

OYSTER

Groots met kleine deeltjes

OYSTER kijken in de binnenkant van ons bestaan

OYSTER is het project waarmee de onderzoeksreactor van het Reactor Instituut Delft (RID) een stuk preciezer en breder inzetbaar wordt. De in de reactor opgewekte neutronen worden met OYSTER door een element met vloeibaar waterstof gekoeld, geremd en 'stuurbaar' gemaakt in bundels. Hierdoor ontstaan nieuwe en betere meetmethodes waarmee het zelfs mogelijk wordt *real time* de productie van materialen en voedingsstoffen te volgen.

OYSTER heeft grote toegevoegde waarde voor de internationale wetenschap, de gezondheidszorg en de industrie.

Het RID is toonaangevend in de wereld met de ontwikkeling en productie van instrumenten voor onderzoek met neutronen. Ze worden in tal van onderzoekscentra gebruikt. Doordat in Delft experimentele en fundamentele onderzoeksprogramma's mogelijk zijn, neemt de Nederlandse onderzoeksreactor een onmisbare plaats in tussen grote internationale instituten. Na OYSTER wordt deze positie sterker: meer onderzoek, grotere precisie en met een grotere spin off naar de samenleving.

De nieuwe mogelijkheden na OYSTER zorgen voor:

- continuering van de aansluiting bij internationale topinstituten in de wereld
- een impuls voor het wetenschappelijk onderzoek bij de TU Delft
- een impuls voor productontwikkeling in Nederland en ver daarbuiten
- ontwikkeling van effectievere behandelmethodes in de gezondheidszorg
- nieuwe mogelijkheden bij energieopwekking en -opslag

Het project OYSTER (*Optimised Yield- for Science, Technology & Education - of Radiation*) vergt een investering van omstreeks 20 miljoen euro en zal in 2012 operationeel zijn.

Neutronenonderzoek in het kort

Waarom neutronenonderzoek?

Neutronen komen vrij bij het splijten van atoomkernen. Deze zeer kleine deeltjes dringen diep door in de materie die er aan blootgesteld wordt. Door veranderingen in snelheid en richting van neutronen te meten als ze op atomen botsen, is de mens in staat om materialen van de binnenkant te bekijken terwijl het materiaal intact blijft. Met de kennis die dit oplevert, kunnen we iets zeggen over het ontstaan van materialen en de processen die hierin een rol spelen. Zo kunnen we materialen naar onze inzichten veranderen en ze de beste eigenschappen geven voor hun functie.

Hoe werkt dit neutronenonderzoek nu?

De met kernsplijting in de onderzoeksreactor opgewekte neutronen worden 'losgelaten' op materialen. Rondom de onderzoeksreactor staan tal van zeer geavanceerde en veelal unieke instrumenten waarmee metingen worden verricht. Neutronen hebben niet alleen de prettige eigenschap diep te penetreren in materialen, ze hebben ook de 'vervelende' eigenschap 'slecht te luisteren'. Met elektrische of magnetische velden kunnen ze niet worden gestuurd. Focuseren met lenzen lukt ook vrijwel niet. Ze gaan dus alle kanten op.

Wat zijn straks de grote verbeteringen na OYSTER?

Die zijn talrijk. Grote winst zit in de mogelijkheid om het gedrag van neutronen beter te kunnen manipuleren, ondanks hun fysische ongreepbaarheid. Er ontstaan ook nieuwe mogelijkheden om te meten en bestaande methodes worden een factor honderd beter.

OYSTER wat levert het op?

Meer, mooier, sneller en fundamenteel beter. Zo laat OYSTER zich het best omschrijven. Het is een logisch vervolg op het succes en de voortdurende doorontwikkeling van de Hoger Onderwijs Reactor die in 1963 operationeel werd.

Met OYSTER wordt de neutronenbron gekoppeld aan een koeling met vloeibaar waterstof. Bij extreem lage temperatuur (minus 250 graden Celsius) veranderen de eigenschappen van neutronen zodanig dat ze beter zijn te bundelen en te geleiden. Vervolgens worden neutronen buiten de reactor naar het hart van iedere meetopstelling geleid. Daar wordt in een box een (productie-)proces nagebootst (temperatuur, druk, beweging, menging). De neutronen worden dwars door de box gestuurd en zien hoe het te onderzoeken materiaal daarin reageert op de behandeling – in sommige gevallen zelfs wanneer de veranderingen zich snel voltrekken.

Wat levert OYSTER op?

Het resultaatgebied is omvangrijk. We zien door OYSTER *real time* onder meer:

- hoe waterstof wordt opgeslagen in speciale metallo-organische buffers
- hoe ultradunne coatings zich (ont-)hechten aan oppervlakten
- hoe voedingsmiddelen van structuur veranderen door bewegen, koelen of verwarmen. We leren hierdoor meer over strem- en stollingsprocessen, belangrijk voor de ontwikkeling van dieetvoedsel
- onder welke omstandigheden staal- en kunststofsoorten hun optimale eigenschappen verwerven
- onder welke omstandigheden en hoe de magnetische eigenschappen van materialen veranderen
- hoe duinzand zich gedraagt onder veranderende condities zodat we uitspraken kunnen doen over onze zeevering
- hoe veranderingsprocessen in mengsels zoals verf zich voltrekken

RID: Knowledge Center & Innovator

Het Reactor Instituut Delft is een magneet voor wetenschappers. Zowel aanstormend toptalent als gevestigde wetenschappers voelen zich aangetrokken tot *cutting edge* onderzoek met unieke apparatuur.

Door OYSTER worden grote beperkingen weggenomen in de huidige neutronentechniek. Nu kunnen er alleen op korte afstand van de bron 'warme' momentopnames worden gemaakt doordat alleen daar voldoende neutronen worden opgevangen. Door OYSTER heeft de wetenschapper veel minder last van deze beperkingen. Met de vijf bestaande en een viertal geavanceerde nieuw te bouwen instrumenten zullen de meetmogelijkheden preciezer en talrijker worden. Er wordt straks zowel met 'warme' als 'koude' neutronen gemeten; zowel momentopnames als procesmatige bevindingen kunnen worden vastgelegd.

Het RID is onderdeel van een internationaal netwerk van topinstituten dat in Delft kennis en instrumenten betreft voor eigen onderzoek. Het RID is gevraagd om bij te dragen aan het te ontwikkelen Europese neutroneninstituut *European Spallation Source*. Voor een grote groep (multinationale) bedrijven is het RID van groot belang bij het ontwikkelen van producten in de voedingsmiddelenindustrie, micro-elektronica, staal- en kunststofproductie etc.

In de gezondheidszorg werkt het Reactor Instituut Delft samen met academische ziekenhuizen bij het ontwikkelen van diagnostische en behandeltherapieën voor het bestrijden van onder meer kanker. Voor de energiesector leidt neutronenonderzoek tot betere methodes voor opslag van energie met waterstof en batterijen.

De vernieuwde reactor beter, sneller en preciezer meten

Waterfunctie 1: Water remt snelle neutronen af

Eén van de drie neutronen **4** (op pagina 4) die bij de kernsplijting vrijkomt moet een volgend uraniumatoom splijten om de kettingreactie aan de gang te houden (de andere neutronen zijn beschikbaar voor experimenten). De snelheid van deze snelle neutronen is zo hoog (20 miljoen m/s) dat bijna alle neutronen wegvliegen zonder een uraniumkern te raken.

Door de reactie in water uit te voeren botsen de neutronen met de watermoleculen waardoor ze zo sterk worden afgeremd (tot 2000 m/s) dat ze wel kunnen reageren met de uraniumkernen. Zonder water vindt er geen kettingreactie plaats en stopt de kernsplijting.

Warmteproductie
3 MW

Snelheid
koude neutronen
500 m/s

Intensiteit koude
neutronenbundel
1 miljard neutronen
per s per cm²

Circa 10 m

OYSTER UITBREIDING Hoger vermogen

Het vermogen (warmteproductie) van de reactor wordt verhoogd van 2 naar 3 MW. Door meer uranium per seconde te splijten, worden 1,5 keer meer neutronen opgewekt. Per dag wordt dan circa 3 gram uranium verbruikt.

Bundelbuizen

Onderzoekers willen experimenten doen met neutronen. Zes bundelbuizen (diameter 20 cm) moeten de neutronen vanuit het bassin naar de experimenten geleiden. Neutronen die vrijwel parallel aan de buisoriëntatie de bundelbuizen in vliegen, komen bij de experimenteeropstellingen uit. Alle andere neutronen vliegen door de buiswand heen en worden geabsorbeerd door de buiswanden, het water en het beton. Ongeveer één op de miljoen neutronen zal door OYSTER bij een experiment aankomen.

Waterfunctie 2: Water koelt de reactorkern

Alle warmte die bij de kernsplijting vrijkomt, wordt door het bassinwater afgevoerd **5**. Een pomp zorgt voor een circulatiestroom (288 m³/h) door het bassin. Het koelwater wordt via een trechter onder de roosterplaat langs alle splijtstofplaten gezogen. Het warme water geeft zijn warmte af in een warmtewisselaar **6** en stroomt afgekoeld **7** (max. 40 °C) terug het bassin in. Het secundaire koelsysteem staat zijn warmte af aan de omgeving **8** door verdamping in de lucht.

Waterbassin

De reactorkern staat in een waterbassin (diepte 8 m, volume 250 m³). De dikte van de betonnen wand varieert van 1 tot circa 2,5 m.

Neutronen

De 100 miljoen x miljard neutronen die elke seconde in de reactorkern worden opgewekt, vliegen alle kanten op. Neutronen zijn ongeladen deeltjes en kunnen daarom niet met magneten worden gestuurd.

waterdamp

Primair koelcircuit

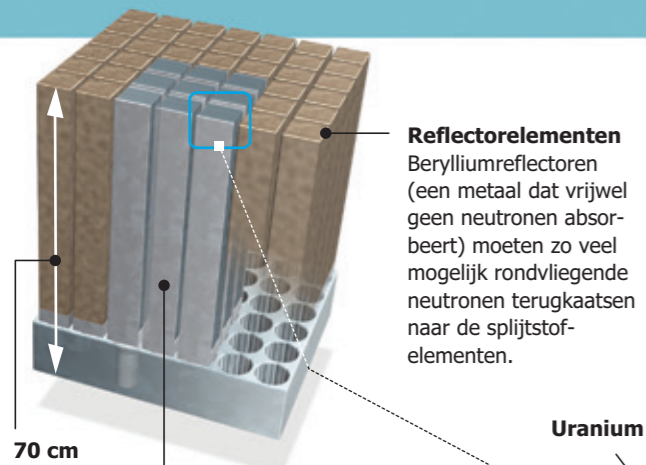
Secundair koelcircuit

ONDERZOEKSREACTOR

In een reguliere kerncentrale wordt de warmte die vrijkomt bij kernsplijting gebruikt om stoom te genereren. De stoom drijft turbines aan waarmee elektriciteit wordt opgewekt. Het doel van de Delftse reactor is neutronen op te wekken om wetenschappelijke experimenten mee uit te voeren.

KOUDE NEUTRONEN

Het grote voordeel van 'koude' neutronen is dat ze beter in de bundelbuizen blijven waardoor er 100 keer meer neutronen de experimenten bereiken dan bij 'warme' neutronen. Tweede voordeel is dat met de grotere golflengte van 'koude' neutronen grotere structuren zichtbaar gemaakt kunnen worden. Derde voordeel is dat de 'koude' neutronen minder snel door een testmateriaal bewegen waardoor beter en nauwkeuriger gemeten kan worden. Om koude neutronen te maken, moet de huidige reactor worden uitgebreid met een neutronenkoeler **1** die snelle 'warme' (40 °C) neutronen afremt tot langzame 'koude' (-250 °C) neutronen. De metingen zullen dan veel korter duren en meer informatie geven.



Reflectorelementen
Berylliumreflectoren (een metaal dat vrijwel geen neutronen absorbeert) moeten zo veel mogelijk rondvliegende neutronen terugkaatsen naar de splijtstofelementen.

Uranium

70 cm

OYSTER UITBREIDING

Nieuwe configuratie kernreactor

De nieuwe reactorkern heeft negen splijtstofelementen (in plaats van 20 elementen nu).

Huidige splijtstofplaten

Elk splijtstofelement (8 x 8 x 60 cm) bestaat uit 19 splijtstofplaten. Een splijtstofplaat is een luchtdichte aluminium doos waarin een dun plakje uraniumsilicide zit. In totaal bevat de reactorkern nu 4 kg uranium.

Kernsplijting in de splijtstofplaten

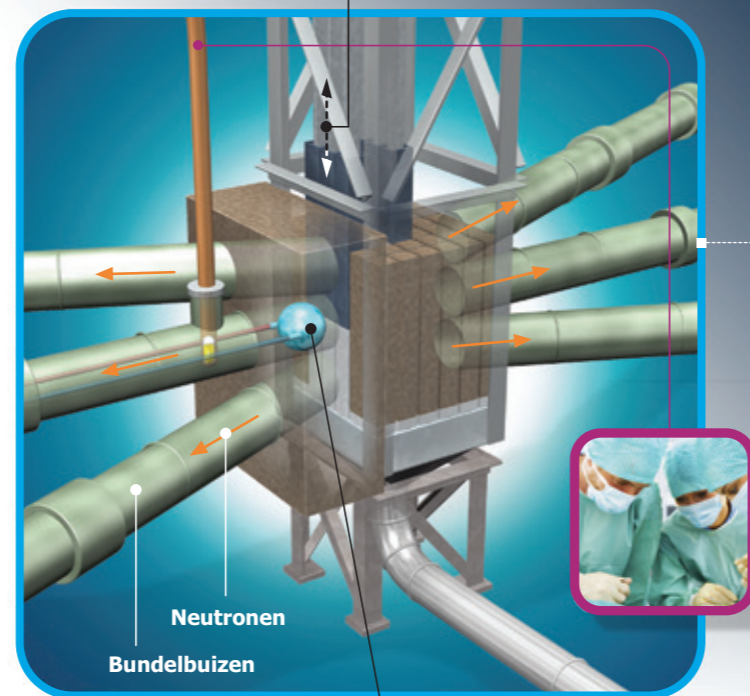
Neutronen vliegen door de aluminium mantel heen en veroorzaken kernsplijting van het uranium. Alle splijtingsproducten blijven in de splijtstofplaat en komen niet in het water terecht. De hoog-energetische straling wordt grotendeels opgenomen door de aluminium mantel (de rest door het water). De opgewekte energie wordt afgegeven aan het water dat tussen de platen stroomt (3 mm ruimte tussen de platen).

Kernsplijting van uranium

Atomen bestaan uit een wolk negatief geladen deeltjes (elektronen) die rond een kern cirkelen van positieve deeltjes (protonen) en ongeladen deeltjes (neutronen). Als een neutron van buitenaf op een uraniumkern botst en het atoom dat neutron in zijn kern opneemt, splijt de uraniumkern in twee kleinere kernen en drie neutronen. De massa van de splijtingsproducten is kleiner dan van de splijtstoffen doordat bij de reactie massa is omgezet in energie. Deze energie komt vrij als bewegingsenergie en hoog-energetische straling. Bij kernsplijting van een gram uranium komt 24.000 kWh energie vrij. Dit komt overeen met de verbranding van 2.500 liter benzine.

Nieuwe regelementen

Zes aluminium kokers gevuld met boriumcarbide kunnen in de reactorkern worden bewogen. Als twee van deze regelementen volledig in de kern zakken, absorberen ze alle rondvliegende neutronen waardoor de kernsplijting stopt. Bij een stroomstoring vallen de regelementen vanzelf in de kern.



Neutronen

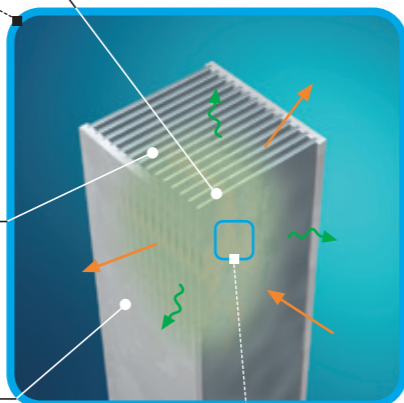
Bundelbuizen

1

OYSTER UITBREIDING

Neutronenkoeler

Vlak naast de kernreactor wordt een reservoir geplaatst met vloeibaar waterstof (temperatuur -250 °C). De neutronen die in de reactor vrijkomen vliegen door de koude waterstof heen waardoor hun snelheid van 2000 m/s tot 500 m/s afneemt. Het reservoir bestaat uit een aluminium bol met aan- en afvoerleidingen naar een warmtewisselaar.



Hoog-energetische straling

Uraniumkern

Vrij neutron

Proton

4

Drie vrije neutronen

Splijtingsproduct

Ventilatieschacht

Ventilatoren zuigen de lucht uit de hal af **2** en voeren die via een filter en een ventilatieschacht (hoogte 60 m) naar buiten af. Detectoren meten de afgevoerde lucht op de aanwezigheid van radioactieve stoffen. Zodra radioactiviteit wordt gemeten, sluiten gasdichte kleppen de luchtafvoer af en wordt de reactor stilgelegd.

Reactorgebouw

In de luchtdichte stalen hal **3** (diameter 25 m, hoogte 28 m) heerst een onderdruk zodat er geen lucht naar de omgeving kan lekken.

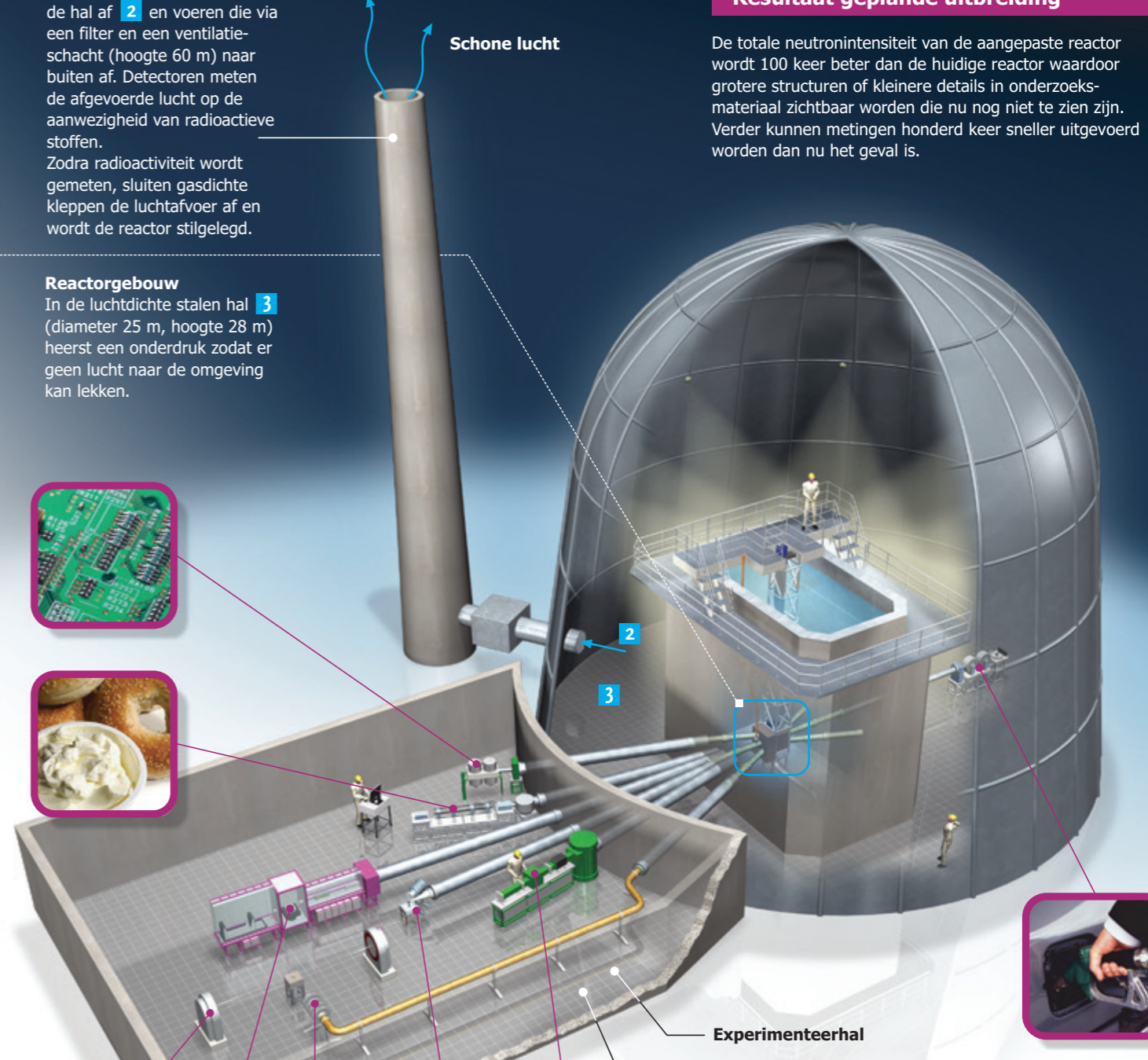
Schone lucht



OYSTER UITBREIDING

Resultaat geplande uitbreiding

De totale neutronintensiteit van de aangepaste reactor wordt 100 keer beter dan de huidige reactor waardoor grotere structuren of kleinere details in onderzoeksmateriaal zichtbaar worden die nu nog niet te zien zijn. Verder kunnen metingen honderd keer sneller uitgevoerd worden dan nu het geval is.



Experimenteerhal

Doel van de reactor: neutronenonderzoek

In de meetinstrumenten rond de onderzoeksreactor worden de neutronen op een stukje testmateriaal gericht. De neutronen veranderen van snelheid en richting als ze op atomen in het testmateriaal botsen. Door de afbuiging of verstrooiing van de neutronen te meten ontstaat een 'beeld' van de samenstelling en structuur van stoffen op atoomniveau dat op geen enkele andere manier verkregen kan worden.

OYSTER UITBREIDING

Nieuwe instrumenten

Nast de vijf bestaande instrumenten worden drie nieuwe instrumenten gebouwd die alleen met 'koude' neutronen kunnen werken. Deze nieuwe instrumenten kunnen metingen uitvoeren die nu niet mogelijk zijn.

Betere halfgeleiders en kunstheupen met ROG



Een instrument dat betere producten in tal van sectoren belooft: de Reflectometer voor Oppervlakten en Grenslagen-onderzoek (ROG). Hiermee kunnen uiterst dunne lagen en coatings worden bekeken. ROG meet hoe neutronen reflecteren onder een uiterst kleine hoek. Hieruit kan worden afgelezen hoe koolwaterstoffen zich hechten op diverse materialen, hoe magnetische lagen op tapes en harde schijven zich gedragen en op welke wijze coatings zich hechten op materialen voor kunstheupen.

Betere kankerbestrijding met CNIF



Met de Cold Neutron Irradiation Facility (CNIF) kan materiaal radioactief gemaakt worden. Dit instrument wordt strategisch achter de koude bron geplaatst waar het veel koude neutronen vangt en weinig gammastraling. Daardoor kan CNIF complexe structuren radioactief maken zonder ze te vernietigen.

Dit biedt goede perspectieven voor nieuwe behandelmethoden voor ernstige vormen van kanker. Op dit moment werkt het Reactor Instituut Delft samen met academische ziekenhuizen bij de ontwikkeling van een nieuwe generatie radio-isotopen. Dat zijn, bij wijze van spreken, nucleaire medicijnen die heel precies kankercellen bestrijden zonder gezond weefsel te beschadigen.

ROG is een bestaand instrument dat met OYSTER tot honderd keer beter gaat presteren. Behalve de laagdiktes zelf zal ook zichtbaar worden hoe ruw de oppervlaktes van de lagen zijn.

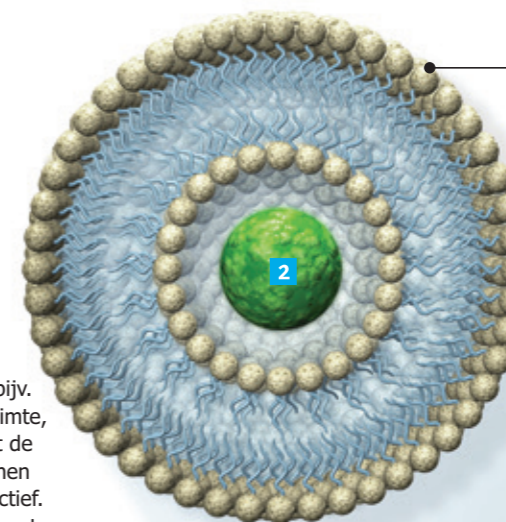
Bij de productie van chips worden spiegels gebruikt voor de sturing van extreem-UV-licht. De coatings op deze spiegels zijn uiterst kritisch: de minste aanslag erop vermindert de reflectie dramatisch. Dit kan onderzocht worden met de ROG. Voor een kunstheup geldt dat de kwaliteit van de coating bepaalt of hij wel of niet door het lichaam wordt afgestoten. Met ROG kan supernauwkeurig de kwaliteit van dit soort kritische coatings worden vastgesteld en het ontstaan van aanslag worden gevolgd.

OYSTER zal deze medische ontwikkeling een grote impuls geven. Met CNIF kunnen zeer zuivere nucleaire medicijnen of therapiestoffen worden gemaakt. In de huidige generatie radionuclides zitten nog veel niet-actieve bestanddelen. Deze hebben soms hinderlijke chemische eigenschappen met ongewenste gezondheidseffecten. Of ze verzadigen nodeloos de te bestrijden tumor waardoor het effect van de bestraling vermindert. Met CNIF lukt het om in radionuclides de niet-actieve moleculen af te scheiden waarna er dus een vrijwel zuiver en zeer effectieve radioactieve stof overblijft. Daarmee worden kankercellen beter bestreden en verminderen de bijeffecten.

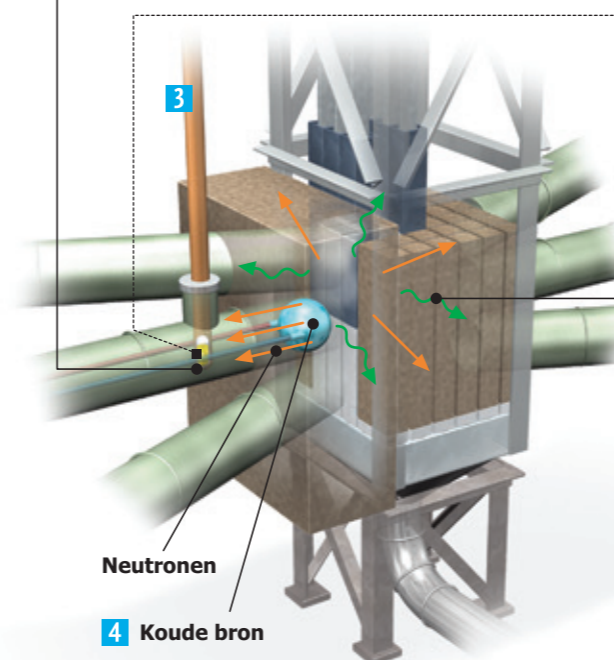
De vervaardiging van dit soort 'nucleaire medicijnen' moet in de directe nabijheid van behandelcentra plaatsvinden. De radio-isotopen zijn vaak kortlevend en moeten dus binnen enkele uren toegepast worden in een behandeling, anders verliezen ze hun werking.

Bestraling van buitenaf
Hoog-energetische straling **1** maakt tumorcellen kapot. Bestraling van een patiënt van buitenaf heeft als groot nadeel dat de radioactieve straling ook gezonde cellen kapotmaakt.

Maken van een liposoom met radioactieve kern
Een capsule met liposomen met bijv. een holmiumaatom in de holle ruimte, wordt via een buis **3** vlak naast de reactor kern geplaatst. De neutronen maken het holmiumaatom radioactief. Het vetbolletje vangt nauwelijks neutronen op en de radioactiviteit die in het vet ontstaat is zo kortlevend dat hij al verdwenen is voor het bolletje de reactor verlaat.



Liposoom
Liposomen zijn kleine holle vetbolletjes (diameter circa 0,01 mm). De wand bestaat uit een dubbele laag moleculen waarvan de kop in water en de staart in vet oplost (vergelijkbaar met een zeep). De holle liposomen zijn zeer geschikt om een medicijn **2** door het lichaam te transporteren. Het vetbolletje werkt dan als een verpakking waarbij het geneesmiddel geïsoleerd blijft totdat het bij een zieke cel is aangekomen. Daar moet de verpakking opengaan zodat het geneesmiddel zijn werk kan doen.

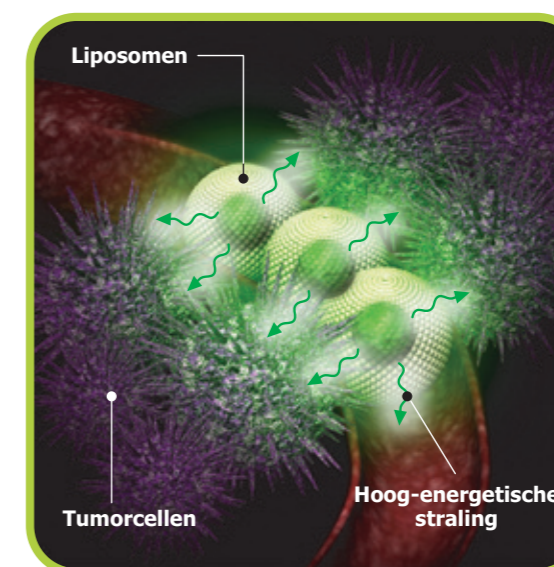


Gammastraling maakt liposomen kapot
De reactor kern zendt niet alleen neutronen uit maar ook gammastraling. Deze gammastraling kan de structuur en de wand van de vetbolletjes kapotmaken waardoor de holmiumatomen **2** direct uit hun verpakking zouden vrijkomen. Om dit te voorkomen worden de vetbolletjes nu bestraald op een plek ver van de reactor kern waar niet veel gammastraling is, maar ook weinig neutronen komen. Meer neutronen zouden het holmium sneller radioactief maken.

OYSTER UITBREIDING: CNIF

Koude neutronenbron

De nieuwe koude bron **4** gaat een dubbelfunctie vervullen. Allereerst remt de koude bron de neutronen af zodat ze meer en vaker in botsing komen met de holmiumatomen. Daarnaast fungeert het reservoir met vloeibaar waterstof als een schild tegen de gammastraling. De hoeveelheid neutronen die de liposomen bereikt wordt dan maximaal zonder dat het vetbolletje kapotgemaakt wordt door de schadelijke gammastraling. Hierdoor kunnen veel effectievere medicijnpakketjes worden geproduceerd.



Bestraling van binnenuit
Een liposoom met een radioactief aтом in de holle ruimte wordt in het lichaam ingespoten. Binnen een minuut is het liposoom op de juiste plek aangekomen en komt klem te zitten binnen in een tumor. Het radioactieve aтом zendt een korte tijd hoog-energetische straling uit. De straling stopt de groei van de tumorcellen terwijl de omringende gezonde cellen ongedeerd blijven.

Innovatieve voedingsmiddelen met SESANS

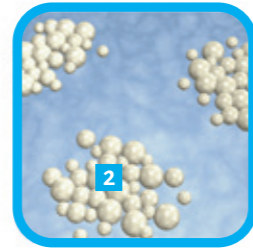
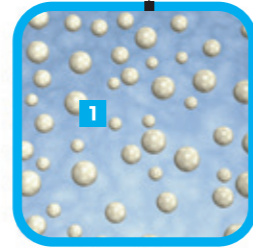
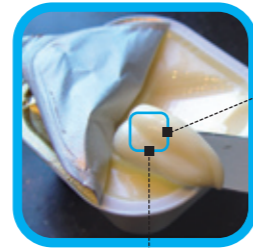


De Spin Echo Small Angle Neutron Scattering-faciliteit (SESANS) is een neutronengelijkrichter. Dit instrument meet de verstrooiing van de neutronen. De 'gelijkgerichte neutronen' veranderen door botsing met atomen in het onderzoeksmateriaal van richting. Die verstrooiingshoek is te meten door deze op een slimme manier om te zetten in een verdraaiing. Door deze truc kunnen superkleine verstrooiingshoeken gemeten worden waarmee uitspraken gedaan kunnen worden over de ordening van grote structuren in het onderzoeksmateriaal.

Voedingsmiddelen worden steeds vaker op grotere afstand van de plaats van consumptie bereid. Ook wordt de samenstelling van voedsel preciezer afgestemd op dieetbehoeften van de westerse mens. Met SESANS kan in ons voedsel worden gekeken naar welke effecten optreden tijdens de bereiding ervan.

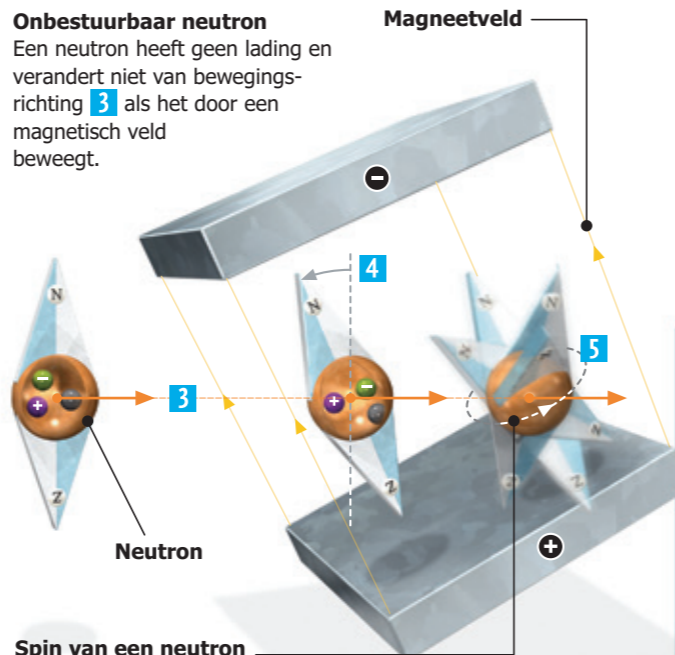
Met OYSTER zullen de mogelijkheden fors toenemen doordat veranderingen *real time* gevolgd kunnen worden. We kunnen bijvoorbeeld letterlijk melk in kaas zien veranderen en leren hierdoor voorspellen wat de gevolgen van bepaalde handelingen op dit voedsel zijn. Koelen, verwarmen, roeren en schudden, centrifugeren of rijpen. Met deze kennis kunnen we ook rekening houden met effecten in het natraject.

Met OYSTER kunnen we er voor zorgen dat een ijsje steeds beter gaat smaken nadat het de fabriek verlaten heeft. De fabrikant kan slimmer rekening houden met het gegeven dat het tijdens het transport nog een aantal keer gekoelde ruimtes verlaat. Als we het nuttigen, is het in optimale conditie. Met OYSTER kan ook de samenstelling van ons voedsel worden veranderd en aangepast op een gezonder dieet. Voedingsmiddelenfabrikanten laten op dit moment onderzoeken of vetbolletjes kunnen worden vervangen door belletjes, die geen vet maar water bevatten. Voedsel wordt dan goedkoper, want vet is duurder dan water. Tegelijk zullen wij deze zeer 'lichte' voedingsmiddelen toch als smakelijk ervaren doordat ze romig aandoen. Dit is een commercieel interessante en gezonde ontwikkeling.

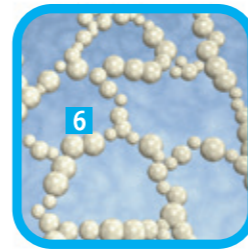


Vetbolletjes in water
Smeerkaas bestaat uit bolletjes vet en water. De afmeting en samenhang van de vetbolletjes bepaalt of kaas 'romig' smaakt. Een losse verdeling van vetbolletjes 1 van circa 1 micrometer ervaren we als romig, een klont bolletjes 2 groter dan 10 micrometer ervaren we als korrelig. Met een microscoop is het niet mogelijk om het gedrag van vetbolletjes binnenin kaas te zien doordat het niet doorzichtig is. Met SESANS kan dat wel.

Onbestuurbaar neutron
Een neutron heeft geen lading en verandert niet van bewegingsrichting 3 als het door een magnetisch veld beweegt.

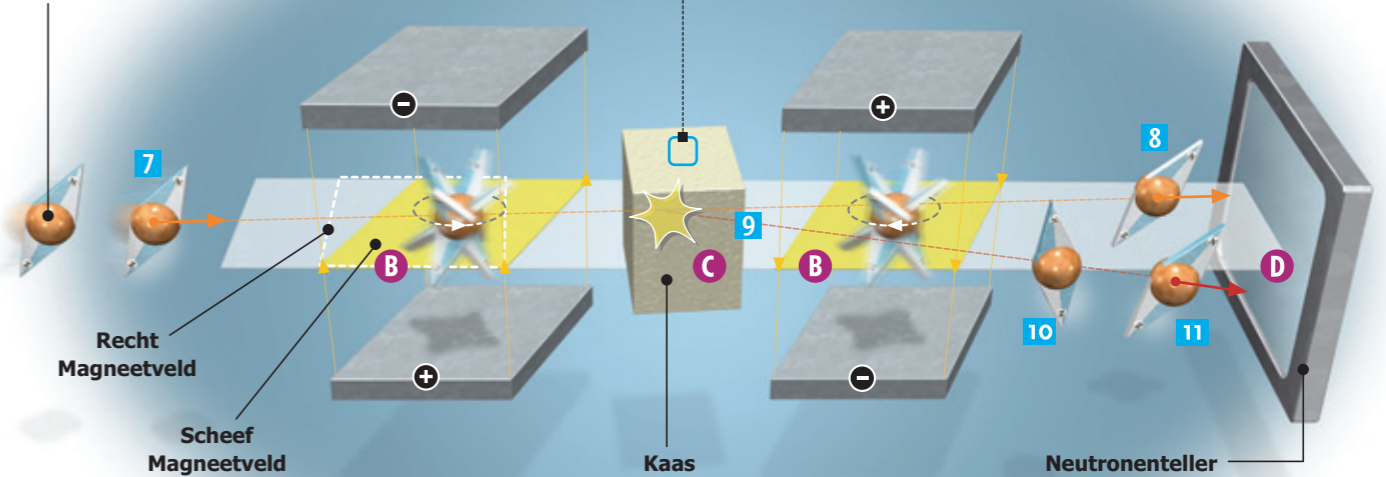


Spin van een neutron
Doordat een neutron is opgebouwd uit een positieve, een negatieve en een neutrale quark, verandert een neutron (zoals een kompasnaald) van oriëntatie 4 in een magnetisch veld. Verder heeft een neutron van nature een spin, een draaimoment van constante grootte. Als een neutron in een magnetisch veld komt, maakt de 'spinnende kompasnaald' hierdoor een zwaai-beweging (precessie) 5 om de richting van het magneetveld heen.



Bewaarstructuur
In het ideale geval is de structuur in een dicht kuipje smeerkaas (van fabriek naar consument) gefixeerd 6, zodat alle bolletjes op hun plaats blijven en de kaas niet uiteen kan vallen in een vetlaag met een laagje water.

A Gepolariseerde neutronen.
Met een kristal en een spiegel worden alle neutronen van één snelheid en één oriëntatie 7 geselecteerd.



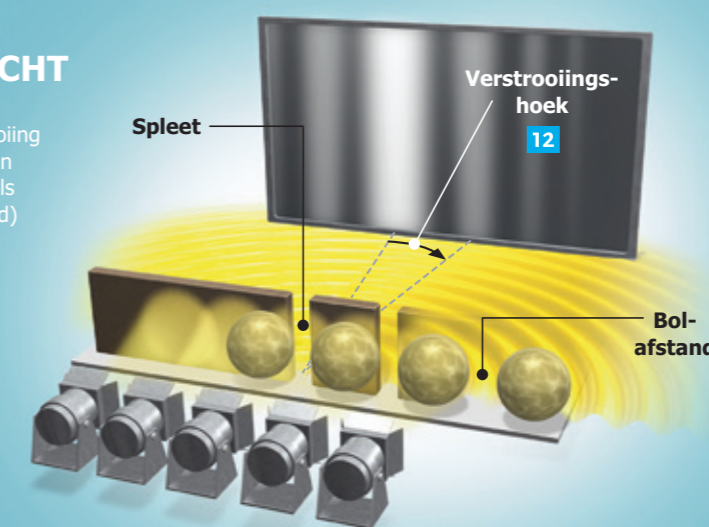
B Tegengestelde velden
De gepolariseerde neutronen bewegen door twee scheve vlakken met tegengestelde magnetische velden. Onafhankelijk van de invalsrichting van de neutronen is de afgelegde weg in beide velden even lang, waardoor een neutron in de twee velden evenveel linksom als rechtsom draait. Aan het einde van de meetopstelling 8 wordt het aantal neutronen gemeten dat de startoriëntatie heeft (= polarisatie). Als de neutronen geen botsingen hebben gehad, wijzen alle neutronen nog steeds dezelfde kant op en is de polarisatie maximaal.

D Maximumpolarisatie zoeken
Door de sterkte van de magnetische velden te verhogen, ontstaat voor iedere verstrooiingshoek een moment dat het verstrooide neutron precies één keer minder rechtsom dan linksom gedraaid is. Als de neutronen bij voorkeur onder die hoek verstrooid werden, ziet SESANS een maximum-polarisatie doordat de verstrooide neutronen 11 dezelfde oriëntatie gekregen hebben als de onverstrooide neutronen.

E Grootte van bolletjes
Uit de grootte van het magneetveld, de snelheid en draaisnelheid van de neutronen kan het verschil in weglengte door de magneetvelden en daarmee de verstrooiingshoek 12 van het neutron worden berekend. De verdeling van voorkeurshoeken is een maat voor de grootte van de bolletjes in het monster, de afstand tussen de bolletjes en de wanddikte van een hol vetbolletje.

NEUTRONEN LIJKEN OP LICHT

SESANS meet de verstrooiing (richtingsverandering) van neutronen die optreedt als een neutron (bijvoorbeeld) op een vetbolletje botst. Deze verstrooiing is vergelijkbaar met de verstrooiing van licht dat door een spleet schijnt: een neutron gedraagt zich als een deeltje maar heeft ook een golfkarakter, net als licht.



Bolmaat volgt uit schaduwpatroon
Doordat licht een golf is, ontstaat op een scherm achter de spleet een patroon van schaduwen dat veel groter is dan de spleet. Uit de afstanden tussen de 'verstrooiingshoeken waarbij de lichtintensiteit maximaal is', kan de grootte van de spleet worden berekend. Als er meer spleten zijn gaan de golfpatronen van de spleten elkaar versterken (veel licht) of uitdoven (schaduwen). De voorkeurshoeken geven dan informatie over de afstanden tussen de spleten en de ordening ervan. Bij SESANS werkt het net zo, alleen wordt dan niet de intensiteit van het licht gemeten, maar het aantal neutronen (=intensiteit) dat van richting en daardoor van oriëntatie is veranderd.

OYSTER UITBREIDING: SESANS
Beter meten
SESANS kan 10.000 keer sneller meten dan de klassieke opstelling met projectiescherm en kan 100 keer grotere structuren zien (tot 10 micrometer) dan met 'warme' neutronen. Met langgolvige 'koude' neutronen wordt dat 20 micrometer en met OYSTER gaat een meting 100 keer korter duren.

Betere zonnecellen met POSH 2D-ACAR



Dit reeds bestaande en beroemde instrument werkt met antimaterie. De afkorting staat voor Positronen Hoger Onderwijs Reactor 2-Detector Angular Correlation Annihilation Radiation. Dit instrument gebruikt vooral de gammastraling vlakbij de reactorkern om positronen te genereren. Energie wordt omgezet in antimaterie die in het te onderzoeken monster een annihilatiereactie oproept. Dat is als een deeltje (elektron) zijn antideeltje (positron) tegenkomt en ze elkaar vernietigen. De energie die hierbij uitgezonden wordt, is te meten. Heel kleine afwijkingen in de resultaten zeggen vervolgens iets over beweging van elektronen nabij onregelmatigheden in het onderzochte materiaal.

Dat is goed nieuws voor de zonnecel. Die zou veel beter presteren als hij volledig zwart zou zijn in plaats van overheersend blauw. Met POSH 2D-ACAR kan onderzocht worden op welke manier we zonnecellen door middel van 'structuurfoutjes' zwarter kunnen maken. Daarbij zal het

elektrisch rendement verbeteren doordat minder energie verloren gaat door reflectie. Het gedrag van de elektronen nabij de structuurfoutjes is dus van groot belang.

Efficiëntere energieopslag met NDF



De Neutron Diffraction Facility (NDF) speelt een belangrijke rol in de ontwikkeling van onze toekomstige energievoorziening. NDF is een nieuw instrument dat werkt met de karakteristieke golflengte van 'warme' neutronen. Door de reflectie van de neutronen te meten als functie van de hoek is het mogelijk om kristalstructuren te ontrafelen.

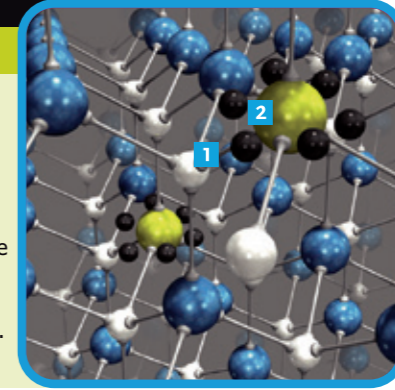
OYSTER maakt nieuwe energietechnieken mogelijk. Met NDF is te volgen hoe en onder welke condities waterstof wordt opgeslagen in metallo-organische materialen. Deze hebben de opmerkelijke eigenschap meer volume waterstof te kunnen opslaan dan een waterstoftank. NDF laat zien waar het waterstof blijft in de kristalstructuur van het materiaal.

NDF wordt ook ingezet bij onderzoek naar energieopslag in batterijen. Kennis en begrip van kristalstructuren en de werking van de diverse onderdelen van superbatterijen zijn cruciaal bij de ontwikkeling van elektrisch vervoer en decentrale (mobiele!) beschikbaarheid van elektrische energie.

OYSTER UITBREIDING: NDF

Nieuw instrument

Poreuze metaalorganische kristallen bestaan uit organische moleculen die door metaal-atomen met elkaar verbonden zijn. Waterstofatomen **1** gaan in de vrije ruimtes in de skeletstructuur zitten. Onderzoekers willen begrijpen hoe de waterstof-atomen zich nestelen in de holle ruimtes. Specifieke atomen kunnen de opslag van waterstofatomen stimuleren **2** of blokkeren. Met een microscoop kun je niet op atoomniveau in een materiaal kijken. Met NDF kan dat wel.

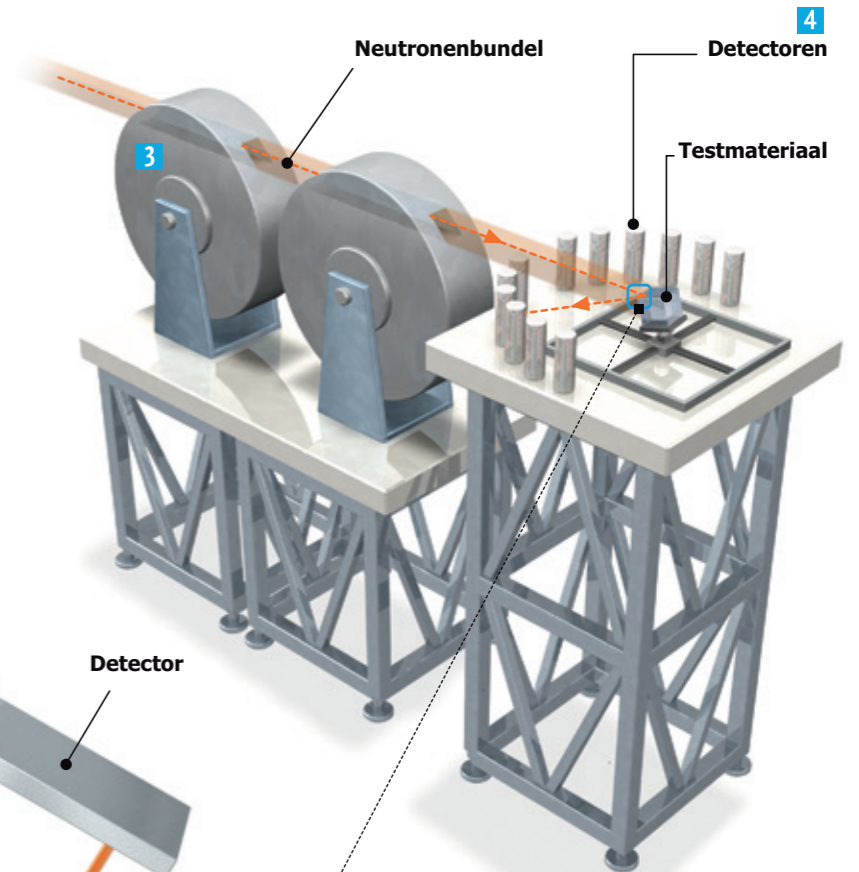


Waterstof is een kansrijke energiedrager voor de toekomst. Waterstof kan worden opgeslagen als gas of vloeistof in een tank (zoals LPG). Het is ook mogelijk om waterstof op te slaan in vaste stoffen, zoals metallo-organische materialen.

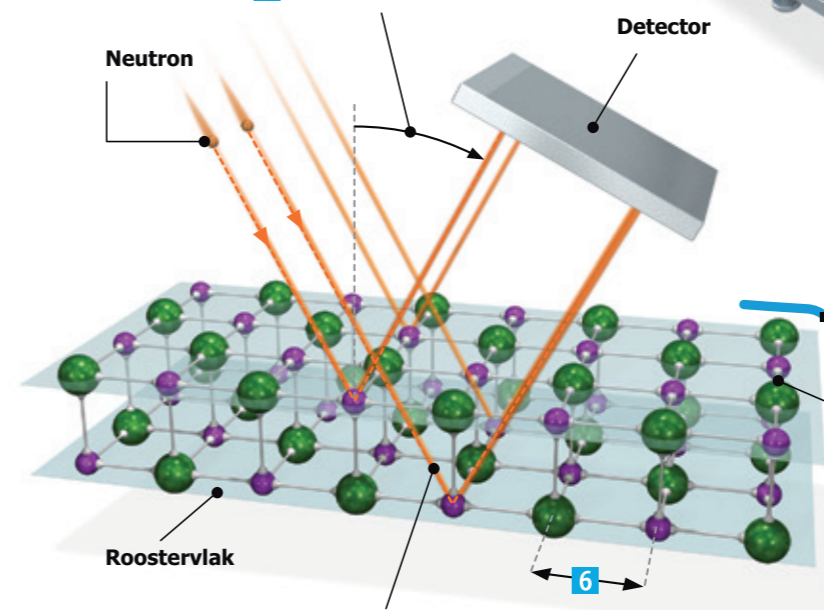
Afstanden tussen atomen meten

Een warme neutronenbundel wordt op een kristallijn testmateriaal gericht. Twee 'choppers' **3** (draaiende wielen met gaten erin) laten steeds een puls neutronen door (= starttijd).

De neutronen reflecteren aan de kristalvlakken en worden waargenomen door een aantal detectoren **4** (= stoptijd). Uit de afgelegde weg en de vluchtijd (= stoptijd minus starttijd) wordt de golflengte van ieder neutron berekend. De golflengte, de reflectiehoek **5** en de intensiteit van de reflectie laten zien welke afstanden tussen de kristalvlakken in het testmateriaal voorkomen. Speciale software kan dan het hele kristalrooster uitrekenen.



5 Reflectiehoek



Neutronen reflecteren sterk aan kristallijne materialen

Een signaal van een reflectie aan een enkel atoom wordt niet gedetecteerd. Als de atomen op een regelmatige manier gerangschikt zijn in kristalvlakken en als het weglengte-verschil tussen de reflecties aan de verschillende vlakken een geheel aantal neutronen-golflengtes is, versterken de reflecties elkaar en wordt door de detectoren een intens signaal gemeten.

Keukenzout

Uit een meting aan een kristal keukenzout volgt maar één afstand **6**, zodat het kristalrooster direct bekend is.

OPLADEN EN ONTLADEN

Met NDF wordt eerst het 'lege' kristalrooster van een metallo-organisch materiaal gemeten en daarna de situatie als er waterstof is toegevoegd. De extra afstanden laten 'zien' waar en hoe de waterstofatomen in het rooster zitten.

Sterker staal met PANDA



De Poly Axis Neutron Depolarization Analysis (PANDA)-opstelling is een 'neutronengelijkrichter'. Ieder neutron is een magneetje dat gericht kan worden. De 'gelijkgerichte neutronen' worden door het onderzoeksmateriaal gestuurd. Aan de uitgaande neutronen wordt gemeten hoeveel ze 'gedraaid' zijn. We zijn dan in staat om in materialen te kijken en de magnetische structuur te zien.

Zo wordt de samenstelling van staal zichtbaar: opeengepakte korrels waarvan een deel magnetisch is. De grootte en samenstelling van de korrels veranderen tijdens het stollingsproces, maar ook nog daarna bij het walsen en verder verwerken. Dat hele proces kan in de PANDA worden nagebootst. Door beter begrip van de processen kunnen we de productiemethode optimaliseren. We kunnen uitspraken doen over de sterkte en zelfs voorspellen wanneer staal bezwijkt. Hierdoor kunnen we betere bruggen bouwen en veiliger kreukelzones aanbrengen in auto's.



Met OYSTER worden deze mogelijkheden nog verder vergroot. Met OYSTER kunnen we ook de snellere processen in de productie van staal volgen en het verschijnen en verdwijnen van kleinere korrels zien. We zien real time wat zich voordoet bij de vorming van staal en wat het effect is van veranderingen. Dat is interessant voor staalproducenten. Doordat staal nog heel veel nabehandelingen ondergaat, veranderen ook de eigenschappen van het product. Wie de gevolgen kan voorspellen, is in staat hier vooraf al rekening mee te houden. Zo kan staal zijn optimale eigenschappen pas krijgen ná vervorming in mallen en de behandeling in zinkbaden en lakstraten. En ze jarenlang lang behouden in zomer en winter.

Zelfherstellend aluminium met POSH-PALS

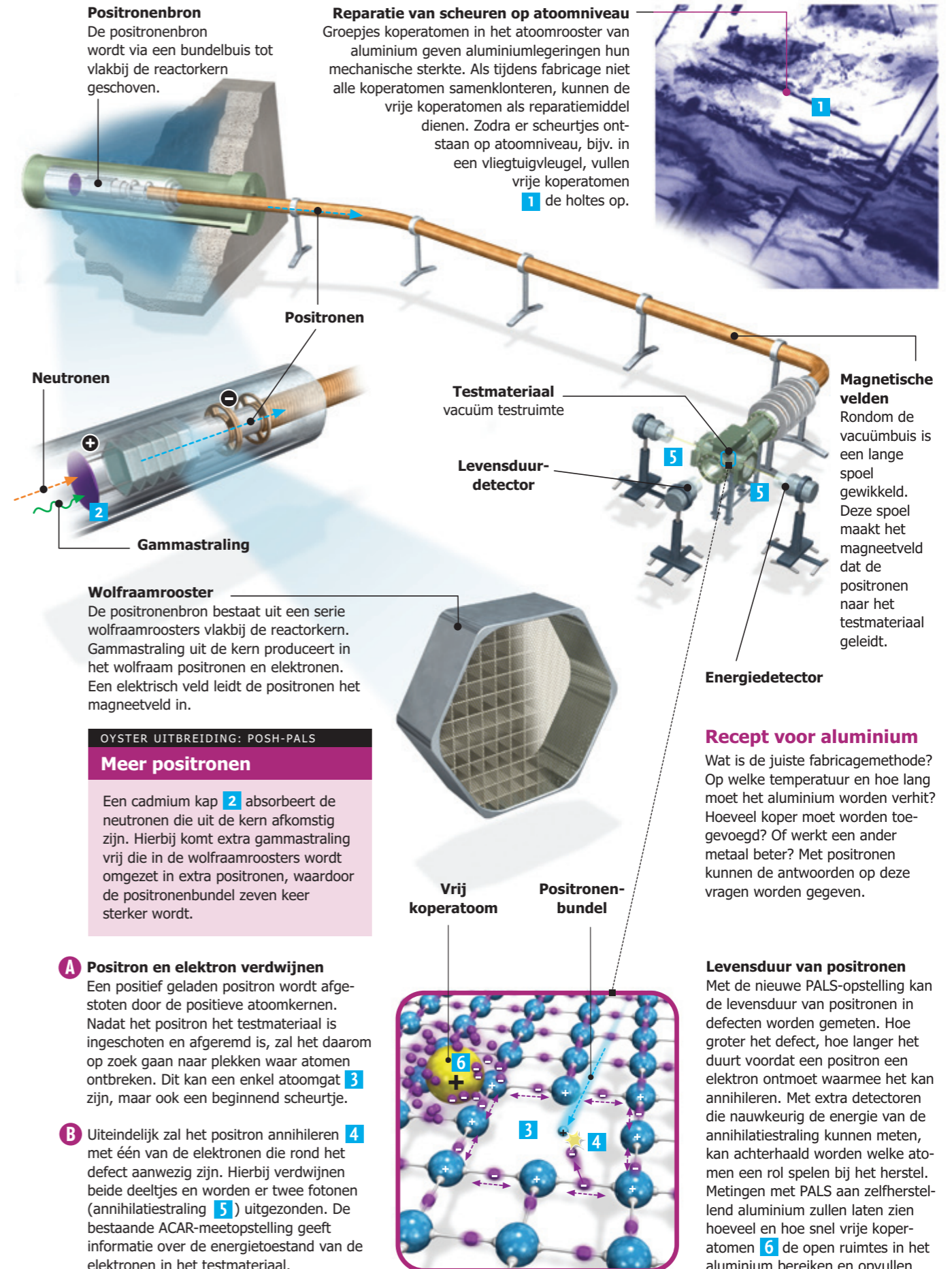


Positronen Hoger Onderwijs Reactor –Positron Annihilation Lifetime Spectometry, dit nieuwe instrument schiet antimaterie in een monster en kijkt hoe lang het duurt voor het zijn tegenpool ontmoet en vernietigt. Hoe groter de holtes in een structuur, hoe langer het duurt voor dit gebeurt.

Uit de gegevens die dit oplevert, kan worden afgeleid hoe groot holle ruimtes in een structuur zijn. Zo worden al in een heel

vroeg stadium potentiële breuken zichtbaar gemaakt. Ook kan het instrument gebruikt worden bij het ontwikkelen van 'slimme' materialen.

Als in aluminium vrije koperatomen worden toegevoegd, zullen deze het begin van haarscheuren opvullen. In principe ontstaat zo een 'zelfherstellend' aluminium: zodra er breuken dreigen, repareren koperatomen de schade. Dat gaat door tot de vrije koperatomen 'op' zijn. Met POSH-PALS kan dit proces *on-line* worden gevolgd zodat de optimale samenstelling en levensduur van dit zelfherstellend aluminium kunnen worden vastgesteld.





De leugendetector SNM

De *Scanning Neutron Microscope* (SNM) heeft een 'koude' neutronenbundel nodig. Via holle glasfibers focuseert de SNM neutronen in een punt op het te onderzoeken materiaal. Sommige neutronen worden daar geabsorbeerd. De energie die daarbij ontstaat, manifesteert zich in de vorm van lichtflitsjes. Die kunnen worden gemeten. De analyse verradt de details van de samenstelling van het materiaal in het brandpunt: in principe kunnen alle elementen in het periodiek systeem zichtbaar worden gemaakt.

Dit nieuwe meetinstrument zal heel nieuwe toepassingen van neutronenonderzoek mogelijk maken. Veelbelovend lijkt 'echtheidsonderzoek' in de kunst- en erfgoedwereld. Met SNM kunnen pigmenten in schilderijen worden ontleed. Daaraan is te zien of ze van het palet van de meester komen, of van dat van een vervalser uit een later tijdvak. Hetzelfde geldt voor de samenstelling van brons, glas en aardewerk. Een ander terrein is onderzoek naar organische afbraak van verontreinigingen. Het is bekend dat bepaalde organismen (vegetatie, bacteriën) zich voeden met chemische verontreinigingen. Met SNM kan worden bekeken hoe, waarom en onder welke condities organisch weefsel elementen uit het periodiek systeem opneemt en wat daarmee gebeurt. Dit opent ook wegen voor medisch onderzoek, bijvoorbeeld voor onderzoek naar de opname van verontreinigde stoffen door de lever en de effecten daarvan.



Chemische samenstelling bepalen

Het is interessant om de chemische samenstelling van objecten te achterhalen. Bijvoorbeeld om vast te stellen of het pigment op een schilderij inderdaad 300 jaar geleden gemaakt is. Het is mogelijk om een stukje verf van het doek te schrapen en dit chemisch te onderzoeken, maar hierdoor raakt het schilderij licht beschadigd.

Neutronenbundel

Non-destructief onderzoek

Het grote voordeel van analyse met neutronen is dat het geen schade aan het testmateriaal toebrengt, zodat een compleet schilderijoppervlak geanalyseerd kan worden door in elke vierkante millimeter een meting uit te voeren.

Glasfibers

De neutronen worden door een bundel holle glasfibers (fiberdiameter enkele micrometers) naar een focuspunt op het testmateriaal geleid. Het is niet mogelijk om warme neutronen met glasfibers te sturen.

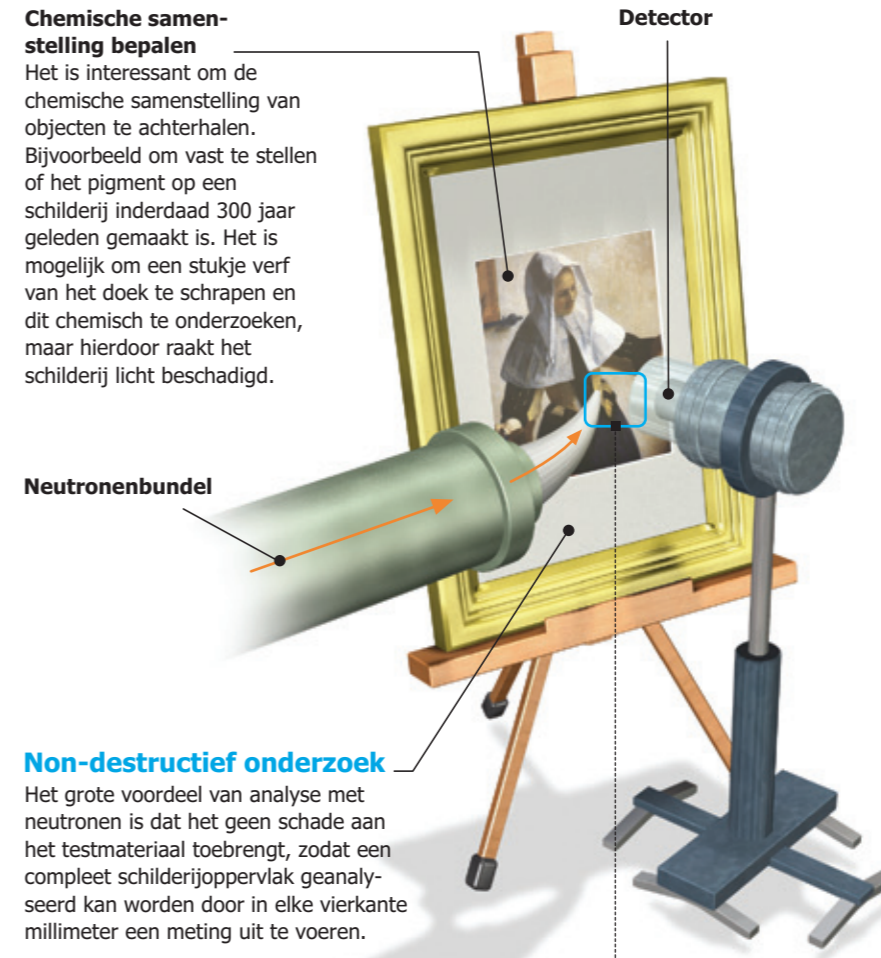
Een germaniumkristal als detector

De gammastraling wordt opgevangen door een germaniumkristal **3** (diameter 10 cm). Elk element uit het periodiek systeem zendt een andere kleur gammastraling uit. De relatie tussen die gammakleuren en de elementen is bekend. Germanium kan heel precies verschillen detecteren in kleur en intensiteit van gammastraling. Het germaniumkristal zet de gammastraling om in elektrische signalen die gemeten worden.

Vloeibaar stikstof

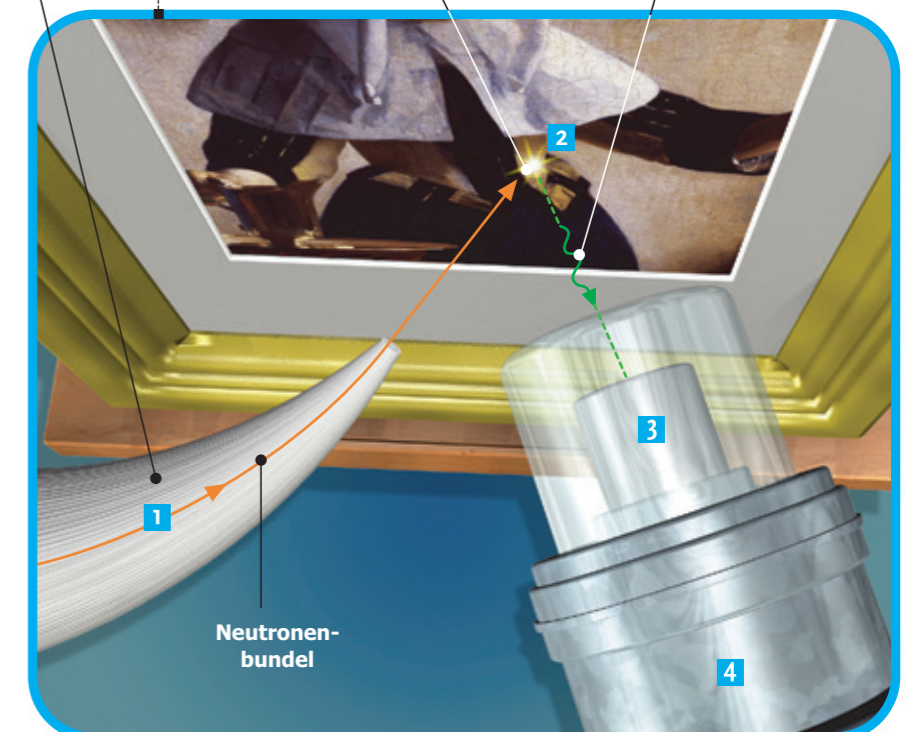
Het germaniumkristal wordt gekoeld met vloeibare stikstof **4** (-196 °C) om te zorgen dat er alleen elektrische pulsen ontstaan als gevolg van opgevangen gammastraling.

Detector



Focuspunt doorsnee 0,2 mm

Gammastraling



OYSTER UITBREIDING: SNM

Neutronen richten

Met neutronen kan de samenstelling van een voorwerp worden bepaald zonder het kapot te maken. Om een specifiek stukje te analyseren is het noodzakelijk om de neutronen precies te richten. Dat is mogelijk met koude neutronen doordat die stuurbaar zijn met holle glasfibers.

Analyse met neutronen

Als een neutronenbundel **1** op een schilderij wordt gericht, neemt een aantal pigmentatomen een neutron op in hun kern en zendt daardoor heel kort een lichtflitsje uit **2** (hoog-energetische straling). Het schilderij verandert niet waarneembaar als gevolg van de analyse, doordat de neutronen maar 1 op de 100 miljard pigmentatomen raken.

Inter- nationalisering

Neutronenonderzoek heeft het moderne leven veel profijtlijks opgeleverd. Internationaal deeltjesonderzoek, zoals dat in Delft vanaf 1963 plaatsvindt, heeft bijgedragen aan effectievere gezondheidszorg, betere materialen en preciezere beheersing van (productie-)processen. Mede hierdoor is de kwaliteit van ons bestaan fors gestegen.

Binnen het internationale deeltjesonderzoek speelt Delft inmiddels een unieke en onmisbare rol.

RID, Delft

Het Reactor Instituut Delft (RID) is in Nederland het universitair centrum voor stralingsgerelateerd onderzoek en onderwijs. Het RID is partner van nationale en internationale universitaire instellingen en draagt bij aan fundamenteel onderzoek op verschillende terreinen. Door een combinatie van expertise, de reactor, de juiste instrumenten en een laagdrempelige toegang is het RID ook het aanspreekpunt van bedrijven die op zoek zijn naar innovatieve toepassingen die bijdragen aan de efficiëntie, de veiligheid en de innovatie van producten. Bij het RID werken 150 mensen.

European Spallation Source

Europa heeft tot op heden een voorsprong op de rest van de wereld waar het gaat om neutronenonderzoek, met ISIS en ILL als troefkaarten. Maar de Verenigde Staten en Japan zijn anno 2008 neutronenbronnen aan het opleveren die sterker zullen zijn dan ISIS.

De Europese neutronengemeenschap bereidt de bouw van een gepulste neutronenbron voor die alle bestaande bronnen met een factor 10 zal overtreffen: de European Spallation Source. Door het combineren van kennis en kunde op Europese schaal wordt het mogelijk om in de wereldtop onze vooraanstaande positie te behouden.

Nederland is gevraagd om via het RID aan dit project bij te dragen. Nederland zal via het RID dus een belangrijke rol spelen bij de ontwikkeling van deze Europese onderzoeksfaciliteit.



ISIS, Oxford, Engeland & ILL, Grenoble, Frankrijk

In Engeland staat de grootste gepulste neutronenbron van de wereld. In Frankrijk staat de krachtigste onderzoeksreactor ter wereld. De twee enorme onderzoekscomplexen herbergen de top van de wereld op het gebied van neutronenonderzoek.

ISIS betreft instrumenten van het RID, dat ze voor dit instituut ontwikkelt en bouwt. ILL maakt ook gebruik van Delftse kennis en ideeën.

Het RID is vanwege doelstelling en mogelijkheden complementair aan ISIS en ILL. In Delft vindt fundamenteel en experimenteel onderzoek plaats dat bij het ISIS en ILL niet thuishoort. Op de carrière-ladder fungeert het RID als wetenschappelijk voorportaal voor ISIS en ILL.

NRG, Petten

Ons land kent twee onderzoeksreactoren. De reactor van de Europese Commissie in Petten wordt bediend door de Nuclear Research and consultancy Group (NRG). Er vindt met hoge vermogens en hoge stralingsniveaus vooral materiaalonderzoek naar stralingschade plaats, waarbij materialen getest worden voor toepassingen in hoge stralingsvelden. Bovendien is Petten een leverancier van radio-isotopen voor de medische industrie en doet dat op commerciële basis.

De onderzoeksreactor van het RID richt zich op wetenschappelijk onderzoek, het benutten van straling om betere functionele materialen en stoffen te ontwikkelen. Ook worden in Delft nieuwe toepassingen en optimale productiemethoden voor medische radio-isotopen ontwikkeld. Zodoende is Delft leverancier van kennis die in Petten kan worden toegepast.

TU Delft

Reactor Instituut Delft

Postbus 5042 - 2600 GA Delft

Mekelweg 15 - 2629 JB Delft

T +31 015 27 86744

F +31 015 27 86422

I www.rid.tudelft.nl

Colofon

Coördinatie & tekst	Zuid-West 3 Communicatie
© Illustraties & tekst	Verdult - Kennis in Beeld, www.kennisinbeeld.nl
© Ontwerp cover	Verdult - Kennis in Beeld
Vormgeving	Chris Cras Reclame
Productiedatum	november 2008