997-2011 en het budget voor die periode bedraagt 20,9 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. P. Kruit (TUDelft), prof.dr.ir. D.C. Schram (TU/e) en dr. M.P.A. Viegiers (Philips Research).

Stroming in ondiepe vloeistoflaag toch driedimensionaal

Ter bestudering van spectrale eigenschappen van tweedimensionale turbulentie zijn er in het recente verleden door diverse onderzoeksgroepen laboratoriumexperimenten uitgevoerd in een horizontale, ondiepe vloeistoflaag. De geringe laagdikte zou impliceren dat de verticale snelheden veel kleiner zijn dan de horizontale snelheidscomponenten. Dergelijke stromingen bezitten weliswaar verticale gradiënten (als gevolg van de plakvoorwaarde aan de vaste bodem onder de vloeistoflaag), maar zouden in goede benadering planair zijn, en daarmee nagenoeg tweedimensionaal.

Experimenten uitgevoerd in de Eindhovense groep FOM-E-16 hebben echter aangetoond dat dergelijke stromingen in een ondiepe laag wel degelijk een significante driedimensionale structuur hebben. De stroming werd hierbij via elektromagnetische forcering opgewekt: de combinatie van een door de vloeistof lopende elektrische stroom en in de bodem aangebrachte permanente magneten resulteert in Lorentz-krachten die de vloeistof in beweging brengen. Bij toepassing van een enkele schijfvormige magneet kan men zo een dipolaire wervelstructuur genereren. Bij een set van 10 x 10 magneten met alternerende polariteit geplaatst in een dambordpatroon wordt een regelmatig cellenpatroon verkregen. In een zuiver tweedimensionale stroming zou dit cellenpatroon bij stopzetten van de forcering dit cellenpatroon snel uiteenvallen en een evolutie vertonen naar een georganiseerde toestand van enkele grotere wervelstructuren die het stromingsdomein grotendeels vullen. Het Eindhovense experiment laat echter een ander gedrag zien, namelijk de vorming van grootschalige meanderende stromingen.

Snelheidsmetingen uitgevoerd met stereoscopische Particle Image Velocimetry brachten aan het licht dat er zelfs lang na uitschakeling van de forcering significante verticale snelheden aanwezig zijn binnen



de vloeistoflaag, en dat deze gelieerd zijn aan de evolutie van het horizontale stromingsveld. Deze verticale snelheden betekenen vervolgens dat de horizontale vloeistofbeweging aan het vrije oppervlak divergent is, dat wil zeggen dat er gebieden zijn waaronder neerwaartse dan wel opwaartse beweging bestaat. Drijvende tracerdeeltjes, losgelaten op dit oppervlak, vertonen dan ook de neiging zich te verzamelen in lijnvormige structuren die samenvallen met gebieden van neerwaartse beweging onder het vrije oppervlak.

Stromingen in een ondiepe vloeistoflaag lijken dus niet geschikt om de karakteristieken van tweedimensionale turbulentie te bestuderen.

Figuur 1. Visualisatie met tracerdeeltjes van stroming in een ondiepe vloeistoflaag met elektromagnetische forcering: (a) tijdens de forcering is het cellenpatroon boven de in een 10 x 10 array geplaatste magneten duidelijk zichtbaar; (b) na stopzetten van de forcering vertoont de stroming een patroon van grootschalige meanders.

Figuur 2. PIV-metingen tonen de structuur van verticale bewegingen in de vloeistoflaag duidelijk aan (rood = opwaartse beweging, blauw = neerwaartse beweging).

Figuur 3. Numerieke simulatie van de beweging van drijvende tracerdeeltjes losgelaten op het vrije oppervlak laten duidelijk zien dat deze zich verzamelen in gebieden waar neerwaartse beweging (aangegeven in blauw) heerst.

Het doel van het FOM-programma "Two-dimensional turbulence" is het beter begrijpen van de dynamische en kinematische karakteristieken van tweedimensionale turbulentie.

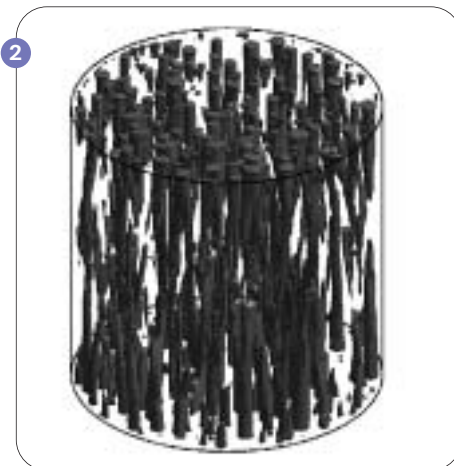
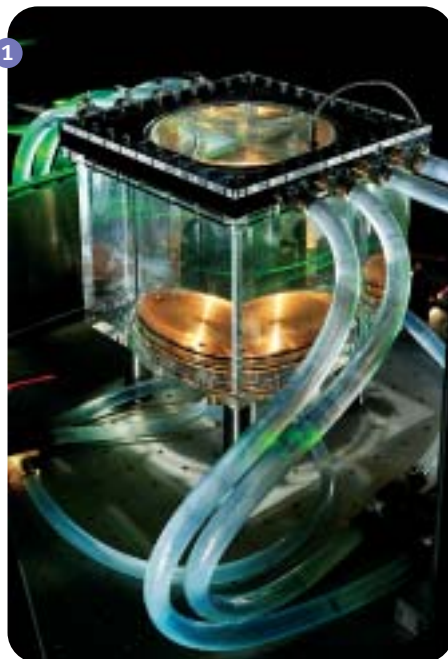
De nadruk ligt daarbij op de zelforganiserende eigenschappen van langzaam vervallende tweedimensionale turbulente stromingen op eindige domeinen en op de chaotisch-transporteigenschappen van opgesloten tweedimensionale turbulente stromingen.

De looptijd van het programma is 1998-2009, het budget voor die periode bedraagt 1,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. G.J.F. van Heijst (TU/e).

Roterende Rayleigh-Bénard convectie

Vele grootschalige geofysische stromingen in de atmosfeer en in de oceanen worden gedreven door zwaartekrachtseffecten en tegelijkertijd beïnvloed door de rotatie van de aarde. Begrip van deze stromingen is belangrijk voor de voorspelling van warmte- en massatransport en daardoor essentieel voor de weersverwachting en klimaatvoorspellingen. Zwaartekracht en rotatie spelen ook een sleutelrol in vele stromingen met technologische toepassingen zoals koelprocessen in roterende machines en gecontroleerde kristalgroei.

Een eenvoudig model voor dit soort stromingen bestaat uit een vloeistoflaag tussen twee horizontale platen waarbij de onderste plaat verwarmd en de bovenste plaat afgekoeld wordt. De warme dus lichtere vloeistof stijgt op en de koude zwaardere vloeistof zal zakken: Rayleigh-Bénard convectie. Bovendien roteert het hele systeem om een as loodrecht op de platen. Het temperatuurverschil (ofwel dichtheidsverschil) leidt dus tot zwaartekrachtsgedreven verticaal transport terwijl de achtergrondrotatie juist probeert verticaal transport te onderdrukken. In de werkgroep FOM-E-16 bestuderen we de competitie van beide effecten door middel van experimenten en numerieke simulaties. Voor dit doel is een optisch toegankelijke cilindrische convectiecel gebouwd (zie figuur 1) waarmee de structuur van de stroming in roterende Rayleigh-Bénard convectie zichtbaar gemaakt kan worden met Stereoscopische Particle Image Velocimetry (SPIV). Hiermee kunnen we



Figuur 1. De Rayleigh-Bénard convectiecel.

Figuur 2. De wervelbuizen in roterende Rayleigh-Bénard convectie.

de stromingssnelheid in een twee-dimensionale (horizontale) doorsnede meten op diverse hoogten in de convectiecel.

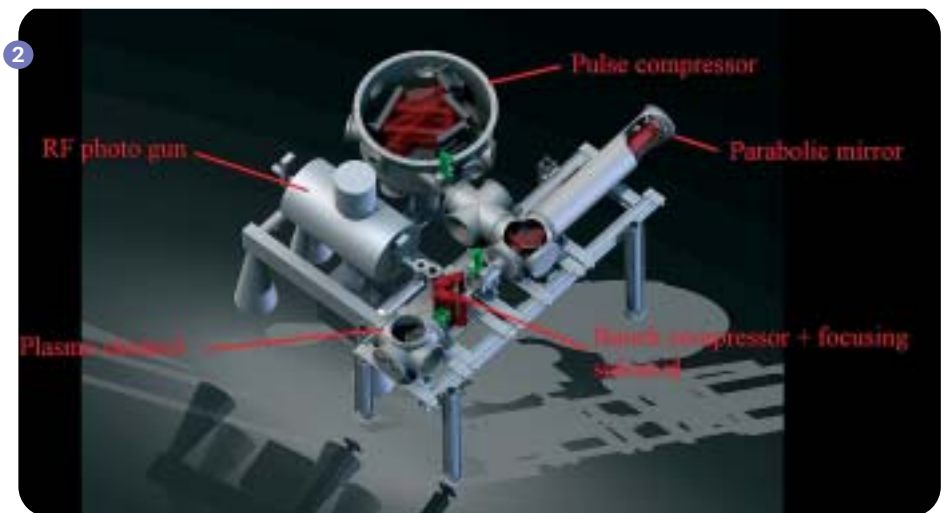
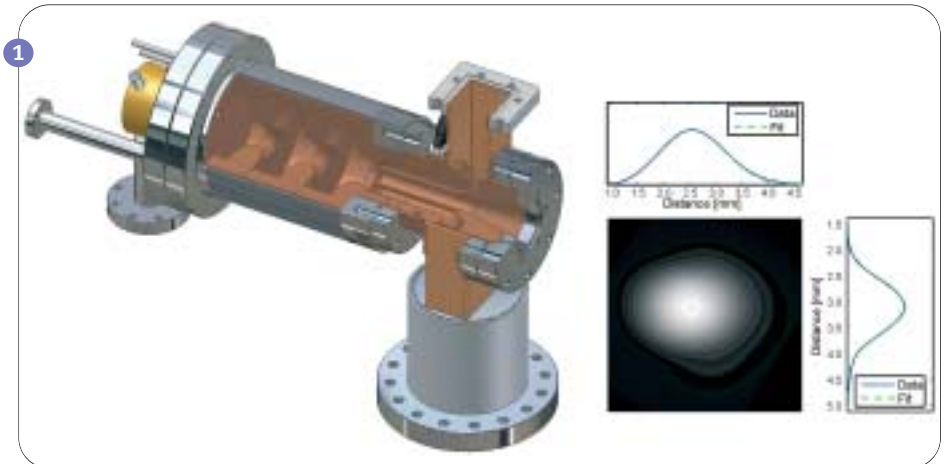
De structuur van de stroming in niet-roterende turbulente Rayleigh-Bénard convectie is tamelijk goed begrepen, waaronder de dynamica van de grootschalige coherente wervel die het verticale transport bepaalt in de convectiecel. Over de rol van achtergrondrotatie op de dynamica van deze wervel en zijn voortbestaan is minder bekend. De SPIV-metingen laten zien dat de structuur van de stroming sterk afhangt van de achtergrondrotatie. Voor lage rotatiesnelheden zal de grootschalige

wervel overleven en een anticyclonale drift vertonen, maar bij hogere rotatiesnelheden zal deze vervangen worden door een aantal verticale wervelbuizen, zie figuur 2. Verticaal transport vindt dan voornamelijk plaats via deze wervelbuizen. Een beter begrip van deze overgang, en de invloed van rotatie op de statistische eigenschappen van turbulente convectie, is mede verkregen met aanvullende numerieke simulaties.

Het doel van het FOM-programma "Turbulence and its role in energy conversion processes" is fundamentele vragen rond turbulente verschijnselen in energieconversie te onderzoeken. Dat moet leiden tot meer inzicht in kwesties als overgang naar turbulentie, ontstaan van stromingsgeïnduceerd geluid, reactiviteit in chemische processen en warmteoverdracht. De looptijd van het programma is 2002-2010 en het budget voor die periode bedraagt 3,6 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. A.A. van Steenhoven (TU/e).

Laser wakefield versneller nabij

In een Laser Wakefield Accelerator (LWA) worden elektronen tot relativistische energieën versneld in 'table-top' opstellingen. Het FOM-programma 55 richt zich op externe injectie van elektronen in een laser-gedreven plasmagolf, een benadering die veel betere reproduceerbaarheid belooft dan alle andere schema's. De experimenten in dit programma hebben zich toegelegd op twee complementaire benaderingen voor de injectie van elektronen: injectie achter de laserpuls aan de TU/e en injectie vóór de laserpuls aan de Universiteit Twente. In de afgelopen jaren zijn de RF-versnellers en bundellijnen gebouwd die speciaal ontworpen zijn om deze injectieschema's toe te kunnen passen. In 2008 zijn in beide instituten de eerste elektronen-bunches geproduceerd en zijn de eigenschappen ervan bepaald die bevestigen dat externe injectie van elektronen een realistische optie is voor LWA. In een eerder stadium van het programma is in het FOM-Instituut voor Plasmafysica 'Rijnhuizen' een 'plasmakanaal' ontwikkeld dat laserpulsen over een afstand van 5 cm kan geleiden. Deze technologie is inmiddels overgedragen aan de Technische Universiteit Eindhoven en aan de Universiteit Twente. Een laserpuls van 2 tot 20 TW wordt in dit plasmakanaal gefocuseerd tot enkele tientallen micrometers waardoor achter de laserpuls een 'hekgolf' van plasma-elektronen ontstaat. De extern geïnjecteerde elektronen zullen in deze hekgolf worden versneld van 3-6 MeV naar 100-1000 MeV. De meest kritische 'issues' zijn de uitlijning en stabiliteit



op micrometerschaal van de overlap van elektronen- en laserbundel in het plasma. In het najaar van 2008 zijn de eerste experimenten in gang gezet om de drie ingrediënten van LWA, de laser, het plasma en

de injector te integreren tot één compacte versneller.

Figuur 1. De lage-emittantie RF foto-injector ontwikkeld aan de TUE met een opname van één van de eerste elektronen-bunches.

Figuur 2. De complete LWA opstelling op de Universiteit Twente.

Het doel van het FOM-programma "Laser wakefield accelerators" is het bestuderen van de fysica en het realiseren van de bouw van een compacte plasmaversneller voor elektronen-energieën van enkele honderden MeV. Het resultaat moet een bundel zijn met een kwaliteit die een 'single pass' vrije-elektronenlaser in het XUV kan aandrijven.

De looptijd van het programma is 2001-2008 en het budget voor die periode bedraagt 3,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. M.J. van der Wiel (TU/e).

Convectie in vertikaal geschudde granulaire materie: succes voor de hydrodynamische beschrijving

Figuur 1. Bouncing bed: Voor een schudsterkte iets boven de 1g zal het hele bed als één geheel op en neer gaan stuiteren, vandaar de benaming bouncing bed.

Figuur 2. Undulations: Vanuit het bouncing bed ontwikkelen zich staande golven wanneer de schudsterkte iets wordt opgevoerd.

Figuur 3. Granular Leidenfrost Effect: Boven een kritische schudsterkte vinden we het granulaire Leidenfrost effect dat gekarakteriseerd wordt door een dicht opeengepakt cluster van langzame deeltjes bovenop een laag met slechts enkele, zeer snelle deeltjes.

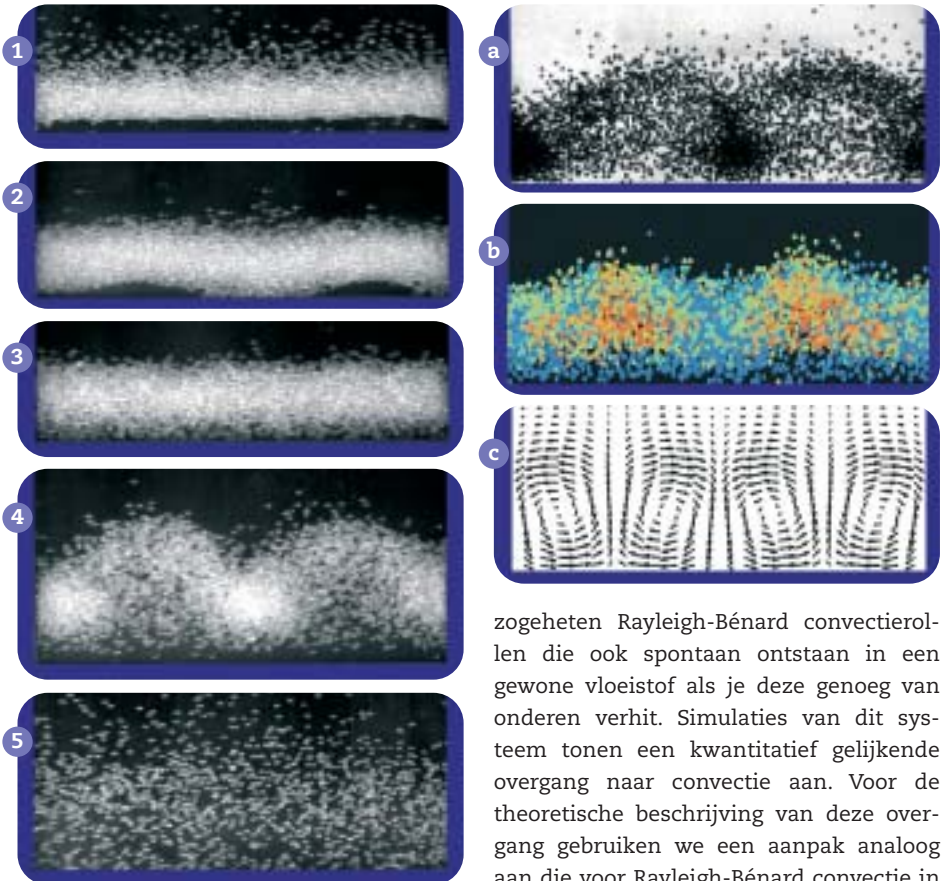
Figuur 4. Convection: Voor een nog hogere schudsterkte ontstaan er vanuit het Leidenfrost effect convectierollen, die zeer veel gelijkenis vertonen met de Rayleigh-Bénard convectierollen die ontstaan wanneer je een gewone vloeistof van onderen verhit.

Figuur 5. Gas: Wanneer het systeem zeer hard geschud wordt, zullen ook de convectierollen verdampen en zo zal een granulaair gas overblijven, waarin de deeltjes kris-kras door elkaar bewegen.

De resultaten voor granulaire convectie uit het experiment (a) hebben we exact kunnen reproduceren met simulaties (b) en ook met theorie (c). Dit betekent een groot succes is voor de beschrijving van granulaire systemen met hydrodynamische modellen.

Binnen het onderzoek aan granulaire, korrelvormige materie is de centrale vraag vandaag de dag in hoeverre de waargenomen effecten te beschrijven zijn met hydrodynamische modellen. Deze vraag behandelen wij voor granulaire materie die sterk vertikaal geschud wordt.

Boven een zekere schudsterkte zweeft een cluster van opeengepakte, trage deeltjes op een dunne, gasachtige laag van snelle deeltjes. Dit noemen we het granulaire Leidenfrost effect, analoog naar het 'originale' Leidenfrost effect, waarbij een druppel water minutenlang boven een vol-



doende hete plaat kan blijven zweven op zijn eigen laagje waterdamp. De experimentele resultaten blijken succesvol beschreven te kunnen worden door een hydrodynamisch model.

Bij nog hogere schudsterktes kunnen er vanuit het granulaire Leidenfrost effect convectierollen ontstaan, net zoals de

zogenoeten Rayleigh-Bénard convectierollen die ook spontaan ontstaan in een gewone vloeistof als je deze genoeg van onderen verhit. Simulaties van dit systeem tonen een kwantitatief gelijkende overgang naar convectie aan. Voor de theoretische beschrijving van deze overgang gebruiken we een aanpak analoog aan die voor Rayleigh-Bénard convectie in een vloeistof: het uitvoeren van een lineaire stabiliteitsanalyse op het hydrodynamisch model van de beginsituatie, het Leidenfrost effect. De theoretische resultaten komen exact overeen met de experimenten en simulaties. Deze kwantitatieve beschrijving van een tijdsafhankelijk, dynamisch granulaair systeem is een groot succes voor het modelleren van granulaire materie met hydrodynamica.

Het doel van het FOM-programma "Physics of granular matter" is de fysica van granulaire materie te verkennen en het gedrag van die materie te begrijpen. Er zijn drie hoofdvragen: wat zijn de ordeparameters die granulaire materie karakteriseren, welke voorwaarden staan continue beschrijving van granulaire materie toe en hoe kunnen statistische fluctuaties in granulaire materie worden gekarakteriseerd. De looptijd van het programma is 2004-2013 en het budget voor die periode bedraagt 4,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. D. Lohse (UT).

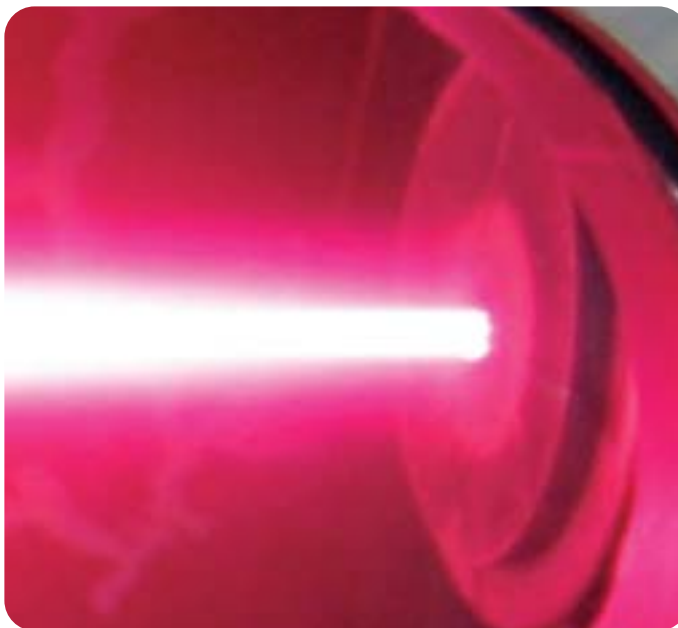
Wandmateriaal fusiecentrales vangt nauwelijks plasma af

Halverwege de eeuw moet kernfusie elektriciteit aan het net gaan leveren. Over tien jaar al gaan experimenten van start in de internationale onderzoeksinstallatie ITER, de eerste fusiereactor die veel meer vermogen op zal wekken dan hij verbruikt. Een van de grote uitdagingen is daarbij om de interactie te begrijpen tussen de reactorwand en intense stroom van deeltjes die op de wand komt – de waterstofisotopen deuterium en tritium die de brandstof van de fusiereactor vormen.

Een belangrijke open vraag is hoeveel van deze gassen in het metaal van de wand wordt opgenomen. Dat kan afhangen van het materiaal zelf, de temperatuur, verontreinigingen en de intensiteit van de belasting. Vooral de opname van tritium moet beter begrepen worden, omdat deze zwakke bètastraler onder regelgeving voor radioactieve stoffen valt.

Het FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen in Nieuwegein kan als een van de weinige laboratoria ter wereld de extreme condities bij de wand van een fusiereactor nabootsen, in het laboratoriumexperiment Pilot-PSI. Hierin wordt een intense straal geïoniseerd waterstofgas – een plasma – van tien- tot vijftigduizend graden magnetisch gebundeld en naar een testplaat geleid.

In Pilot-PSI is voor het eerst aangetoond dat beoogde wandmaterialen als wolfram en molybdeen zelfs bij de meest extreme omstandigheden in onderzoeksreactor ITER de opnamelimiten voor deuterium en tritium niet overschrijden. Volgens de Rijnhuizen-onderzoekers zorgt juist de hoge oppervlaktetemperatuur die het wolfram door de intense plasmabundel krijgt ervoor, dat het metaal maar zeer weinig gas vasthoudt. Goed nieuws voor ontwerpers van commerciële fusiecentrales, waarin de hele reactorwand op hoge temperatuur wordt gehouden.



Een bundel waterstofplasma in het experiment Pilot-PSI valt op een metalen target.

Ook is aangetoond dat de mogelijke depositie van laagjes lichte elementen, zoals koolstof en boor, de totale opname van fusiebrandstof niet boven de vastgestelde grenzen brengt. Die stoffen zouden in principe veel deuterium en tritium kunnen opnemen.

Onderzoekers hebben al veel meetgegevens verzameld over de opname van deuterium en tritium in de beoogde wandmaterialen van fusieinstallaties. Pilot-PSI heeft dat proces voor het eerst onderzocht bij de temperatuur en deeltjesdichtheid die in toekomstige commerciële fusiereactoren heersen. Deze resultaten hebben

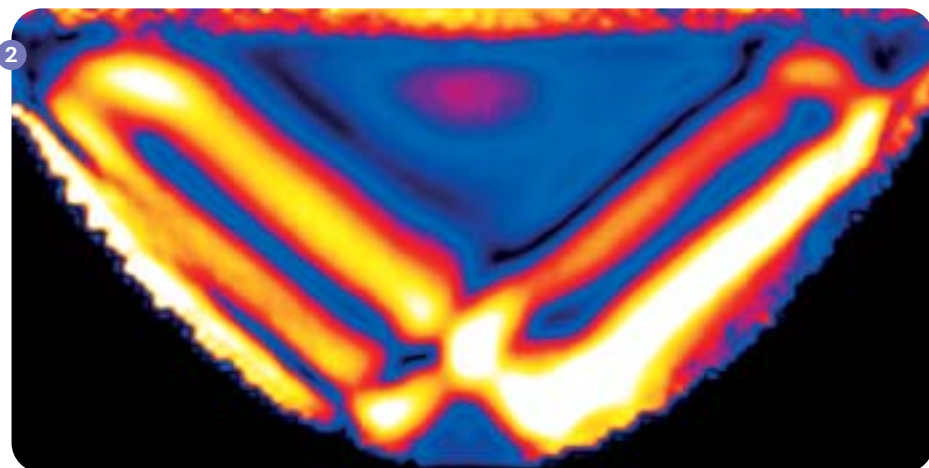
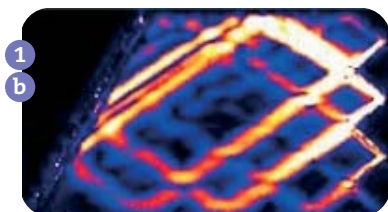
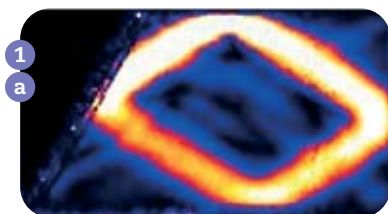
direct hun weg gevonden naar modellen van de reactorwand van ITER.

In 2009 start FOM-Rijnhuizen een nog ambitieuzer experiment. Magnum-PSI, de grote broer van Pilot-PSI, heeft een bredere, intensere en hetere plasmabundel en kan in steady state worden bedreven. Daardoor is in een dag het effect op de reactorwand te onderzoeken van een maandenlang verblijf in ITER. De unieke mogelijkheden van Magnum-PSI maken de installatie aantrekkelijk voor internationale onderzoeksgroepen die de plasma-wand-interactie in toekomstige fusiereactoren bestuderen.

Het doel van het FOM-programma "PSI-lab: an integrated laboratory on plasma-surface interaction" is de interactie tussen intense deeltjes- of fotonenfluxen en het oppervlak van materialen in een fundamentele benadering te bestuderen. Een belangrijk doel is toegang te krijgen tot het sterk gekoppelde regime waarin deeltjes die van het oppervlak komen in het systeem blijven en zo de wisselwerking tussen plasma en wand bepalen.

De looptijd van het programma is 2004-2015 en het budget voor die periode bedraagt 19,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. A.W. Kleyn en prof.dr. N.J. Lopes Cardozo (beiden Rijnhuizen).

Interne golfpatronen



In oceanen neemt het zoutgehalte, en dus de dichtheid, van water toe met de diepte. Aangedreven door het getij kunnen hierdoor onderwatergolven ontstaan. Deze interne zwaartekrachtsgolven worden in de vorm van golfbundels bijvoorbeeld waargenomen in de buurt van zeebergen. Interne golven worden met name bestudeerd omdat zij mogelijk een verklaring kunnen geven voor de onverwacht sterke menging van oceanen op grote diepte, een van de grootste openstaande vragen in de hedendaagse oceanografie. Experimenteel kunnen interne golven worden opgewekt door een watertank gevuld met uniform gelaagd, zout water periodiek te 'schudden'. Opeenvolgende reflecties van golfbundels aan de wanden van de tank kunnen ervoor zorgen dat de golfenergie zich ophoopt op een gesloten baan, de zogenaamde golfaantrekker. Het karakter van het door deze aantrekker gevormde patroon hangt sterk af van de geometrie van de tank (figuren 1 en 2).

In het kader van het 'Dynamics of Patterns' programma wordt door drie instituten samengewerkt om de structuur en de dynamica van interne golfpatronen te bestuderen. Het onderzoek vindt plaats op het Centrum Wiskunde & Informatica in Amsterdam, het Koninklijk Nederlands

Figuur 1. Zijaanzicht van de energieverdeling in een smalle, en dus als tweedimensionaal te beschouwen, tank met aan de linkerkzijde een schuine wand en aan de rechterzijde een rechte (1a) of zaagtand-wand (1b). De kleuren geven aan dat er alleen lokaal een (sterke) golfbeweging wordt waargenomen (wit/geel), een groot deel van het water beweegt nauwelijks.

Figuur 2. De energieverdeling in een parabolische goot, loodrecht op de richting van de goot. De beweging is wederom sterk gelocaliseerd. De aantrekker heeft een tweedimensionale structuur, terwijl de goot driedimensionaal is.

Instituut voor Zeeonderzoek op Texel en aan de Universiteit van Cambridge in Engeland, waar de laboratoriumexperimenten worden uitgevoerd.

De terugkoppeling van de golfbundels op de vloeistofdynamica is in essentie nog onbegrepen en vormt daarom een van de belangrijkste uitdagingen binnen het

onderzoek. Uit een combinatie van metingen en wiskundige analyse blijkt dat interne golven op een langere tijdschaal aanleiding geven tot netto transport: horizontaal in de richting van de aantrekker, en verticaal langs de aantrekkerbundels. Dit mechanisme kan inderdaad een verklaring geven voor menging.

Het doel van het FOM/GBE-programma "Dynamics of patterns" is door theoretisch en experimenteel onderzoek bij te dragen aan het fundamentele begrip van specifieke niet-lineair dynamische verschijnselen van ruimtelijk uitgestrekte systemen, van breed belang voor die terreinen van de wetenschap waar de dynamica inherent complex is en een samenspel van met elkaar wedijverende effecten. De looptijd van het programma is 2005-2010 en het FOM-deel van het budget voor die periode is 0,8 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. W. van Saarloos (LEI) en prof.dr. A. Doelman (CWI).

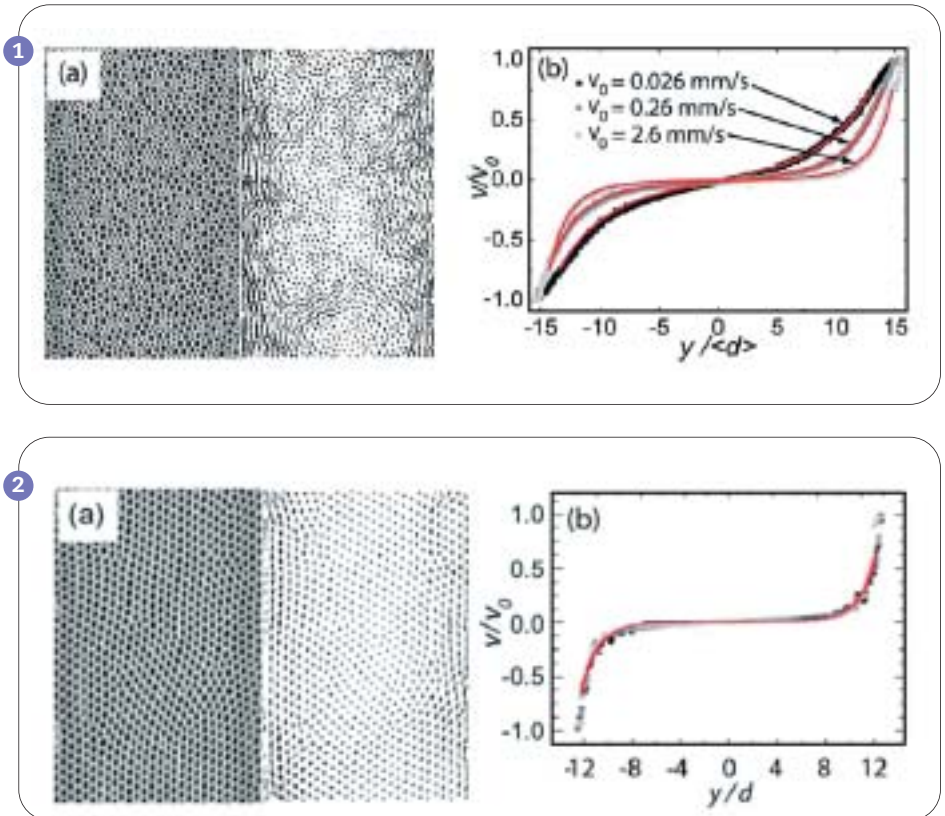
Gejammed en vloeiend gedrag van yield stress vloeistoffen ontrafelen

Scheerschuim en mayonaise stromen als je dit op je kin of boterham smeert, maar kunnen ook eenvoudig hun eigen gewicht dragen, zoals wanneer je een bergje schuim of mayonaise maakt. Deze mengeling van vast en vloeiend gedrag typeert een brede klasse van wanordelijke materialen, die 'yield stress fluids' genoemd worden. Zulke materialen vinden veel toepassingen in de industrie (boor vloeistoffen, cosmetica, voeding), juist doordat zij zich elastisch gedragen voor kleine krachten, maar vloeien bij grotere krachten (denk aan tandpasta). De overgang van hun 'vloeiende' naar hun 'vaste' fase wordt de 'jamming'-overgang genoemd, een goed Nederlands woord is hier niet voor.

Het FOM-programma "Jamming and Rheology" dat eind 2007 is goedgekeurd heeft tot doel de transitie tussen gejammed en vloeiend gedrag van deze yield stress vloeistoffen te ontrafelen. Motivatie is dat het gedrag van deze materialen nog steeds slecht begrepen en slecht te voorspellen is, en dat deze materialen daarbij razend interessante dynamica vertonen.

Wat is de relatie tussen de krachten tussen individuele schuimbellen en het globale stromingsgedrag van schuim? Dit is de kernvraag van een recent project aan de universiteit Leiden waar een tweedimensionaal schuim, bestaande uit gasbelletjes die tussen een zeepsoplossing en een glasplaat zijn gevangen, door middel van bewegende zijwanden tot stroming wordt gebracht.

Zowel de microscopische bellenbeweging als het globale stromingsgedrag hangt sterk af van de mate van orde in het schuim: wanordelijke schuimen vertonen stromingsgedrag dat essentieel verschilt van dat van ordelijke schuimen, en vanwege de ingewikkelde stromingen in wan-



Figuur 1. In een wanordelijk schuim organiseert de beweging van de bellen zich in kolken (a), terwijl de gemiddelde stromingsprofielen afhangen van de aandrijfsnelheid (b).

Figuur 2. In een ordelijk schuim is de bellenbeweging rechttoe rechtaan (a) en de stromingsprofielen hangen niet langer van de aandrijfsnelheid af (b).

ordelijk schuim komt hun globale stromingsgedrag niet overeen met wat op grond van de individuele interacties tussen bellen verwacht zou worden. Wanorde is dus essentieel, en leidt zelfs tot nieuw, niet-evenwichtskritisch gedrag, zoals we nu ook zien in schuimsimulaties waarin

de volledige complexe trajectories van de bellen worden meegenomen. Gewapend met dit numerieke model en experimenten aan schuivend schuim, zijn we nu in staat een heel nieuw aspect van de jamming-overgang, namelijk de stroming van wanordelijke materialen, aan te pakken.

Het FOM-programma "Rheophysics: Connecting jamming and rheology" heeft tot doel de transitie tussen gejammed en vloeiend gedrag van yield stress vloeistoffen te ontrafelen. De looptijd van het programma is 2008-2013 en het budget bedraagt 2,8 miljoen euro. Prof.dr. M. van Hecke heeft de leiding.

Tabel 2 [deel I]. Goedgekeurde Industrial Partnership Programmes per 31 december 2008

nr.	titel	periode	totaal gemiddeld		organisatie-eenheid
			FOM- budget ¹⁾	budget/ jaar ¹⁾	
Industrial Partnership Programmes					
I03.	Evolution of the microstructure of materials (together with M2i and various industrial partners)	1999-2008	7,2	0,7	BUW
I04.	Dispersed multiphase flow (together with STW and various industrial partners)	2000-2010	4,8	0,4	BUW
I06.	The physics of fluids and sound propagation (together with Shell)	2003-2010	2,2	0,3	BUW
I07.	Sustainable hydrogen (together with ACTS and various industrial partners)	2003-2009	1,6	0,2	BUW
I08.	Microphotonic light sources (together with Philips)	2005-2010	1,8	0,3	AMOLF
I09.	Joint Solar Programme (together with Shell, Nuon and CW)	2005-2013	7,2	0,8	BUW
I10.	Extreme UV multilayer optics (together with Carl Zeiss)	2005-2010	7,9	1,3	Rijnhuizen
I11.	Metrology with frequency comb lasers (together with NMI, TNO and ASML)	2006-2010	1,1	0,2	BUW
I13.	Fundamentals of heterogeneous bubbly flow (together with Akzo Nobel, Corus, DSM, Shell)	2007-2012	1,0	0,2	BUW
I14.	Microscopy and modification of nano-structures with focused electron and ion beams (together with FEI Electron Optics6)	2007-2011	2,7	0,5	BUW
I15.	Size dependent material properties (together with M2i and various industrial partners)	2008-2012	2,0	0,4	BUW
I16.	Innovative physics for oil and gas (together with Shell)	2008-2014	4,5	0,6	BUW
I18.	Magnetocaloric materials not only for cooling applications (together with BASF)	2008-2012	1,3	0,2	BUW
I19.	Bio(-related) materials (together with DPI, TIFN and various industrial partners)	2008-2013	5,0	0,7	BUW

1) bedragen in M€ en inclusief / in cash / bijdrage van participerende bedrijven.

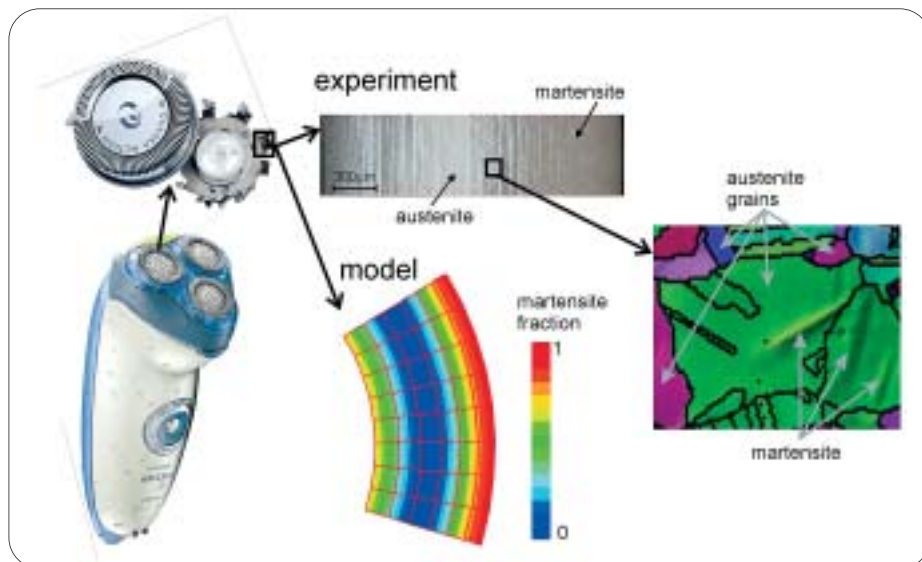
Opmerking.

Het getal vóór de titel van elk programma is het programmanummer. Hoe hoger het getal, hoe jonger in de regel het programma.

Scheermesjes onder de loep: multi-schaal analyse van metastabiele materialen

Metastabiel austenitisch roestvrijstaal is één van de meest geavanceerde staalsoorten, met een uitstekende combinatie van sterkte en vervormbaarheid. De opmerkelijke mechanische eigenschappen van dit materiaal op productniveau zijn een directe uiting van het onderliggende complexe gedrag op microniveau. Het belangrijkste kenmerk is de austeniet-naar-martensiet fasetransformatie die optreedt tijdens het vervormen van het materiaal bij kamertemperatuur. Deze transformatie is een buitengewoon complexe functie van de gebruikte legeringselementen, procesparameters, lokale rekpaden en spanningstoestanden. Om kwantitatieve en nauwkeurige voorspellingen te maken van het productieproces, moet de interactie tussen de fysische fenomenen op diverse schalen onderzocht en begrepen worden. Aan dit onderzoek op drie gekoppelde schalen werd door drie universiteitspartners (TU Delft, TU Eindhoven en UTwente) en één industriële partner (Philips CL) een bijdrage geleverd. Het metaalkundige onderzoek (TUD-TU/e) heeft laten zien dat de variabiliteit in het transformatiegedrag niet triviaal herleid kon worden tot samenstellingsfluctuaties. Mechanische spectroscopie geeft interessante informatie over het transformatiegedrag tijdens gecontroleerde afkoeling geleverd, waarbij de verschillende stadia in het transformatiegedrag konden onderscheiden worden. Transformatiemetingen bij hoge magneetvelden (tot 20 T) lieten een 1000-voudige versnelling van de transformatie zien. De transformatiekinetiek als functie van temperatuur en magnetische veldsterkte werd in een nieuw integraal model beschreven, met een uit-

Numeriek-experimentele multischaal analyse van de mechanisch geïnduceerde martensitische transformatie in metastabiele metalen, zoals gebruikt in de productie van scheermesjes en scheerkapjes.



stekende fysische onderbouwing van de parameters. Het werk aan de TU/e richtte zich voornamelijk op het ontwikkelen van een microschaal model van de austeniet-martensiet transformatie met inbegrip van de intrinsieke interactie tussen transformatie en plastische deformatie. Het model overbrugt drie lengteschalen: het polykristal, de austenietkorrel, de kleine transformerende austeniet-martensiet domeinen. Het model kan de effecten van de korreloriëntatie, de spanningstoestand en de plasticiteit van austeniet goed beschrijven. Aanvullend werd er experimenteel mechanisch onderzoek verricht voor model input en verificatie. Het model op de macroschaal (UT) is gebaseerd op

het spanningsgeïnduceerde transformatieconcept in tegenstelling tot de vaak gebruikte vervormings-martensiet gebaseerde modellen. De bereikte resultaten met dit macromodel bleken heel bevredigend, te meer omdat de gerealiseerde metingen met beduidend minder parameters beschreven werden. Het resulterende model combineert een consistent transformatieplasticiteitsmodel met een efficiënte homogenisatiemethode. De resultaten van het hele project hebben een waardevol inzicht opgeleverd in het complexe multi-schaal gedrag van deze bijzondere staalsoort. De ontwikkelde modellen worden inmiddels verder toegepast voor proces- en productoptimalisatie.

partners: M2i, *verscheidene bedrijven*

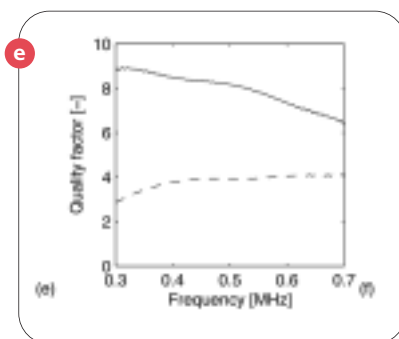
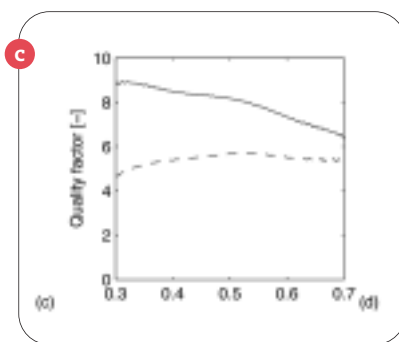
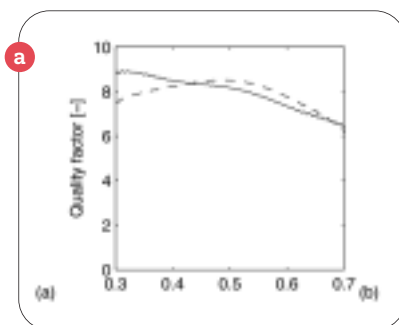
Het doel van het Industrial Partnership Programme "Evolution of the microstructure of materials" is de bestudering van de evolutie van de microstructuur van materialen tijdens verwerking, bewerking en gebruik. In het bijzonder gaat de aandacht uit naar het begrijpen van de dynamische relatie tussen die microstructuur en de mechanische eigenschappen. Dit is cruciaal voor het ontwerp van materialen met microstructuren die optimale eigenschappen opleveren voor specifieke toepassingen. De looptijd van het programma is 1999-2008. Het budget voor die periode bedraagt 7,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. E. van der Giessen (RuG).

Meer seismische demping door gasbellen in de ondergrond?

Seismisch onderzoek wordt in de olie-industrie altijd gebruikt om een beeld te krijgen van de ondergrond. Net als vleurmuizen met hoogfrequent geluid hun omgeving in beeld brengen, kijken seismologen met laagfrequent geluid in het binnenste van de aarde. Het zal duidelijk zijn dat kennis omtrent het gedrag van de golfvoortplanting in de ondergrond essentieel is om een juist beeld te verkrijgen.

Het probleem is dat er goede modellen bestaan om de snelheden van de golven uit te rekenen, maar dat we nog geen goede theorie hebben om de demping correct te kunnen voorspellen. De gedachte is dat die demping veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van bijvoorbeeld kleine gasbellen die achterblijven in de porievloeistoffen. Om deze hypothese ook in het laboratorium te testen injecteren we kleine hoeveelheden lucht in een gesteentemonstertje. Het gesteente bestaat uit gesinterd glas dat doorzichtig wordt als we een porievloeistof kiezen met dezelfde brekingsindex als die van het glas. Enkele foto's zijn getoond in figuur b, d, f.

Aan de ene kant van het monstertje plaatsen we nu een geluidsbron, en aan de andere kant een ontvanger. De demping van het geluid door het monstertje wordt nu gemeten als functie van de hoeveelheid geïnjecteerd gas (figuur a, c, e). De demping wordt uitgedrukt als de "Quality factor". Hoe hoger deze factor, des te beter de kwaliteit, en dus des te minder demping. De doorgetrokken lijn in elke grafiek geeft de meting weer zonder geïnjecteerd gas en dient als referentie. De gestippelde lijnen zijn de metingen met gas. Duidelijk zichtbaar is dat bij toenemende hoeveelheid gas de "Quality factor" afneemt, en dus de demping toeneemt.

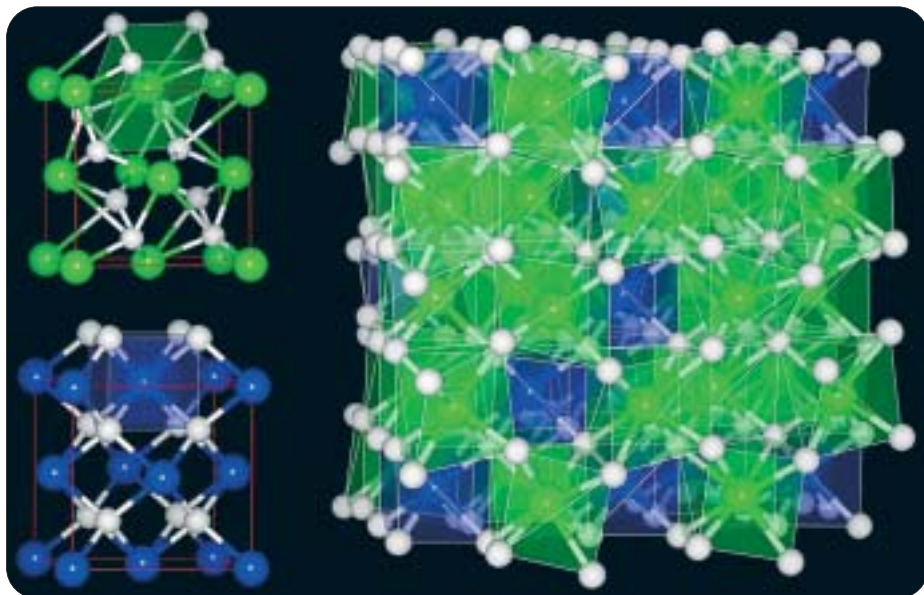


Metingen (a, c, e) van de "Quality factor" van een gesteentemonster bij verschillende gasfracties in de poriën. De doorgetrokken lijn in elk plaatje geeft de meting weer zonder gas. De foto's b, d, f komen overeen met de metingen a, c, e. Geïnjecteerde gasvolumina: (a, b) 0,3 ml; (c, d) 1,0 ml; en (e, f) 3,0 ml. De dikte van de naald is 1,2 mm.

partner: Shell

Het doel van het Industrial Partnership Programme "The physics of fluids and sound propagation" is significante vooruitgang te boeken op het terrein van de voortplanting en verstrooiing van (geluids)golven in de aardkorst en van de fysica van drie-fasestromingen. De looptijd van het programma is 2003-2010 en het budget voor die periode bedraagt 2,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van de Shell-FOM Stuurgroep.

Waterstofopslag in lichte metalen



De kubische structuur van MgH_2 (links boven) is onder normale omstandigheden instabiel, terwijl die van TiH_2 (links onder) stabiel is. De structuur van $Mg_{0.75}Ti_{0.25}H_2$ (met Mg en Ti atomen in random posities) is quasi-kubisch, wat gunstig is voor de beweeglijkheid van waterstof.

Vervanging van de huidige auto's door elektrisch aangedreven voertuigen leidt tot reductie van CO_2 emissie. Het grote probleem met elektrische energie is de opslag ervan. Batterijen bevatten weinig energie en het opladen duurt lang, waardoor elektrische auto's alleen geschikt zijn voor infrequente, korte ritten. Waterstof heeft potentieel een veel hogere energiedichtheid en kan in combinatie met brandstofcellen gebruikt worden voor elektrische aandrijving. Om dit potentieel ten volle te realiseren moet waterstof echter compact kunnen worden opgeslagen, bijvoorbeeld door absorptie in een metaal, waarbij een metaal-hydride wordt gevormd. Hydrides van lichte metalen zoals magnesium (licht om gewicht te besparen) zijn echter te stabiel, waardoor een substantieel deel van de energie verloren gaat, en worden te langzaam gevormd, waardoor het opladen en ontladen van waterstof te lang duurt.

Een belangrijk deel van het onderzoek binnen het programma "Sustainable Hydrogen" richt zich op het vinden van lichte metaalcombinaties die deze thermodynamische en kinetische problemen

niet of veel minder hebben. De werkgroepen FOM-T-09 (Twente) en FOM-N-16 (Nijmegen) gebruiken daarbij ab initio elektronenstructuur-berekeningen om de eigenschappen van metaal-hydrides te voorspellen. De atomaire roosterstructuur is van groot belang voor de kinetiek van waterstof in het hydride rooster. Wanneer we magnesium-hydride, MgH_2 , dwingen een kubische structuur aan te nemen, in plaats van de meest stabiele (rutiel) structuur, verhoogt dat de beweeglijkheid van waterstof. Overgangsmetaalhydrides, TMH_2 , $TM = Sc, Ti, V, Cr$, hebben de kubische fluoriet structuur en berekeningen laten zien dat verbindingen $Mg_{(1-x)}TM_xH_2$ voor $x > 0,2$ ook een kubische structuur hebben.

De waterstof-kinetiek in $Mg_{(1-x)}TM_xH_2$ is beter dan in MgH_2 , maar helaas zijn ook deze verbindingen nog steeds te stabiel. Berekeningen laten bijvoorbeeld zien dat het 1,1 eV per molecuul aan energie kost om waterstof uit $Mg_{0.5}Ti_{0.5}H_2$ vrij te maken. Het bijvoegen van een derde (metaal)element zoals aluminium kan dit sterk verbeteren. Zo kost het slechts 0,4 eV per molecuul om waterstof uit $Mg_{0.5}Ti_{0.25}Al_{0.25}H_2$ vrij te maken. Dit zit dicht bij de gewenste waarde voor toepassingen in combinatie met PEM brandstofcellen. Aluminium destabiliseert het hydride en het stabiliseert de metaallegering, en beide effecten dragen bij tot verlaging van deze energie.

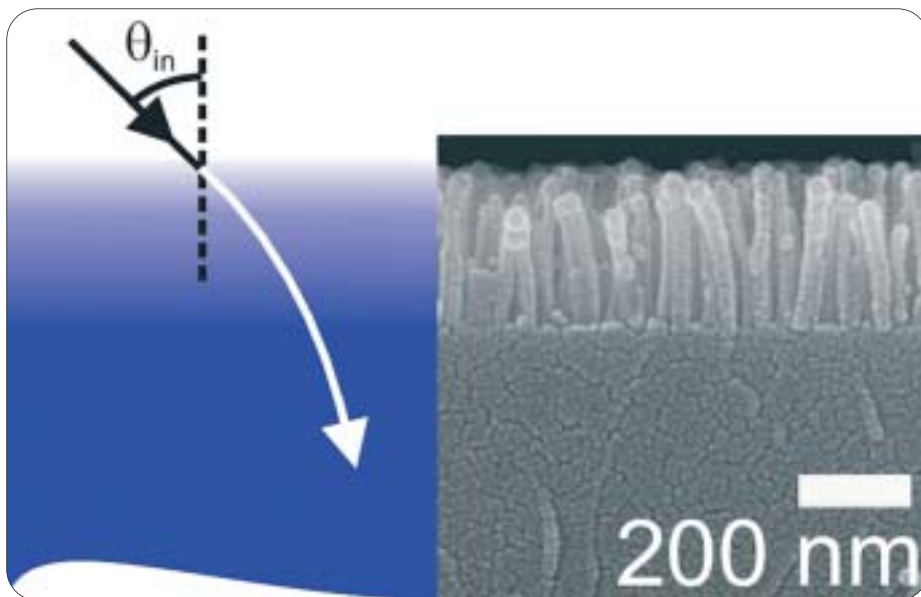
partners: ACTS, diverse bedrijven

Het doel van het Industrial Partnership Programme "Sustainable hydrogen" is significante vooruitgang te boeken in het overbruggen van kenniskloven op weg naar een samenleving die gebaseerd is op waterstof. De looptijd van het programma is 2003-2010 en het FOM-aandeel in het budget voor die periode bedraagt 1,6 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van de Programmacommissie Sustainable hydrogen.

Het reduceren van lichtreflectie met nanogestructureerde oppervlakten

In homogene media plant licht zich voort als een rechte straal. Het pad van de lichtbundel verandert als het een grensvlak tussen twee verschillende media tegenkomt. Als dit gebeurt, wordt een fractie van de lichtintensiteit weerkaatst en de rest wordt afgebroken en gaat door in het tweede medium. Welke fractie van het licht reflecteert hangt af van het verschil in brekingsindex tussen beide media, ofwel het verschil in de snelheid waarmee de lichtgolven zich in beide media voortplanten, en van de invalshoek van het licht. Voor grote invalshoeken en aan het grensvlak tussen lucht en vaste stoffen zoals halfgeleiders, wordt bijna 100% van het licht gereflecteerd.

In de natuur zijn grensvlakken te vinden waarbij de reflectie juist wordt gereduceerd. De ogen van nachtvlinders bijvoorbeeld zijn bedekt met taps toelopende nanopilaren die bedoeld zijn om hun zicht in het donker te verbeteren door zoveel mogelijk licht naar het oog te sturen. Geïnspireerd door deze biostructuren hebben onderzoekers aan het FOM-Instituut AMOLF en Philips Research een methode gevonden waarmee de reflectie van het grensvlak tussen een halfgeleider met een hoge brekingsindex en lucht drastisch wordt gereduceerd. Deze methode bestaat uit het laten groeien van lagen van nanopilaren van verschillende lengten of van dezelfde lengte, maar dan met een piramidevorm. Deze lagen hebben bovenin een lage brekingsindex, die de brekingsindex



van lucht benadert en dichtbij het halfgeleider substraat een hoge brekingsindex. Op deze manier krijg je een geleidelijke overgang van lucht naar halfgeleider waardoor het licht op een efficiënte manier naar het substraat wordt gezonden en de reflectie wordt geminimaliseerd. Deze lagen vertonen een verlaagde reflectie voor een groot bereik van kleuren en invalshoeken.

Het reduceren van lichtreflectie bij interfaces is van groot belang voor verschillende praktische toepassingen. Een lage reflectie kan niet alleen de gevoeligheid van lichtdetectoren verbeteren, het kan ook de efficiëntie verhogen van zonnecellen en LED's.

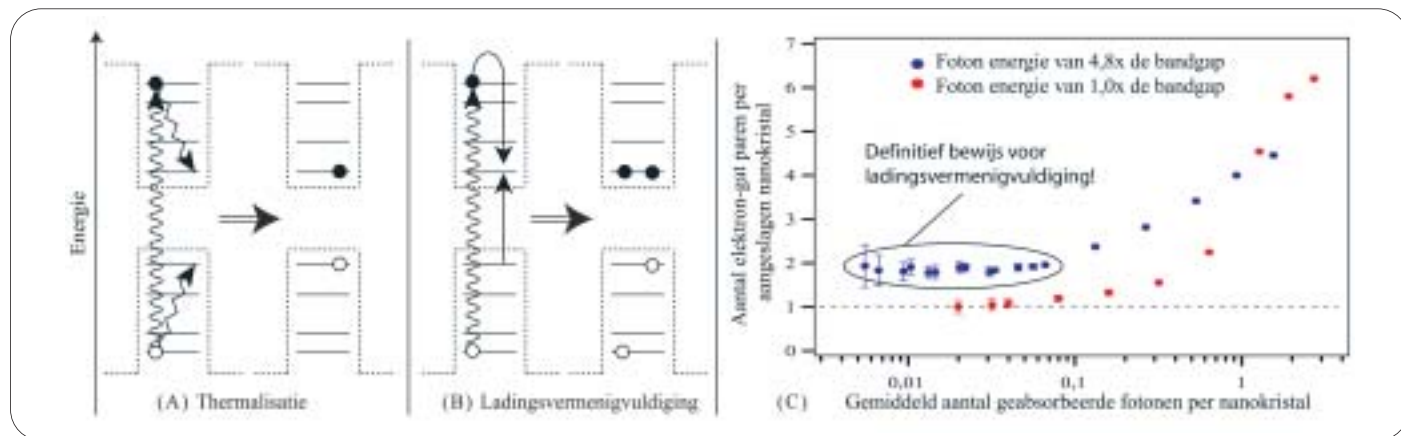
Links: schematische weergave van de breking van licht bij de overgang van lucht naar een halfgeleidermateriaal. Door het nanogestructureerde oppervlak worden reflecties geminimaliseerd.

Rechts: elektronenmicroscopische opname van dwarsdoorsnede van het nanogestructureerde oppervlak.

partner: Philips

Het doel van het Industrial Partnership Programme "Microphotonic light sources" is het bestuderen van optische verschijnselen in micro-gestructureerde materialen en devices om licht op te wekken en te manipuleren. De nadruk ligt op nieuwe concepten en experimenteel demonstreren van baanbrekende nieuwe benaderingen die de prestaties van devices moeten bevorderen. De looptijd van het programma is 2005-2010; het budget voor die periode bedraagt 1,8 miljoen euro. De leiding van het programma berust bij het FOM-Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica.

Ladingsvermenigvuldiging in halfgeleider nanokristallen



Schematische weergave van verschillende processen die kunnen optreden in optisch aangeslagen halfgeleiders. Normaal gesproken koelen “hete” ladingen snel af naar de randen van de geleidings- en valentieband (A, thermalisatie). Een alternatief is dat een hete lading botst met een valentie-elektron en een extra elektron-gat paar aanmaakt (B, ladingsvermenigvuldiging). (C) Het aantal door een laserpuls geproduceerde elektron-gat paren als functie van de laserintensiteit (uitgedrukt als het gemiddeld aantal geabsorbeerde fotonen per nanokristal). Zelfs voor lage laserintensiteit worden meervoudige elektron-gat paren aangemaakt als de fotonenergie hoog genoeg is (blauwe punten). Dit geeft aan dat ladingsvermenigvuldiging optreedt.

Licht met energie groter dan de bandgap van het lichtabsorberende materiaal wordt in zonnecellen geabsorbeerd. Hierdoor ontstaat een zogenaamd elektron-gat paar, bestaande uit een negatieve en een positieve lading. Het overschot aan energie (de fotonenergie min de bandgap) wordt omgezet in warmte en draagt niet bij aan het produceren van elektrische energie (zie figuur A). Dit beperkt het maximale theoretische rendement van zonnecellen tot 33%. Het is mogelijk boven dit rendement uit te komen door het overschot aan energie ook om te zetten in ladingen. Dit proces van ladingsvermenigvuldiging is weergegeven in figuur B. Het zal leiden tot een grotere fotostroom in een zonnecel en daarom tot een hoger rendement. Sinds 2004 verschenen claims dat ladingsvermenigvuldiging optreedt in onder andere nanokristallen van het halfgeleidermateriaal loodselenide. In 2007

ontstond echter twijfel of ladingsvermenigvuldiging inderdaad optreedt, omdat het door andere onderzoekers niet werd waargenomen in veel materialen.

De voornaamste problemen hebben te maken met de intensiteit van de laserpulsen die bij de experimenten worden gebruikt. Een laserpuls van te hoge intensiteit kan ongewenst ook leiden tot meerdere ladingen door absorptie van meerdere fotonen en niet door ladingsvermenigvuldiging. De manier om zeker te weten

dat ladingsvermenigvuldiging optreedt, is uit te sluiten dat per nanokristal fotonen worden geabsorbeerd.

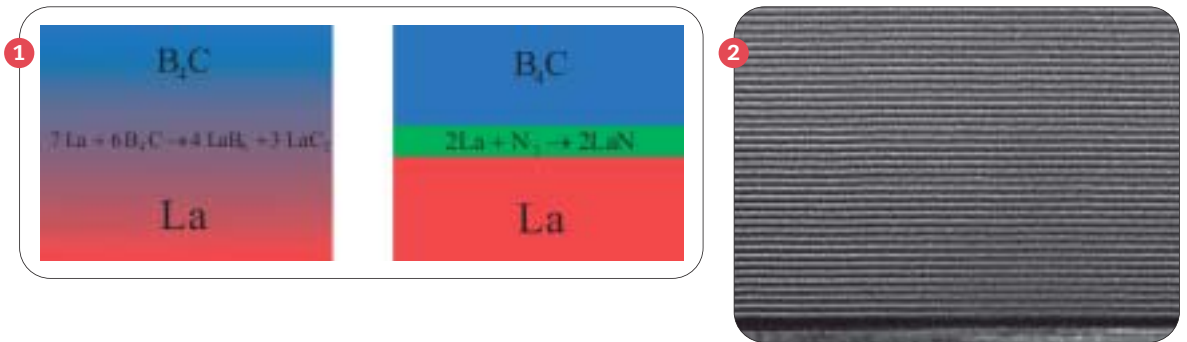
Onderzoekers uit de werkgroep FOM-D-37 hebben hun experiment geoptimaliseerd voor het meten bij lage laserintensiteiten. Vervolgens bepaalden ze het aantal ladingen voor steeds lagere laserintensiteit. Zo konden ze aantonen dat het aantal ladingen per nanokristal bij zeer lage intensiteit onafhankelijk wordt van de laserintensiteit (zie figuur C). Dit betekent dat per nanokristal nooit meer dan één foton wordt geabsorbeerd, terwijl ze toch meerdere ladingen vonden. Ondanks de recente twijfels in de literatuur vormt dit het definitieve bewijs dat ladingsvermenigvuldiging optreedt in nanokristallen. De weg naar een efficiënte zonnecel die gebruik maakt van ladingsvermenigvuldiging is nog lang, maar er staan veel wetenschappers klaar om dat einddoel dichterbij te brengen.

partners: Shell, Nuon en CW

Het doel van het Industrial Partnership Programme 'Joint Solar Programme' is het creëren van vooruitzichten op nieuwe generaties zonnecellen met sterk verbeterde eigenschappen, en het tot stand brengen van synergie en versnelling in het onderzoek door het samenwerken van groepen en vakgebieden die op dit terrein nieuw zijn.

De looptijd van het programma is 2005-2013 en het budget voor die periode bedraagt 7,2 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van de JSP Stuurgroep.

Controle van interlaagdiffusie in Extreem UV Multilaagoptiek



Figuur 1. links: schematische weergave van ongewenste grenslaagvorming tussen B_4C en La-lagen. Rechts: na N_2^+ -plasma behandeling vindt vorming van stabielere LaN en BN:C laag plaats en wordt ook segregatie van B_4C in La verminderd.

Figuur 2: Elektronenmicroscopie opname van een B_4C /La multilaag.

Op nanometerschaal gelaagde structuren zijn uitermate geschikt als reflectieve optische elementen voor toepassing in de toekomstige generatie lithografiemachines in de halfgeleiderindustrie. Deze gelaagde structuren bestaan voor die toepassing uit Mo/Si laagparen met een periodiciteit van typisch 7 nm om Extreem UV (13,5 nm) licht optimaal te kunnen reflecteren. Binnen het Industrial Partnership Programma I10 (eXtreme UV Multilayer Optics, ofwel XMO) met partner Carl Zeiss SMT wordt onder andere onderzocht hoe de interne Mo/Si multilaagstructuur tot op atomair niveau verbeterd kan worden, o.a. door toevoeging van diffusiebarrières, met als doel een betere reflectie en verhoogde thermische stabiliteit.

De nieuwe uitdaging die nu door de XMO-onderzoekers op het FOM-Instituut Rijnhuizen aangegaan wordt, is een verdere verkleining van de periodiciteit van de gelaagde structuur, om nog kortere golflengten te kunnen reflecteren en zo eventueel kleinere geprinte patroondimensies

te realiseren in het lithografieproces. Op dit moment wordt gedacht aan een halvering van de gebruikte golflengte naar 6,7 nm, waarbij nieuwe optische elementen ontwikkeld moeten worden die functioneren bij deze golflengte. Hiervoor is het gebruik van B_4C /La multilaagspiegels voorzien, waarbij de individuele laagdikten gereduceerd zijn tot slechts 1,7 nm, en grenslaagvorming beperkt moet blijven tot slechts een fractie daarvan!

Hoewel B_4C en La gekozen zijn om hun theoretisch groot optisch contrast bij 6,7 nm, blijkt in de praktijk deze keuze enkele

problemen met zich mee te brengen. Bij groei van B_4C op het veel grotere La atoom treden namelijk groeispanningen op, alsmede oppervlaktesegregatie en de vorming van een grenslaag door vorming van borides en carbides, via.

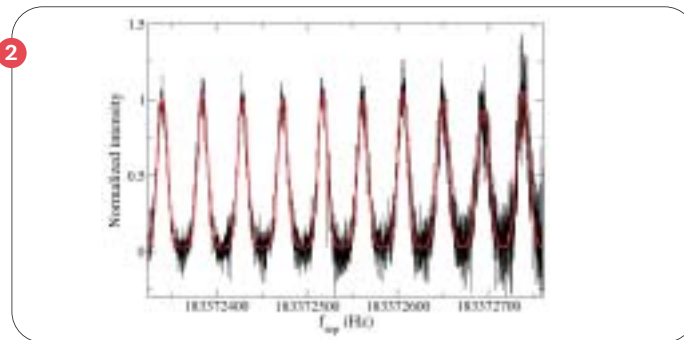
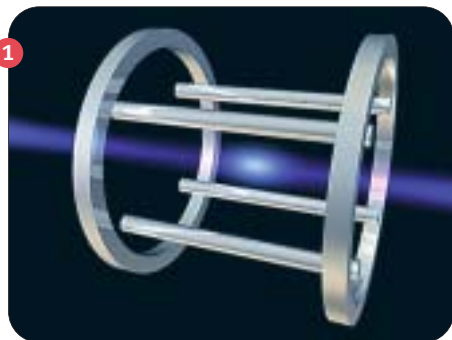
In het IPP-XMO onderzoek is voor de eerste keer een N_2^+ -plasmabehandeling aan de grenslagen toegepast, wat via de vorming van stabielere LaN en BN:C verbindingen de vorming van LaB_6 en LaC_2 tegengaat, terwijl het tevens het optisch contrast verder vergroot. Met x-ray fotoelectron spectroscopie (XPS) is te zien dat een deel van het N_2 zwakgebonden wordt en naar het oppervlak en in de bovenliggende laag diffundeert, waardoor het segregatie van B_4C in La vermindert. Atomaire diepteprofielen laten verder zien dat de B_4C en La lagen na behandeling met N_2^+ beter gescheiden blijven, wat in combinatie met het grotere optisch contrast een aanzienlijk verbeterde reflectie oplevert.

partner: Carl Zeiss

Het doel van het Industrial Partnership Programme "Extreme UV multilayer optics" is het ontwikkelen en toepassen van de natuurkunde en aanverwante procestechnologie om periodieke multilaagsstructuren te maken die atomair scherpe vlakke interfaces hebben, chemisch stabiel en stralingsbestendig zijn en tot op sub-nanometerschaal dimensioneel zijn gecontroleerd.

De looptijd van het programma is 2005-2010 en het budget voor die periode bedraagt 7,9 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr. F. Bijkerk (Rijnhuizen).

Directe frequentiekam-spectroscopie in een ionenvaal



Een frequentiekam is een precisielaser die een kam van hele nauwkeurig vastgelegde frequenties produceert over een groot golflengtegebied van soms enkele honderden nanometers. Via verbreding en verdubbelingstechnieken zijn golflengtes van infrarood tot in het ultraviolet toeganke-lijk. Een dergelijke laser kan als meetlat voor laserlicht worden gebruikt, overgan- gen in atomen kunnen met uiterste preci- sie worden geïjkt, en de frequenties van atoomklokken kunnen worden gelinkt via de kamfrequenties.

Op de Vrije Universiteit worden, in samen- werking met onderzoekers van het Nederlands Meet-instituut, precisie- metingen verricht aan ionen die ook worden waargenomen in absorptiespectra van quasars (zeer oude objecten in het univer- sum). Hiermee onderzoeken we of de fijn- structuurconstante (een van de funda- mentele natuurconstanten) mogelijk ver- anderd is over een tijdsinterval van miljarden jaren. In het laboratoriumexpe- riment worden calcium-ionen met stati- sche en radiofrequente velden opgesloten in een ionenvaal, en met behulp van laser- koeling tot 1K afgekoeld. Als eersten heb- ben we aangetoond dat frequenties van opgesloten ionen direct met een frequen- tiekamlaser gemeten kunnen worden, zonder tussenkomst van een gestabili- seerde continue laser. Dankzij het brede bereik van de frequentiekam, kan deze ene laser in principe gebruikt worden om heel veel verschillende absorpties in aller-

lei ionen te meten. Een aspect bij directe frequentiekam-spectroscopie is het lage vermogen per kamlijn. Om dit op te lossen gebruiken we een 'shelving'-techniek. In plaats van directe fluorescentie te meten, wordt er gekeken naar de fluorescentie veroorzaakt door de intensere en single- mode koellaser. Als een kamlijn resonant is met de te bestuderen overgang, is er een kleine kans op verval naar een donkere toestand: een toestand die een seconde lang leeft, en waarvandaan de ionen niet meer aangeslagen kunnen worden met de koellaser. Met een extra laser kan deze

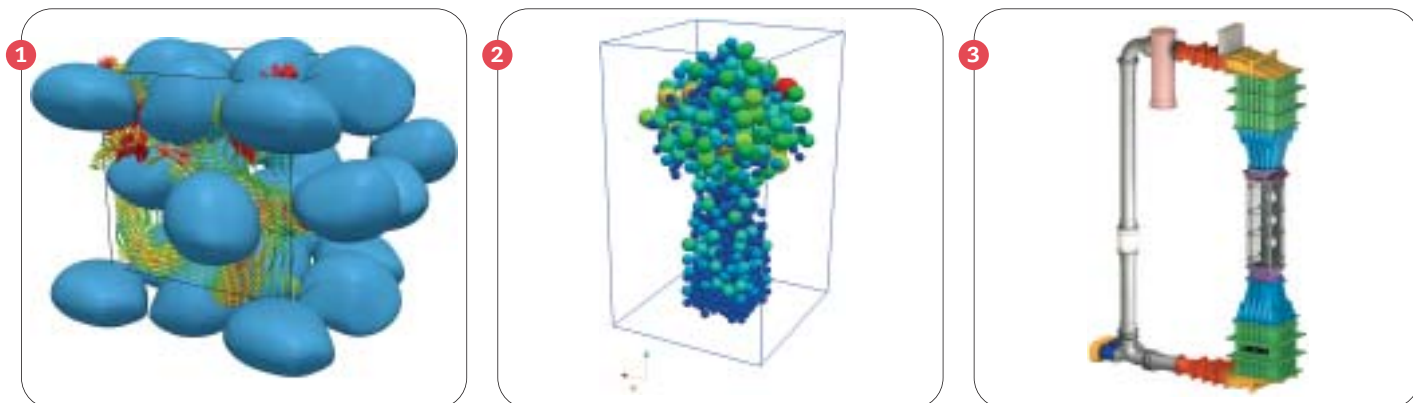
toestand echter ook weer leeggepompt worden. Door nu de signalen met en zon- der deze 'repumper' te vergelijken, kun- nen we heel gevoelig en nauwkeurig over- gangsfrequenties direct meten met een frequentiekamlaser. Zo hebben wij de overgang bij 394 nm in het calciumion gecalibreerd op 761905012.7 (0,5) MHz. Deze techniek zal in de toekomst worden aangewend voor calibratiemetingen aan meerdere andere ionen, in het kader van ons onderzoek naar mogelijke variatie van natuurconstanten.

partners: NMI, TNO, ASML

Het doel van het Industrial Partnership Programme "Metrology with frequency comb lasers" is het toepassen van frequentiekamlasers in precisiefrequentie en lengtemetingen, en het verder verbeteren en ontwikkelen van deze geavanceerde systemen in termen van golflengte- bereik, compactheid en intensiteit. NMI heeft als belangrijkste doel het leggen van de basis voor toekomstige atoomklokken en operationele lengtestandaarden. TNO steunt en bevordert de ontwikkeling van frequentiekamlasers met het oog op toepassingen in ruimtevaart en ruimteonderzoek. ASML stelt vooral belang in contacten met de onderzoekers.

De looptijd van het programma is 2006-2010, het budget voor die periode bedraagt 1,1 miljoen euro en de leiding van het programma is in handen van prof.dr. W.M.G. Ubachs (VU).

Belzwermen onder de loep



In dit programma richt men zich op onderzoek naar zwermen van bellen door middel van experimenten en numerieke simulaties. Dit is met name interessant voor industriële toepassingen, zoals (petro)chemische, biologische en metallurgische processen. In deze industrieën worden vaak bellenkolommen gebruikt, als interacties tussen een gas en een vloeistof gewenst zijn. Bij het toevoegen van een gas aan een vloeistofkolom vormen zich bellen die, tijdens het stijgen, een chemische reactie aangaan, de vloeistoffase mixen of componenten uit de vloeistof absorberen. Deze processen worden in zowel onderzoeksinstellingen als industrie gesimuleerd, met het doel om bestaande processen te optimaliseren of nieuwe processen te ontwerpen. De huidige modellen zijn echter vooral gebaseerd op het gedrag van individuele, afzonderlijk stijgende bellen. In werkelijkheid is de gasfractie in een bellenkolom dusdanig hoog, dat het gedrag van een stijgende bel wordt beïnvloed door omringende bellen en de vloeistoffase. Deze interacties moeten worden meegenomen in bestaande modellen; deze interacties worden in dit onderzoeksprogramma in kaart gebracht. Experimenten worden onder andere uitgevoerd in de Twente Water Tunnel; een verticaal recirculerende tunnel waarin een turbulente stroming opgelegd kan worden en waarin bellen kunnen worden geïnjecteerd.

Met behulp van optische technieken ('Particle Tracking Velocimetry') kunnen bellen worden gevolgd in ruimte en tijd om meer inzicht te krijgen in hun gedrag. Ook de vloeistofstroming kan worden gemeten ('Particle Image Velocimetry'). Daarnaast worden er experimenten uitgevoerd met een optische probe die de vloeistof en belsnelheid van binnenuit de vloeistof meet.

Numerieke modellen, ontwikkeld aan de Universiteit Twente, kunnen op verschillende schalen belzwermen simuleren. Op kleine schaal is er het zogeheten 'Front Tracking' model, waarmee belzwermen met tientallen bellen kunnen worden gesimuleerd. Deze simulaties lossen de vloeistofstroming in het grootste detail op, en houden rekening met de vervorming en oppervlaktespanning van de bellen. Het 'Discrete Bellen Model' is beter in staat om grotere systemen te simuleren. De met het Front Tracking model opgeda-

Figuur 1. Het Front Tracking model simuleert tientallen bellen in het grootste detail.

Figuur 2. Het Discrete Bellen Model simuleert grote schaal belzwerm interacties.

Figuur 3. Een schematische weergave van de Twente Water Tunnel.

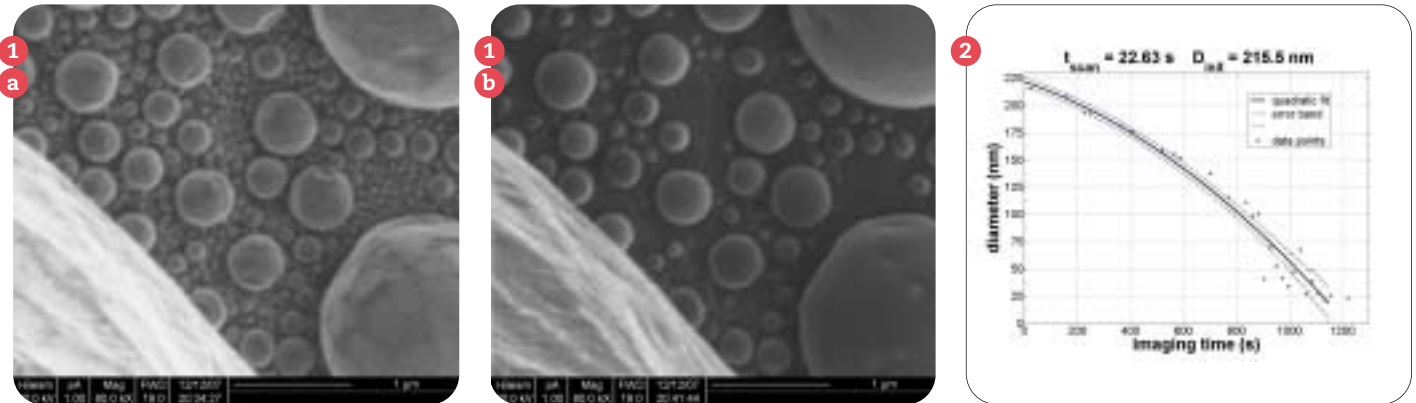
ne kennis wordt gebruikt om gedetailleerde bel-bel en bel-vloeistof interacties kwantitatief te beschrijven en deze vervolgens in het Discrete Bellen Model te implementeren, om uiteindelijk belzwerm-interacties op grotere schaal te bestuderen. Deze kennis kan tenslotte worden gevalideerd met experimenten en worden gebruikt in de modellen die in de industrie worden gebruikt.

partners: Akzo Nobel, Corus, DSM, Shell

Het hoofddoel van het programma is het bestuderen van de basis van stromingen met bellen erin, geïnspireerd door vragen uit de industriële praktijk. Twee groepen met aanzienlijke ervaring in onderzoek aan gedispergeerde stromingen pakken dit gezamenlijk met experimentele, theoretische en numerieke technieken aan. Bijkomend doel is jonge mensen in het gebied van meefasestroming op doctorsniveau op te leiden.

De looptijd van het programma is 2007-2012 en het budget voor die periode bedraagt 1,0 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. J.A.M. Kuipers (UT).

Ionenmicroscopie: kijken naar een verdwijnend preparaat



Figuur 1. Modificatie van een Sn-balpreparaat in een Ga^+ ionenmicroscopie ten gevolge van sputtering.

Figuur 2. Het verloop van de diameter van een Sn-bal als functie van de belichtingstijd. De nauwkeurigheid van de meting is aan de ene kant beperkt door de ruis in de meting en aan de andere kant door het sputtereffect.

Moderne scanning elektronen microscopen halen sub-nm resolutie, beperkt door een combinatie van aberraties en diffractie. Ionen hebben een nog kortere golflengte en daarom zou scanning ionen microscopie een nog hogere resolutie kunnen geven. FEI heeft de laatste jaren heel wat “dual beam” systemen geïnstalleerd: scanning microscopen met een gefocuseerde Ga ionenbundel om nanostructuren te maken met behulp van ionen-gestimuleerde depositie en ionen-sputtering. Die ionenbundel kan ook gebruikt worden om een scanning ionen beeld te maken. Eén van de fundamentele problemen is echter dat de ionenbundel het preparaat beschadigt, door dat zelfde sputtering proces waar de machine eigenlijk voor gebouwd was. Figuur 1 geeft daarvan een voorbeeld: de kleinste details uit figuur 1a zijn in figuur 1b verdwenen. De oplossing zou zijn te werken met een zeer kleine ionenstroom, maar dan loopt de meting vast in de tel-ruis van het signaal. Figuur 2 laat zien hoe de twee onzekerheden in de meting samen een effectieve onzekerheid

in de afmeting van kleine tinbolletjes oplevert en daarmee de behaaltbare resolutie definieert. Interessante onderzoeksvragen hierbij zijn de details van de ionenpreparaat interacties die tot sputtering leiden, maar ook tot de emissie van secundaire elektronen die het signaal, de ruis en het contrast bepalen. Bovendien blijkt de definitie van resolutie steeds weer tot discussies te leiden. Bij gebruik van 30 kV Ga ionen zijn de kleinste tinnen bolletjes die gezien kunnen worden ongeveer 10 nm. Voor andere combinaties ligt de limiet anders. Er wordt gehoopt dat bij het gebruik van lichtere ionen (H^+ of He^+)

die limiet zo laag ligt, dat er winst te halen is ten opzichte van de scanning elektronenmicroscopie.

In het Industrial Partnership Programme I14 van FOM met FEI Electron Optics, dat een samenwerking is tussen FEI en groepen in de TU Delft, TU Eindhoven en FOM-Instituut AMOLF, wordt onderzocht wat de huidige grenzen zijn van het gebruik van elektronen- en ionen-bundeltechnieken, en hoe die technieken kunnen worden verbeterd. Dit is een voorbeeld van hoe die grenzen experimenteel en theoretisch worden gekwantificeerd.

partner: FEI Electron Optics

Doel van het programma is door gezamenlijk onderzoek op het gebied van nanotechnologie elektronenmicroscopen en ionenbundelmachines tot het uiterste te verbeteren, om daarmee de structuur van materialen tot op de schaal van een enkel atoom zichtbaar te maken en te bewerken. Hiervoor zijn nieuwe geavanceerde kennis en technologie vereist. Zowel de instrumenten zelf als de gebruikte processen zullen onderwerp van studie zijn. De looptijd van het programma is 2007-2011 en het budget voor die periode bedraagt 2,7 miljoen euro. De leiding van het programma is in handen van prof.dr.ir. P. Kruit (TU Delft).

Springende eiwitten vinden sneller doel op DNA-strengen



Een artistieke impressie van springende eiwitten.

Onderzoekers van de Vrije Universiteit in Amsterdam en de Stichting FOM hebben voor het eerst aangetoond hoe eiwitten razendsnel een specifieke plek op DNA kunnen vinden. Daarmee hebben ze een probleem opgelost dat wetenschappers al jaren bezighoudt. Hun resultaten verschenen in oktober 2008 in het invloedrijke Amerikaanse wetenschappelijke tijdschrift *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

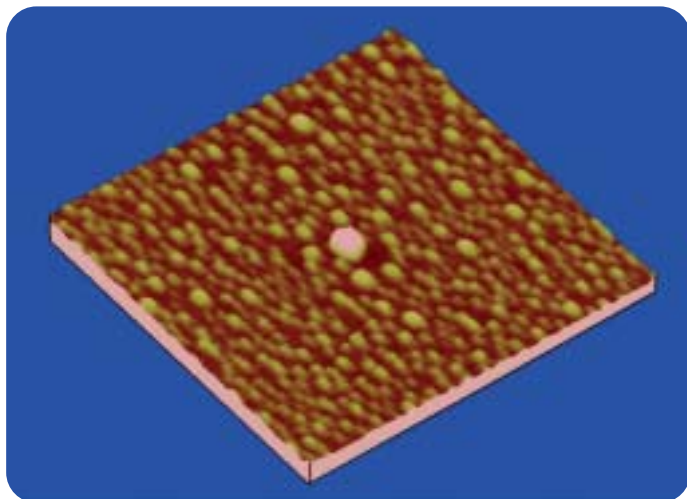
In de biologische cel vinden talrijke dynamische processen met DNA plaats. In veel gevallen worden reacties op gang gebracht door eiwitmoleculen die binden aan een

specifiek stukje van het DNA. Bij veel cellulaire processen is het essentieel dat zulke bindingsplaatsen snel worden gevonden; als dit niet gebeurt kan dit dodelijk zijn voor de cel. De specifieke bindingslocaties zijn echter ingebed in lange DNA-moleculen met duizenden of zelfs miljoenen niet-specifieke DNA-locaties. Hoe lukt het deze eiwitten dan toch om in de brij van niet-specifiek DNA hun bindingsplek te vinden?

FOM-onderzoekers dr. Bram van den Broek en drs. Svenja-Marei Kalisch in de groep van dr.ir. Gijs Wuite hebben nu voor het eerst laten zien hoe eiwitten van

DNA- naar DNA-molecuul kunnen 'springen', en hoe dat springen helpt bij het vinden van de juiste plek op het DNA. Met een ingenieus experiment maten zij de zoeksnelheid van afzonderlijke eiwitten in een kluwen DNA. Door beide uiteinden van een DNA-molecuul aan microscopisch kleine bolletjes vast te plakken en deze met behulp van laserlicht te manipuleren konden de onderzoekers de kluwen DNA uit elkaar trekken. Op deze manier werd het springen van de eiwitten handmatig uitgeschakeld, simpelweg door de afstand tussen de DNA-strengen te groot te maken voor de sprongen. In de experimenten viel op dat de zoeksnelheid toeneemt naarmate het DNA meer een kluwenvorm aanneemt. De onderzoekers speculeren dat in de cel het effect van de springende eiwitten nog belangrijker zal zijn, aangezien daar de lokale dichtheid van het DNA nog veel groter is dan in de uitgevoerde experimenten. Het onderzoek heeft hiermee een essentieel mechanisme blootgelegd dat een rol speelt bij alle eiwitten die op DNA inwerken, inclusief processen die een rol spelen bij veel soorten kanker.

Waarom nanobellen toch kunnen bestaan



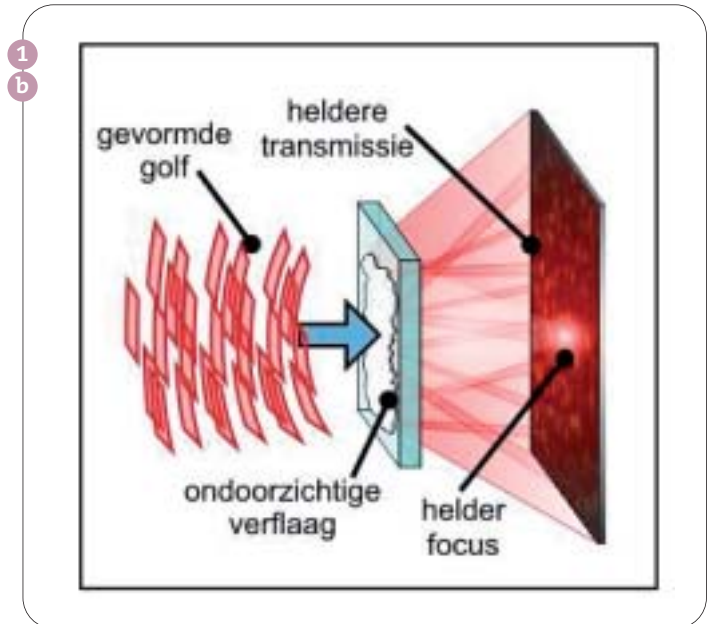
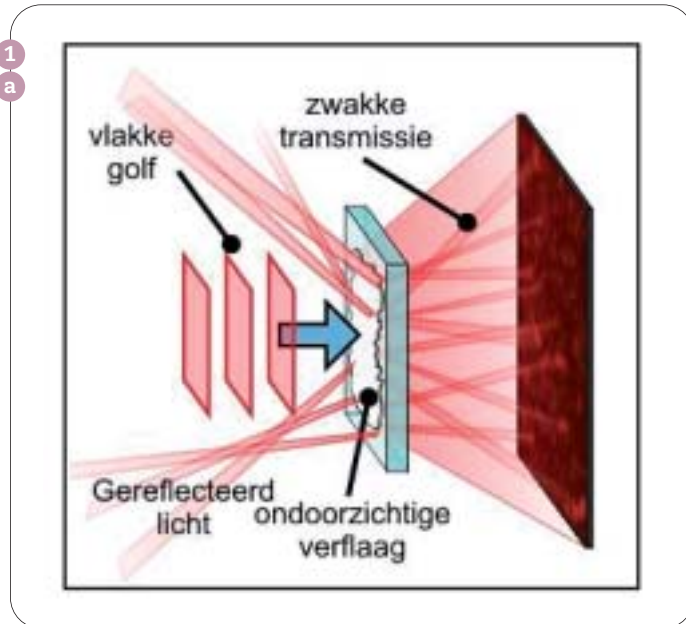
3D-hoogteprofiel van een hydrofoob silicium substraat ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$) in water, gemeten met de AFM. Het oppervlak is bedekt met nanobellen. De grote bel in het midden is 14 nm hoog en heeft een diameter van 200 nm. Dit resulteert in een kromtestraal R_c van 350 nm en een nanoscopische contacthoek van 164° .

Op het grensvlak van water met een waterafstotend oppervlak (bijvoorbeeld Teflon) zijn extreem kleine, raadselachtige luchtbelletjes aanwezig. Deze zogenaamde 'oppervlakte-nanobellen' zijn nog geen tien jaar geleden ontdekt, met behulp van een atomische kracht microscoop (AFM). Dit apparaat kan een oppervlak aftasten met een extreem dunne naald (dikte $\sim 1/100 \mu\text{m}$) en daarbij het hoogteprofiel bepalen, vergelijkbaar met een pick-up-naald op een grammofoonplaat. Een hydrofoob (=waterafstotend) oppervlak in ontgast water ziet er op deze manier net zo glad uit als in lucht, zoals verwacht. Doen we nu ditzelfde experiment in verzadigd water dan zijn er plotseling allerlei bolvormige kapjes waar te nemen met typische hoogte van 10 nm, breedte van 100 nm en een kromtestraal R_c van enkele honderden nanometer: oppervlakte nanobellen (zie de figuur).

De laatste jaren krijgen nanobellen steeds meer aandacht. Dit heeft vooral te maken met een fundamenteel fysisch probleem: theoretisch mogen de bellen niet bestaan. Nanobellen ondervinden ten opzichte van

het water een drukverschil van $2\sigma/R_c$, waarbij de oppervlaktespanning van het water (0,073 N/m) en R_c de kromtestraal van de bel zijn. Een typische nanobel met een kromtestraal van 350 nm heeft dus een overdruk van ruim 4 bar ten opzichte van het water. Dit leidt tot een onomkeerbaar diffusie proces waardoor het gas in de bel binnen een fractie van een seconde moet oplossen in het water. Maar in werkelijkheid zijn de belletjes stabiel voor tenminste enkele uren. Recentelijk heeft prof.dr. Detlef Lohse een model ontwikkeld dat de stabiliteit van nanobellen verklaart door een instroom van gas aan de rand van de bel te poneren. Deze theorie voorspelt onder meer dat nanobellen een voorkeursafmeting hebben. De voorspellingen van dit model zullen de komende tijd getoetst worden aan nieuwe experimenten, uit onder meer FOM projectruimte gelden, opdat we ook het bestaan van nanobellen ooit mogen begrijpen.

Licht vindt een weg door ondoorzichtige materialen



Veel materialen, zoals papier, verf en biologische weefsels, zijn ondoorzichtig door verstrooiing. Licht plant zich in zulke materialen niet rechtlijnig voort, in tegendeel, het wordt zo vaak verstrooid dat het nauwelijks door het materiaal heen komt. Hoe dikker het verstrooiende materiaal, en hoe sterker de verstrooiing, hoe minder licht er door kan komen.

In eerdere experimenten is aangetoond dat het verstrooide licht niet helemaal zijn geheugen kwijt is: door het aanpassen van de vorm (het golffront) van de invallende lichtgolf kan het diffuse doorgelaten licht tot een heldere focus worden gevormd. Tot dusverre leek daarbij de totale hoeveelheid doorgelaten licht nauwelijks te veranderen.

Al in 1984 is voorspeld dat in een ver-

strooiend systeem altijd enkele open kanalen bestaan: Golven met zeer complex gevormde golffronten die zonder verlies doorgelaten worden, zelfs door zeer sterk verstrooiende materialen. Experimenteel waren die open kanalen nog niet aangetoond: voor ieder stukje materiaal zijn de open kanalen verschillend van vorm, en om er licht in te sturen moet het golffront uiterst precies aan de open kanalen aangepast worden.

Onderzoekers van de Universiteit Twente (FOM-T-23) hebben een apparaat ontwikkeld om zeer precies golffronten te maken, en hebben daarmee voor het eerst gericht licht in de open kanalen gestuurd. Door deze aanpassing nam de transmissie van licht door een ondoorzichtige verflaag met wel 44% toe. Het licht, dat normaal

maar voor een heel klein deel in de open kanalen terecht komt, wordt door de aanpassing van de golffronten gericht in de open kanalen gestuurd. De hoeveelheid extra transmissie kan theoretisch berekend worden, en de gemeten waarden komen precies overeen met de voorspelde transmissie van open kanalen.

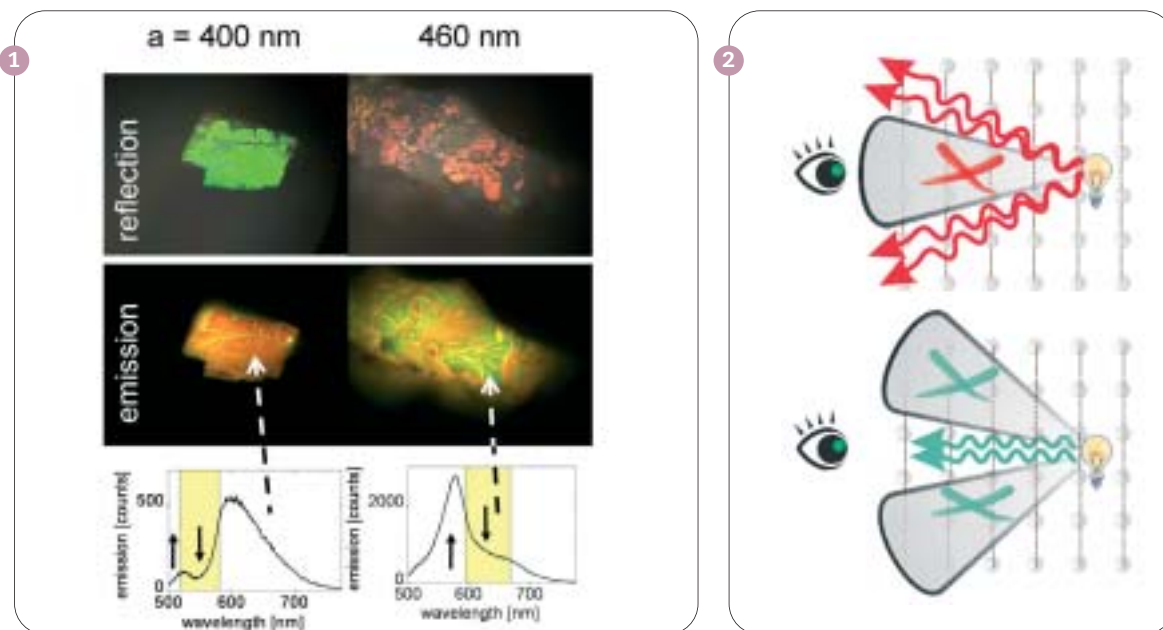
Nu het mogelijk is gebleken licht door ondoorzichtige materialen te sturen, is een volgend doel het gebruiken van deze technieken om door zulke materialen, in het bijzonder biologische weefsels, heen te kijken.

Figuur 1a. Vlakke inkomende golven van laserlicht worden in een ondoorzichtige verflaag verstrooid. Het zwakke licht dat erdoorheen komt vormt een diffuus spikkelpatroon.

Figuur 1b. Door delen van het golffront een beetje te vertragen is de vorm van het golffront aangepast om zoveel mogelijk licht door het materiaal te krijgen. Al eerder is aangetoond dat op deze wijze een heldere focus ontstaat. Nu is aangetoond dat daarbij ook de achtergrondtransmissie toeneemt.

NB. Dit onderzoek is in de top tienvan 2008 van het American Institute of Physics gekozen, als één van de tien grootste ontdekkingen van het jaar. (zie <http://www.aip.org/pnu/2008/split/879-1.html>).

Nanofotonica kleurt lichtgevende eiwitmoleculen



Lichtgevende eiwitmoleculen, zoals die worden geproduceerd door bijvoorbeeld kwallen en in koraal, zijn belangrijke gereedschappen om biologische processen, zoals de inschakeling van genen, zichtbaar te maken. De kleur van het uitgezonden licht kan veranderd worden door aan de DNA code van het lichtgevende eiwit te sleutelen.

Het veranderen van een natuurlijke lichtbron kan ook op een nieuwe manier: door de fotonische structuur van de omgeving te veranderen. Dit is het onderwerp van de nanofotonica. Fotonische kristallen zijn nanostructuren die de uitzending en

voortplanting van licht sterk kunnen veranderen en in het extreme geval zelfs geheel kunnen onderdrukken. Zo'n fotonisch kristal bestaat bijvoorbeeld uit een geordende stapeling van luchtbolletjes - elk niet groter dan een halve micrometer - in een matrix van titaniumdioxide, een mineraal met een hoge brekingsindex.

Onderzoekers van de Universiteit Twente (FOM-T-15, T-23 en T-24) en FOM-Instituut AMOLF zijn erin geslaagd lichtgevende eiwitmoleculen in zulke fotonische kristallen te plaatsen. Voor het eerst werd aangetoond dat fotonische kristallen het door biologische lichtbronnen uitgezonden

den licht sterk kunnen beïnvloeden. De waargenomen kleur van het uitgezonden licht werd veranderd door Bragg reflectie aan de kristalvlakken van het fotonische kristal, en veranderde zo van rood naar groen (zie figuur 1). Deze kleurverandering is een resultaat van de herverdeling van het uitgezonden licht: sommige golflengten passeren het fotonische kristal ongehinderd, andere worden verzwakt (zie figuur 2). Deze resultaten zijn een voorbeeld van "biofotonische technologie": het manipuleren en optimaliseren van biologische lichtbronnen en receptoren door middel van nanofotonica.

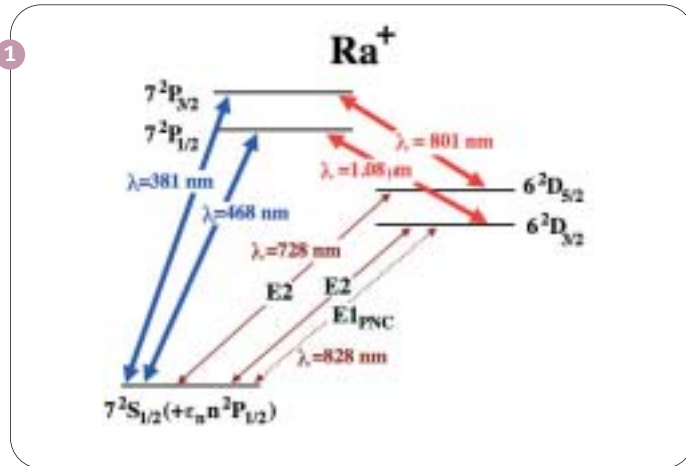
Figuur 1. Boven: Reflectie van fotonische kristallen. In het linker kristal kan groen licht zich niet voortplanten, in het rechter kristal rood.

Midden: Door de eiwitmoleculen uitgestraald licht, dat van nature oranje is, ziet er in een fotonisch kristal rood of groen uit.

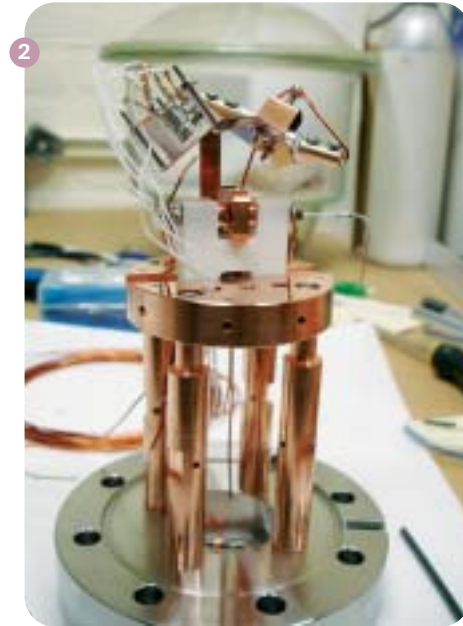
Onder: Spectra van het uitgezonden licht. De gele balken geven aan bij welke golflengten de fotonische kristallen het licht reflecteren. De zwarte pijlen geven aan bij welke golflengten de emissie versterkt (op) of verzwakt (neer) is. De reden voor de kleurverandering is dat in het linker kristal het groene licht uit het spectrum wordt verwijderd, en in het rechter kristal het rode.

Figuur 2. In het rechter kristal in figuur 1 kan rood licht zich niet voortplanten en niet uitgezonden worden loodrecht op de kristalvlakken (grijze kegel). Groen licht heeft een kortere golflengte en voelt alleen onder een hoek het fotonische kristal. Het bereikt vrijwel ongehinderd ons oog.

Atomaire pariteitschending in het radiumion



Figuur 1. Energieschema van het radiumion.



Figuur 2. In de KVI-werkplaats geproduceerde ionenvall voor hoge-precisie-experimenten met één enkel radiumatoom

Op het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) wordt een experiment opgezet om met behulp van lasers hoge-precisiemetingen te verrichten aan één enkel radium-ion. De gewenste (instabiele) radiumisotopen worden gemaakt met bundels van het AGOR-cyclotron, vervolgens afgeremd en daarna gevangen in een ionenvall. Het uiteindelijke doel is het meten van de breking van links-rechtsymmetrie (pariteit) in dit atomaire systeem. Het onderzoek wordt verricht in het kader van het TRI μ P-programma (programma 48), met additionele ondersteuning binnen de FOM-projectruimte en de NWO Veni- en Toptalentprogramma's.

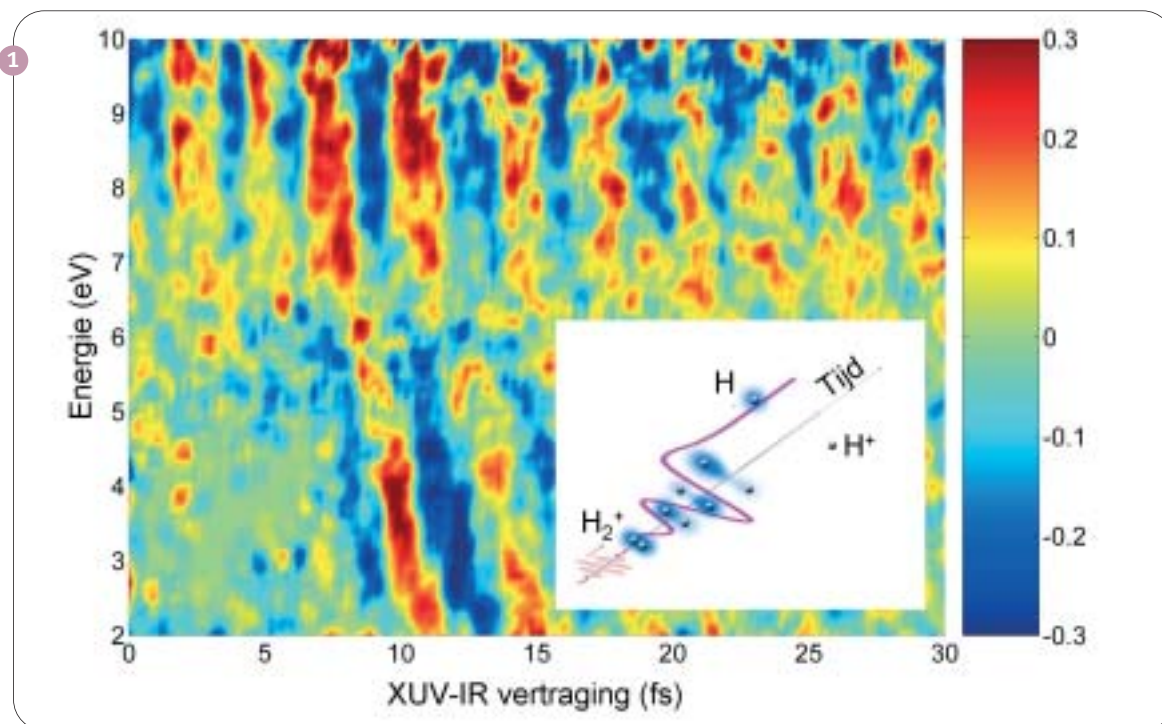
Binnen het Standaardmodel van de elementaire-deeltjesfysica worden de elektromagnetische wisselwerking en de zwakke kernkracht verenigd tot de elektrozwakke wisselwerking. Voor atomaire systemen impliceert dit dat behalve het foton ook het zeer zware Z^0 -boson wordt uitgewisseld tussen de elektronen en de quarks in de kern. Deze wisselwerking breekt pariteit, waardoor er zeer kleine

schendingen van de gebruikelijke selectieregels optreden. Het radiumion (zie figuur 1) heeft een "verboden" E2-overgang tussen de $7S$ -grondtoestand en de $6D$ toestand. Door de schending van pariteit is de grondtoestand echter geen eigentoestand van pariteit meer, waardoor er ook een E1-overgang mogelijk is. Het nauwkeurig meten van deze overgang leidt, in combinatie met zeer nauwkeurige atoomstructuurberekeningen, tot een krachtige test van de theorie van de elektrozwakke wisselwerking. Dezelfde overgang biedt daarnaast ook mogelijkheden voor een nauwkeurige frequentiestandaard ("atoomklok").

Het afgelopen jaar is in het KVI een laboratorium opgezet met ionenvallen en lasers. De eerste ionenvall werd al getest met de optische detectie van ingevangen bariumionen. Een tweede ionenvall voor de hoge-precisie-experimenten met één enkel ion is onlangs in de KVI-werkplaats gemaakt (zie figuur 2). Voor het onderzoek met radium was nog niet experimenteel getest welke productiemethode het beste is. Een goede opbrengst van radiumisoto-

pen werd gevonden bij een experiment met een 1650 MeV ^{206}Pb -bundel en een koolstofdoelwit. Hierbij worden $^{212-214}\text{Ra}$ -isotopen geproduceerd die op dezelfde wijze als natrium in een laag-energetische ionenbundel worden omgezet. Van alle mogelijke productiemethoden heeft deze als belangrijk voordeel dat de ongewenste radioactieve producten niet de *thermal* ionizer (zie FOM-programma 48) bereiken, zodat de radioactiviteit bij de experimentele opstellingen minimaal blijft. Op korte termijn zullen de eerste radiumionen worden gevangen.

Attoseconde elektron-dynamica in moleculen



Scheikundige processen waarbij oude moleculaire bindingen verbroken worden en nieuwe moleculaire bindingen gemaakt worden, verlopen typisch op een femtoseconde ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) tijdschaal. Echter, elektronen kunnen op een nog veel snellere, attoseconde ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) tijdschaal bewegen. In een experiment dat uitgevoerd werd binnen een grote internationale samenwerking (met deelname van AMOLF, de universiteiten van Lund, Milaan, en Lyon, alsmede het Max-Planck Instituut voor Quantumoptiek in Garching) is voor het eerst de beweging

Nadat het H_2^+ ion gevormd is door ionisatie van H_2 met een attoseconde laserpuls, wordt het resterende elektron door de infrarode laser gelocaliseerd op het linker (blauw) of rechter (rood) H-atoom. De elektronlocalisatie kan gestuurd worden door met attoseconde nauwkeurigheid de vertraging tussen de attoseconde puls en de infrarode puls te kiezen.

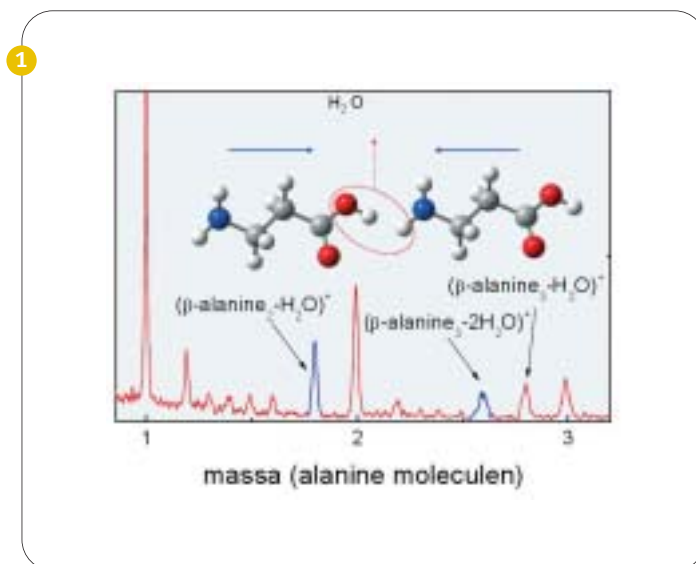
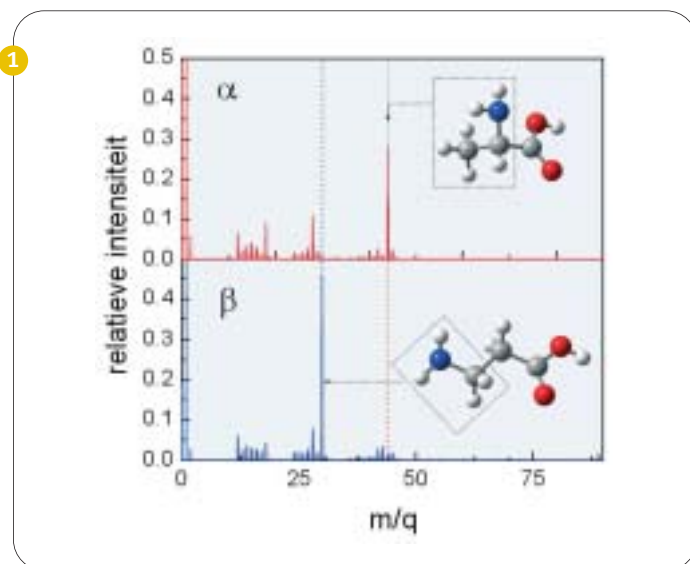
van elektronen in een molecuul op attoseconde tijdschaal waargenomen.

In het experiment werd het simpelst denkbare molecuul, H_2^+ (bestaande uit twee waterstof atomen en één elektron) gebruikt. De H_2^+ ionen werden gemaakt door ionisatie van neutrale H_2 moleculen met een attoseconde laserpuls. Deze puls werd gemaakt via hoge-harmonische generatie, waarbij atomen blootgesteld worden aan een intense femtoseconde laserpuls. Met de ionisatie van H_2 werd ook direct de dissociatie van het molecuul (leidend tot de vorming van een neutraal H atoom en een H^+ ion) in gang gezet. Tijdens de dissociatie werd een korte infrarode laserpuls op het molecuul afgevuurd. Hierdoor ontstond een asymmetrie in de hoekverdeling van de H^+ ionen die afhangt van de vertraging tussen de attoseconde puls en de infrarode puls. Hieruit kan afgeleid worden dat de laserpuls een localisatie van het elektron op één

van de twee atomen bewerkstelligen. Tijdens de dissociatie beweegt het elektron, onder invloed van de infrarode laser, met hoge snelheid heen en weer tussen de twee ionen. Afhankelijk van de vertraging tussen de twee laserpulsen, blijft het uiteindelijk op het ene dan wel het andere atoom achter.

Met behulp van een theoretische analyse is meer duidelijkheid verkregen over deze elektronlocalisatie. De experimenten konden gesimuleerd worden door het oplossen van de tijdsafhankelijke Schrödinger vergelijking. Verder is een semi-analytische theorie ontwikkeld, die laat zien dat er tijdens het dissociatieproces één of twee beslissende momenten zijn, waarop bepaald wordt voor welk atoom het elektron uiteindelijk zal kiezen. Met deze theorie kan hopelijk in de toekomst ook inzicht verkregen worden in de mate waarin gecontroleerd elektrontransport mogelijk is in grotere moleculen.

Aminozuren onder invloed van ioniserende straling



Kleine aminozuren, de bouwstenen van proteïnes, worden vaak aangetroffen in meteorieten. Algemeen wordt aangenomen dat deze aminozuren ook in de interstellaire ruimte voorkomen, zowel als los molecuul als in clustervorm. Ze zijn dan continu onderhevig aan ioniserende straling, bijvoorbeeld röntgenstralen en energetische ionen van supernovae. De wisselwerking met deze ioniserende straling speelt een sleutelrol in de ionenchemie in interstellaire wolken. Een eenduidige directe detectie van biomoleculen in interstellaire wolken, bijvoorbeeld via infrarood-spectroscopie, is nagenoeg onmogelijk. Onderzoekers van het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) hebben de wisselwerking van α -straling (He^{2+} -ionen) met aminozuren en clusters van aminozuren met massaspectrometrische technieken bestudeerd. Het uiteindelijke doel van deze experimenten is astrobiologisch: kunnen complexe biomoleculen zoals

peptiden ontstaan onder omstandigheden die heersen in de interstellaire ruimte?

In een eerste serie experimenten hebben de onderzoekers de wisselwerking van α -deeltjes met twee in geometrie verschillende isomeren van het aminozuur alanine onderzocht. In figuur 1 is duidelijk te zien dat de invloed van de geometrie op de fragmentatiepatronen verbazingwekkend groot is en dat er bij zowel de fragmentatie van α - als β -alanine sprake is van een voorkeurskanaal. β -Alanine valt voornamelijk uiteen door een neutraal carboxylmolecuul (COOH) af te splitsen. In het geval van β -alanine komt COOH -afsplitsing niet of nauwelijks voor. Het veruit belangrijkste kanaal is nu de vorming van NH_2CH_2^+ .

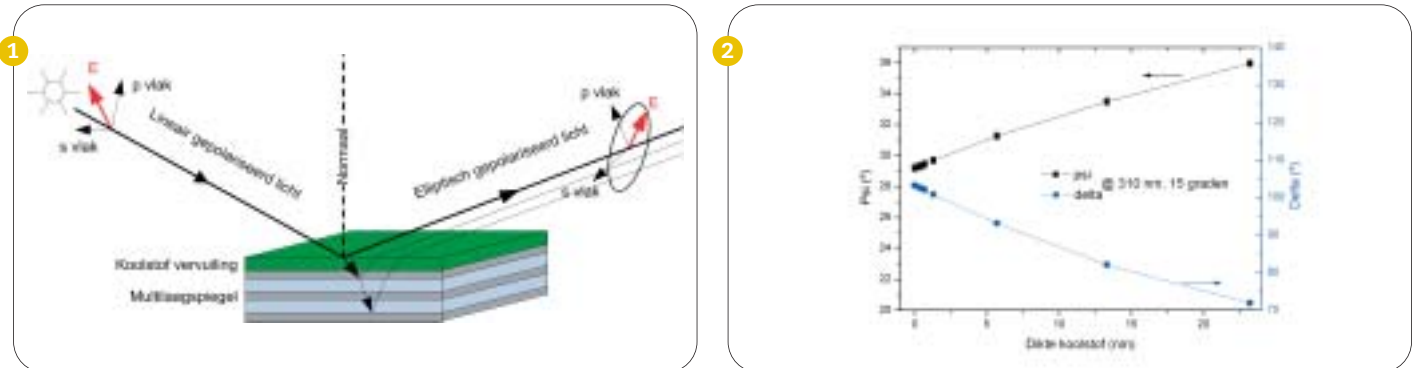
Naast geïsoleerde aminozuurmoleculen komen ook aminozuurclusters, systemen bestaande uit 2, 3 of meer zwak aan elkaar

gebonden aminozuren, voor. De onderzoekers hebben energetische ionen laten wisselwerken met clusters bestaande uit β -alanine om te zien of peptideformatie mogelijk is. Figuur 2 laat het deel van het massaspectrum zien waar men qua massa peptides zou kunnen vinden. Naast de pieken van de mono-, di- en trimeren van alanine zijn er sterke pieken bij massa's overeenkomend met een alanine-dimeer minus een watermolecuul en met een alanine-trimeer minus één of twee watermoleculen. Zoals geïllustreerd in de inzet in figuur 2 is het verlies van watermoleculen een indicatie van peptidevorming. Dit resultaat is een sterke aanwijzing dat in interstellaire wolken onder invloed van ioniserende straling complexere biologische moleculen zoals peptiden zouden kunnen ontstaan.

Figuur 1. Massaspectra voor botsingen van α -deeltjes met α - (boven) en β -alanine (onder).

Figuur 2. Massaspectrum voor botsingen van energetische ionen met β -alanineclusters. De inzet toont de OH- en H-ionen die vrijkomen in het proces van peptidevorming.

Vervuiling op multilaagspiegels opsporen



Extreem ultraviolet lithografie (EUVL) met een golflengte van 13,5 nanometer (miljardste meter) is dé techniek om de nieuwe generatie computerchips te maken. De techniek is echter uiterst gevoelig voor vervuiling in de EUVL-apparatuur, bijvoorbeeld door koolwaterstoffen in het vacuümsysteem waardoor dunne laagjes koolstof kunnen ontstaan op de spiegels. In een EUVL-apparaat staan tien spiegels achter elkaar om de chippatronen af te beelden. Als die elk door een heel dun laagje koolstof een beetje slechter reflecteren, gaat er in totaal veel licht verloren. Het onderzoek richt zich daarom op de ontwikkeling van gevoelige methoden om niet alleen de oppervlakteverontreiniging op te sporen, maar ook de aard ervan te bepalen. Is het wel koolstof? En in welke vorm?

Onderzoekers van het FOM-Instituut Rijnhuizen werken aan twee veelbelovende technieken om optiekvervuiling te meten. Spectroscopische ellipsometrie (SE) bekijkt hoe de polarisatie van licht

verandert als het reflecteert aan het verontreinigde oppervlak. Bij laser-opgewekte akoestische oppervlaktegolven (laser-generated surface acoustic waves of LG-SAW) wordt onderzocht hoe een golf zich voortplant over het spiegeloppervlak na een 'tik' van een laserpuls. De Rijnhuizen onderzoekers hebben met beide technieken expres vervuilde multilaagspiegels onderzocht. Eén set spiegels werd tijdens EUV-bestraling bedekt met een koolstoflaagje, afkomstig uit koolwaterstoffen in de opstelling. Op een tweede set werd een koolstoflaag afgezet door grafiet te laten verdampen. De tests vonden plaats buiten de lithografische apparatuur, maar het uiteindelijke doel is natuurlijk een techniek te ontwikkelen die de vervuiling meet terwijl de apparatuur in gebruik is.

Zowel LG-SAW als SE blijken erg gevoelig voor de aanwezigheid van koolstoflaagjes, zelfs tegen de achtergrond van de dunne lagen in de multilaagspiegel. Van de twee technieken ziet SE het scherpst, met een gevoeligheid onder de nanometer (slechts

enkele atoomlagen). De LG-SAW-methode ziet structuren tot op 5 nanometer, maar is wel beter in het onderscheiden van harde, diamantachtige lagen en meer amorfe lagen waarin waterstof is opgenomen. Met de ellipsometrische techniek lukt dat alleen met voorkennis uit andere meetmethoden.

Vanwege de gevoeligheid is SE waarschijnlijk de beste kandidaat om tijdens het lithografische belichtingsproces naar de vervuiling van de multilaagspiegels te kijken. Uitgebreid verder onderzoek is nodig om ook in die complexe omgeving de benodigde nauwkeurigheid te halen.

Figuur 1. Principe van ellipsometrie op een multilaagspiegel.

Figuur 2. Ellipsometrische grootheden ψ and δ voor verschillende diktes koolstof, gemeten met een golflengte van 310 nm bij een hoek van 15° t.o.v. het oppervlak. De figuur toont de gevoeligheid van ellipsometrie: een koolstoflaag van slechts enkele tienden van een nanometer kan worden vastgesteld.

Detectoren met grote samengestelde oppervlaktes met multi-gigabit per seconde uitlezing

In samenwerking met PANalytical (Almelo), IMEC (Leuven), Canberra (Olen) en Nikhef wordt in het kader van het Relaxd project (gesubsidieerd door SenterNovem (EZ)) gewerkt aan de ontwikkeling van een detector voor röntgenstraling met een groot oppervlak, samengesteld uit losse detectoren op basis van Medipix chips (Cern). Dit project moet leiden tot een videocamera voor röntgenstraling met toepassing in verschillende velden zoals kristalstructuuranalyse door middel van röntgenstralingsdiffractie, maar ook medische toepassingen zijn mogelijk.

Om beelden met minimale artefacten te kunnen maken is het noodzakelijk om de ruimtes tussen de verschillende detector units nagenoeg teniet te doen door het gebruik van siliciumdetectoren van Canberra met een minimale rand. De eerste detectoren zonder de gebruikelijke 'guard ring' zijn geproduceerd en worden gekarakteriseerd. In het verlengde hiervan wordt er bij IMEC gewerkt aan Through Silicon Vias om de elektrische verbindingen van de chip naar het Printed-Circuit-Board overbodig te maken en het contact tussen de chip en de uitleeselektronica tot stand te brengen door middel van een Ball-Grid-Array onder de chip.

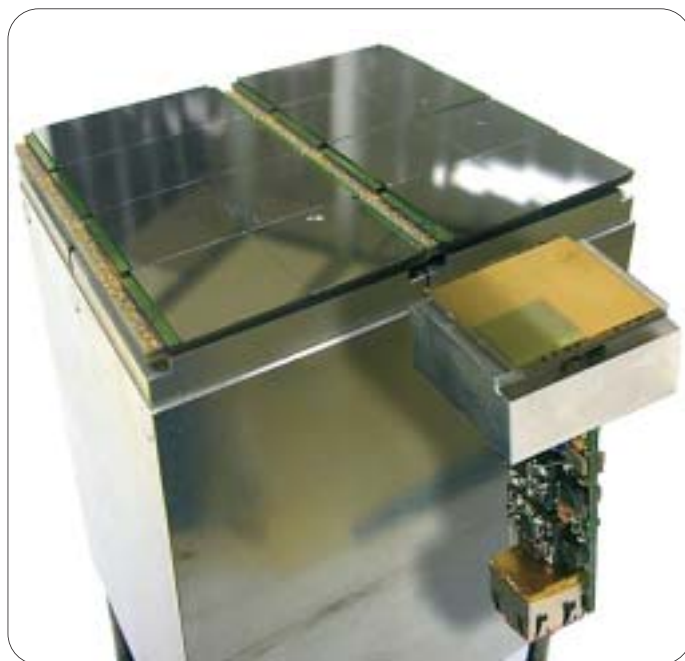
Daarnaast wordt gewerkt aan de uitlezing van dit geheel met multi-gigabit per seconde bandbreedte. Het eerste contact met de CMOS chip via het ontworpen systeem is gerealiseerd en binnenkort wordt een volledig functioneel systeem aan de eerste tests onderworpen.

Voor een nieuw samenwerkingsproject, Hidralon, met de TU Delft en verschillende bedrijven uit de Nederlandse industrie is het Nederlandse deel van het Europese

Eureka-Catrene project goedgekeurd door SenterNovem (EZ).

Het project beoogt om hoge resolutie röntgen camera's op basis van CMOS chips te verbeteren voor toepassingen in de entertainment/broadcasting sector, de auto-industrie en in medische röntgen apparatuur. De Nederlandse partners komen uit die sectoren: Grass Valley (Breda), Philips (Eindhoven), twee faculteiten van de TU Delft en Nikhef.

Op Nikhef zal de nadruk liggen op het onderzoek aan het toepassen van zwaardere halfgeleider materialen die röntgenstraling met hogere energie (40-100keV), gebruikelijk in medische toepassingen, met goede efficiëntie kunnen detecteren. Dit gebeurt in samenwerking met Philips Healthcare (Best).



Vier Relaxd modules in een koel blok, met daarnaast een afzonderlijke module met daaronder de bijbehorende uitleeselektronica