

Grote faciliteiten voor natuurkundig en sterrenkundig onderzoek

Advies van de Raad voor Natuur- en Sterrenkunde

Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen
Amsterdam, juli 2004

© 2004. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, via internet of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de rechthebbende, behoudens de uitzonderingen bij de wet gesteld.

Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW)
Kloveniersburgwal 29, 1011 Jv Amsterdam
Postbus 19121, 1000 Gc Amsterdam
T 020 551 07 00
F 020 620 49 41
E knaw@bureau.knaw.nl
www.knaw.nl

Voor het bestellen van publicaties: 020 551 07 80

ISBN 90-6984-423-0

Het papier van deze uitgave voldoet aan  ISO-norm 9706 (1994) voor permanent houdbaar papier

Inhoud

Inleiding	7
Conclusies	11
Aanbevelingen	14
Conclusions	17
Recommendations	20
1 De vier grote onderzoeksfaciliteiten	23
1.1 Hoge-energiefysica	23
1.2 Fusieonderzoek	24
1.3 Optische sterrenkunde	26
1.4 Ruimteonderzoek	26
2 Faciliteiten voor natuur- en sterrenkundig onderzoek	29
2.1 Radiosterrenkunde	29
2.2 Kernfysica	31
2.3 Hoge-energieastrodeeltjesfysica	34
3 Faciliteiten voor multidisciplinair onderzoek	37
3.1 Onderzoek met behulp van synchrotronstraling	37
3.2 Vrije-elektronenlasers	39
3.3 Onderzoek met behulp van neutronenstraling	42
3.4 Onderzoek met behulp van sterke magneetvelden	44
4 Signalering	47
4.1 Nanotechnologie	47
4.2 Natuurkunde van levende materie	47
4.3 Positronenstraling	48
Bijlagen	
1 Informanten	51
2 Overzicht internationale faciliteiten	53
3 Lijst van afkortingen	55

Inleiding

Achtergrond en aanleiding

Voor wetenschappelijk onderzoek is talent en creativiteit nodig. Maar voor veel natuurwetenschappelijk onderzoek is dat niet voldoende. Hier kunnen onderzoekers vaak niets beginnen zonder instrumenten. Waren in vorige eeuwen kleine instrumenten voldoende die door één universiteit, of zelfs door één onderzoeksgroep konden worden betaald, tegenwoordig zijn voor veel natuurwetenschappelijk onderzoek grote investeringen vereist. Vaak wordt over de landsgrenzen heen samengewerkt om deze investeringen te dragen. Wetenschapsbeleid en investeringsbeleid hangen daarom nauw samen. Welke inhoudelijke ontwikkelingen in het onderzoek in de toekomst zijn te voorzien en welke ontwikkelingen zou Nederland moeten stimuleren? In welke gebieden is Nederland sterk en wat is in deze gebieden het perspectief voor de komende tien à vijftien jaar? Hoe kan het Nederlandse wetenschappelijke profijt van deelname aan internationale faciliteiten worden vergroot? Met welke investering kan Nederland een bijdrage leveren aan het onderzoek, die inhoudelijk gericht is en bijdraagt aan de zichtbaarheid van de Nederlandse wetenschap?

Bij het beantwoorden van deze vragen moet rekening gehouden worden met het feit dat programmering van grote faciliteiten voor onderzoek afhankelijk is van meer aspecten dan onderzoeksinhoud alleen. Dit laat onverlet dat een visie op wetenschappelijke ontwikkeling vooraf moet gaan aan agendering van onderzoek en planning van investeringen.

Onderzoeksinfrastructuur: indeling in categorieën

Faciliteiten voor natuur-, sterrenkundig en natuurwetenschappelijk onderzoek waar Nederland structureel bij is betrokken kunnen in vier groepen worden verdeeld. De eerste groep bevat faciliteiten waarvan de nationale bijdrage op regeeringsniveau is overeengekomen. Zowel wetenschappelijke argumenten als geopolitieke overwegingen spelen een rol bij besluitvorming over deelname aan deze faciliteiten. De financiële bijdrage is bovendien relatief groot ten opzichte van het nationale onderzoeksbudget. Deze faciliteiten zijn onderhevig aan een fors positief momentum. Vanuit Nederland wordt goed deelgenomen aan de ontwikkeling van het wetenschappelijk werk, veelal vanwege een goed institutioneel verankerde thuisbasis en/of een nationale contactcommissie. Als gevolg hiervan is al sprake van nationale focus en coördinatie; er is een breed veld van onderzoekers en de thuisbasis of contactcommissie heeft een adviserende rol voor de nationale politiek. Het gaat om de hoge-energiefysica (CERN en NIKHEF), de optische sterrenkunde (ESO en NOVA/ASTRON), het ruimteonderzoek (ESA en SRON) en het kernfusieonderzoek (Euratom en FOM-Rijnhuizen). De onderhavige internationale faciliteiten spelen een cruciale rol in het veld: er zijn nauwelijks vergelijkbare instrumenten voorhanden. De wetenschappelijke kwaliteit is gewaarborgd als gevolg van het grote aanbod van onderzoeksvragen en het systeem van mondiale peer review. Deze faciliteiten worden volledigheidshalve kort besproken maar zij vallen hier zowel vanwege hun bestuurlijke koers-

vastheid als hun onbetwiste wetenschappelijke belang buiten de discussie.

De tweede groep telt faciliteiten die van wezenlijk belang zijn voor onderzoek in specifieke natuur- of sterrenkundige subdisciplines. Deze faciliteiten hebben een Europese tot mondiale uitstraling in hun vakgebied, maar de er aan ten grondslag liggende internationale samenwerking is niet op regeeringsniveau vastgelegd. De disciplines waarvoor deze faciliteiten van belang zijn, zijn de radioastronomie, de kernfysica en de hoge-energieastrodeeltjesfysica.

De derde groep bestaat uit faciliteiten die van belang zijn voor meerdere vakgebieden en die een faciliterende rol hebben in het onderzoek in deze disciplines. Natuurkundige principes zijn voor de werking van deze faciliteiten van wezenlijk belang en ze vervullen tevens een beperkte faciliterende rol voor de natuurkunde zelf. Het gaat om onderzoek met behulp van synchrotronstraling (ESRF/DUBBLE), onderzoek met behulp van vrije-elektronenlasers (FELIX/FELICE), onderzoek met behulp van neutronenstraling (ISIS en IRI) en onderzoek met behulp van sterke magneetvelden (HFML).

De vierde groep bestaat uit instrumenten waarvoor vanwege hun omvang, en dus kosten, geen samenwerkingsverbanden behoeven te worden aangegaan. Instrumenten die kunnen worden ontwikkeld en gebouwd met behulp van subsidie uit de fondsen NWO-Middelgroot (van € 110.000 tot € 900.000 per instrument) en NWO-Groot (meer dan € 900.000 per instrument; 18,5 miljoen euro per twee jaar beschikbaar) vallen in deze vierde categorie. Deze categorie wordt hier niet in beschouwing genomen.

De natuurkunde van nanostructuren en die van levende materie is de laatste jaren sterk in opkomst. Er vindt onderzoek plaats dat met apparatuur uit de vierde categorie kan worden uitgevoerd. Voor een deel van het onderzoek in deze subdisciplines zijn in de toekomst waarschijnlijk ook instrumenten vereist van behoorlijke omvang. Maar Nederland neemt daar thans niet op structurele wijze aan deel. Afgezien van enkele opmerkingen komen specifieke faciliteiten voor deze subdisciplines daarom hier niet aan de orde.

Werkgroep en werkwijze

De Raad voor Natuur- en Sterrenkunde (RNS) van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen heeft in het najaar van 2003 een werkgroep ingesteld met als taak een advies te formuleren over de wijze waarop het Nederlandse wetenschappelijke profijt van deelname aan internationale faciliteiten kan worden vergroot. Zo mogelijk zou de werkgroep moeten aangeven voor welke (sub)disciplines Nederland zelf een initiatief kan nemen voor het stichten van een nieuwe grootschalige faciliteit met internationale uitstraling. De werkgroep staat onder voorzitterschap van prof. dr. ir. J.A.M. Bleeker; de leden zijn prof. dr. K.J.F. Gaemers, prof. dr. E.P.J. van den Heuvel en prof. dr. P. Kruit. J.D. Schiereck is secretaris van de werkgroep.

De werkgroep is uitgegaan van een interne RNS-notitie met feitelijke, beschrijvende informatie over internationale faciliteiten voor natuur-, sterrenkundig en natuurwetenschappelijk onderzoek waaraan Nederland op structurele wijze deelneemt. Deze notitie heeft geleid tot een indeling van onderzoeksinstru-

mentatie in vier categorieën (zie bijlage 2 voor de in dit rapport besproken categorieën). Deze beschrijving vormde voor de RNS aanleiding een nadere beschouwing te maken van het betreffende onderzoek en van de rol die instrumentontwikkeling daarin speelt. Het werd wenselijk geacht om uitspraken te kunnen doen over ontwikkelingen in de betreffende subdisciplines en over mogelijkheden voor Nederland om daarop te kunnen inspelen.

De werkgroep is enkele malen bijeen geweest om taak en te beschouwen veld af te bakenen. Vervolgens zijn gerichte vragen gezonden aan onderzoeksleders over de toestand van het onderzoek in hun subdiscipline en de rol van internationaal geëxploiteerde onderzoeksinstrumenten. Na ontvangst van de reacties is met een aantal van hen mondeling overlegd over de schriftelijke reactie en over vragen die daaruit voortvloeiden. De werkgroep heeft vervolgens in vergadering en schriftelijk overlegd over de wijze waarop de ontvangen informatie en inzichten zouden kunnen worden geëvalueerd. Dit rapport berust wat betreft inhoudelijke informatie in grote mate op notities van de geraadpleegde onderzoeksleders. De conclusies en aanbevelingen vallen onder verantwoordelijkheid van de werkgroep.

In de hoofdstukken één tot en met vier wordt een overzicht gegeven van de wijze waarop Nederland participeert in onderzoeksfaciliteiten met een internationale status of uitstraling. Daarbij is een indeling aangehouden in drie groepen, te weten faciliteiten waarbij Nederlandse participatie op regeringsniveau is verankerd (hoofdstuk 1), faciliteiten van internationale statuus voor monodisciplinair onderzoek (hoofdstuk 2), en faciliteiten voor multidisciplinair onderzoek (hoofdstuk 3). Tevens worden enkele opmerkingen gemaakt over onderzoek waarvoor internationale samenwerking voor de stichting van grote faciliteiten spoedig noodzakelijk zal worden (hoofdstuk 4). Geheel voor in het rapport geeft de werkgroep aan welke conclusies kunnen worden getrokken uit de gevonden informatie en geeft ze aanbevelingen voor concrete actie. Om ook de internationale lezers van dienst te zijn is een Engelse vertaling van de conclusies en aanbevelingen toegevoegd.

Conclusies

De vier grote onderzoeksfaciliteiten

De Nederlandse participatie in internationale faciliteiten voor hoge-energiefysica, optische astronomie, ruimteonderzoek en kernfusieonderzoek is op nationaal niveau vastgelegd (hst. 1). Dit betekent een zeer goede uitgangspositie voor het Nederlandse onderzoek bij de betreffende faciliteiten. De aanwezigheid van een ‘thuisbasis’, zoals voor de hoge-energiefysica (NIKHEF), het kernfusieonderzoek (FOM-Rijnhuizen), de optische sterrenkunde (NOVA/ASTRON) en het ruimteonderzoek (SRON) het geval is, zorgt ervoor dat Nederlandse onderzoekers in staat zijn om optimaal te profiteren van de mogelijkheden die de grote faciliteiten bieden. Deze situatie is van wezenlijk belang voor het behoud van een vanuit mondiaal perspectief gezien vooraanstaande positie van het Nederlandse onderzoek. De huidige situatie dient derhalve tenminste op het huidige niveau te worden gecontinueerd.

Radiosterrenkunde, hoge-energie astrodeeltjesfysica, magneetveldenonderzoek

Nederland heeft in de radioastronomie (hst. 2.1), in het onderzoek naar hoog energetische neutrino's (hst. 2.3) en in het onderzoek met behulp van sterke magneetvelden (hst. 3.3) een uitstekende positie als het gaat om betrokkenheid bij bestaande en toekomstige grote internationaal geëxploiteerde onderzoeksfaciliteiten:

- Nederland speelt een leidende rol in het EVN, en sinds kort in LOFAR.
- Nederland draagt momenteel bij aan de ontwikkeling van ANTARES, een hoge-energieneutrino-telescoop in de Middellandse Zee. Hierdoor bevindt Nederland zich op het gebied van het neutrino-onderzoek in een goede uitgangspositie voor een participatie in de ontwerpstudie voor KM₃NET, de km³-neutrino-telescoop die eveneens in de Middellandse Zee is voorzien. Gezien het schaalverschil tussen beide installaties zal deelname aan KM₃NET tot wezenlijk nieuwe mogelijkheden leiden voor Nederlands onderzoek en technologieontwikkeling.
- Met het HFML heeft Nederland een toonaangevend instrument gesticht op eigen bodem. De positieve uitstraling daarvan voor de Nederlandse natuurkunde is belangrijk.

Politieke steun vanuit Den Haag bij de EU in Brussel is van eminent belang gebleken en dat zal in de toekomst blijven, voor het behoud van de vooraanstaande positie van de Nederlandse radio-astronomie, het neutrino-onderzoek en het onderzoek in sterke magneetvelden.

Kernfysica

Kernfusie en -splijting kunnen op termijn (opnieuw) van belang worden voor de energieconversie. Het is daarom voor Nederland van belang enige expertise op het gebied van de kernfysica te behouden (hst. 2.2). De deelname van Nederland aan het kernfysisch onderzoek wordt belemmerd door het ontbreken van een visie in de kernfysica om toekomstige speerpunten te definiëren. Dat maakt het

moeilijk om het onderzoek op een goede manier te positioneren en het is onduidelijk waarin Nederland goed zou kunnen investeren.

De ontwikkelingen die Nederland hierdoor kan mislopen liggen in grensverleggend onderzoek in verschillende subgebieden van de kernfysica, versnelde fysica, nieuwe meettechnieken en apparatuur, onderzoek naar nieuwe procedures voor energieconversie – daarbij kan onder meer worden gedacht aan participatie in ITER via de Europese Unie (zie ook hst. 1.2) – en op de lange termijn kennis over basistechnieken in de kernfysica en technische ontwikkelingen.

Voor de Nederlandse kernfysica is het van belang de formulering van doelen in het onderzoek te scheiden van die van mogelijkheden die een eigen nationale versneller zou kunnen bieden.

Faciliteiten voor multidisciplinair onderzoek

Realisatie van een monodisciplinair instrument kan het beste geschieden op basis van in het onderzoeksveld opkomende behoeften en belangstelling. Voor realisatie van een instrument met gebruiksmogelijkheden voor een waaier aan disciplines zijn daarentegen van buiten deze disciplines komend initiatief en stimulering noodzakelijk. Deze gebruikers komen zelf dikwijls uit andere disciplines dan de discipline die de principes en de expertise levert die noodzakelijk zijn voor ontwerp en gebruik van het instrument in kwestie. Daar komt bij dat de gebruikers primair zijn geïnteresseerd in de specifieke mogelijkheden die een faciliteit biedt voor hun eigen onderzoek. Twee voorbeelden zijn elektromagnetische straling en neutronenstraling.

Elektromagnetische stralingsbronnen

Röntgen vrije elektronenlasers

De bouw van vrije elektronenlasers (FEL) voor röntgenstraling staat momenteel in de belangstelling (hst. 3.2). Deze faciliteiten kunnen veel bijdragen aan materiaalonderzoek. Nederland kan op betrekkelijk eenvoudige wijze deelnemen in de ontwikkeling van een dergelijke FEL bij DESY (Hamburg).

Terahertzfaciliteit

Nederland heeft expertise op het gebied van infrarood vrije elektronenlasers (hst. 3.2). Deze expertise is inzetbaar voor ontwikkeling van een terahertz-faciliteit. De uitdaging daarbij bestaat uit het genereren van hoge vermogens. Terahertzlasers zijn inzetbaar voor levenswetenschappen en vaste stof fysica, met name onderzoek aan ladingsdragers en polymeren. Met dergelijke bundels kan onderzoek worden gedaan aan levende materie (eiwitbeweging). Vanuit onderzoeksoogpunt is subterahertzspectroscopie aan supergeleiders interessant; er zijn vele mogelijkheden voor toepassingsgericht onderzoek. Realisatie van een terahertzlaser zou een grote positieve uitstraling bieden voor het onderzoek buiten de natuurkunde, en buiten Nederland. Deze technologie sluit aan bij de expertise in Rijnhuizen rond de daar ontwikkelde en geëxploiteerde infraroodlasers. Voor de middellange termijn zijn Nederlandse onderzoekers identificeerbaar die hieraan zouden kunnen werken. De beslissing om in terahertz-technologie te investeren zal top down moeten worden genomen.

Neutronenstraling

Europa heeft op het terrein van neutronenstraling van oudsher een leidende rol, met het ILL en ISIS (nog) als grootste faciliteiten ter wereld (hst. 3.3). Neutronenstraling wordt gebruikt door een grote, maar diffuse, groep van onderzoekers.

Eind jaren negentig was het beleid er op gericht om in Nederland een kleine bron in stand te houden, afgeleid uit de onderzoeksreactor van het IRI. De mondiale onderzoeksbehoefte werd geschat op drie bronnen met een intensiteit die minstens een grootteorde uitstak boven ISIS en ILL. Inmiddels bouwen de Verenigde Staten en Japan elk een dergelijke neutronenbron. De politieke beslissing voor het bouwen van een vergelijkbare of grotere neutronenbron in Europa, de ESS, is tot nu toe niet genomen. Nadat de politieke beslissing is genomen zal het bouwen ongeveer 10 jaar vergen. Deze beslissing wordt thans niet voor 2007 verwacht. Een positieve beslissing ten aanzien van de ESS is op termijn te verwachten omdat neutronen zeer geschikt zijn voor vele disciplines. Met name vanuit de biologie en de natuurkunde van de zachte gecondenseerde materie zal in de toekomst een grote onderzoeksvraag ontstaan.

De positie van het Nederlandse onderzoek met behulp van neutronenverstrooiing verdient expliciet aandacht. De organisatie van dit onderzoek is nu versnipperd en ondoorzichtig. Het behoud van een eigen bundelfaciliteit voor experimenten staat onder druk (IRI). Gezien de potentiële belangstelling voor neutronenstraling als onderzoeksgereedschap voor vele disciplines, dient een kleinschalige neutronenbron als testfaciliteit voor validatie van experimenten in Nederland als zelfstandige entiteit te worden georganiseerd en te worden gericht op een breed spectrum van gebruikers.

Nanotechnologie

Het is thans onduidelijk of ontwikkelingen in de nanotechnologie (hst. 4.1) beter worden bevorderd met facilitaire mogelijkheden op basis van netwerken van instituten (zoals Nanolab), of, analoog aan de organisatie in de micro-elektronica, met enkele grote, breed geëquiperde centra (vergelijk IMEC). De mogelijkheid en wenselijkheid van beide modellen zou nader moeten worden onderzocht, in de eerste plaats door het formuleren van parameters en criteria voor het kunnen maken van een vergelijking van beide modellen. In de Verenigde Staten worden met steun van de federale overheid enkele instituten voor nanowetenschap opgericht. Een vergelijkbaar initiatief in Europa kan bijdragen aan de positie van nanowetenschap hier en aan wetenschappelijke en technologische samenwerking met de Verenigde Staten. Aangezien Nederland een goede uitgangspositie heeft in nanowetenschap, zou Nederland in een Europees initiatief een belangrijke rol kunnen spelen.

Aanbevelingen

Radiosterrenkunde, hoge-energieastrodeeltjesfysica, magneetvelden-onderzoek

Het Nederlandse onderzoek in de radiosterrenkunde, de hoge-energieastrodeeltjesfysica en het magneetveldenonderzoek neemt mondiaal gezien een goede positie in.

Het ministerie van OCW dient op Europees niveau actief de belangen te blijven behartigen van het Nederlandse onderzoek in de radiosterrenkunde, het neutrino-onderzoek en onderzoek in sterke magneetvelden.

Kernfysica

Kennis van de kernfysica blijft noodzakelijk voor inzicht en participatie in toekomstige ontwikkelingen in kernfusie en -splijting.

De Nederlandse kernfysica dient speerpunten voor toekomstig onderzoek te identificeren. De internationale inbedding van de Nederlandse kernfysica en de daar toegevoegde waarde dienen daarbij centraal te staan. Zo moet inzicht worden verschaft in welke (internationale) faciliteiten het beste kan worden geïnvesteerd; beschikbaarheid voor de 'thuisbasis' van een eigen faciliteit dient daarbij van ondergeschikt belang te zijn. De Raad voor Natuur- en Sterrenkunde van de KNAW is bereid, bij voorkeur in samenwerking met NWO, in dezen een faciliterende en initiërende rol te vervullen.

Elektromagnetische stralingsbronnen

Röntgen vrije elektronenlaser

Bij DESY (Hamburg) wordt in het komend decennium een grote röntgenlaserfaciliteit ontwikkeld voor onderzoek naar tijdsafhankelijke atomaire en moleculaire processen op een tijdschaal van femtoseconden. Duitsland draagt vijftig procent van de kosten zelf en zoekt voor het resterende deel internationale partners. Gezien de revolutionaire technologie en de wetenschappelijke potentie zou Nederland serieus moeten onderzoeken hoe hieraan zinvol (ook technologisch) kan worden deelgenomen.

NWO zou moeten analyseren op welke onderdelen Nederland optimaal kan bijdragen en zij zou hiervoor draagvlak in het onderzoeksveld en (financiële) steun op het politieke niveau moeten realiseren.

Terahertzfaciliteit

Een terahertzfaciliteit biedt vele mogelijkheden voor Nederlands onderzoek op het gebied van levenswetenschappen en de vaste stof fysica. In Nederland is veel expertise aanwezig op het gebied van vrije-elektronenlasers. Nederland is vooralsnog wetenschappelijk en technisch uitstekend gepositioneerd voor ontwikkeling en bouw van een terahertzfaciliteit. De financiële inspanning

voor realisatie van een dergelijke faciliteit is voor Nederland haalbaar (enkele tientallen miljoenen euro's) en een dergelijke faciliteit zou een grote uitstraling hebben in de internationale natuurwetenschappelijke onderzoekswereld. Gezien de belangstelling voor realisatie van een terahertzbron elders (Jefferson Lab, Novosibirsk) is snelheid geboden ten aanzien van besluitvorming.

NWO zou terstond met het ministerie van OCW de mogelijkheden moeten verkennen om een terahertzfaciliteit in Nederland te stichten. Het is daarbij van belang uit de groep van belangrijke gebruikers ten minste één gebruiker (launching customer) hierbij te betrekken.

Neutronenstraling

Voor de bepaling van het Nederlandse beleid zou moeten worden uitgegaan van de komst van de ESS in 2017. Het in stand houden van een thuisbasis voor neutronenonderzoek biedt Nederland de mogelijkheid om in de toekomst een goede rol te kunnen spelen in de bouw en daarna het gebruik van de ESS. Voor de opbouw van de hiervoor noodzakelijke kennis en ervaring op het gebied van gebruik van de faciliteit en van ontwikkeling van apparatuur, is het noodzakelijk dat:

- Nederlandse onderzoekers formeel toegang hebben tot en gebruik maken van de krachtigste faciliteiten die nu beschikbaar zijn, de Europese ILL en ISIS.
- Een 'thuisbasis' voor onderzoek met neutronenbundels wordt geïdentificeerd die op nationaal niveau een coördinerende en ondersteunende rol speelt. De neutronengroep van het IRI zou hiervoor op het nationale niveau een logische kandidaat zijn.

NWO zou op korte termijn een review met hulp van internationale neutronen-experts moeten organiseren om voor Nederland de voor de toekomst meest kansrijke aanpak voor een coherente nationale inspanning op dit terrein te waarborgen.

Nanowetenschap en nanotechnologie

Nanowetenschap en nanotechnologie zijn momenteel zeer sterk in ontwikkeling. De overgang van nanowetenschap naar nanotechnologie betekent een enorme vergroting van het scala aan innovatieve toepassingen. Daarbij is mogelijk schaalvergroting, zoals bij het onderzoek in de micro-elektronica (IMEC), van belang. De mondiale positie van de nanowetenschap in Europa, en de rol die Nederland daarbij speelt, kunnen hierbij in het geding zijn.

Onderzocht dient te worden op welke wijze een afweging is te onderbouwen over de organisatie van nanowetenschap en nanotechnologie, waarvoor thans zowel netwerken van kleine centra als concentratie in één of enkele (zeer) grote instituten als reële mogelijkheden worden gepercipieerd. De kansen en bedreigingen in internationaal perspectief dienen daarbij in kaart te worden gebracht. De Raad voor Natuur- en Sterrenkunde van de KNAW is bereid hierin een rol te spelen.

Conclusions

The four major research facilities

Dutch participation in international facilities for high-energy physics, optical astronomy, space research and nuclear fusion research has been laid down at national level (ch. 1). This provides the Dutch research relating to the facilities in question with an excellent starting position. The existence of a ‘home base’, as in the case of high-energy physics (NIKHEF), nuclear fusion research (FOM-Rijnhuizen), optical astronomy (NOVA/ASTRON) and space research (SRON), ensures that Dutch researchers are able to benefit to the full from the possibilities offered by large facilities. This situation is vitally important for Dutch research to maintain its leading position at international level. The current situation should therefore be continued at at least its present level.

Radio astrology, high-energy astro-particle physics, magnetic field research

When it comes to involvement in existing and future large, internationally operated research facilities, the Netherlands occupies an excellent position in radio astronomy (ch. 2.1), research into high-energy neutrinos (ch. 2.3) and research with the aid of strong magnetic fields (ch. 3.3).

- The Netherlands plays a leading role in the European Very Long Baseline Interferometry Network (EVN) and (since recently) the Low Frequency Array (LOFAR).
- The Netherlands is currently contributing towards the development of ANTARES, a high-energy neutrino telescope in the Mediterranean Sea. In the field of neutrino research this leaves the Netherlands well-placed to participate in the design study for KM₃NET, the km³-neutrino telescope also planned for the Mediterranean Sea. Given the difference in size of the two installations, participation in KM₃NET will result in radically new possibilities for Dutch research and technological development.
- The High Field Magnet Laboratory (HFML) in Nijmegen provides the Netherlands with a leading instrument on its own ground. The HFML also provides a significant and positive boost for physics in the Netherlands more generally.

The political support given by The Hague at the EU in Brussels has proved vitally important and will remain so in the future so as to ensure that the Netherlands retains its leading position in radio astronomy, neutrino research and strong magnetic field research.

Nuclear physics

Nuclear fusion and fission could in due course (once again) be of importance in energy conversion. The Netherlands therefore has an interest in maintaining a certain level of expertise in the field of nuclear physics (ch. 2.2). Dutch participation in nuclear physics research is held back by the lack of vision in this field when it comes to defining the focal points for the future. This makes it difficult to position the research effectively and it is unclear where the Netherlands could invest to good effect.

The developments that the Netherlands could consequently miss out on are related to pioneering research in various specialist areas of nuclear physics, accelerator physics, new measurement techniques and equipment, research into new procedures for energy conversion – including participation in the ITER fusion power experiment through the EU (see also ch. 1.2) – and, in the long-term, knowledge of basic techniques in nuclear physics and technical developments.

It is important for Dutch nuclear physics that the formulation of research goals be separated from the possibilities that having a separate national accelerator could offer.

Facilities for multidisciplinary research

The construction of a monodisciplinary facility can best be undertaken on the basis of the emerging needs and interests in the research field in question. By contrast the construction of an instrument with potential applications in a range of disciplines requires external initiative and stimulus. The users in the latter case are often drawn from disciplines other than that providing the principles and expertise required for the design and use of the facility in question. In addition users are primarily interested in the specific possibilities that a facility offers for their own research. Two examples are electromagnetic radiation and neutron radiation.

Electromagnetic radiation sources

X-ray free electron lasers

The construction of free electron lasers (FEL) for X-ray purposes is currently the focus of attention (ch. 3.2). Such facilities can make a major contribution towards materials research. It would be possible for the Netherlands to take part in the development of such a FEL at the Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg relatively straightforwardly.

Terahertz facility

The Netherlands has expertise in the field of infrared free electron lasers (ch. 3.2) that could be used in the development of a terahertz facility. The particular challenge here is to generate high capacities. Terahertz lasers can be used in the life sciences and solid state physics, especially research into charge-carriers and polymers. These kinds of beams can also be used for research into living matter (e.g. protein movement). From a research viewpoint subterahertz spectroscopy of superconductors is of interest, with numerous opportunities for application-oriented research. The construction of a terahertz laser would have a major positive knock-on effect for research outside the field of physics and also outside the Netherlands. This technology links up with the expertise built up at Rijnhuizen with the development and operation of infrared lasers. Dutch researchers capable of working in this area are clearly available in the medium term. The decision to invest in terahertz technology will need to be taken on a top-down basis.

Neutron radiation

Europe has long played a leading role in the field of neutron radiation; the Institut Laue Langevin (ILL) and ISIS are (still) the largest facilities in the world (ch. 3.3). Neutron radiation is used by a large but diffuse group of researchers.

The policy in the late 1990s was aimed at maintaining a small source in the Netherlands, derived from the Interfaculty Reactor Institute (IRI) research reactor. The worldwide research requirement was put at three sources with an intensity at least one order of magnitude in excess of that of ISIS and ILL. In the meantime both the US and Japan are each building a neutron source of this kind. The political decision to build a comparable or larger neutron source in Europe – the European Spallation Source (ESS) – has not yet been taken. Once it has, construction will take approximately ten years. At present no such decision is anticipated before 2007. A positive decision with regard to the ESS is likely in due course since neutrons can be effectively used in so many disciplines. In particular the biology and physics of soft condensed material will generate a large research demand in the future.

The position of Dutch research with the aid of neutron dispersion deserves explicit attention. At present the organisation of this research is fragmented and lacks transparency. The retention of a separate beam facility for experiments (IRI) is under pressure. In view of the potential interest in neutron radiation as a research tool in many disciplines a small-scale neutron source should be set up as an independent entity and test facility for the validation of experiments in the Netherlands, aimed at a wide spectrum of users.

Nanotechnology

It is at present unclear whether developments in the field of nanotechnology (ch. 4.1) would best be served by working on the basis of networks of institutes (such as ‘Nanolab’) or – by way of analogy with the organisation of microelectronics – by a number of large, well-equipped centres (cf. the Interuniversity Microelectronics Center, IMEC). The potential for and desirability of both models needs to be explored further, in the first place by the formulation of parameters and criteria for comparing the two. A number of nanoscience institutes are being set up in the US with federal government support. A comparable initiative in Europe could help improve the position of nanoscience here, as well as scientific and technological cooperation with the US. Since the Netherlands is well-placed in nanoscience it could play a significant role in any European initiative.

Recommendations

Radio astronomy, high-energy astro-particle physics, magnet field research

Dutch research in radio astronomy, high-energy astro-particle physics and magnet field research is well to the forefront internationally.

The Ministry of Education, Culture and Science should continue at European level to promote the interests of Dutch research in radio astronomy, neutrino research and research in strong magnetic fields.

Nuclear physics

Knowledge of nuclear physics remains essential in order to understand and participate in future developments in nuclear fusion and fission.

Dutch nuclear physics needs to identify focal areas for future research, based on the international context and the value added at that level. It is important, for example, to identify the national and international facilities in which investments can best be made; in this regard the availability of a separate facility for the 'home base' should be of secondary importance. The Council for Physics and Astronomy of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences is prepared to play a facilitating and initiating role here, preferably in cooperation with NWO.

Electromagnetic radiation sources

X-ray free electron laser

A large x-ray laser facility is to be developed at DESY (Hamburg) over the next ten years for research into time-dependent atomic and molecular processes on a timescale of femtoseconds. Germany will be bearing fifty percent of the cost itself and is otherwise looking for international partners. Given the revolutionary technology and scientific potential involved, the Netherlands should be seriously investigating how it can make a meaningful contribution to this facility (including in terms of technology).

NWO should analyse the areas in which the Netherlands could make the greatest contribution, creating the necessary support base in the research field and providing financial and other support at political level.

Terahertz facility

A terahertz facility offers numerous opportunities for Dutch research in the life sciences and solid state physics. The Netherlands has considerable expertise in the field of free electron lasers. Scientifically and technically, the Netherlands is excellently placed to develop and build a terahertz facility. The Netherlands would certainly be capable of funding such a facility (cost: several tens of mil-

lions of euros), which would make a major impact in the international physics research world. Given the interest elsewhere in constructing a terahertz source (Jefferson Lab, Novosibirsk), a decision would need to be taken rapidly.

NWO should immediately explore the possibilities with the Ministry of Education, Culture and Science of establishing a terahertz facility in the Netherlands. In this regard it would be important to involve at least one launching customer from the group of major users.

Neutron radiation

Dutch policy should be based on the assumption that the ESS will come on stream in 2017. The preservation of a ‘home base’ for neutron research provides the Netherlands with the opportunity to continue playing an effective future role in the construction and later the use of the ESS. In order to build up the necessary knowledge and experience with regard to the use of the facility and development of equipment, it is necessary for:

- Dutch researchers to have formal access to and make use of the most powerful facilities now available, namely the European ILL and ISIS.
- a ‘home base’ for research with neutron beams to be identified in order to play a coordinating and support role at national level. The IRI neutron group would be a logical candidate at national level.

NWO should organise a review in the short term with the aid of international neutron experts to ensure that the most promising approach towards a coherent national effort in this field is adopted in the Netherlands.

Nanoscience and nanotechnology

Nanoscience and nanotechnology are currently growing rapidly. The switch from nanoscience to nanotechnology means an enormous increase in the range of innovative applications. As in the case of research into microelectronics (IMEC), increases in scale may be important in this regard. The global position of nanoscience in Europe and the role played in this area by the Netherlands could be at issue here.

Consideration should be given as to how nanoscience and nanotechnology should be structured in the Netherlands, with a choice between networks of small centres or concentration into one or a few large or very large institutes. In this regard the threats and opportunities from an international perspective need to be identified. The Academy’s Council for Physics and Astronomy is prepared to play a role in this respect.

Op nationaal niveau participeert Nederland voor de hoge energiefysica in CERN, voor het kernfusieonderzoek in Euratom, voor de optische sterrenkunde in ESO en voor het ruimteonderzoek in ESA.

1.1**Hoge-energiefysica**

De hoge-energiefysica onderzoekt de eigenschappen en wisselwerkingen van fundamentele deeltjes en velden. De volgende stap in dit onderzoek is gericht op het bestuderen van elektrozwakke symmetriebreking ('hoe krijgen deeltjes massa?') en wellicht het blootleggen van een hogere symmetrie tussen de fundamentele deeltjes (supersymmetrie). De moderne hoge-energiefysica is hiervoor aangewezen op versnellers die onderzoek aan de 'energiegrens' mogelijk maken. Dergelijke versnellers kunnen slechts worden gerealiseerd en onderhouden indien middelen daarvoor op internationale schaal gecombineerd worden. Dat heeft geleid tot een, vanuit mondiaal perspectief gezien, beperkt aantal versnellercentra. Voor het Nederlandse onderzoek is CERN (Genève) het belangrijkste; ook wordt onderzoek gedaan bij DESY (Hamburg). Het Nederlandse onderzoek in de hoge-energiefysica wordt voor een belangrijk deel gecoördineerd door het Nationaal Instituut voor Kern- en Hoge-Energie Fysica (NIKHEF).

In 1951 is de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) opgericht. CERN onderhoudt een aantal deeltjesversnellers waaraan verschillende meetopstellingen zijn gekoppeld. CERN werkt thans aan de grootste versneller ooit gebouwd, de Large Hadron Collider. Deze versneller is bedoeld om protonen en ionen met TeV-energieën met elkaar in botsing te brengen. Ontwerp, bouw en gebruik worden door en vanuit landelijke expertisecentra geregeld, voor Nederland vanuit het NIKHEF. Thans zijn 20 landen lid¹ van CERN. Daarnaast zijn een aantal landen als waarnemers aangesteld.² De lidstaten betalen contributie evenredig met hun bruto nationaal product. De waarnemers betalen een relatief kleinere bijdrage en hebben minder zeggenschap over de organisatie dan gewone lidstaten. De totale begroting van CERN heeft een omvang van ongeveer 635 miljoen euro per jaar. Er is geen afzonderlijk budget voor investeringen. De Nederlandse bijdrage, vanuit het ministerie van OCW bedraagt 30,1 miljoen euro (2002).

Het Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) is een nationaal Duits onderzoeksinstituut. Het instituut is in 1959 opgericht en vormt een onderdeel van de Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF). Het internationaal gefinancierde onderzoek is geregeld in bilaterale overeenkomsten. Nederland heeft via de ministeries van OCW en EZ financiële steun verleend aan contracten met de Nederlandse industrie voor bijdragen aan de in 1992 in gebruik genomen HERA-versneller. Vanuit het NIKHEF wordt het Nederlandse onderzoek bij HERA gecoördineerd en worden experimenten uitgevoerd en resultaten geanalyseerd. De Nederlandse middelen voor deze experimenten

¹ Lidstaten zijn België, Bulgarije, Denemarken, Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Hongarije, Italië, Nederland, Noorwegen, Oostenrijk, Polen, Portugal, Slowakije, Spanje, Tsjechië, Verenigd Koninkrijk, Zweden, Zwitserland.

² Waarnemers: Israël, Japan, Rusland, Turkije, Verenigde Staten, Europese Commissie, UNESCO.

komen uit de begroting van het NIKHEF. DESY is gevestigd te Hamburg en te Zeuthen en heeft een budget van 153 miljoen euro.

In de European Committee for Future Accelerators (ECFA) en de OECD Consultancy Group on High Energy Physics wordt gesproken over mogelijkheden om een mondiale faciliteit te realiseren: de Linear Collider. In deze versneller, die een lengte van ongeveer 30 kilometer zal krijgen zullen elementaire deeltjes (in het bijzonder elektronen en positronen) met een energie van 1000 GeV met elkaar in botsing worden gebracht. De technische hindernissen voor het bouwen van een dergelijke versneller lijken thans te zijn overwonnen (versnellingsgradiënten van 25 tot 50 MV.m⁻¹ en diameters van deeltjesbundels in de orde van 10-9 m).

1.2

Fusieonderzoek

Fusieonderzoek is een multidisciplinair gebied van onderzoek. Het zwaartepunt van het fusieonderzoek ligt voor wat betreft de fysica in de plasmafysica, en voor de technologie voornamelijk in materiaalonderzoek en supergeleidende magneten. Atoomfysica speelt een rol in de (relatief koele) rand van het plasma. Fusieonderzoek vereist zeer grootschalige investeringen. Dit onderzoek vindt daarom voornamelijk plaats in het kader van internationale samenwerkingsverbanden. Voor het Europese fusieonderzoek is dat het verdrag van de European Atomic Energy Community (Euratom). Met de middelen die de lidstaten via het lidmaatschap van de EU op grond van dit verdrag inbrengen, wordt kernsplitsings- en -fusieonderzoek uitgevoerd.

Hierna komen aan de orde Euratom, de Joint European Torus (JET), de International Thermonuclear Reactor (ITER) en de Nederlandse 'thuisbasis' voor het fusieonderzoek, FOM-instituut Rijnhuizen.

Het onderzoeksbeleid van Euratom voor fusieonderzoek wordt vastgesteld op advies van de Consultative Committee for the Euratom specific research and training programme in the field of nuclear energy (fusion) (CCE-FU). Alle lidstaten van de Europese Unie, Zwitserland en Roemenië nemen eraan deel. De stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) vertegenwoordigt Nederland in Euratom op grond van het Associatieverdrag Euratom-FOM. Het Euratombudget is een geormerkt onderdeel van de budgetten van de achtereenvolgende Kaderprogramma's. Het Euratombudget heeft in het Zesde Kaderprogramma een omvang van 1,23 miljard euro (gedurende vier jaren). Daarvan is 750 miljoen euro bestemd voor fusieonderzoek. Nederland draagt via het lidmaatschap van de Europese Unie (EU) op basis van het BNP 5 % bij aan het Euratombudget. Euratom draagt 20 % van alle nationaal gemaakte kosten voor fusieonderzoek, tot een tevoren bepaald plafond; dit is de zogenaamde *basic support*. Daarnaast draagt Euratom 40 % bij in specifieke investeringen in grote installaties voor fusieonderzoek. Er is afgezien van de bijdrage aan JET (zie hieronder) geen afzonderlijke contributie aan Euratom.

Nederlands fusieonderzoek vindt plaats bij de Joint European Torus (JET) en in bilaterale samenwerkingsverbanden. De JET te Culham (Verenigd Koninkrijk)

is thans de grootste experimentele fusiereactor ter wereld³. De exploitatie wordt voor 60 miljoen euro per jaar betaald uit middelen uit het Euratomverdrag, en voor 12 miljoen euro (oplopend tot 14 miljoen euro) uit het zogenaamde *joint fund*: middelen die rechtstreeks afkomstig zijn uit de verschillende deelnemende landen. Voor Nederland draagt FOM hiervoor jaarlijks € 250.000 bij. JET valt sinds 2000 onder het European Fusion Development Agreement (EFDA). Het EFDA is in 1999 opgericht door Euratom en onderzoeksorganisaties uit een groot aantal Europese landen. Nederland wordt door FOM vertegenwoordigd in EFDA.

Nederland zal via de EU deelnemen aan ontwerp en bouw van de International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). ITER is een door Rusland, Japan, Verenigde Staten, Zuid-Korea en de EU gezamenlijk te construeren proefreactor voor kernfusie. De beoogde reactor is twee maal zo groot als JET en zal de eerste zijn waarmee in een experimentele omgeving een netto vermogensvermenigvuldiging kan worden gerealiseerd. De plannen voor ITER zijn eind jaren '80 van de vorige eeuw door de Verenigde Staten, Japan, de EU en Rusland geformuleerd. Nadat een eerste plan te duur bleek om politiek draagvlak te genereren, is over een afgeslankte versie overeenstemming bereikt. Momenteel wordt onderhandeld over de ITER Joint Implementation Agreement: het gaat om de locatie, de gunning van contracten en de verdeling van kosten, het benoemen van een directeur-generaal en de organisatievorm. De investeringskosten voor ITER worden voorlopig geraamd op ongeveer 4,5 miljard euro. Naast ITER worden andere machines voorzien in het kader van de zogenaamde *broader approach*. De belangrijkste hiervan is IFMIF, een faciliteit om materialen met snelle neutronen (circa 14 MeV) te bestralen.

Nederlands fysisch fusieonderzoek is geconcentreerd op het FOM-instituut voor plasmafysica Rijnhuizen. Het instituut heeft een samenwerkingsverband met het Forschungszentrum Jülich (bij Aken) en de Koninklijke Militaire School te Brussel, tezamen het Trilateral Euregio Cluster (TEC) vormend. De experimenten van het wetenschappelijk programma van TEC worden voornamelijk uitgevoerd op de tokamak-reactor TEXTOR in Jülich, deels bij JET en soms ook bij andere internationale faciliteiten. Nederland draagt met 1,5 miljoen euro bij aan de exploitatielast (35 %). Er bestaat voorts intensieve samenwerking met een aantal Europese instituten, waaronder het Max Planck Instituut voor plasmafysica in Garching, Duitsland en de Tore Supra te Cadarache, Frankrijk. Het FOM-instituut Rijnhuizen werkt thans aan de opzet van een experiment ('Magnum-psi') op gebied van interactie tussen plasma en wand. Dit onderzoek is van groot belang voor ITER en internationaal georiënteerd.

Met de hoge-fluxreactor in Petten wordt door de Nuclear Research and Consultancy Group (NRG) onderzoek gedaan naar neutronenbestendigheid van materialen voor fusiereactoren.

³ De – op afstand – tweede experimentele reactor staat in Japan: JT60 upgrade. In deze machine kan in tegenstelling tot in JET alleen met deuterium worden gewerkt. De VS hadden wel een reactor (TFTR) waarin met tritium kon worden geëxperimenteerd, maar deze reactor is in 1998 gesloten.

1.3

Optische sterrenkunde

De optische sterrenkunde in Nederland en Europa, is enorm gestimuleerd door de stichting in 1962 van de European Southern Observatory (ESO), op initiatief van astronoom J.H. Oort, door Nederland, Zweden, Duitsland en België, met steun van de Ford Foundation.⁴ Het doel was een astronomisch waarnemingsstation te realiseren op het zuidelijk halfrond, uitgerust met krachtige apparatuur, teneinde de internationale samenwerking op astronomisch gebied te bevorderen.

Het hoofdkantoor van ESO bevindt zich in Garching, Duitsland. In Santiago, Chili, staat tevens een kantoor. ESO beheert twee sterrenwachten in Chili (La Silla Observatorium en de Very Large Telescope (VLT) te Paranal). In juli 2002 heeft ESO besloten deel te nemen aan de bouw van de Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Canada en de VS zullen eveneens deelnemen in dit project, en later wellicht ook Japan. ESO publiceert haar onderzoeksvoornemens in een plan voor de lange termijn. Op verschillende plaatsen wordt momenteel onderzoek gedaan naar mogelijkheden voor de bouw van extreem grote telescopen, met diameters tot 100 meter. Zo onderzoekt ESO mogelijkheden voor de bouw van een 100 meter-telescoop voor zichtbaar en infrarood licht (Overwhelmingly Large Telescope, OWL). De lidstaten dragen bij in de kosten van de ESO, naar rato van het BNP. In de toekomst zal de maximale bijdrage in stappen worden verlaagd naar 24 % (in 2006) van het totale budget, vanwege de toetreding van het Verenigd Koninkrijk. De bijdrage per land zal daarbij gelijk blijven; de bijdrage van het Verenigd Koninkrijk betekent dus een uitbreiding van het ESO-budget. Het totale budget had in 2000 een omvang van 96,4 miljoen euro. Nederland draagt via het ministerie van OCW 5,5 miljoen euro bij (2002).

Om waarnemingen van objecten in de noordelijke hemel mogelijk te maken doet Nederland mee op het niveau van 20 % aan de Isaac Newton Group (ING) van optische telescopen op La Palma in de Canarische Eilanden. De ING wordt geëxploiteerd door de Britse research council PPARC; de participatie van Nederland wordt georganiseerd via NWO-EW. Onderzoek in de optische sterrenkunde wordt in Nederland via NOVA en ESO gecoördineerd; dit valt buiten de beschouwing van dit rapport.

ASTRON is een technisch facilitair instituut voor de Nederlandse sterrenkunde. Het instituut werkt nauw samen met de Nederlandse universitaire sterrenkundige gemeenschap, te weten de onderzoeksschool NOVA. ASTRON bouwt in beperkte mate instrumenten voor optische sterrenkunde, zowel voor de samenwerking tussen het Verenigd Koninkrijk en Nederland (ING op La Palma, JCMT op Hawaï) als voor de ESO telescopen. De hoofdtaak van het instituut ligt bij de radioastronomie.

1.4

Ruimteonderzoek

Het ruimteonderzoek kent drie gebieden: astronomisch onderzoek, aardgericht ruimteonderzoek en microgewichtsonderzoek. Astronomisch onderzoek vindt

⁴ Later hebben Frankrijk, Denemarken, Zwitserland, Italië, Portugal en, in 2003, het Verenigd Koninkrijk zich hierbij aangesloten.

voor een deel vanuit de ruimte plaats, omdat delen van het spectrum van elektromagnetische straling vanaf de aarde niet waarneembaar zijn. Het aardgerichte ruimteonderzoek biedt mogelijkheden 'globaal' inzicht te verkrijgen in klimatologische en meteorologische processen. Onderzoek in de ruimte biedt voorts mogelijkheden voor het doen van waarnemingen waarbij de invloed van de zwaartekracht langdurig sterk is gereduceerd.

Nederland speelt een belangrijke rol in het astrofysisch ruimteonderzoek, wat betreft waarnemingen in de golflengtegebieden van submillimeter tot infrarood (lage energieastrofysica), en röntgen- en gammastraling (hoge energieastrofysica). Het Nederlandse onderzoek aan de zon en de planeten is in de loop van de jaren '80 afgebouwd. Op het gebied van aardobservatie is het Nederlandse onderzoek goed vertegenwoordigd in het onderzoek naar de topografie en de fluctuaties in het aardse zwaartekrachtveld en op het gebied van atmosferische chemie op planetaire schaal, hetgeen van eminent belang is voor het klimaatonderzoek.

De European Space Agency (ESA) is opgericht in 1975, als opvolger van de in 1964 gestichte European Space Research Organisation. ESA kent 15 lidstaten. De bijdrage van de lidstaten aan de basisactiviteiten van ESA (waaronder het Science-programma) is gerelateerd aan het BNP. Daarnaast zijn er zogenaamde optionele programma's, waarvoor op basis van belangstelling of nationale prioriteit kan worden ingeschreven. In het hoogste bestuursorgaan, de ESA-Council, hebben de ministers van onderzoek of economische zaken van de lidstaten zitting. Voor Nederland is EZ het coördinerend ministerie, maar OCW speelt een bepalende rol bij het landelijke beleid ten aanzien van de wetenschappelijke programma's van ESA. Voor zaken die niet primair gericht zijn op onderzoek, spelen de ministeries van venw en EZ een belangrijke rol. Het European Space Research and Technology Centre (ESTEC) te Noordwijk is een onderdeel van ESA en tevens de grootste vestiging van deze organisatie in Europa. ESTEC coördineert het technisch management van de ruimtevaartprojecten van ESA, zorgt voor technische ondersteuning van projecten en voor ontwikkeling van nieuwe technologie, bewaakt de kwaliteit van ESA-projecten en testsatellieten. De onderzoeksprojecten waaraan bij ESTEC wordt gewerkt, variëren van fundamenteel tot toepassingsgericht onderzoek. Bij ESTEC werken ongeveer 1600 mensen waarvan er 1000 worden betaald uit middelen van ESA.

De nationale bijdrage aan het ESA-Science Programme (SP; astronomisch onderzoek) is vastgesteld op basis van het BNP van de deelnemende landen (voor Nederland 4,65 % van het ESA-SP-budget). De OCW-bijdragen voor de andere twee onderdelen zijn afhankelijk van het Nederlandse beleid. Het totale ESA-budget voor wetenschappelijk onderzoek bedraagt 770 miljoen euro. De totale OCW-bijdrage bedraagt in 2002 30,2 miljoen euro.

De Nederlandse inspanning in dit onderzoek wordt gecoördineerd door de Stichting Ruimteonderzoek Nederland (SRON), die de functie vervult van landelijk expertisecentrum. Bij SRON zijn ongeveer 250 personen werkzaam, waarvan 150 in het onderzoek. Het grootste deel van het Nederlandse ruimteonderzoek vindt plaats via ESA, een kleiner deel via de NASA en andere *space agencies*.

Daarbij wordt samengewerkt met onderzoekers in de vs. In sommige gevallen zijn instrumenten op NASA-satellieten gemonteerd die afkomstig zijn uit Nederland.

Het gaat hier om faciliteiten voor wetenschappelijk onderzoek met een internationale uitstraling en een door meerdere landen gedragen financiering, voor bouw en/of voor exploitatie. In tegenstelling tot de vorige categorie is hier geen sprake van op regeeringsniveau vastgelegde samenwerking: alle initiatieven komen vanuit het veld.

2.1

Radiosterrenkunde

Sinds 1949 is Nederland actief in de radiosterrenkunde. Gedurende een aantal jaren zijn de antenne te Dwingeloo en de Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) de grootste en meest gevoelige ter wereld geweest. De antenne te Dwingeloo is inmiddels niet meer in gebruik. Na een grondige renovatie is de telescoop te Westerbork in zijn soort opnieuw het meest gevoelige instrument ter wereld voor specifieke golflengtebanden. Het onderzoek richt zich vooral op neutronensterren (pulsars), waterstof in melkwegstelsels als indicatie van donkere materie en van de evolutionaire status, alsmede op zwarte gaten en andere extreme fysica in het heelal.

Interferometrie in het radiogebied biedt de mogelijkheid om met een groter hoekscheidend vermogen astronomische waarnemingen te doen dan in het zichtbare spectrum. Trends in het onderzoek zijn gedetailleerde waarnemingen aan radiosterren in het Melkwegstelsel, aan zwakke radiostelsels, en zeer diepe onderzoeksmetingen van beperkte gebieden van de hemel. De radiotelescopen kunnen aan randapparatuur worden gekoppeld, waaronder ontvangers voor specifieke spectraallijnen. Radiotelescopen kunnen voorts worden ingezet voor geodetisch onderzoek.

Radiosterrenkundig onderzoek met zeer groot hoekscheidend vermogen wordt in Europa gedaan via het European Very Long Baseline Interferometry Network (EVN). EVN is in 1980 opgericht door vijf radiosterrenwachten, in Nederland, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk, Zweden en Italië. Het doel was drieledig: gezamenlijk uitvoeren van waarnemingen, samenwerken in wetenschappelijk onderzoek, en het bieden van een structuur voor radiosterrenkunde met een groot hoekscheidend vermogen. Inmiddels nemen 15 radiotelescopen deel aan het EVN. In 1993 is als Europees centrum het Joint Institute for Very long baseline Interferometry in Europe (JIVE) te Dwingeloo opgericht, teneinde het gebruik van het Europese Very Long Baseline Interferometry (VLBI)-netwerk te coördineren en te ondersteunen.

De WSRT is operationeel sinds 1970. De WSRT is een zeer belangrijke schakel in het Europese VLBI-netwerk. De exploitatie wordt volledig betaald met Nederlandse middelen onder verantwoordelijkheid van ASTRON. Het jaarlijkse exploitatiebudget is 3,5 miljoen euro hetgeen geheel afkomstig is uit de jaarlijkse structurele toekenning van NWO aan het ASTRON Instituut. De WSRT, die een vervangingswaarde heeft van circa 91 miljoen euro, is het primaire instrument van de sterrenwacht. De WSRT is recent gerenoveerd voor circa 12 miljoen euro uit middelen van NWO.

De hoofdtak van ASTRON is de ontwikkeling en bouw van meetinstrumenten voor radiotelescopen, vooral voor de WSRT maar ook voor JIVE en andere internationale faciliteiten, alsmede beheer en exploitatie van de eigen telescoop. Tevens wordt technologie ontwikkeld voor toekomstige radiotelescopen.

Op de agenda van het radioastronomisch onderzoek staan de volgende punten:

- Het vergroten van de waarnemingsgevoeligheid door het vergroten van de detectiebandbreedte en door het ontwikkelen van systemen met een hogere signaal/ruis-verhouding.
- Het ontwikkelen van antennes en arrays en datatransport van arrays naar centrale rekenautomaten.
- Het ontwikkelen van nieuwe methoden voor dataverwerking en voor de weergave van de gehele (sterren)hemel met een groot hoekscheidend vermogen vanuit base lines met lengtes van tientallen meters tot duizenden kilometers.
- Het kalibreren voor hoge en lage frequenties en interferentiereductie.

Belangrijke instrumentele ontwikkelingen zijn:

- ALMA (millimeter – submillimeter), detectorontwikkeling vindt plaats bij SRON
- LOFAR (dekameter – meter), in Nederland, Duitsland, Verenigde Staten en in Australië
- Allen telescoop array (ATA) in de Verenigde Staten (meter – centimeter)
- SKA (meter – centimeter)

In Nederland is voor ALMA en LOFAR financiering beschikbaar; LOFAR staat in Australië nog ter discussie.

Voor de ATA zijn middelen ten dele beschikbaar. Zowel LOFAR als dit project zijn voorlopers van SKA. Dit is een mondiaal project om een telescoop te ontwerpen en bouwen met een waarnemingsoppervlak van een miljoen vierkante meter en een frequentiebereik van ± 100 MHz tot 25 GHz. Bij SKA zijn 34 instituten in 15 landen betrokken. De verwachte kosten bedragen ongeveer één miljard euro. Een besluit over de locatie wordt verwacht in 2006, een besluit over de technologische opzet in 2008. De bouw zou gereed moeten zijn in 2020.

Nederland speelt een leidende rol bij enkele van de genoemde onderwerpen:

- ontwikkeling van *phased arrays* voor radioastronomie (SKA)
- ontwikkeling van ontvangers voor lage (LOFAR) en middelhoge frequenties (SKA)
- datatransport (Gb/s – Tb/s) van de arrays naar de centrale verwerkingscomputer (LOFAR, e-EVN)
- gegevensverwerking (LOFAR)
- ijking en oplossen van interferentieproblemen (LOFAR, SKA)
- samenstelling van *arrays* en beeldkwaliteit (LOFAR)

Met het beschikbaar komen van financiering voor de bouw van LOFAR zijn er momenteel geen beperkingen voor Nederland bij de ontwikkeling van deze telescoop. Middelen voor onderzoek met behulp van deze telescoop blijven noodzakelijk. Ontwikkeling van *flat panel phased array technology* voor SKA

voor lage frequenties hangt af van toekenning van middelen uit FP6. Nederland heeft bij een aanvraag hiervoor een leidende rol gespeeld. Als deze aanvraag niet wordt gehonoreerd, zijn Canada of Australië mogelijke opvolgers.

Technische ontwikkelingen in de radioastronomie zijn gericht op het verhogen van de gevoeligheid van *wide-field surveys* in HI en continuüm. De belangrijkste bijdrage wordt verwacht van het vergroten van de gevoeligheid in de brandpuntsvlakken van de parabolen en in *phased array* technology. De Nederlandse expertise sluit goed aan bij deze onderzoeksdoelen. Momenteel is financiering beschikbaar voor het vergroten van gevoeligheid en operationele betrouwbaarheid van EVN door het installeren van glasvezeldataverbindingen naar de JIVE-correlator (eEVN), zodat een virtuele telescoop ontstaat van intercontinentale afmetingen waarmee *real time* waarnemingen kunnen worden gedaan. Nederland speelt hierbij een initiërende rol.

De activiteiten rond LOFAR, SKA en EVN domineren de komende tien jaar de agenda; de Nederlandse astronomie is hiermee actief in het centrum van de mondiale radioastronomie. Continuering van onderzoeksfinanciering is daarom van groot belang.

2.2

Kernfysica

Het internationale onderzoek

Het onderzoek in de kernfysica in Europa wordt beschreven in het Long Range Plan 2004 van NuPECC. Hier volgt een beknopte samenvatting. Ontwikkeling van nieuwe apparatuur, verfijnde detectiemethoden en de toegenomen computercapaciteit hebben de mogelijkheden voor kernstructuuronderzoek vergroot. Experimenteel is het nu en in de toekomst mogelijk het onderzoeksterrein te verbreden van de 300 stabiele kernen naar de ongeveer 6000 instabiele atoomkernen. Met het gebruik van nieuwe methoden alsmede de beschikbaarheid van radioactieve ionenbundelversnellers (RIB) worden nu astrofysische relevante kernreacties gemeten. Onderzoek naar symmetrieën en fundamentele interacties (*physics beyond the standard model*) heeft in de laatste jaren geleid tot precisie-metingen aan neutrino's, tijdsomkeer en CP-schending (meting van elektrische dipoolmomenten van moleculen, atomen en nucleonen alsmede door metingen aan correlaties tussen elektronen en neutrino's in bètaverval) en het bepalen van fundamentele constanten. Kernfysisch onderzoek naar reacties en structuren heeft relevantie voor astrofysica. Door recente ontwikkelingen in QCD-roosterberekeningen, is er grote belangstelling ontstaan voor hadronspectroscopie van gluonrijke hadronen en van hybride toestanden van combinaties van quark en gluonische excitaties. Ook is er belangstelling voor quarkdynamica. Fasenovergangen van kernmaterie worden in twee regimes onderzocht: bij de Fermi-energie waarbij een vloeistof-gas fase overgang is verwacht en bij zeer hoge energieën en/of dichtheden waarbij een quark-gluon plasma (QGP) is verwacht.

Onderzoek naar het quark-gluonplasma vindt op dit ogenblik plaats bij de Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) bij Brookhaven in de Verenigde Staten en vormt een belangrijk onderdeel van het toekomstige CERN-programma. Onderzoek aan discrete symmetrieën (CP-schending) is reeds lange tijd een thema binnen de hoge energiefysica.

Faciliteiten

Voor de komende 10 jaar vereist het onderzoek *upgrades* van bestaande faciliteiten in de vorm van bundels van hoge intensiteit bij relatief lage energie. Botsingsringen met gekoelde bundels van zware en lichte ionen in parallelle of tegengestelde richtingen bieden mogelijkheden voor reacties in gebieden van de faseruimte die niet mogelijk zijn met vaste targets. Voor kernstructuurstudies met extreme N/Z verhoudingen zijn RIB faciliteiten nodig, via de In-Flight Fragmentation (IFF)- techniek of via de Isotope-Separation On-Line (ISOL)- methode. Een aantal ontwikkelingen in de bouw van faciliteiten vindt nu al plaats;

- De meest ambitieuze is de Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt omdat deze naast RIB, simultaanbundels levert voor onderzoek in verschillende subgebieden van de fysica: hadronische structuur, samenge-drukte hadronische materie, instabiele atoomkernen, hoge-dichtheid plasma en kwantumelektrodynamica. Deze faciliteit wordt opgeleverd voor experimenten na 2010.
- Voorts bestaat het plan de EURISOL-faciliteit te bouwen die gereed zou komen na 2013; dit is een proton- of deutronversneller met hoge intensiteit (1 GeV, enkele MW bundelvermogen). Een voorloper van EURISOL is SPIRAL2 in GANIL, die gereed zal zijn rond 2008.
- De RIBF (Radioactive Ion-Beam Facility) in Japan is operationeel rond 2006.
- De ISAC (Isotope Separator and Accelerator), in Vancouver, is al operationeel en er bestaan plannen voor een upgrade. Ook de Amerikanen hebben in de RIA (Rare Isotope Accelerator) een zeer ambitieus en hoog geprioriteerd project.

Op langere termijn zal onderzoek van niet-perturbatieve QCD de bouw van een hoge-intensiteit, hoge-energie leptonverstrooiingsfaciliteit vereisen, waarvoor wereldwijde samenwerking vereist is.

Nederland en kernfysica

Kernfysisch onderzoek vindt in Nederland voor een belangrijk deel plaats in het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI), te Groningen. Het KVI wordt geëxploiteerd door de Stichting voor Fundamenteel onderzoek der materie (FOM) en de Rijksuniversiteit Groningen (RUG). Het KVI exploiteert een compacte ionenversneller, AGOR, die in samenwerking met het Institut de Physique Nucléaire (INP) te Orsay, één van de dochterinstituten van het Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3-CNRS), is gebouwd. De versneller bestaat uit een supergeleidend cyclotron en is geschikt om ionen tot lage en middelhoge energie te versnellen. Aan de versneller zijn thans drie en in de nabije toekomst vier vaste experimenteeropstellingen gekoppeld. In Europa zijn geen andere versnellers operationeel met een mogelijkheid onderzoek te doen met lichte ionen, in het bijzonder gepolariseerde protonen- en neutronbundels met een inschietenergie tot ongeveer 200 MeV. De versneller heeft behalve voor de kernfysica betekenis voor de medische fysica, radiobiologie, vaste stof fysica en astrofysica.

Belangrijke onderwerpen voor het onderzoek bij AGOR betreffen: grenzen van stabiliteit van atoomkernen, exotische kernen, verandering van krachten in

kernmaterie, toestandsvergelijking van kernmaterie, en nucleaire astrofysica. De mogelijkheden om protonstraling in te zetten bij oncologische therapie worden onderzocht. Het vaste stof onderzoek is onder meer gericht op de bestendigheid van computers en andere elektronische componenten tegen straling bij de ruimtevaart. Met behulp van bepaalde kernreacties worden sterrenkundige waarnemingen geanalyseerd en geïnterpreteerd. Onderzoek op het gebied van fundamentele wisselwerkingen en symmetrieën wordt op het KVI voorbereid binnen het programma Trapped Radioactive Isotopes: Micro-laboratories for Fundamental Physics (TRIUP).

Op de lange termijn

Op de lange termijn dienen zich voor de Nederlandse kernfysica mogelijkheden aan om te participeren in onderzoek aan:

- kernstructuuronderzoek
- nucleaire astrofysica
- hadronspectroscopie
- faseovergang van kernmaterie bij zeer hoge temperaturen (QGP)
- fundamentele wisselwerkingen-toepassingen van kernfysische methoden en technieken

Het KVI kan ook deelnemen aan het ontwikkelen van tweede generatie RIB-faciliteiten zoals de internationale FAIR bij GSI, de EUROpean Isotope-Separation On-Line (EURISOL)- faciliteit, of de Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne 2 (SPIRAL2) bij GANIL. Voor onderzoek in deze gebieden op GSI/FAIR en GANIL kan het KVI als thuisbasis voor Nederlands onderzoek fungeren. Het KVI kan kernstructuuronderzoek verrichten dat complementair is aan wat er gaat gebeuren bij RIB-faciliteiten. Daarnaast kan het KVI zich richten op *Physics beyond the Standard Model* onderzoek.

Het KVI kan samenwerking zoeken met het NIKHEF op het gebied van onderzoek naar quark-gluonplasma. Voor onderzoek naar de rol van quarks en gluonen in hadronen en naar fundamentele symmetrieën, kan op onderdelen worden samengewerkt met het Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) en met CERN. Intensivering van samenwerking met GSI staat hoog op de agenda. Op het gebied van nucleosynthese in de astrofysica is samenwerking mogelijk met CERN (neutrino-fysica) en met GANIL (kernstructuur). Met CERN zal verder worden gesproken over mogelijkheden voor de ontwikkeling van een protonversneller. Ook zal aansluiting worden gezocht met onderzoek in de hoge-energiefysica, neutronenbronnen en *spallation sources*.

De deelname van Nederland aan het genoemde onderzoek wordt belemmerd door het ontbreken van een lange termijn visie. Thans zijn onvoldoende speerpunten geformuleerd voor toekomstig kernfysisch onderzoek. Dit heeft deels betrekking op de eigen faciliteit AGOR, maar ook, op de lange termijn, als gebruik moet worden gemaakt van dan beschikbare Europese faciliteiten. Dit maakt het moeilijk om het Nederlandse onderzoek op een goede manier te positioneren en het is onduidelijk waarin Nederland zou kunnen investeren. De ontwikkelingen

die hierdoor aan Nederland voorbij dreigen te gaan liggen wellicht in grensverleggend onderzoek in verschillende subgebieden van de kernfysica, versnellerfysica, nieuwe meettechnieken en apparatuur, onderzoek aan nieuwe procedures voor energieproductie en op de lange termijn in kennis over basistechnieken in de kernfysica en technische ontwikkelingen.

2.3

Hoge-energieastrodeeltjesfysica

Hoge-energieastrodeeltjesfysica beoogt met behulp van waarnemingen de oorsprong en aard van deeltjes afkomstig uit het heelal te bestuderen, waardoor nieuwe kennis verworven kan worden over astrofysische en kosmologische processen en over bekende en nog niet bekende elementaire deeltjes.

Hoge-energieastrodeeltjesfysica is een betrekkelijk nieuwe subdiscipline, met sterke banden met de astrofysica en de op versnellers gebaseerde deeltjesfysica. Een speerpunt in deze nieuwe subdiscipline van de natuurkunde is het onderzoek naar hoog energetische neutrino's. Deze neutrino's zijn te onderscheiden van neutrino's met significant lagere energieën, afkomstig van de zon en supernovae. Neutrino's afkomstig van de zon en van supernovae hebben energieën in het MeV-gebied, kosmische neutrino's hebben energieën tot 1 ZeV (1021 eV). Neutrino's afkomstig uit het heelal kunnen informatie verschaffen over de toestand van het heelal zeer kort (10-30 s) na de Big Bang, nog voor het ontstaan van gewone materie.

Neutrino's zijn van belang voor sterrenkundig en kosmologisch onderzoek omdat ze elektrisch neutraal zijn zodat ze niet worden beïnvloed door magnetische velden; omdat ze stabiel zijn, waardoor ze voor astronomische begrippen lange afstanden kunnen afleggen; en omdat ze weinig interactief zijn, waardoor ze inzicht kunnen geven in gebieden in het heelal die voor fotonen ondoordringbaar zijn. Sterrenkunde met behulp van neutrino's kan daarom een wezenlijke toevoeging zijn op de sterrenkunde die wordt gedaan met behulp van elektromagnetische straling.

Neutrinodetectie is relevant voor astrofysica, deeltjesfysica en kosmologie. Hoogenergetische neutrino's zijn naar verwachting afkomstig van neutronsterren en zwarte gaten, supernovae of overblijfselen daarvan. Waarnemingen met behulp van deze neutrino's maken de bestudering van een geheel nieuwe categorie van objecten mogelijk. Een mogelijke indicatie hiervan is dat kosmische straling met energieën van meer dan 1020 eV, in de huidige modellen moeilijk verklaarbaar is. Waarneming van de aan deze straling gerelateerde neutrino's kan hierin verandering brengen. Voor de deeltjesfysica is neutrinodetectie van belang voor het meten van de neutrinomassa. Recente waarnemingen wijzen sterk op het bestaan van zogenaamde neutrino-oscillaties waarbij elk van de drie soorten neutrino's in de andere soort kan overgaan. Dit is slechts mogelijk als neutrino's massa hebben. Nader onderzoek naar neutrino-oscillaties kan bijdragen aan het inzicht in de precieze massa van neutrino's. Onderzoek naar neutrino's kan ook van belang zijn voor de kosmologie. Vele waarnemingen wijzen erop dat het grootste deel van de materie in het universum 'donker' is en dus niet kan worden waargenomen met behulp van methoden die op elektromagnetische

golven zijn gebaseerd. Deze donkere materie kan zich verzamelen in zware hemellichamen en dan annihileren waarbij onder andere neutrino's worden geproduceerd. Neutrino telescopen kunnen naar verwachting het inzicht in de structuur en samenstelling van het heelal aanmerkelijk vergroten.

Neutrino's kunnen indirect worden waargenomen als ze in water of ijs botsen met een atoom. In sommige gevallen levert deze botsing een muon op die een grotere snelheid heeft dan de lichtsnelheid in water of ijs. De daardoor optredende Cherenkovstraling kan worden waargenomen en gemeten. In neutrino telescopen wordt gebruik gemaakt van dit verschijnsel door middel van een zeer groot driedimensionaal rooster van gevoelige lichtdetectoren. Door waarneming van hetzelfde muon op verschillende tijdstippen en plaatsen kan de baan van dat muon en bij gevolg die van het oorspronkelijke neutrino worden bepaald. Daarmee is de richting bekend van waaruit dit neutrino de aarde bereikte. De beschikbaarheid van grote hoeveelheden water en ijs en de transparantie van het medium maken deze detectietechniek economisch en technisch mogelijk.

Op twee plaatsen wordt gewerkt aan de constructie van neutrino telescopen. Op het zuidelijk halfrond is op Antarctica in het ijs een eerste 'kleine' neutrino telescoop gebouwd, AMANDA. Op het noordelijk halfrond worden in de Middellandse Zee drie proefopstellingen gebouwd: ANTARES bij Toulon, Nemo bij Sicilië en Nestor bij Pylos. Deze opstellingen zijn onder meer bedoeld om expertise op te bouwen voor het ontwerp en de bouw van twee neutrino telescopen, ICECUBE en KM3NET⁵. AMANDA en ANTARES worden gezien als eerste generatie neutrino telescopen. Ze zijn gericht op detectie van neutrino's die door de aarde heen komen en voor het ontstaan van muonen zorgen in het zeewater tussen de zeebodem en de detectoren (in het ijs boven het aardoppervlak onder de detectoren).

ICECUBE zal naar verwachting in 2010 operationeel zijn. Op het moment dat KM3NET in exploitatie wordt genomen (2012), staan twee telescopen ter beschikking waarmee in principe waarnemingen kunnen worden gedaan in elke mogelijke richting. Deze instrumenten zijn complementair vanwege hun 'zichtrichting'. Als gevolg van de draaiing van de aarde is voor een deel van de waarnemingsrichtingen zelfs gecombineerde waarneming met beide telescopen mogelijk.

AMANDA (operationeel sinds 1997) en ICECUBE worden voornamelijk door de VS gefinancierd, maar enkele Europese landen participeren in bescheiden mate.⁶ ANTARES wordt gerealiseerd door onderzoekers vanuit 16 instituten in 7 landen.⁷ Bij de ontwikkeling en constructie van ANTARES speelt FOM-NIKHEF een belangrijke rol. Zo heeft NIKHEF onder meer het *all-data-to-shore*-concept geïntroduceerd: alle signalen worden naar de wal gezonden om dan te worden verwerkt met behulp van speciale software en statistische bewerking van de waarnemingsgegevens. De richting waarin wordt waargenomen kan worden gemanipuleerd,

⁵ Deep Sea Facility in the Mediterranean for Neutrino Astronomy and Associated Sciences.

⁶ Duitsland, Zweden, België en Nederland (Universiteit Utrecht); buiten Europa: Japan, Nieuw Zeeland, Venezuela.

⁷ Rusland, Nederland, Verenigd Koninkrijk, Duitsland, Frankrijk, Spanje en Italië.

zodat de telescoop als het ware kan worden gericht op een vermoedelijke bron van neutrino's. Dit vergroot de gevoeligheid van de telescoop aanzienlijk. De ANTARES proefopstelling zal worden gekoppeld aan het Gamma Ray Burst (GRB)-netwerk, zodat gedurende een GRB alle meetgegevens kunnen worden bewaard voor een gedetailleerde analyse.

Voor KM3NET wordt onder meer financiële steun gezocht bij de EU. In het consortium dat KM3NET voorbereidt, speelt het NIKHEF eveneens een belangrijke rol. Voorts doen instituten mee uit Frankrijk, Griekenland, Italië, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en Spanje. Belangstelling bestaat bij CERN, dat ANTARES de status van *Recognized Experiment* heeft gegeven. Ook de OECD heeft de detectie van kosmische neutrino's met energieën van meer dan 100 GeV van groot wetenschappelijk belang genoemd.⁸

Het KM3NET consortium heeft onlangs een aanvraag voor financiering van ontwerpstudies ingediend bij de EU in het kader van het FP6-programma. De penvoerder van dit voorstel is de Universiteit van Erlangen. Naar verwachting zal dit jaar de uitslag bekend worden. Het totale budget voor de bouw van de KM3NET telescoop en benodigde infrastructuur is begroot op ongeveer 200 miljoen euro. Er is 10 miljoen euro aangevraagd voor de ontwerpstudies. De ervaringen opgedaan met ANTARES, in het bijzonder op het gebied van signaalverwerking, spelen hierbij een essentiële rol. Onder meer vanwege de Nederlandse rol in het ANTARES-programma is Nederland nu betrokken bij de ontwerpstudie voor KM3NET. De verwachting is dat Nederland hierin een relevante rol kan vervullen op gebied van natuurkundig onderzoek en van technologieontwikkeling.

Overigens is naast onderzoek aan hoog-energetische kosmische neutrino's onderzoek aan zeer hoog-energetische stralingsdeeltjes een belangrijk terrein van de astrodeeltjesfysica. Hierin zal LOFAR een belangrijke rol kunnen spelen. De botsing van hoog-energetische kosmische straling met atomen uit de aardatmosfeer veroorzaakt een lawine van secundaire elementaire deeltjes ('air shower'), die een radioflits afgeeft in het voor LOFAR relevante golfnengebied.

⁸ High Energy Neutrino Astrophysics Panel of the Particle and Nuclear Astrophysics and Gravity International Committee of IUPAP: rapport d.d. juli 2002.

In deze categorie vallen onderzoeksfaciliteiten die voor een veelheid aan disciplines relevant kunnen zijn en die voor het principe van hun werking en hun gebruik bij het beantwoorden van onderzoeksvragen in belangrijke mate berusten op natuurkundige kennis en expertise.

3.1

Onderzoek met behulp van synchrotronstraling

Nederland neemt deel aan de European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) en exploiteert tezamen met Vlaanderen een eigen aan het synchrotron gekoppelde onderzoeksfaciliteit (Dutch Belgian Beam Line (DUBBLE)). Nederland is in 1991 toegetreden tot de ESRF. Nederland neemt gezamenlijk met België deel (Benesync, ieder voor 3 %, samen 6 %). In september 1994 zijn de eerste 15 stralingsbundels met golflengten in het röntgengebied in gebruik genomen voor wetenschappelijk onderzoek.

Enkele bundellijnen van de ESRF worden geëxploiteerd door private samenwerkingsverbanden. Hiertoe behoort onder meer de Nederlands-Vlaamse bundellijn DUBBLE. Nederland en Vlaanderen wisselen onderzoekstijd uit met een Noors-Zwitsers samenwerkingsverband waardoor Nederlandse onderzoekers mogelijkheden hebben om poederdiffractie-experimenten uit te voeren. Experimenten van verschillende types zijn mogelijk: macromoleculaire kristallografie, zachte en harde gecondenseerde materie, absorptiespectroscopie, oppervlakenatuurkunde, magnetische verstrooiing, *imaging coherence*, *nuclear scattering*, *inelastic scattering*, *small angle scattering*.

Wereldwijd zijn er slechts enkele (derde generatie) synchrotrons van de omvang en met de mogelijkheden van die te Grenoble. Nederland heeft belang bij deze samenwerking omdat de opgewekte synchrotronstraling wordt gekenmerkt door een grote intensiteit en helderheid. Geavanceerde diffractie-experimenten worden gedaan bij alle derde generatie synchrotrons die electronenenergieën genereren van meer dan 1,5 GeV. Nederland heeft geen centrale thuisbasis voor het onderzoek dat bij ESRF of andere synchrotrons plaatsvindt. Onderzoekers dienen individueel aanvragen voor bundeltijd in.

In de komende vijf jaren zijn de volgende belangrijke ontwikkelingen te verwachten:

1. Voor de *structuurbepaling van eiwitten* met behulp van röntgendiffractie zijn synchrotrons onontbeerlijk (bijvoorbeeld MacKinnon, ionenkanalen in celmembranen, Nobelprijs Chemie 2003). Dankzij de helderheid van undulatorstraling aan synchrotrons van de derde generatie kunnen structuren van eiwitten met extreem grote eenheidscellen (bijvoorbeeld ribosomen) en van membraaneiwitten (voor zover kristalliseerbaar) worden opgelost. In de komende jaren zullen nieuwe typen van plaatsgevoelige pixeldetectors en robots worden ingezet, waarmee de nauwkeurigheid en de efficiency van deze metingen sterk worden vergroot.

2. Bij het onderzoek naar het mechanisme van supergeleiding bij hoge kritische temperatuur worden technieken als foto-elektronspectroscopie en inelastische röntgenverstrooiing verder ontwikkeld (hogere energieresolutie en dieptegevoeligheid, variabele polarisatie, etc). De *spectroscopie van gecorreleerde elektronensystemen* blijft een belangrijk onderzoeksthema; het q-afhankelijke excitatiespectrum van de quasideeltjes kan rechtstreeks worden gemeten.
3. *Ultrasnelle dynamische processen in materie* worden in de tijd gevolgd. Met de gepulste röntgenstraling van de afzonderlijke elektronenbunches kunnen op een tijdsschaal van picoseconden bijvoorbeeld structurrelaxaties in oplossingen en spinprecessie van magnetische domeinen worden waargenomen. De techniek van *electron beam slicing* maakt het binnenkort mogelijk videoclips te maken op een tijdschaal van tientallen femtoseconden. Deze tijdschalen zijn weliswaar langer dan bij lasers in het zichtbare gebied (thans honderden attoseconden), maar dit is pas het begin van een lange ontwikkeling.
4. *Coherente röntgenbundels* worden gebruikt om de interne structuur van 3D nano-objecten te bepalen volgens methoden verwant aan de holografie (afbeelden zonder lens). De grootste uitdaging is om technieken te ontwikkelen, waarmee bij een resolutie van enkele nanometers naar processen in cellen kan worden gekeken. In het algemeen biedt de combinatie van nanowetenschap en het gebruik van synchrotronstraling tal van mogelijkheden voor wetenschappelijke doorbraken. Zo kunnen met gebruik van nanolithografische technieken diffractieve lenzen worden vervaardigd die röntgenbundels focuseren tot circa 20 nanometer. Een spotgrootte van 10 nanometer lijkt mogelijk.

Voor het Nederlandse onderzoek bieden deze ontwikkelingen de volgende mogelijkheden:

1. De Nederlandse structuurbiologie is van goede kwaliteit. Verschillende onderzoeksgroepen gebruiken synchrotronstraling en hebben onder meer toegang tot de EMBL-bundellijnen voor eiwitkristallografie (PX) aan de ESRF en in HASYLAB. Bovendien verstrekken alle Europese synchrotronstralingsfaciliteiten PX-bundeltijd aan buitenlandse onderzoeksgroepen na selectie op basis van *peer review*. Met de komst van nieuwe synchrotronstralingsbronnen in Europa zal het aantal PX-faciliteiten toenemen en men verwacht dat het aanbod gelijke tred zal houden met de toenemende vraag. Belangrijker dan de kwantiteit van het gebodene is de kwaliteit. De EMBL-bundellijnen in HASYLAB zijn niet meer *state of the art* en ook DUBBLE is niet optimaal voor *cutting edge* PX. Algemeen wordt erkend dat de beste bundellijnen voor PX voorhanden zijn bij Swiss Light Source (SLS) en ESRF. Momenteel wordt gesproken over de bouw van een derde PX-bundellijn aan de SLS.
2. Het onderzoek aan gecorreleerde elektronensystemen heeft in Nederland jarenlang in de belangstelling gestaan en er zijn met synchrotrons resultaten geboekt die internationaal sterk de aandacht hebben getrokken. Nederlandse groepen op dit gebied zijn in het algemeen succesvol bij aanvragen van bundeltijd.
3. In de ultrasnelle tijdsopgeloste spectroscopie met synchrotronstraling spelen Nederlandse onderzoeksgroepen momenteel geen actieve rol. Vooralsnog zijn het voornamelijk de *in-house* groepen, die onderzoek doen aan synchrotrons,

die deze gecompliceerde technieken ontwikkelen en toepassen, al dan niet in samenwerking met externe groepen. Hierin zou verandering moeten komen.

4. Coherente röntgenverstrooiingstechnieken worden gebruikt bij het onderzoek naar de structuur en dynamica van vloeibare en colloïdale kristallen. De huidige en nieuw te bouwen bundellijnen voor coherente verstrooiing aan Europese synchrotrons zullen waarschijnlijk in de behoefte van Nederlandse groepen kunnen voorzien.

Uitgaande van de reeds beschikbare expertise heeft Nederland mogelijkheden op het gebied van gebruikersondersteuning en participatie in PX-bundellijnen. Vaste stoffysici, chemici en structuurbiologen hebben nu toegang tot de ESRF en tevens via peer review tot andere synchrotronstralingsfaciliteiten. Ter stimulering van de structuurbioologie kan worden overwogen te participeren in de bouw en exploitatie van een bundellijn aan één van de nieuwe derde generatie synchrotrons. Voor het vaste stofonderzoek kan Nederland overeenkomsten sluiten met synchrotrons voor de installatie en het gebruik van speciale gebruikersstations of componenten daarvan, bijvoorbeeld een hoge-resolutie fotonspectrometer, een foto-emissieopstelling, een He-cryostaat en hoge-veld magneet, et cetera.

3.2

Vrije-elektronenlasers

In een vrije-elektronenlaser wordt een bundel relativistische elektronen gemanipuleerd met een speciaal vormgegeven magneetopstelling. Het resultaat is een zeer heldere flexibele bron van coherente straling die eenvoudig over een groot golflengtebereik kan worden afgestemd. Hoewel in Nederland enig onderzoek wordt gedaan naar mogelijkheden tot miniaturisatie (Technische Universiteit Delft), zijn op vrije-elektronenlaser gebaseerde lichtbronnen, omvangrijke installaties. Hierdoor is het toepassingsgebied beperkt tot die delen van het spectrum waar nauwelijks alternatieve, coherente bronnen met vergelijkbare specificaties, met name hoog (piek)vermogen en afstembaarheid, voor handen zijn. Ook nemen de schaal en complexiteit van een vrije-elektronenlaser snel toe met het korter worden van de golflengte. Het is daarom geen toeval dat de eerste op vrije-elektronenlasers gebaseerde faciliteiten, waaronder FELIX, infrarood faciliteiten zijn.

Door het beschikbaar komen van, veelal Ti/saffier-gepompte, *table-top* systemen, is de niche voor wetenschappelijk onderzoek met vrije-elektronenlasers in het nabij-infrarood de laatste jaren sterk verkleind. Wel is inmiddels aangetoond dat op basis van Energy Recovery Linac-technologie (ERL), FELS gebouwd kunnen worden die gemiddelde vermogens van vele kW leveren in het gebied van (ver) infrarood tot nabij UV. In het golflengtegebied onder de 200 nanometer zijn momenteel vrijwel geen coherente lichtbronnen voorhanden. Daarom wordt in dit gebied vooral, en met veel succes, gebruik gemaakt van de synchrotronstraling van opslagringen. Met de huidige, derde generatie synchrotrons zijn de grenzen bereikt van wat fysisch haalbaar is. Omdat de meettechnieken zeker gelijke tred gehouden hebben met de toegenomen mogelijkheden,

zijn deze grenzen, en dan met name de beperkte tijdsresolutie, coherentie en (piek)helderheid, voor sommige experimenten ook reële belemmeringen. De ontwikkeling van FELs voor dit golflengtegebied wordt daarom vooral vanuit de synchrotrongemeenschap gestimuleerd. Het ambitieuze doel, te realiseren op een termijn van vijf tot tien jaar, is het produceren van subnanometer straling met een pulsduur (ver) onder de 100 fs en met een piek helderheid die negen tot tien grootteorden boven dat van een synchrotron ligt.

Momenteel bestaan in Europa bij enkele synchrotrons plannen voor de bouw van een FEL-faciliteit voor het XUV. Daarbij worden nieuwe synchronisatie-technieken en detectoren ontwikkeld die deels vergelijkbaar zijn met hetgeen nodig is voor FELs. Men kan deze activiteiten dus zien als een opmaat voor de latere ontwikkelingen aan FELs. De belangrijkste nieuwe toepassingen van dergelijke bronnen zijn, gezien de enorme toename van de helderheid, moeilijk te voorspellen maar zullen vooral het onderzoek betreffen aan structuurveranderingen op femtoseconde tijdschaal en van niet-lineaire processen in het röntgengebied. Bij gebrek aan een eigen synchrotron speelt Nederland tot nu toe in deze ontwikkeling een te verwaarlozen rol. Er zijn alleen (erg bescheiden) bijdragen vanuit de TU Eindhoven op het gebied van *high-brightness guns*, vanuit FELIX bij het ontwikkelen van een diagnostiek voor het meten van de elektronenpulsduur en vanuit AMOLF bij het inventariseren van mogelijke toepassingen van de straling. Nederlandse deelname is relevant voor de wetenschappelijke en technische uitdaging die de ontwikkeling van dergelijke geavanceerde technologie biedt en dat kan een reden zijn om deelname te vergroten. De mogelijkheden liggen dan vooral op het terrein van de manipulatie van de XUV-straling. Op het gebied van de toepassingen wordt gedacht aan het opbouwen van een testfaciliteit ten behoeve van systemen voor lithografie, waarbij goede contacten met de industrie een groot voordeel zijn. Dergelijke faciliteiten zijn ook beschikbaar bij ALS (Berkeley) en BESSY.

De ontwikkeling van röntgen vrije-elektronenlasers (FEL) in vijf tot acht jaar (TESLA-FEL, Hamburg en LCLS, Stanford) is belangrijk voor toekomstig onderzoek. De helderheid van deze bronnen is circa 10 orden groter en stralingschade zal een rol van betekenis spelen. Daarom zal het onderzoeksprogramma aan een FEL maar gedeeltelijk overlap hebben met dat aan een synchrotron. Belangrijke onderzoeksthema's zijn tijdsafhankelijke processen in gecondenseerde materie, atomen en moleculen op femtoseconde tijdschaal, spectroscopie van atoomclusters, *single-shot* structuurbepaling van afzonderlijke eiwitmoleculen (indien mogelijk!) en onderzoek aan *warm condensed matter*. Schema's voor het opwekken van sub-fs FEL-pulsen staan momenteel ter discussie. ERLs bieden als extreme heldere bron 100 x meer coherente flux dan synchrotrons en laten pulscompressie tot beneden 100 fs toe, hetgeen voor materiaalonderzoek ideaal is. Wereldwijd zijn verschillende ERL-concepten voorgesteld, maar tot nu toe is slechts een prototype (4GLS, Daresbury) in aanbouw.

SASE-FELs (*Self Amplified Spontaneous Emission*) in het XUV-gebied zijn thans in ontwikkeling in DESY en op andere plaatsen. De verwezenlijking van deze FELs is vanuit wetenschappelijk oogpunt misschien minder interessant (hoog-

vermogen *table-top* lasers dekken dit spectrum deels ook af als gebruik wordt gemaakt van de opwekking van hogereharmonischen), maar noodzakelijk als tussenstap naar de realisatie van een SASE-FEL in het harde-röntgen gebied (0,1 nanometer). Deze laatste machines zullen op zijn vroegst over zes tot acht jaar voor gebruikers beschikbaar zijn.

De TESLA-FEL in Hamburg is een grote gebruikersfaciliteit, echter slechts 50 % van het benodigde budget is momenteel voor dit project gegarandeerd (de Duitse bijdrage). De resterende 50 % moet door andere landen worden opgebracht. Na sluiting van de NIKHEF-versneller en door het ontbreken van een perspectief voor de bouw van nieuwe grootschalige faciliteiten is het aantal actieve versnellerexperts (inclusief ingenieurs en technici) in Nederland drastisch afgenomen. Bij een besluit aan de ontwikkeling van TESLA-FEL deel te nemen, moet de inspanning in versnellerfysica worden vergroot. In Nederland is expertise voorhanden (FOM-Rijnhuizen, TU Eindhoven) om aan het TESLA-FEL-project deel te nemen in de volgende gebieden: ultrasnelle spectroscopie met *table-top* lasersystemen, atoom- en molecuulfysica, ultrasnelle dynamica van vloeistoffen, meting van pulsbreedte met elektro-optische technieken, ontwikkeling van een elektronenkanon met extreem lage emissie, synchronisatie van pulsen, ultrasnelle *streak-camera*'s en pixeldetectors.

Belangrijke uitdagingen die aan Nederland voorbij dreigen te gaan:

1. *Ultrasnelle spectroscopie en diffractie met röntgenstraling*. Nederlandse onderzoekers, met name in AMOLF, hebben een uitstekende internationale reputatie in de atoom- en molecuulspectroscopie met gepulst langgolvig laserlicht en in studies van ultrasnelle dynamische processen in vloeistoffen. Echter, het gebruik van *röntgenstraling* om rechtstreeks informatie over de dynamisch veranderende posities van atomen te verkrijgen is zeker zo belangrijk: *seeing is believing*. Buiten Nederland ziet men de synchrotron/FEL en de klassieke-laser *communities* naar elkaar toegroeien, want hoog-vermogen lasers zullen bij *seeding* en *pump-probe* experimenten aan FELs een cruciale rol spelen. Te lang heeft men in Nederland ontwikkelingen in FELs links laten liggen met het argument dat *table-top* lasers de behoefte afdekken. Dit standpunt is nu achterhaald en een nieuwe oriëntatie is gewenst als men het vakgebied van ultrasnelle dynamica ook over 5-10 jaar serieus wil blijven beoefenen.
2. FOM heeft de fysica van levensprocessen gedurende de laatste jaren sterk gestimuleerd. De fysica heeft vooralsnog haar belangrijkste bijdrage tot de levenswetenschappen geleverd via de ontwikkeling van *nieuwe technieken en meetmethoden*, met name NMR en synchrotron-PX. De fysica ontwikkelt hier *enabling technologies*. In PX worden binnen afzienbare tijd pixeldetectors ingezet. Hier kan het Medipix-team van het NIKHEF in samenwerking met andere laboratoria (bijvoorbeeld de detectorgroep van PSI) wellicht een bijdrage leveren.

In het FIR-gebied (sub-THz) zijn ook ontwikkelingen gaande. Opslagringen kunnen zó worden bedreven, dat de lengte van de elektronenbunches kleiner is dan de golflengte. De straling is dan volledig coherent. De opbrengst van deze bronnen is zeer hoog. Het piekvermogen ligt bij golfgetallen beneden

10 cm⁻¹, een gebied waar de vrije elektronen laser te Rijnhuizen, FELIX, geen straling meer levert. FELIX biedt mogelijkheden voor onderzoek met gepulste infrarode laserstraling in het golflengtegebied tussen 5 en 300 micrometer (100 MW, (sub)picoseconde intervallen). FELIX wordt gebruikt voor experimenten in uiteenlopende subdisciplines van de natuurkunde: gecondenseerde materie, atoom- en molecuulfysica, optica en biofysica. Dankzij FELIX had Nederland al een uitstekende reputatie in het onderzoek met IR opgebouwd. Inmiddels is begonnen met de bouw van een faciliteit voor *intra-cavity* experimenten in combinatie met de vrije elektronen laser (FELICE). Deze installatie zal van groot belang zijn voor met name atoom-, molecuul- en optische fysica.

De technologische en diagnostische ontwikkelingen rondom SASE-FEL- en FIR-faciliteiten, waaronder de TESLA-FEL, sluiten goed aan bij de Nederlandse expertise en belangstelling. Het is verder interessant om de mogelijkheden na te gaan voor de bouw van een opslagring voor FIR, die Nederland zelf zou kunnen bouwen (geschatte kosten 20 miljoen euro). Een kleine opslagring voor opwekking van straling in het FIR (sub-THz)-gebied biedt voor spectroscopie aan gecorreleerde elektronensystemen (energieschaal ± 1 meV) en voor microscopie van biosystemen zeer interessante perspectieven.

3.3

Onderzoek met behulp van neutronenstraling

Neutronenverstrooiing wordt sinds de jaren '50 van de vorige eeuw als onderzoeksinstrument gebruikt voor het ophelderen van molecuulstructuur en -dynamiek. Met behulp van diffractie- en spectrometrische metingen wordt neutronenstraling gebruikt bij natuurkundig onderzoek aan vaste stoffen, magnetische materialen, zachte gecondenseerde materie, halfgeleiders, geleidende polymeren, opslag van waterstof en elektrolyten. In vergelijking met andere straling die voor materialenonderzoek wordt gebruikt, heeft neutronenstraling een groot doordringend vermogen, terwijl het te onderzoeken materiaal intact blijft. De verstrooiing van de bundel geeft inzicht in de interne opbouw van de kern.

Neutronenstraling als wetenschappelijk instrument is erg afhankelijk van de deeltjesflux; vergroting hiervan verruimt de onderzoeksmogelijkheden in bestaande en nieuwe gebieden van onderzoek. Doorbraken zijn te verwachten voor *colossal magnetoresistance*, hoge temperatuur supergeleiding, *in situ real time* onderzoek aan technische componenten, dynamica en functie van eiwitten en eiwitvouwing en onderzoek aan biologische complexen. Interessante toepassingen zijn magnetische opslag van data, spintronics, tertiaire oliewinning, energie-opslag en conversie, en farmaceutische toepassingen. Nanowetenschap, biologie en polymeeronderzoek zijn gebieden die nu een sterke groei doormaken, mede dankzij neutronenverstrooiing.

Mondiaal gezien ontwikkelt het veld van neutronenonderzoek zich snel. Ten eerste kan de neutronenstroom uit de meeste bronnen, die nu ongeveer twintig jaar oud zijn, met behulp van nieuwe technologie vrij eenvoudig worden verhoogd met een factor vijf tot tien. Bij de meeste bronnen wordt hieraan continu gewerkt. Zo zal het Millenniumprogramma van het ILL een algehele verbetering van de bron opleveren van een factor vijf. Het nieuwe (aanvullende) doel/mo-

deratostation van ISIS zal een met het ILL concurrerende spallatiebron van koude neutronen opleveren, hetgeen met name nuttig is voor onderzoek aan zachte gecondenseerde materie. Dit nieuwe station wordt in de komende vijf jaar ontworpen en gebouwd. De aanpassing van bestaande instrumenten en ontwerp en de bouw van nieuwe instrumenten, zowel bij het station voor warme als voor koude neutronen, is primair een initiatief van het Verenigd Koninkrijk, maar aan de ontwikkeling van één van deze instrumenten, een *off-specular* reflectometer, werkt het Interfacultair Reactor Instituut (IRI) van de TU Delft mee. Ten tweede, in de Verenigde Staten (de SNS) en in Japan (JPARC) worden nieuwe spallatiebronnen gebouwd die meer dan een grootteorde intenser zijn dan ISIS. Dit zijn beide nationale initiatieven. De SNS is voor Nederlandse onderzoekers het meest interessant, deels vanwege de ligging, maar vooral vanwege het palet aan instrumenten. Vanuit het IRI wordt reeds informeel samengewerkt met twee van deze groepen. De SNS en JPARC zullen in ongeveer drie jaar operationeel zijn; de volledige opbouw zal over vijf jaar gereed zijn. Tot slot, Europese landen zijn momenteel leidend in het neutronenonderzoek. Er bestaat overeenstemming over de wenselijkheid een European Spallation Source (ESS) te bouwen met een hogere flux dan de Amerikaanse en de Japanse bron (70 maal de huidige flux van ILL en ISIS). Dit project moet met andere projecten wedijveren om Europees geld en hoewel de aanvraag bij de eerste poging niet is gehonoreerd, is het waarschijnlijk dat de ESS over tien tot vijftien jaar zal worden gebouwd. De toename van de neutronenflux in de verschillende instrumenten loopt op tot meer dan het honderdvoudige. Er bestaan vele mogelijkheden voor Nederlandse onderzoekers om te participeren in bestaande en nieuwe mogelijkheden. Daarvoor zou de financiering van het neutronenonderzoek moeten worden herzien en een samenhangend beleid voor actieve deelname in ISIS en ILL en in de toekomst in de ESS worden geformuleerd.

Het Nederlandse neutronenstralingsonderzoek is gericht op; onderzoek aan functionele materialen (katalyse, metallurgie en energieopslag), levenswetenschappen (structuuronderzoek aan oplossingen en complexe biologische systemen), magnetisme en onderzoek gerelateerd aan kunst- en archeologische voorwerpen. Hoewel de omvang van de Nederlandse inspanning beperkt is, bestaan er mogelijkheden om via deelname aan grotere consortia een duidelijke rol te spelen in Europees verband. De Nederlandse onderzoeksgemeenschap mist *in concreto* een formele band met het Institut Laue-Langevin (ILL), het de facto centrum van de Europese, zo niet de mondiale, neutronenverstrooiing. Het ILL is in de komende vijf jaar de beste bron voor onderzoek aan zachte gecondenseerde materie. Daarnaast zijn er mogelijkheden bij andere specialistische laboratoria (*engineering, deuteration, et cetera*).

Het Nederlandse neutronenonderzoek heeft baat bij actieve deelname in ISIS en ILL, niet slechts bij aankoop van bundeltijd. Het totale bedrag dat Nederland uitgeeft aan neutronenonderzoek is bijna adequaat, maar dit is verdeeld over verschillende fondsen. Lokaal geld is beschikbaar gekomen toen neutronenverstrooiing ingezet werd voor vaste stoffysica bij faciliteiten die oorspronkelijk een ander doel kenden: Petten en het IRI. Met het toenemen van de toepas-

singen van neutronenstraling ontstond behoefte aan het gebruik van speciaal gebouwde faciliteiten. Dat heeft geleid tot financiering vanuit NWO en ongeveer tien jaar geleden is besloten om structureel samen te werken met ISIS (en niet met ILL). Er zijn thans drie gescheiden bronnen voor middelen van neutronenonderzoek:

- De TU Delft financiert het IRI ten behoeve van lokale experimenten, opleiding, het voorbereiden van experimenten en het adviseren van onderzoekers die bij ISIS of ILL experimenten doen. Onderzoekers zoeken ook rechtstreeks contact met ISIS of ILL.
- NWO draagt structureel bij aan de exploitatie van ISIS, met name voor *thermal* en *epithermal neutron scattering*.
- De EU financiert onderzoek te Petten waar neutronen worden gebruikt voor spanningsmetingen aan technische constructieonderdelen.

Voorts betalen andere landen in feite voor ILL-experimenteertijd voor Nederlandse onderzoekers, met name voor het gebruik van koude neutronen, als zij participeren in projecten die worden ingediend door onderzoekers uit contribuerende landen.

Wetenschappelijk inzicht, praktische kennis en enthousiasme voor Nederlandse deelname aan toekomstige ontwikkelingen zijn alle voorhanden, maar de versnipperde financiering belemmert adequaat inspelen op nieuwe mogelijkheden, zoals samenwerken in het Second Target Station van ISIS of deelname aan het Millenniumprogramma van ILL. Het gevolg kan zijn dat Nederland onvoldoende expertise behoudt om goed gebruik te kunnen maken van de SNS in de Verenigde Staten, of later van de European Spallation Source (ESS) in Europa. Er zou daarom één samenhangend beleid en budget moeten zijn voor het gebruik van IRI, ISIS en ILL voor neutronenverstrooiing, mede met het oog op de bouw van de ESS over tien tot vijftien jaar.

De bouw van deze nieuwe faciliteiten – al dan niet met Nederlandse structurele participatie – kan als gegeven worden aangenomen. Het is daarom van belang de Nederlandse expertise en belangen te bundelen. Het Nederlandse onderzoek naar neutronenverstrooiing in zachte gecondenseerde materie is vooraanstaand en dat geldt ook voor kennis van instrumentontwikkeling, als gevolg van mogelijkheden bij het IRI. Voor een deel van het onderzoek aan zachte gecondenseerde materie zijn spallatiebronnen minder geschikt dan reactoren, maar spallatie is zonder twijfel de toekomstige bron van neutronenstraling. Het onderzoek heeft daarom baat bij ontwikkeling van instrumenten en technieken die zijn toegesneden op spallatie en de Nederlandse onderzoeksgemeenschap heeft hiervoor een zeer goede uitgangspositie.

3.4

Onderzoek met behulp van sterke magneetvelden

Het onderzoeken van veranderingen in materie die het gevolg zijn van het aanleggen van een magnetisch veld kan inzicht leveren in fysische eigenschappen van materialen. Met behulp van magneetvelden kan een breed spectrum van onderzoek worden gedaan: biologisch, materialen-, kristal- en medisch onder-

zoek. Onderzoek onder invloed van magneetvelden vindt over het algemeen steeds plaats in combinatie met andere onderzoeksmethoden of onder speciaal aangelegde omstandigheden, zoals een lage temperatuur, een elektrisch veld of inval van elektromagnetische straling.

Op het gebied van de hoge magneetvelden zijn mondiaal gezien drie doelen van belang. Ten eerste staat op de agenda het ontwikkelen van methoden en installaties voor hogere continue (enkele secondes tot een uur) velden, dan nu bereikbaar zijn. De ambitie is hier 50 T continue velden met behulp van hybride magneten (resistief en supergeleidend gecombineerd). Het niveau van de vereiste investeringen voor 50 T hybride magneten is zodanig hoog en de perspectieven voor een mogelijke wetenschappelijke return zijn onvoldoende duidelijk, dat HFML op dit moment geen ambities in deze richting heeft. Tallahassee in de Verenigde Staten is leidend op dit gebied. Verbeteren van bestaande resistieve magneten (maximaal veld van 33 T naar 36-38 T met behulp van bestaande vermogensinstallaties) heeft de hoogste prioriteit.

Het tweede doel is het ontwikkelen van methoden voor hogere gepulste, niet destructieve velden (enkele milliseconden). Het magische getal is betrouwbare metingen bij 100 T te kunnen doen. HFML heeft nauwe banden met Toulouse en Dresden waar installaties voor pulsvelden met behulp van capaciteitsbanken staan (14 MJ respectievelijk 50 MJ in opbouw) en waar de magneettechnologie voor pulsvelden het meest ontwikkeld is. De DC installatie (20 MW continu) in Nijmegen kan geschakeld worden als geregelde pulsgenerator waarmee gedurende enkele seconden een stabiele stroom van 20.000 ampère bij 1000 volt gegenereerd kan worden. Hiermee kan een 35 T *flat-top* platformveld gemaakt worden, waarbinnen met behulp van de in Nijmegen aanwezige 2 MJ capaciteitsbank een 65 T pulsveld gegenereerd zou kunnen worden. Op deze wijze zou 100 T gehaald kunnen worden. De mogelijkheid de vermogensinstallatie als pulsbron te gebruiken is uniek in de wereld en technisch gezien is dit een aantrekkelijke weg. In Los Alamos (vs) bestaat een vliegwielfgenerator waarmee ook hoge geregelde stromen kunnen worden gemaakt. Deze laatste bron is waarschijnlijk de eerste waarmee 100 T bereikt zal kunnen worden. De combinatie van platformveld en pulsveld voor 100 T is waarschijnlijk de meest economische en efficiënte methode om dit doel te bereiken.

Een derde doel is het verbeteren van kwaliteit van velden, i.e. hogere homogeniteit, stabiliteit, laag trillingsniveau, om gevoelige experimenten die nu niet mogelijk zijn bij hoge velden, mogelijk te maken. De ambitie hier is op subnanometerschaal bij de hoogste velden te kunnen meten (enkele moleculen, scanning probes). Tevens ook om hoge resolutie NMR bij 1.4 GHz (30 T) te kunnen doen. De kwaliteit van de HFML-installatie is de beste ter wereld; het bereiken van de hier genoemde doelen is zeer wel mogelijk. Er bestaat samenwerking met de NMR-groep en de scanning probegroep in Nijmegen om hieraan te werken.

Momenteel zijn wereldwijd drie magneetfaciliteiten beschikbaar voor fysisch onderzoek waar een veldsterkte kan worden opgewekt van meer dan 30 T. Dit is in Grenoble, Talahassee en Nijmegen. Deze drie instituten werken samen op het gebied van magnetenonderzoek en -technologie. Er bestaat geen formele

verkaveling van onderzoeksgebieden. Het HFML te Nijmegen richt zich op drie taken, te weten de beschikbaarheid van een hoog magneetveld, het verlenen van service aan andere onderzoekers en eigen wetenschappelijk onderzoek. Bij het HFML bestaan mogelijkheden om in het magneetveld onderzoek te doen onder speciale omstandigheden of met specifieke apparatuur: lage temperaturen (tot 15 milliKelvin), spectroscopie tussen golflengtes variërend van microgolven tot zichtbaar licht, *time resolved spectroscopy*, thermodynamische meetapparatuur voor transport, specifieke warmte, magnetisatie.

Het HFML is onlangs uitgebreid en vernieuwd. Er zijn een aantal 33 T resistieve magneetvelden geïnstalleerd, een gepulst 75 T magneetveld (5 ms) en een hybride magneet van 41 T. De totale investering heeft een omvang van 23 miljoen euro; van dit bedrag is 16 miljoen euro via FOM van NWO afkomstig. De exploitatie en investeringen zijn voor rekening van de KUN, voor zover niet van FOM/NWO of de EU afkomstig.

De investering in HFML die onlangs is gerealiseerd plaatst Nederland in een unieke positie een zeer belangrijke rol te kunnen spelen bij het hiervoor genoemde tweede en derde doel. Het bestaande niveau van de exploitatie van HFML is echter zodanig dat deze rol slechts zeer beperkt kan zijn waardoor unieke kansen gemist zullen worden. Wellicht de meest tot de verbeelding sprekende gemiste kans zal hoge resolutie NMR bij 30 T zijn, hetgeen voor heel grote onderzoeksgebieden een zeer belangrijke stap vooruit in resolutie en gevoeligheid zou betekenen. Verder is te verwachten dat op het gebied van nanomaterialen hoge magneetvelden een belangrijke rol zullen spelen. In de jaren '60 waren hoge velden essentieel voor het begrip van bulkmaterialen en in de jaren '80 voor laagdimensionale (2D) systemen. Te verwachten is dat nanosystemen in het begin van deze eeuw aan de beurt zullen zijn. De belangrijkste technische rem hierbij is dat er nog onvoldoende meettechnologieën bestaan die individuele nano-objecten bij zeer hoge velden kunnen meten. HFML is hiervoor goed gepositioneerd vanwege de kwaliteit van de installatie. Ook hier geldt dat het relatief lage niveau van exploitatieondersteuning maakt, dat de voortgang wellicht te langzaam is.

Stimulering van deze vakgebieden kan voor Nederland van betekenis zijn. Daarvoor zijn investeringen gewenst in de vorm van het oprichten van onderzoeksinstituten of van een conglomeraat van kleine zelfstandige faciliteiten.

4.1**Nanotechnologie**

Voor de natuurkunde van nanostructuren zijn nog geen investeringen in apparatuur vereist met een omvang die hier relevant is. Vrijwel ieder land en bijna iedere universiteit heeft zijn eigen laboratorium voor nanotechnologie. Toch gaat het ook hier al om machines en *clean rooms* die vele miljoenen kosten. In het kader van de BSIK-gelden worden tientallen miljoenen geïnvesteerd in Nederland, verdeeld over een aantal universiteiten. De faciliteiten in Delft (TU/DIMES en TNO/TPD), Twente (MESA+) en Groningen (MSC+/BioMaDe) hebben besloten zich gezamenlijk Nanolab te noemen en rekenen voor dat ze samen bezig zijn verspreid over de genoemde plaatsen 108,6 miljoen euro te investeren.

Het vervaardigen en analyseren van *devices* en functionele materialen ten behoeve van innovatief fundamenteel en toepassingsgericht onderzoek op het gebied van de nanotechnologie (met raakvlakken aan de biomoleculaire chemie) vereist in toenemende mate een breed scala van dure apparatuur en uitstekende voorzieningen, verenigd in speciale, interdisciplinair georiënteerde laboratoria. Deze samenstellingen van apparatuur gaan de ondergrens van de in dit rapport besproken apparatuur te boven. De investering in Nanolab zou moeten kunnen leiden tot een belangrijk nationaal expertisenetwerk. Dit is relevant voor de ontwikkeling van beleid ten aanzien van nanowetenschap en nanotechnologie. Het is zeker denkbaar dat over enkele jaren ook hier alleen in internationaal verband de noodzakelijke investeringen voor faciliteiten voor nanotechnologie kunnen worden gedragen. Nederland zou zich er op voor kunnen bereiden dat een dergelijke internationale faciliteit voor nanotechnologie op haar bodem wordt gevestigd.

4.2**Natuurkunde van levende materie**

Het levenswetenschappelijk onderzoek boekt grote vooruitgang. Levend materiaal blijkt ook voor fysici interessante vragen op te roepen. Het levenswetenschappelijk onderzoek kan veel baat hebben bij een verdere verbreding van de onderzoeksaanpak met natuurkundige principes en technieken.

In vele gevallen bestaan samenwerkingsverbanden van natuurkundigen en onderzoekers in de levenswetenschappen voornamelijk uit een losse bundeling van afzonderlijk opererende (monodisciplinaire) onderzoeksgroepen. Voor deze vorm van samenwerken zijn geen grote investeringen noodzakelijk. Er bestaan echter ook initiatieven voor meer structurele onderzoeksprogramma's en voor het stichten van instituten. Ook maken onderzoekers in de levenswetenschappen in toenemende mate gebruik van onderzoeksfaciliteiten die zijn gebaseerd op natuurkundige principes of die oorspronkelijk slechts voor natuurkundig onderzoek waren bestemd, maar die ook voor de levenswetenschappen zeer re-

levant blijken te zijn. Een recent uitgevoerde verkenning⁹ van het natuurkundige onderzoek van levende materie heeft laten zien dat Nederland in dit veld van onderzoek een goede uitgangspositie heeft. Beleidsvoornemens ten aanzien van de natuurkunde van levende materie en ten aanzien van apparatuur voor wetenschappelijk onderzoek beïnvloeden elkaar daarom wederzijds.

Onderzoek in de levenswetenschappen maakt in toenemende mate gebruik van grote faciliteiten. Bij de voorbereiding en vaststelling van apparatuurbeleid dient rekening te worden gehouden met een toename van het volume aan natuurkundig georiënteerde onderzoeksvragen vanuit de levenswetenschappen, naast onderzoeksvragen vanuit de natuurkunde zelf.

4.3

Positronenstraling

Positronenstraling wordt gebruikt voor onderzoek aan lege ruimtes en grensvlakken in materialen, nanoceramics, metalen, polymeren en materialenonderzoek in het algemeen. Positronenonderzoek is een concurrerende techniek van hoge resolutie elektronenmicroscopie en röntgentomografie.

Buiten Nederland wordt onderzoek gedaan met behulp van positronen in Rusland, in de Verenigde Staten (Washington State University, Lawrence Livermore Laboratory) en in Japan. In de Verenigde Staten en Japan wordt gebruik gemaakt van versnellergedreven positronenbundels. Het IRI beschikt over een positronenbron en bundellijn. De bron bij het IRI is internationaal betrekkelijk onbekend, maar in helderheid is de bron bij het IRI wereldwijd onovertroffen. De faciliteit is betrekkelijk nieuw en is in eigen beheer gebouwd. De positronenbron bij het IRI wordt thans gedurende 100 % van de beschikbare tijd gebruikt. Het onderzoek vindt plaats bij het IRI, DIMES, UT, RUG en Philips. In enkele FOM-projecten worden positronen gebruikt, maar er wordt niet geïnvesteerd in positronen. Bij grotere bekendheid zal het aantal onderzoeksaanvragen stijgen, zodat selectie van onderzoeksaanvragen zal moeten plaatsvinden.

Een uitdaging voor het onderzoek bestaat uit de overstap van instrumentontwikkeling en -bouw naar instrumentgebruik voor onderzoeksdoeleinden. Het IRI heeft de ambitie om het onderzoek en de mogelijkheden die positronen bieden breder bekend te maken. Daarna kan een nieuwe bundellijn worden ontwikkeld en gebouwd. Nieuw onderzoek is aan te trekken op het gebied van natuurkunde, materialenonderzoek, oppervlakteonderzoek, polymeren en elektrotechniek.

Nederland heeft thans een zeer heldere positronenbron ter beschikking. Het positronenonderzoek is echter nog kleinschalig; er is meer aandacht en er zijn meer investeringen nodig om positronenonderzoek tot verdere ontwikkeling te brengen. Na vergroting van de internationale bekendheid zouden een nieuwe bundellijn en nieuwe diagnostische randapparatuur kunnen worden ontwikkeld.

⁹ KNAW (2003) *De appel van Newton. Nieuwe mogelijkheden voor natuurkundig onderzoek van levende materie*. Amsterdam: KNAW.

Bijlagen

Bijlage 1 Informanten

Gesprekspartners

dr. A.M. van den Berg	KVI
prof. dr. M.N. Harakeh	KVI
prof. dr. J.T.M. de Hosson	RUG
prof. dr. K. Jungmann	KVI
prof. dr. G.J. Kearley	IRI
prof. dr. A. Kleyn	FOM-Rijnhuizen
prof. dr. H. Schenk	UvA
dr. P.A.J. Tindemans	
prof. dr. J.F. van der Veen	PSI en ETH-Zürich
prof. dr. A.H.M. Verkooijen	IRI

Schriftelijke informatie

prof. dr. J.J. Engelen	CERN
prof. dr. S. Gales	IN2P3
prof. dr. M.N. Harakeh	KVI
dr. M. de Jong	NIKHEF
prof. dr. G.J. Kearley	IRI
prof. dr. A. Kleyn	FOM-Rijnhuizen
prof. dr. J.C. Maan	HMFL/KUN
prof. dr. R.T. Schilizzi	EVN
dr. P.A.J. Tindemans	
prof. dr. J.F. van der Veen	PSI en ETH-Zürich
prof. dr. A.H.M. Verkooijen	IRI
prof. dr. M.J. van der Wiel	TUE

Bijlage 2 Overzicht internationale faciliteiten

Het schema geeft een globaal overzicht van de faciliteiten die in dit rapport zijn genoemd in de categorieën 1, 2 en 3.

Overzicht internationale faciliteiten; bedragen in miljoen euro per jaar (2002)

<i>faciliteit</i>	<i>budget</i>	<i>OCW bijdrage</i>	<i>'thuisbasis'</i>	<i>budget</i>	<i>'flankerend beleid'</i>	<i>budget</i>
CERN	635	28,1	NIKHEF	16,3		
Euratom-fusie	750	37,5 ¹⁰	Rijnhuizen-fusie ¹¹	7,5	bijdragen uit Euratom	1,8
ESO	87,75	5,49	NOVA/ ASTRON ¹²	11,9	NOVA, NWO	3,0
ESA-science	770	22,7 ¹³	SRON	11,4	aardgericht ruimteonderzoek, microgewichtonderzoek	2,7
EVN	2,2	–	(JIVE)	0,8	EU	0,8
ANTARES ¹⁴	0,725					
AGOR	1,58	–	KVI	7,9	EU	0,6
ESRF	69,3	–	(NWO)	1,9		
DUBBLE	0,95	–		0,7		
FELIX	1,4	–	Rijnhuizen-IR	1,4	EU EPRSC	0,1 0,3
ISIS	43	–	IRI-NM, NWO	3,5		
HFML	2,5	–	KUN FOM	1,6 0,4	EU	0,3

¹⁰ Nederland draagt bij aan Euratom op basis van het BNP; deze bijdrage komt niet ten laste van de ocw-begroting.

¹¹ Totale budget Rijnhuizen 10,16 miljoen euro.

¹² Het overgrote deel van het ASTRON-budget is bestemd voor radioastronomisch onderzoek. Slechts een klein deel (< 10 %) is beschikbaar voor de functie van thuisbasis voor optische sterrenkunde.

¹³ De volledige ocw-bijdrage aan ESA is 30,2 miljoen euro.

¹⁴ De investering in ANTARES bedraagt 18,4 miljoen euro, waarvan NIKHEF 3,6 miljoen euro bijdraagt.

Bijlage 3 Lijst van afkortingen

AGOR	Accélérateur Groningen Orsay
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
ALS	Advanced Light Source
AMANDA	Antarctic Muon and Neutrino Detector Array
AMOLF	Atoom-, Molecuul en Optische Fysica, FOM-instituut voor
ANTARES	Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch
ASTRON	Astronomisch Onderzoek Nederland
ATA	Allen Telescope Array
BESSY	Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotron- strahlung
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
DESY	Deutsches Elektronen Sychrotron
DIMES	Delft Institute of Micro Electronics and Submicron technology
DUBBLE	Dutch Belgian Beam Line
ECFA	European Committee for Future Accelerators
EFDA	European Fusion Development Agreement
ERL	Energy Recovery Linac
ESA	European Space Agency
ESO	European Southern Observatory
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility
ESRO	European Space Research Organization
ESS	European Spallation Source
ESTEC	European Space and Technology Centre
EURISOL	European Isotope Separation On-Line
EVN	European Very Long Baseline Interferometry Network
FAIR	Facility for Antiproton and Ion Research
FEL	Free Electron Laser
FELICE	Free Electron Laser for Intra-Cavity Experiments
FELIX	Free Electron Laser for Infrared eXperiments
FIR	Far Infra Red
FOM	Fundamenteel Onderzoek der Materie (Stichting)
GANIL	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
GSI	Gesellschaft für Schwerionenforschung
HERA	Hadron-Electron Ring Accelerator
HFML	High Field Magnet Laboratory
IFMIF	International Fusion Materials Irradiation Facility
ILL	Institut Laue-Langevin
IMEC	Interuniversitair Micro-Elektronica Centrum
ING	Isaac Newton Group
IN2P3	l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Parti- cules
IRI	Interfacultair Reactor Instituut

ITER	International Thermal Nuclear Reactor
JCMT	James Clerk Maxwell Telescope
JET	Joint European Torus
JIVE	Joint Institute for Very Long Baseline Interferometry in Europe
JPARC	Japan Proton Accelerator Research Complex
KM ³ NET	km ³ Neutrino Telescope
KNAW	Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen
KVI	Kernfysisch Versneller Instituut
LOFAR	Low frequency Array
NIKHEF	Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge Energiefysica
NUPECC	Nuclear Physics European Collaboration Committee
NOVA	Nederlandse Onderzoekschool voor Astronomie
NWO	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
NWO-EW	Gebied Exacte Wetenschappen van NWO
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OWL	Overwhelmingly Large Telescope
PPARC	Particle Physics and Astronomy Research Council
PSI	Paul Scherrer Institut
PX	Protein crystallography
QCD	Quantum Chromo Dynamica
QGP	Quark Gluon Plasma
RIB	Radioactive Ion Beam
RNS	Raad voor Natuur- en Sterrenkunde
SASE	Self Amplified Spontaneous Emission
SKA	Square Kilometer Array
SLS	Swiss Light Source
SPIRAL2	Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne 2
SRON	Stichting Ruimteonderzoek Nederland
TEC	Trilateral Euregio Cluster
TESLA	TeV Energy Superconducting Linear Accelerator
THZ	terahertz (10 ¹² Hz)
TRIμP	Trapped Radioactive Isotopes: Micro-laboratories for Fundamental Physics
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VLT	Very Large Telescope
WSRT	Westerbork Synthesis Radio Telescope