

prof.dr. W.M.G. Ubachs

Van Moleculen, Lasers en het Universum

prof.dr. W.M.G. Ubachs

Van Moleculen, Lasers en het Universum

*Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar
Atoom-, Molecuul- en Laserfysica aan de faculteit der Exacte
Wetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam
op 23 september 2004.*

vrije Universiteit amsterdam



Van Moleculen, Lasers en het Universum

Geachte Rector, dames en heren,

In deze openbare les hoop ik U te onderrichten over het onderzoek aan de materiele wereld om ons heen, en mijn fascinatie daarvoor over te brengen. Mijn leeropdracht betreft atomen en moleculen en hun wisselwerking met licht. Licht uit lasers heeft eigenschappen die dat onderzoek heel precies en heel gevoelig mogelijk maken, en daarmee spannend, uitdagend en leuk. We leren de structuur van moleculen kennen, hoe ze het zonlicht absorberen en verstrooien in de aardse atmosfeer, hoe ze zich gedragen in vlammen, chemische reacties en plasma's, in kometen, sterren en de verst verwijderde sterrenstelsels, en hoe ze daarmee de raadsels rondom structuur en samenstelling van ons universum blootleggen. Voor de leken onder U zal ik proberen de rijkdom te schilderen van moleculaire processen en hoe schoon die te bestuderen met laserlicht. Voor de experts hoop ik duidelijk te maken dat molecuulfysika met lasers fundamentele natuurkunde is: door extreem nauwkeurige metingen met lasers aan moleculen leren we over fundamentele symmetrieën, over fundamentele natuurconstanten, en over de structuur van ons universum. Maar tegelijkertijd worden met lasers, en zeker ook in mijn groep, zogenaamd "nuttige" zaken bestudeerd. Waar het lasers betreft gaan fundamenteel en toegepast onderzoek hand in hand. Een aantredend hoogleraar geeft vaker een beschouwing over de relatie van zijn vakgebied tot de maatschappij, wat veelal uitmondt in een klaagzang over geringe financiering en tanende belangstelling van studenten. Wees gerust, vandaag is een feestdag, ik zal niet zeuren. Het vak van de natuurkunde is leuker dan alle andere, en al komen ze niet in groten getale, er komen steeds weer slimme en enthousiaste studenten, en ik vind het een voorrecht met hen te mogen werken.

Het universum is anders dan U denkt. Uw perspectief is bepaald door datgene wat U rondom U heen ziet. Solide materie waarop U staat, de grote vloeistofmassa's in de oceanen, de zuurstofrijke atmosfeer die U ademt en de dichte wolken boven Uw hoofd. In werkelijkheid is het universum vooral leeg; het is gevuld met zeer ijl gas, veel ijler dan we met de beste vacuümpompen op aarde kunnen produceren. En in de oerknal zijn alleen de elementen waterstof, helium en een klein beetje deuterium en nog minder lithium gevormd. De precieze verdeling van die elementen vormt een belangrijk bewijs voor de oerknal waarmee het universum in gang is gezet. Uit de gemeten hoeveelheid deuterium, aangegeven met de blauwe lijn in de grafiek kan overigens worden afgeleid, dat er een miljard keer meer fotonen, of lichtdeeltjes bestaan dan materiedeeltjes. Naast de 80% waterstof, in de vorm van het atoom H of het molecuul H_2 , en de 20% helium, omvat de rest van de elementen (inclusief

koolstof, zuurstof, en stikstof waar Uw lichaam uit bestaat) slechts een schamele 0.1 % van de bestaande materie.

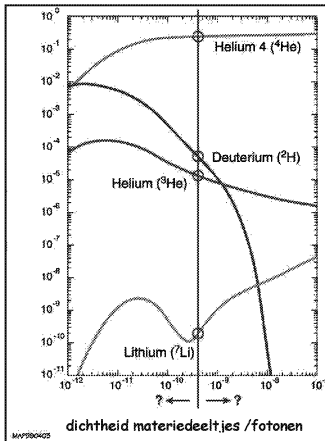


Fig. 1: Verdeling van de elementen zoals gevormd in de oerknal en vlak erna. Verticale schaal is logaritmisch en relatief t.o.v. atomair waterstof: H. Curves zijn berekend als functie van de dichtheid van materiedeeltjes t.o.v. de dichtheid van fotonen (lichtdeeltjes) in het universum.

Die laatste elementen, dus die waaruit U bestaat, zijn overigens niet in de oerknal aangemaakt, maar veel later, in kernversmeltings-processen in het binnenste van sterren en bij supernova explosies, fenomenale uitbarstingen die het einde in de levenscyclus van sterren markeren. Op het plaatje is de supernova-explosie uit 1987 afgebeeld, die plaatsvond in ons eigen melkwegstelsel, dus bij de buren zeggend, met een explosie-energie van 10^{28} Megaton; dat is honderd keer een miljard maal een miljard maal een miljard maal de bommen op Hiroshima en Nagasaki bij elkaar. Wij hebben een gewelddadig verleden.

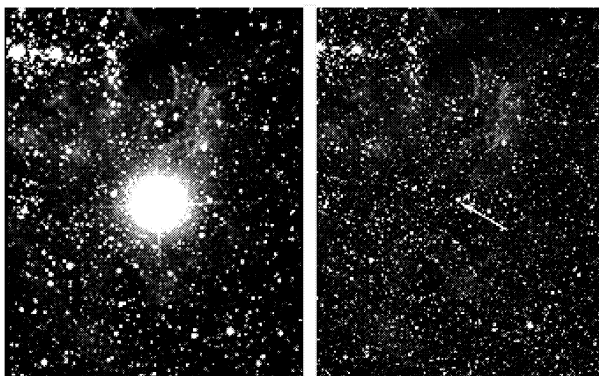


Fig. 2: Links de supernova explosie 1987A; rechts de ster voor de explosie.



Fig. 3: Robert Wilson (links) en Arno Penzias, ontdekkers van de kosmische achtergrondstraling.

Vanuit Uw perspectief van de aardse verhoudingen lijkt het heelal wellicht divers en heterogeen, maar vanuit het grote kosmologische perspectief is dat slechts een minieme rimpeling; het heelal is extreem homogeen, het is juist overal hetzelfde. Dit leiden we af uit metingen aan de zogenaamde kosmische achtergrondstraling. Deze vorm van radiostraling werd voor het eerst waargenomen als ruis op een antenne van Bell Telephone Companies in 1965, en de ingenieurs Penzias en Wilson dachten aanvankelijk dat het een gevolg was van duivenpoep op de antenne, maar interpreteerden het later correct. Een mooi staaltje van “weten door meten” (en wat nadenken) dat hen in 1978 de Nobelprijs opleverde. Deze achtergrondstraling vormt nu een tweede belangrijk bewijs voor het ontstaan van ons universum door een “oerknal”: de achtergrondstraling wordt gevormd door de afgekoelde lichtdeeltjes uit het verre verleden.

Al is het heelal slechts een ijle waterstofwolk, hier en daar zitten wat opeenhopingen van ander materiaal; toevallig is dat ook op onze planeet, de aarde het geval. Hier komen veel koolstofatomen voor, die het meest veelzijdig zijn in mogelijkheden om scheikundige verbindingen aan te aan. Koolstof en zuurstof staan aan de basis van de complexiteit in onze wereld. In de omstandigheden, die in het verleden en nu nog op aarde heersen, zijn door scheikundige reacties moleculen met een hoge mate van complexiteit ontstaan, moleculen die in onderlinge relaties processen ondergaan die we als leven kennen. Via het proces van natuurlijke selectie is daaruit een wonderlijke veelheid aan organismen geëvolueerd. Bij één soort bleek een groot hersenvolume een evolutionair voordeel te zijn, en heeft de complexiteit van de neurale structuur een zodanig niveau bereikt, dat zich daarbinnen iets afspeelt, dat wij benoemen als bewustzijn; het vermogen om na te denken over zichzelf en het universum.

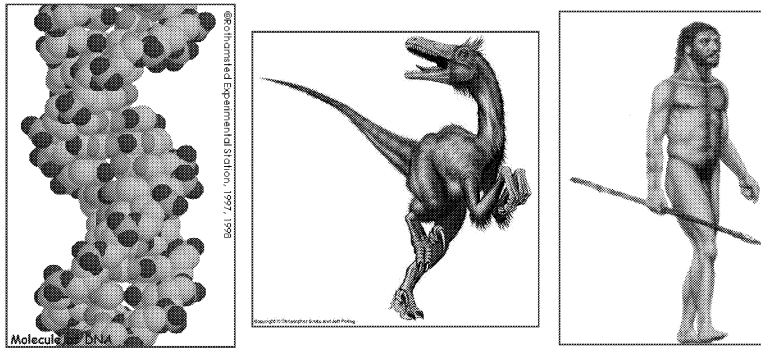


Fig. 4: De ontwikkeling naar complexiteit, mogelijk gemaakt door koolstofchemie in aanwezigheid van zuurstof.

Dat bewustzijn is daarna met zichzelf op de loop gegaan, althans zo interpreteer ik de lange filosofische traditie waarin “Der Geist” los wordt gezien van het materiele neurale netwerk, waarin elke gedachte zijn beslag krijgt. In de ware zin van het woord zijn zij, de idealistische filosofen, van Plato tot Hegel: “fantasten”. Zelfs een van de grootste filosofen uit de geschiedenis, René Descartes, met belangrijke bijdragen in de wiskunde en natuurkunde (hij heeft ons leren denken in coördinaten), en gezien als de eerste moderne filosoof, raakte volledig verstrikt toen hij aannam dat *naast* de materiele werkelijkheid nog een werkelijkheid van het denken (of de geest) bestond. Het probleem zit er dan in hoe die twee universa, het materiele en het ideële, met elkaar moeten wisselwerken.

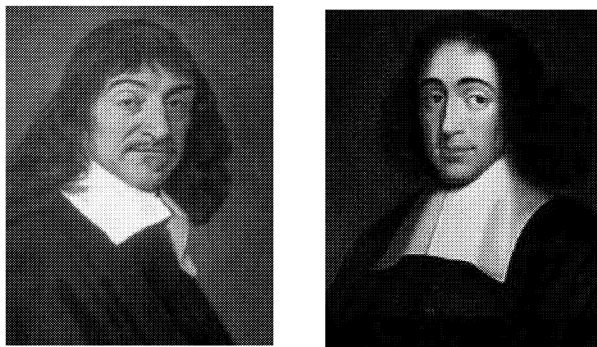


Fig. 5: René Descartes (links) en Baruch de Spinoza (rechts)

Descartes kwam met het zeldzaam merkwaardige voorstel, dat de interactie in de pijnappelklier zou plaatsvinden, een klein onderdeel midden in de hersenen, zo

groot als een erwt. Daar zou de materie aangrijpen op de geest. Dat doet anno 2004 wat lachwekkend aan. De Nederlandse filosoof Baruch de Spinoza, van Portugees-joodse komaf, een allochtoon *avant la lettre*, leerde ons dat het denken en ruimtelijke uitgebreidheid (materie) twee attributen zijn van één en dezelfde werkelijkheid, en dat is het juiste perspectief [1].

Een vraag die eigenlijk interessanter is dan die van de schijn dualiteit van materie en geest, is de vraag of het geschetste evolutionaire proces, waarin complexiteit optreedt met bewustzijn, alleen op onze planeet heeft plaatsgevonden. De vraag naar buitenaardse intelligentie is een vraag met een open einde, een wetenschappelijke vraag dus, en we kunnen de meest geavanceerde technologieën inzetten om ze te beantwoorden. Dat gebeurt op dit moment via de detectie van radiostraling in het SETI-project. Er is nog maar een gering deel van de hemelbol afgetast en ik wacht met spanning af wat deze metingen ons gaan leren.

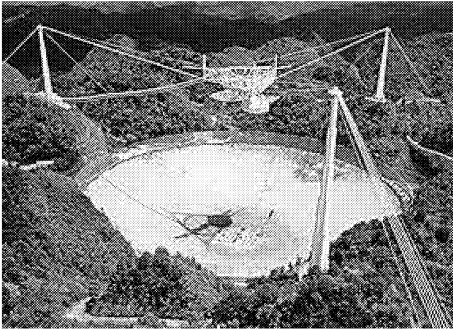


Fig. 6: De Arecibo telescoop in Puerto Rico, die gebruikt wordt in het SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence) project.

Leven is afhankelijk van het bestaan van koolstof en zuurstof en het heeft maar een haar gescheeld of deze elementen waren nooit gevormd, met als gevolg dat leven nooit ontwikkeld zou zijn. Hoe zit dat? In het binnenste van sterren vinden fusiereacties plaats, waarbij aanvankelijk waterstofkernen versmelten tot helium. In de latere stadia van sterren, als er veel helium gevormd is, worden via fusiereacties ook zwaardere kernen gevormd: twee helium-4 deeltjes versmelten tot beryllium-8, dan koolstof-12 en zuurstof-16, enzovoort. Nu is er sprake van een zeer subtiel evenwicht tussen de productie van koolstof-12 en de productie van zuurstof-16, waarbij weer koolstof-12 wordt verbrand. Fred Hoyle, de man die geksterend de term Big Bang, vertaald met oerknal bedacht, doorzag al in de jaren 50 dat er iets bijzonders aan de hand was.

Er kan alleen koolstof en zuurstof van ongeveer gelijke hoeveelheid ontstaan door een subtiel samenspel van de kern kracht en de elektromagnetische kracht. In het plaatje is aangegeven hoe een kleine verandering in de sterkte van de fundamentele krachten een andere verdeling van elementen in ons universum tot gevolg heeft: het voorkomen van leven zoals wij dat kennen hangt dus in belangrijke mate af van de fijne afstemming van de natuurkrachten, ofwel de fundamentele natuurconstanten. We weten niet waarom de kern- en de elektromagnetische kracht zich op een bepaalde manier verhouden; we weten niet waarom de fundamentele natuurconstanten een bepaalde waarde hebben. De moderne natuurkunde heeft zelfs geen idee waar ze een antwoord op die vraag zou moeten zoeken.

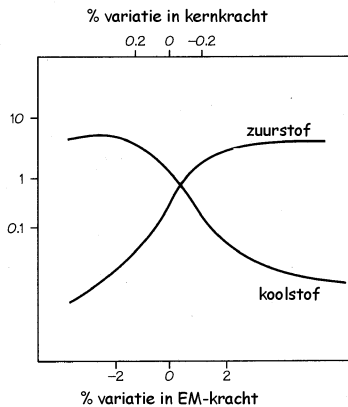


Fig. 7: Het subtiële spel van de natuurkrachten. De berekende verhouding van zuurstof t.o.v. koolstof bij kleine variaties in de kernkracht of de elektromagnetische kracht. Een recente analyse van dit fenomeen is te vinden bij Oberhummer et al. [2].

We zouden de problematiek zo kunnen samenvatten:

- 1) Het is wel heel erg toevallig dat we in een universum wonen waarin de natuurconstanten net zo zijn, dat ze leven toelaten [3].
- 2) Als de natuurconstanten andere waarden zouden hebben zou niemand zich die vraag kunnen stellen

Een verdere vraag die opkomt: zijn die natuurconstanten altijd hetzelfde geweest [4] ? Dat komt nog.

Het heelal kennen we door: *Spectroscopie*, de tak van onderzoek waar ik me mee bezig houd.

Fraunhofer was een van de eerste spectroscopisten. Hij keek naar het spectrum van de zon en zag overduidelijk absorptiebanden of lijnen, zoals in zwart aangegeven; zwart, want bij die golflengtes dringt het licht niet door. Fraunhofer labelde de lijnen, die later naar hem vernoemd zijn met hoofdletters A t/m K, en dan nog eens voor de zwakke lijnen met kleine letters.

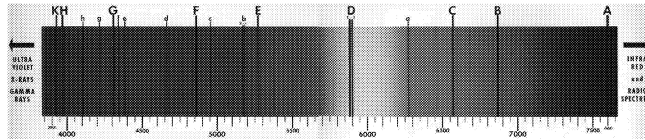


Fig. 8: Joseph von Fraunhofer en het naar hem genoemde zonnenspectrum.

De A-band kennen we nu als de zuurstof-A band bij 760 nm, de B-band is ook zuurstof, waarbij het molecuul een vibratie erbij krijgt, en de kleine “a” kennen we nu als de volgende vibratie in het zuurstofmolecuul. Deze absorpties hangen samen met het zuurstofmolecuul en worden veroorzaakt door het feit dat het licht van de zon eerst door de Aardse atmosfeer moet dringen alvorens de detector van Fraunhofer te bereiken, en zoals U weet bestaat de aardse atmosfeer voor 20% uit zuurstof. De drie absorptiebanden van zuurstof, A, B en kleine a, en nog een vierde, zwakkere, zijn in ons laboratorium bestudeerd, met lasers, en met de hoogste resolutie, en voor alle natuurlijke isotopen. De D-lijn hangt samen met het Natrium atoom en dat is een absorptie die in de zon zelf plaats vindt. Merk op dat deze Natrium D-lijn gesplitst is in twee componenten, en dat hangt samen met magnetische interacties in het inwendige van het atoom; de details ervan vormen een geheide tentamenvraag bij mijn vak “Structuur der Materie” in het tweede jaar. Lijn C is een Balmer-lijn, kom ik zo op. Alle atomen en moleculen hebben zo hun kenmerkende spectrum, als een vingerafdruk die nooit verandert.

Later ging men naar spectra van sterren en andere hemellichamen kijken en tegelijkertijd ook naar de spectra van alle ons bekende elementen op aarde. Zo leerden we via de spectroscopische methode dat ons universum, tot in de verste uithoeken in de meest veraf gelegen sterrenstelsels, bestaat uit dezelfde pakweg 100 elementen, die we ook op aarde kennen. Dat is een belangrijk inzicht in het universum. Lange tijd dachten we dat in de zon een apart deeltje bestond, dat aanleiding gaf tot een gele spectraallijn, en dat we daarom helium noemden: het zonnedeeltje. Later werd helium via het karakteristieke spectrum ook op aarde gevonden en we weten nu dat het in zeer lage concentraties in de aardse atmosfeer voorkomt.

In de 19^e eeuw werden vele atoomspectra gemeten, maar niemand begreep waarom die vingerafdrukken er zo uitzagen, en niet anders. Johann-Jakob Balmer, een brave wiskundeleraar aan het meisjesgymnasium te Basel, zat omstreeks 1885 in de avonduren wat te puzzelen met die lijnen en vond zo voor een aantal lijnen van het atoom waterstof een eerste wetmatigheid.



Fig. 9: Balmer (links) en Rydberg (rechts)

Een aantal jaren later vond Janne Rydberg, in Uppsala, een algemenere formule waarmee hij alle lijnen in het waterstofspectrum kon verklaren, en ook nog onbekende lijnen kon voorspellen, die later ook gemeten zijn. Dat was vooruitgang, maar men begreep nog steeds niet *waarom* die formules zo waren zoals hier opgeschreven. Daarin kwam verandering toen Niels Bohr zijn model formuleerde voor het waterstofatoom, waarbij hij aannam dat een elektron in een stationaire baan om een proton heen beweegt. Als hij verder aannam dat de draaibeweging, ofwel het draai-impulsmoment gequantiseerd is, kon hij simpelweg de Rydbergformule afleiden.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

waarin λ de golflengtes zijn voor overgangen tussen quantum toestanden n en m , en R is de Rydbergconstante. Met deze ad-hoc aanname maakte Bohr een gigantische stap voorwaarts, maar gaf geen volledige verklaring.



Fig. 10: Erwin Schrödinger (links) en Paul Dirac (rechts).

Die kwam pas toen Erwin Schrödinger de vergelijking opstelde, die naar hem is vernoemd, waarmee hij het bouwwerk van de quantummechanica definieerde. Het is voor een leek moeilijk te bevatten wat de reikwijdte is van deze vergelijking. Laat ik het zo formuleren: de gehele atoomfysica, de gehele molecuulfysica, en de gehele scheikunde met alle vormen van chemische binding en reacties wordt beschreven met deze vergelijking. Voor iedere situatie

moet de potentiaal, aangegeven met hoofdletter V (dus de optelsom van alle krachten tussen de deeltjes) uitgeschreven worden.

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}) \right] \Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(\vec{r}, t)$$

En dan moet een oplossing gezocht worden voor de golffunctie, aangeduid met de Griekse letter Ψ . Dat is alles, maar in vele gevallen vreselijk moeilijk, en in de meeste gevallen kennen we slechts benaderende oplossingen. Zo ligt de atoomspectroscopie aan de basis van de quantummechanica, een van de fundamentele theorieën van de natuurkunde. De vergelijking van Dirac is nog wat eleganter en neemt ook de magnetische effecten mee, en voldoet tevens aan de relativiteitstheorie.

De Dirac-vergelijking ziet er perfect uit, en men dacht dat deze perfectie het einde van de atoom- en molecuulfysica markeerde. Maar er is meer: heel kleine afwijkingen werden gevonden in spectroscopische experimenten. Richard Feynman, een van de briljante geesten uit de 20^e eeuw formuleerde een nieuwe theorie: QED ofwel de quantumelektrodynamika.

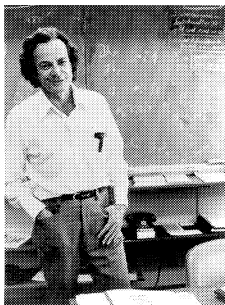


Fig. 11: Richard Feynman, de grondlegger van QED, overigens samen met Julian Schwinger en Sin-Itiro Tomonaga (Nobelprijs 1965).

Ik doe geen moeite hier formules neer te schrijven voor QED; die zouden vele bladzijden beslaan, en dan nog geven ze geen exacte oplossing. QED gaat over twee problematische zaken voor fysici:

1) Vacuüm bestaat niet. QED behandelt hoe deeltjes en hun anti-deeltjes spontaan uit het vacuüm geproduceerd worden. Ze bestaan maar heel kort, want anders wordt de wet van behoud van energie gebroken, en dat kan natuurlijk niet. Maar gedurende die heel korte tijd dat ze bestaan kunnen die spookdeeltjes krachten uitoefenen binnen atomen. Dat is heel moeilijk te berekenen, want steeds plopt er spontaan weer iets uit het vacuüm, en al die deeltjes beïnvloeden elkaar ook nog eens, en alle mogelijkheden moeten worden meegenomen...

2) Het probleem dat een elektron in principe een punt-deeltje is. D.w.z. het elektron heeft geen afmetingen en vormt een punt in de ruimte. Nu wordt de elektrische energie van een elektron gegeven door de Coulomb-formule,

$$E_{Coulomb} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

die schaal met $1/r$. Voor een puntdeeltje geldt: de straal $r=0$ en daarmee wordt de energie van een enkel elektron oneindig groot. Volgens Einstein's formule $E=mc^2$ volgt dan dat ook de massa van het elektron oneindig groot is. Wat we daarmee moeten blijft een mysterie maar Feynman vond een praktische oplossing waarmee we in ieder geval kunnen rekenen.

QED is, vanwege de gekke veronderstellingen en de lange bladzijden vol formules geen esthetische theorie, maar het is wel de meest precies geteste theorie in de natuurkunde. Met enige trots vermeld ik dat onze groep de meest precieze test van QED heeft uitgevoerd in een systeem met 2 elektronen. Met behulp van een speciale laser, een smalbandige extreem ultraviolette laser, hebben we het energieverschil gemeten tussen twee quantumtoestanden in het helium atoom (dat heeft 2 elektronen). Deze meting komt precies overeen met de voorspelling van de theorie. De getallen voor de QED-effecten in Helium, zoals gevonden in het Amsterdamse experiment [5] komen heel precies overeen met de nieuwste berekeningen [6].

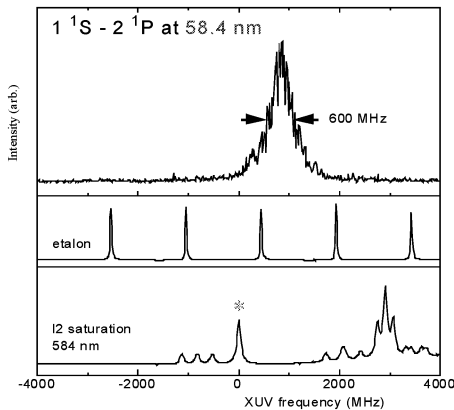


Fig. 12: Spectrum van de helium resonantielijijn bij 58 nm, gemeten met de Amsterdamse XUV-laser [5]. QED-effect uit de meting: 41224 (45) MHz, te vergelijken met een berekening van 41223 (42) MHz [6].

Gedurende mijn voordracht zal ik maar beperkt ingaan op lasers, hoewel al onze experimenten met lasers verricht worden, heel speciale lasers nog wel. Tijdens de rondleiding in het lasercentrum heeft U lasers gezien, rode, gele, groene en blauwe, continue lasers en gepulste lasers, met pulsen die nanoseconden, picoseconden en femtoseconden duren. Voor laserspectroscopische experimenten geldt bij uitstek: met betere lasers doe je betere experimenten, en

de allerbeste lasers kun je niet kopen, die moet je bouwen, en dan gaat het om inventiviteit en vernuft. De laser waarmee we de afgelopen 10 jaar wereldwijde bekendheid hebben verworven is de smalbandige extreem ultraviolette laser, en ik verwacht dat we de komende 10 jaar net zoveel of nog meer bekendheid verwerven met de frequentiekam laser. De XUV laser is een multi-trapsrakiet: eerst een uiterst smalbandige continue kleurstof laser in een ring-geometrie, die werkt in het geel of rood; het licht daarvan wordt in pulsen versterkt in een zogenaamde gepulste kleurstof-versterker, die we PDA noemen in het jargon.

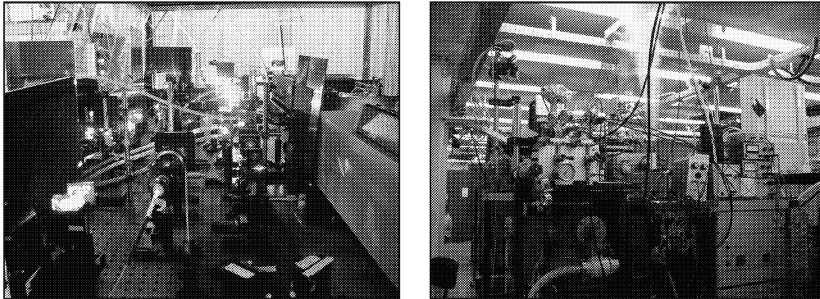


Fig. 13: Foto's van de XUV-laseropstelling; links de kleurstofversterker (PDA) en rechts de vacuüm opstelling waarin de harmonischen worden geproduceerd en toegepast.

De daar geproduceerde zichtbare pulsen van nanoseconde tijdsduur worden in frequentie verdubbeld in een kristal, waarmee ultraviolette laser pulsen worden geproduceerd. Bij frequentieverdubbeling moet U in gedachten houden, dat de golflengte wordt gehalveerd: korte golflengten geven harde straling en energierijke fotonen. Daarna worden van hoogintense laserpulsen in een gas zogenaamde harmonischen geproduceerd. Harmonischen betekent: frequentie verdrievoudiging of zelfs vervijfvoudiging. De paradox is, dat de conversie verloopt in een gas, terwijl het geproduceerde kortgolvlige licht zich niet kan voortplanten door een gas. De truc die wordt toegepast is die van de gepulste gasklep: hele korte gaspulsen worden losgelaten, juist op het moment dat de laserpuls eraan komt: die duurt maar nanoseconden. Dat maakt het mogelijk om toch hoogvacuümcondities in de opstelling te handhaven, terwijl we gas kortstondig laten instromen. Dan ontstaat het zogenaamde XUV licht, dat moeilijk te hanteren is, want het kan nergens doorheen dringen; niet door vensters, en niet door lucht. Het XUV licht wordt van de ene naar de andere vacuümkamer getransporteerd, en dan worden uiteindelijk ook experimenten ermee uitgevoerd. We kunnen zo laser spectroscopie doen bij golflengtes tussen 60 en 100 nm. Dat is ons paradepaardje; we zijn de enigen in de wereld die dat zo kunnen, met onze vrienden in Zürich natuurlijk. Mijn promovendus Fernando

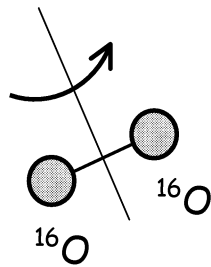
Brandi is deze zomer gepromoveerd op een studie waar hij liet zien smalbandig XUV-licht zelfs bij golflengtes van 40 nm te kunnen maken [7].

De werkelijkheid wordt beschreven met de quantummechanika, en daarin wordt de toestand van een systeem beschreven met een golf functie Ψ . We hebben geen intuïtieve interpretatie voor Ψ , maar volgens de interpretatie van Max Born weten we dat alleen het kwadraat van de absolute waarde van Ψ ,

$$|\Psi|^2$$

iets fysisch voorstelt: dat is de kans dat een systeem op een bepaald tijdstip er zo of zo uitziet. Als een systeem twee identieke deeltjes bevat, dan is de vraag wat er gebeurt als die twee deeltjes met elkaar verwisseld worden. Onder verwisseling van twee identieke deeltjes kan Ψ gelijk blijven, maar het is ook mogelijk dat Ψ overgaat in $-\Psi$ en dat is de basis voor het onderscheid in families. U begrijpt: min maal min is plus, dus de interpretatie volgens Born blijft dezelfde. Uw intuïtie is juist: het universum verandert niet als we twee identieke deeltjes met elkaar verwisselen. De deeltjes die bij verwisseling de golf functie Ψ onveranderd laten, behoren tot de familie van Bose en Einstein, en de deeltjes waarvoor de golf functie verandert van teken behoren tot de familie van Fermi en Dirac. Het is een opgave voor 2^e jaars natuurkundestudenten om te laten zien dat twee Fermi-Dirac deeltjes zich niet in dezelfde quantumtoestand kunnen bevinden. Die afleiding sla ik maar over; het resultaat is bekend als het Pauli-verbod. Een uiterst belangrijk gevolg is dat alle elektronen in een atoom, want elektronen zijn identiek en ze behoren tot de familie van Fermi en Dirac, in een andere quantumtoestand moeten zitten, en dat maakt ze toch een beetje anders. Dat maakt ook dat alle elementen, alle atomen dus, die alle een verschillend aantal elektronen bevatten, zich anders gedragen. Het is de basis van het periodiek systeem van de elementen. Zonder het Pauli-verbod zouden alle atomen zo'n beetje hetzelfde zijn, zou scheikunde echt saai zijn, en zou er geen complexiteit bestaan die tot leven zou kunnen evolueren.

Waarom heb ik het hierover? Welnu, in de natuurkunde is er sprake van fundamentele symmetrieën en het onderscheid van alle deeltjes in de families is misschien wel de meest fundamentele symmetrie van alle. In het verleden is in de natuurkunde gebleken dat sommige fundamentele symmetrieën toch gebroken worden (bijvoorbeeld spiegelsymmetrie en tijdomkeer). Aan de familie-tweedeling wordt nog weinig getwijfeld; maar ze kan in principe getest worden in laser experimenten aan atomen en moleculen. Soms moet je experimenten proberen tegen beter weten in.



Draai-impuls = 0, 2, 4 ... verboden

Draai-impuls = 1, 3, 5 ... toegestaan

Fig. 14: De draaibeweging van een twee-atomig zuurstof molecuul is gequantiseerd. Als het molecuul bestaat uit twee identieke ^{16}O atomen, dan zijn sommige toestanden (met een even aantal quanta van rotatie) verboden, en de bijbehorende lijnen in het spectrum "missen". De lijnposities waar ze eventueel verwacht zouden kunnen worden zijn wel goed bekend.

Een voorbeeld is dat van het zuurstofmolecuul waarin twee identieke zuurstof-16 kernen voorkomen, die met elkaar verwisseld kunnen worden, om dan weer hetzelfde molecuul te vormen. Dat zuurstofmolecuul kan om zijn as tollen, en men kan laten zien (een opgave voor 4^e jaars natuurkunde studenten), dat toestanden met een even aantal quanta van rotatie een anti-symmetrische golf functie hebben onder verwisseling van twee kernen.

Maar wat is nu het geval? Zuurstof-16 kernen behoren tot de familie van de Bose en Einstein, dus die kunnen helemaal geen anti-symmetrische golf functie vormen, dus die toestanden kunnen niet bestaan. Daarom moeten er lijnen missen in het spectrum van zuurstof. Dat inzicht vormt de basis voor een test van de theorie, want het gekke is dat je precies weet waar je moet zoeken. Waar het dus om gaat is of je deeltjes kunt vinden, die tot een familie behoren, maar die misschien wat onzuiver bloed hebben, waarmee de strikte scheiding tussen de twee families wordt opgeheven. Natuurkundigen noemen dat symmetriebreking. We hebben een eerste laser experiment uitgevoerd zoekend naar die verboden lijnen, met een gevoeligheid van een op de enkele miljoenen en niets gevonden, nog niets...[8]. Het gaat nu om het opschroeven van de gevoeligheid, en daarvoor is nog heel wat inventiviteit nodig. Je zou een dergelijk experiment ook kunnen doen in het heliumatoom, waarin twee identieke elektronen voorkomen, die ook een verwisselings-symmetrie kennen. De verboden quantumtoestanden in helium worden aangeduid met paronisch helium en golflengtes van de daarbij behorende spectraallijnen zijn heel nauwkeurig uitgerekend. Het plan om die te gaan zoeken heb ik al een tijdje, maar ben er nog niet aan toegekomen.

Terug naar het universum.

Het waterstof molecuul is het handvat om het universum te bestuderen, want het universum bestaat voornamelijk uit waterstof. Sinds korte tijd is gebleken dat de

zogenaamde Lyman en Werner banden, de sterke spectraallijnen van waterstofmoleculen ook kunnen worden waargenomen in zogenaamde quasars. Quasars zijn objecten in ons universum, waar we niet zo heel veel van weten, maar die wel heel oud zijn, heel ver weg staan, daarom heel snel van ons afbewegen (want het heelal dijt uit zoals U weet) en enorm veel licht uitzenden (anders zouden we ze niet zien). Deze Lyman en Werner lijnen zijn waargenomen in 3 quasars. Dus wat is het geval: het licht van die quasars stuurt ons een 12 miljard jaar oude vingerafdruk van het waterstofmolecuul. Dat is mooi, want dan kunnen we eens precies kijken of die moleculen er nog steeds hetzelfde uitzien.

Om een goede vergelijking te kunnen maken hebben we de Lyman en Werner spectraallijnen (150 stuks) heel precies gemeten, d.w.z. met een ongekeerde nauwkeurigheid van 5×10^{-8} [9]. De spectra zien er eenvoudig uit, maar het werk vergde meer dan twee jaar, en we gebruikten daarvoor alweer onze speciale XUV-laser.

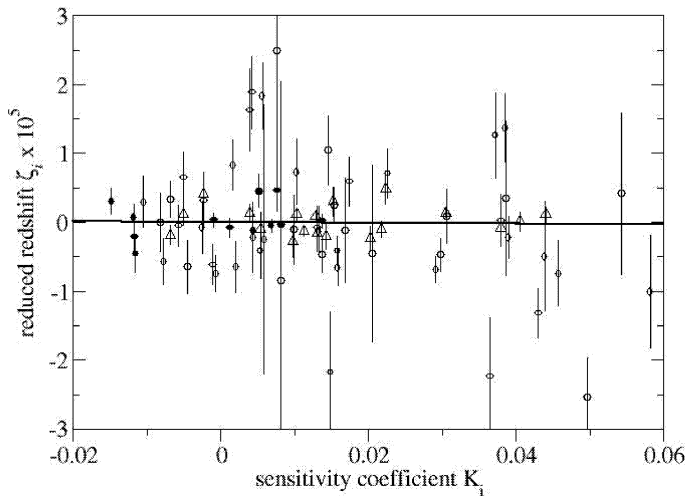


Fig. 15: Vergelijking tussen 81 spectraallijnen van waterstof gemeten in ons laboratorium en in drie quasars (PKS 0528-250, Q 1232+082 en Q 0347-382) resulterend in een bovengrens voor een mogelijke variatie van M_p/m_e van $-0.5 \pm 3.5 \times 10^{-5}$ (bij een 2σ fout).

Met die data kunnen we een vergelijking maken tussen het tegenwoordige spectrum van waterstof en dat van 12 miljard jaar geleden. Voor een vergelijking is het inzicht van belang dat iedere spectraallijn op een speciale manier gevoelig is voor een mogelijke verandering van de massa van het proton; eigenlijk de massaverhouding van het proton en het elektron. Hoe dat zit kun je

precies uitrekenen, en we hadden een slimme bachelors-studente die dat voor ons gedaan heeft. Uit een gedetailleerde en statistische analyse van de gegevens (als weergegeven in deze chaotisch aandoende grafiek) kunnen we iets belangrijks afleiden, namelijk of de verhouding tussen de proton en elektron massa gelijk is gebleven de afgelopen 12 miljard jaar. 12 miljard jaar betekent overigens; bijna vanaf de oerknal, want die was 13,7 miljard jaar geleden volgens de meest recente schattingen. En uit onze analyse blijkt de beste afchatting van een *mogelijke* kosmologische variatie van de fundamentele massaverhouding. Deze fundamentele dimensieloze natuurconstante is niet veranderd, of preciezer gezegd: is minder dan een op honderdduizend veranderd [10].

U zult zich afvragen: Waarom onderzoek je dat en waarom is zo'n nul-resultaat van belang? Bovendien, natuurkundigen zijn de afgelopen 500 jaar, sinds Galileo, bezig geweest het universum te vatten in eeuwige en onveranderlijke wetten van de natuurkunde, en waarom dat bouwwerk nu op losse schroeven zetten? Als de verhouding van de proton over de elektron massa zou veranderen, dan zijn de natuurwetten niet constant! Dat laatste lijkt me nu reden genoeg om eens precies er naar te kijken.

De vraag is ook: waarom heeft de zogenaamde fijnstructuur constante α de gemeten waarde $1/\alpha = 137.0359911$? Waarom is een proton 1836.15267261 keer zo zwaar als een elektron? En waarom is de elektrische aantrekking tussen een elektron en een proton 10^{40} keer sterker dan de aantrekking door de zwaartekracht? Dat is echt een astronomisch getal! Op deze vragen weet niemand het antwoord. Wat we wel weten is: als die getallen anders waren hadden we hier niet gezeten. En dat is weer reden om het naadje van de kous te willen weten.

In de toekomst gaan we werken aan nog preciezere metingen in het laboratorium en wij zijn verheugd dat de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie ons daarvoor een projectsubsidie gegeven heeft. Moleculair waterstof heeft spectraallijnen (in het infrarode golflengtegebied, samenhangend met de vibratiebeweging in het H_2 molecuul) die in potentie tot op 20 cijfers nauwkeurig gemeten zouden kunnen worden. Nauwkeurige studie ervan zou ons op het spoor kunnen brengen van een tijdsafhankelijkheid van de natuurwetten. Een noodzakelijke ingrediënt daarbij nodig, een frekwentiekam-laser is daartoe in ons laboratorium gebouwd door Dr. Kjeld Eikema; een laser die net zo stabiel is als de meest stabiele atoomklok. We zijn daarmee de enige groep in Nederland zijn die daarover de beschikking heeft.

Nogmaals het universum en de spectroscopie. Er is nog één probleem dat ons spectroscopisten fascineert: het mysterie van de Diffuse Interstellaire Banden,

ook wel simpelweg DIBs genoemd. Als we in de richting van een groot aantal sterren kijken, waarvan we weten dat het licht naar ons toe reist door ijle interstellaire wolken, dan nemen ze onderweg een vingerafdruk mee die gerepresenteerd wordt door het rijke spectrum weergegeven in de figuur. Deze mysterieuze lijnen zitten in het gehele zichtbare spectrum tussen 400 en 900 nm.

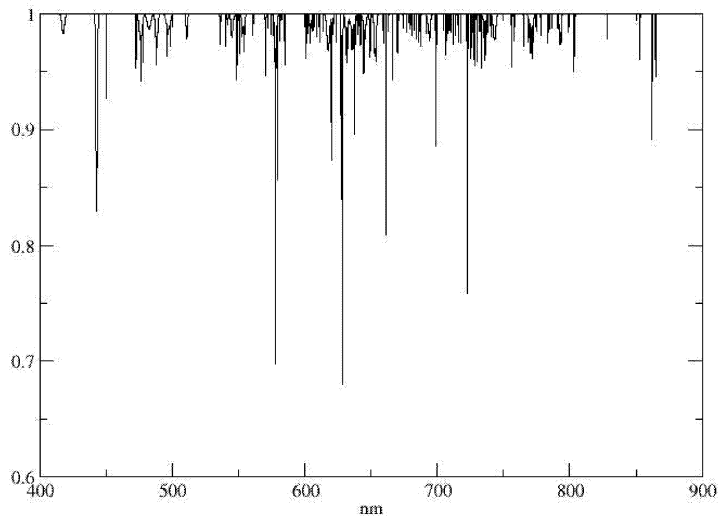


Fig. 16: Het spectrum van de Diffuse Interstellaire Banden. Op dit moment zijn er zo'n 200 spectraallijnen geregistreerd, die als ongeïdentificeerde DIB te boek staan.

Enkele honderden mysterieuze spectraallijnen zijn inmiddels gevonden, de eerste al in 1920, en na 80 jaar weten we nog steeds niet op welke stof in het universum ze duiden: zijn het stofdeeltjes of moleculen in de gasfase? Zijn het koolstofhoudende onverzadigde moleculen, zijn het polycyclische aromaten? Ofwel: uitlaatgassen in de melkweg, zoals een bekende NASA-wetenschapper zei? Zijn de DIBs een teken van leven? We weten het niet. Om deze wetenschappelijke impasse vooruit te helpen gaat het erom in het laboratorium spectra te produceren die niet alleen erop lijken, nee spectra zijn vingerafdrukken die exact moeten passen. Wij hebben bij onze laboratoriummetingen enkele coïncidenties gevonden in het spectrum van moleculair waterstof, waarvan drie hier weergegeven, maar met zwakke DIBs [11]. Daarom wordt onze bewijsvoering nog te dun gevonden, en dat is ook wel zo [12].

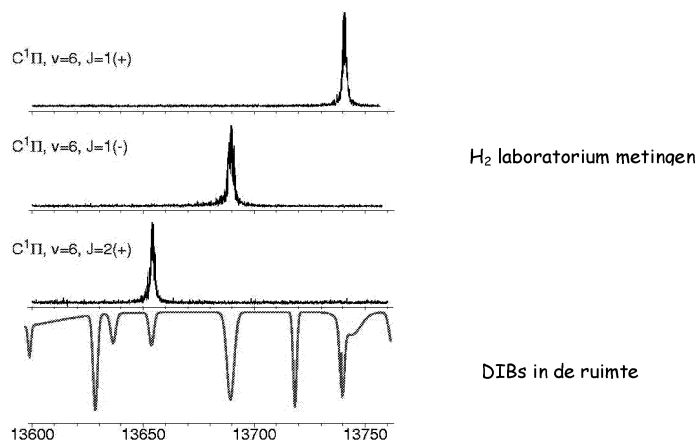


Fig. 17: Drie coincidenties van overgangen tussen Rydberg toestanden van moleculair waterstof. De identifikaties, zoals $C^1\Pi_u, v=6, J=1(+)$, geven de quantumgetallen van het tussenniveau aan, van waaruit de absorptie plaatsvindt.

In de toekomst wil ik samen met collega Linnartz van de groep Fysische Chemie zoeken naar exotische moleculen die tot op heden nog niet geproduceerd zijn. We zullen proberen deze te produceren in een plasma expansie in vacuüm. Ook als ze daarin maar kortstondig leven kunnen we met lasers een absorptiespectrum, of een vingerafdruk, registreren. U begrijpt dat we niet de enigen zijn in de competitie om een antwoord te vinden op deze prangende vraag uit de molecuulfysika en de astrofysika. En als altijd geldt in de natuurkunde: de inventiefste zal het eerst het antwoord vinden.

Ik kan mij voorstellen dat uit het voorgaande het idee kan ontstaan dat we hoogdravend bezig zijn en dat sommigen van U zich de vraag stellen: doen ze daar in het Lasercentrum van de VU ook nog wat nuttigs ?

Dat brengt me bij het toegepast onderzoek. Dan heb ik het niet over het aan elkaar lassen van scheepswanden met lasers. Dat laten we graag over aan de ingenieurs. Wij hebben kennis van licht, lasers en moleculen, en daarmee hopen we een bijdrage leveren aan een van de grote problemen van deze tijd, namelijk dat van de aardse atmosfeer. U weet wel: het broeikaseffect, het ozongat en de veranderingen in het klimaat. Voor ons zijn dan de vragen: wat is de precieze chemische samenstelling van de lucht boven ons, kunnen we veranderingen meten, welke reacties zijn van belang, hoe wordt het zonlicht in de atmosfeer opgenomen of verstrooid ? Kun je onder laboratoriumcondities precies meten wat die moleculen (zuurstof, stikstof, waterdamp) doen met licht ?

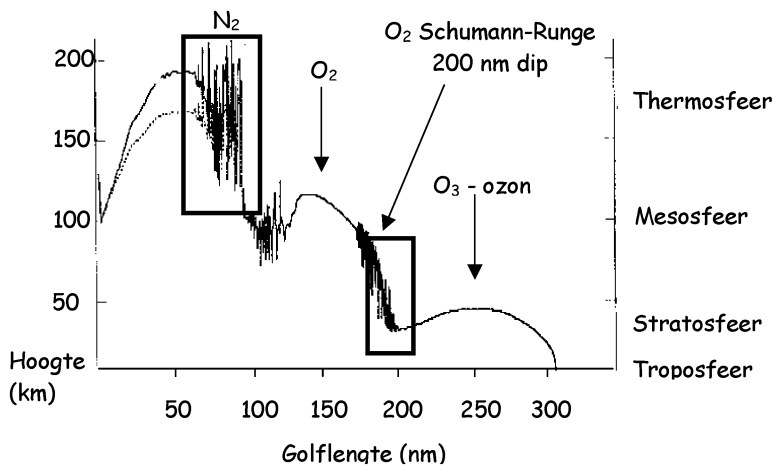


Fig. 18: Indringdiepte van zonlicht in de aardse atmosfeer, en absorptie door de belangrijkste moleculen. De stukken ingekaderd door rechthoeken worden door ons bestudeerd.

Hoe het zonlicht doordringt in de aardse atmosfeer is aangegeven in de figuur, vooral voor de korte golflengtes van het UV en het XUV, gevaarlijk voor ons mensen en alle levende materie. Het gebied tussen 200 en 300 nm wordt tegengehouden door de ozonlaag in de stratosfeer, die enigszins aangetast is, zoals U weet. Op hoogtes boven 100 km wordt de hardere XUV straling tegengehouden door de aanwezige stikstofmoleculen. Hoe dat precies gaat, en vooral hoe de stikstof dan geactiveerd wordt om reacties aan te gaan, wordt in ons lab onder gecontroleerde condities met onze unieke XUV-laser bestudeerd. De interpretatie van het XUV absorptiespectrum van stikstof blijkt fenomenaal ingewikkeld; alle aspecten van ro vibronische koppelingen, Rydberg-valentie interacties, spin-baan wisselwerking en predissociatie doen een duits in de zak. Maar daarmee is het een leuk probleem om de tanden in te zetten. Golflengtes tussen 100 en 200 nm worden in de mesosfeer tegengehouden door O_2 , gewone zuurstofmoleculen. Juist bij 200 nm zit er een dip, daar zijn de zuurstof absorpties zwak en dringt het licht verder door naar beneden tot in de stratosfeer. Deze zwakkere absorpties bij 200 nm zijn dus wel degelijk van belang, en we bestuderen ze op dit moment, en we hebben er zelfs een mooie en unieke laser voor gebouwd, een compacte Titaan-saffier oscillator, die na verviervoudiging, smalbandige straling geeft bij 200 nm, die we toepassen in de metingen.

Om verder atmosferisch onderzoek te doen hebben wij ons gespecialiseerd in een methode om met gepulste lasers en zeer hoog-reflecterende spiegels ultragevoelige metingen te verrichten. De techniek die bekend staat als Cavity-Ring-Down spectroscopie gebruikt spiegels die 99.99% (of meer) van het inkomende licht weerspiegelen. Zo kan het licht als het ware tussen twee spiegels gevangen worden en daar padlengtes van wel 100 km afleggen; over dat gehele pad kan het licht dan geabsorbeerd of verstrooid worden door aanwezige moleculen, waarmee ultragevoeligheid wordt gehaald. Met deze techniek meten we o.a. het botsingsspectrum van zuurstof; als twee zuurstof moleculen met elkaar in botsing komen kunnen ze samen een lichtdeeltje absorberen, de energie verdelen en dan weer uiteen vliegen. Dit merkwaardige fenomeen geeft aanleiding tot een spectrum dat te zien is als een absorptie van zonlicht in de atmosfeer. Precieze meting van deze zuurstof botsingsresonanties, zoals in ons laboratorium [13], is van belang voor een verbeterde interpretatie van de gegevens van aardobservatiesatellieten die voortdurend bezig zijn om concentraties van ozon en andere gassen in de atmosfeer te meten. Vandaar dat de Stichting Ruimte Onderzoek Nederland (SRON) een aantal van onze projecten financiert en we zijn hen daar zeer erkentelijk voor.

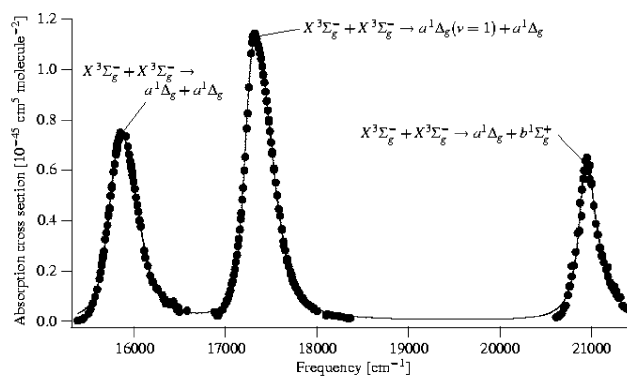


Fig. 19: Het botsingsspectrum van zuurstof.

Na de successen met de Cavity Ring-Down techniek begon ik me af te vragen of deze gevoelige lasertechniek ook toegepast zou kunnen worden om verontreinigingen te meten in vloeistoffen. Samen met de collega's van de afdeling Analytische Chemie, ook werkzaam in het Lasercentrum VU, zijn we dat gaan proberen. Het gaat erom zo laag mogelijke concentratie van een stof te meten in een zo klein mogelijk sample, in zo'n klein mogelijk volume. En bij voorkeur meten aan de uitstroom van een chemisch scheidingsproces, bijv. een vloeistof chromatograaf. We zijn er inmiddels in geslaagd een stofje te meten in een volume van 10 μL bij een concentratie van 1 nanoMol/liter. Dat is pas een

eerste resultaat en niettemin hebben we al een extreme gevoeligheid gerealiseerd; FOM vond ons idee spannend genoeg om het te honoreren met een projectsubsidie, dus we kunnen nu serieus aan de slag. Als U ons resultaat wat abstract vindt, moet U maar het woord doping in Uw achterhoofd houden; daarbij gaat het om gevoelige detectietechnieken in vloeistoffen. Deze spannende nieuwe wending in ons onderzoek geeft aan dat, als inventiviteit voorop staat, het maar een kleine stap is van fundamenteel laseronderzoek naar fascinerende en nuttige toepassingen. Juist het laseronderzoek leent zich daarvoor.

In de jaren dat ik werkzaam ben geweest op de Vrije Universiteit heb ik nauw samengewerkt met Wim Hogervorst, die ik als eerste wil noemen in een woord van dank. Wim, ik ben je erkentelijk voor de vruchtbare, stimulerende en harmonieuze manier waarop we over een reeks van jaren hebben samengewerkt, en voor de mogelijkheid, die je me gegeven hebt mijn interesses in het onderzoek te volgen. Verder is vooral door jouw bezielende inzet het Lasercentrum aan de VU tot bloei gekomen, heeft het een sterke positie in Europa verworven, nu als onderdeel van LASERLAB-Europe. 17 grote Europese lasercentra werken samen met een grote Europese subsidie in het 6^e kaderprogramma. Daar dragen alle groepen binnen het centrum de vruchten van en is ook mijn uitgangspositie goed om weer een frisse start te maken.

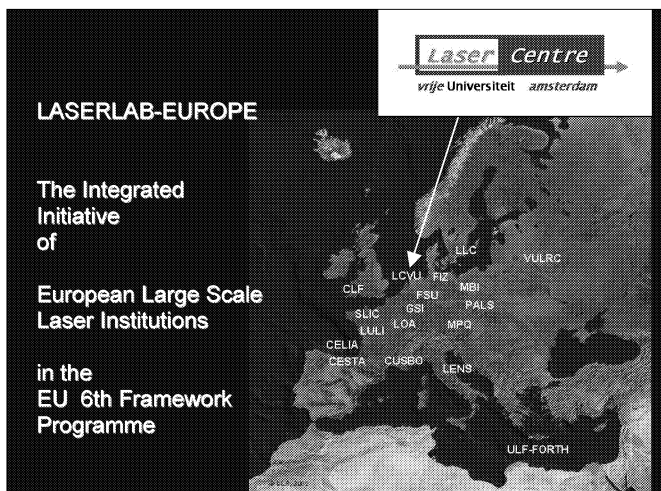


Fig. 20: LASERLAB-Europe: 17 samenwerkende laser centra in Europa

Het bestaan van het lasercentrum is een belangrijke troef voor het natuurkundig en scheikundig onderzoek aan de VU. Daarbij geldt, dat het geheel meer is dan de som der delen. Ik zal me in de toekomst als directeur en anderszins blijven inzetten voor een bloeiend centrum, dat in Europa en de wereld steeds meer uitstraling krijgt. Ik verheug me ook op de wetenschappelijke samenwerking binnen ons centrum, die steeds meer gestalte krijgt.

Mijn werk aan de VU leunt op de noeste arbeid en het intellect van de studenten en promovendi waar ik mee gewerkt heb, en waar ik nu mee werk. Dat is een lange lijst, te lang om op te noemen; ze is weergegeven in de Appendix. Het laboratoriumwerk van de afgelopen 15 jaar leunt op het vernuft en de inventiviteit van onze technicus Jacques Bouma. Jacques bedankt, voor de prettige samenwerking; ik hoop dat je nooit met pensioen gaat. Voor wat de toekomst betreft; in de groep Atoom, Molecuul en Laserfysika zal ik samenwerken met de docenten Wim Vassen en Kjeld Eikema. We hebben het nieuwe thema precisie metingen en metrologie gedefinieerd als ons gezamenlijke onderzoeksterrein, en ik zie uit naar een spannende tijd waarin we mooie resultaten gaan behalen. Evenzeer zie ik uit naar een vruchtbare samenwerking met Ilse Aben en Ton van Leeuwen, verbonden als bijzonder hoogleraar aan onze groep.

Ik beschouw mezelf als vrucht van de Nijmeegse School in de molecuulspectroscopie. Deze school, begin jaren 60 gefundeerd door Professor Tony Dymanus, mijn promotor, heeft naam gemaakt in de wereld, heeft een reeks van wetenschappers opgeleverd, die het vak nu elders bedrijven, waarvan een aantal ook in het Lasercentrum VU. Op een dag als deze wil ik mijn dank uitspreken aan hem, en ook aan Professor Hans ter Meulen, die mij indertijd in Nijmegen het vak van de laserspectroscopie geleerd heeft. Ik hoop mij in mijn toekomstige werk een waardig representant van de Nijmeegse school te tonen. Met enige nostalgie denk ik terug aan de stimulerende Nijmeegse tijd, waarin ik een kamer deelde met mijn maten van het eerste uur, Niek van Hulst en Gerard Meijer, die nu beide researchgroepen leiden in Twente en Berlijn.

Het mooie van het vak natuurkunde is gelegen in de experimenten die we mogen doen, met dankzegging aan U, de belastingbetaler. Maar je komt ook nog eens ergens, en je houdt er wetenschappelijk vruchtbare en meestal vriendschappelijke contacten aan over. Ik heb ze weergegeven in de Appendix. Speciaal wil ik echter noemen mijn vrienden uit de wetenschap: Patrice Cacciani in Lille en Frederic Merkt in Zürich.

Tot slot bedank ik mijn ouders, die mij de kans hebben gegeven om te gaan studeren en daarbij de keuzes te maken die ik wilde maken.

Lieve Ghislaine, je wil liever niet dat ik je noem; mag ik je toch vanaf deze plaats bedanken voor de steun die je geeft, vooral ook in de periodes dat het wat tegenzit.

Jef, er valt nog veel te ontdekken aan de moleculen en de sterren, we zijn nog lang niet klaar. We laten nog wat voor je over, want ontdekken, dat is het allerleukste...

Ik heb gezegd

Referenties

- [1] Spinoza, *Ethica Ordine Geometrico demonstrata*, Vertaling in het Nederlands: H. Krop, Amsterdam, Uitg. Prometheus /Bert Bakker 2002
- [2] H. Oberhummer, A. Csótó, H. Schlattl, *Stellar production rates of carbon and its abundance in the universe*, Science 289, 88 (2000).
- [3] C.J. Hogan, *Why the universe is just so ?*, Rev. Mod. Phys. 72, 1149 (2000).
- [4] J.-P. Uzan, *The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status*, Rev. Mod. Phys. 75, 403 (2003).
- [5] K.S.E. Eikema, W. Ubachs, W. Vassen, W. Hogervorst, *Lamb shift measurements in the 1^1S ground state of helium*, Phys. Rev. A 55, 1866 (1997).
- [6] V. Korobow, A. Yelkovsky, *Ionization potential of the helium atom*, Phys. Rev. Lett. 87, 193003 (2001).
- [7] F. Brandi, D. Neshev, W. Ubachs, *High-order harmonic generation yielding tunable extreme-ultraviolet radiation of high spectral purity*, Phys. Rev. Lett. 91, 163901 (2003).
- [8] H. Naus, A. de Lange, W. Ubachs, $b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^- (0,0)$ band of oxygen isotopomers in relation to tests of the symmetrization postulate in $^{16}\text{O}_2$, Phys. Rev. A 56, 4755 (1997).
- [9] J. Philip, J.P. Sprengers, Th. Pielage, C.A. de Lange, W. Ubachs, E. Reinhold, *Highly accurate transition frequencies in the H_2 Lyman and Werner absorption bands*, Can. J. Chem. 82, 713 (2004).
- [10] W. Ubachs, E. Reinhold, *Highly accurate H_2 Lyman and Werner band laboratory measurements and an improved constraint on a cosmological variation of the proton-electron mass ratio*, Phys. Rev. Lett. 92, 101302 (2004).
- [11] W. Ubachs, P.C. Hinnen, E. Reinhold, *Observation of inter-Rydberg transitions in H_2 coinciding with Diffuse Interstellar Bands*, Astrophysical Journal Lett. 476, L93 (1997).
- [12] P.P. Sorokin, J.H. Glowina, W. Ubachs, *Current status of the interstellar bands theory*, Faraday Discussion 109, 137 (1998).
- [13] M. Snee, W. Ubachs, *Cavity Ring-Down measurement of the $\text{O}_2\text{-O}_2$ collision-induced absorption resonance at 477 nm at sub-atmospheric pressures*, J. Quant. Spectr. Rad. Transfer 78, 171 (2003).

Appendix

Met dank aan de promovendi, waar ik in het verleden mee gewerkt heb, of nu nog werk; het was/is een groot genoegen met jullie te werken:

Robert de Graaf, Robert van Leeuwen, Ilse Aben, Pieterneel Levelt, Kjeld Eikema, Paul Hinnen, Elmar Reinhold, Hans Naus, Iavor Velchev, Rüdiger Lang, Arno de Lange, Fernando Brandi, Maarten Sneep, Arjan Sprengers, Sandro Hannemann, Dmitriy Ityaksov, Lineke van der Sneppen, en Edcel Salumbides.

En met dank aan de PostDocs, Marie Curie fellows en andere jonge wetenschappers, waarmee ik wetenschappelijke publikaties heb geschreven:

Urs Hollenstein, Stefan Schiemann, Dragomir Neshev, Wojchek Majewski, ShuCheng Xu, Ewa Witkowitz, Josselin Philip, GuoRong Wu, Achilleas Maurellis, Rianne Teule, Roelant van Dierendonck, Mamdouh Abutaleb, Claire Lyngå, Allan Johansson, Gregory Bazalgette, Martynas Barkauskas, Angela Pirri, Blagovest Bahnev, Gregory Greetham, Robert Seiler, en Lynn Tashiro.

Met dank aan de medewerkers van onze groep en het Lasercentrum VU voor de samenwerking: Wim Hogervorst, Jacques Bouma, Wim Vassen, Eric-Jan van Duijn, Joop Mes, Steven Stolte, Maurice Janssen, Harold Linnartz, Cees de Lange, Freek Ariese, Cees Gooijer, Gert van der Zwan, en Ivo van Stokkum.

Met dank aan de (ex)-Nijmegenaren: Tony Dymanus, Hans ter Meulen, Gerard Meijer, Niek van Hulst, Leo Meerts, Lex van Deursen, Ton de Vroomen[†], Dave Parker, en Wim van der Zande.

Many thanks to my international colleagues for the fruitful collaborations:

Richard Zare (Stanford), Frederic Merkt (Zürich), Patrice Cacciani (Lille), Klaus Huber (Ottawa), Lou Nanquan (Dalian), Brenton Lewis and Ken Baldwin (Canberra), Peter Sorokin and James Glownia (New York), Anne L'Huillier and Claes-Goran Wahlström (Lund), Lydia Tchang (Paris), Francesco Giammanco (Pisa), Horst Knöckel (Hannover), Jonathan Tennyson (London), Mireille Aymar (Paris), Christian Jungen (Paris), Lutoslaw Wolniewicz (Torun), and Pierre Camus (Paris).



VU Boekhandel/Uitgeverij Amsterdam
ISBN 90 - 5383 - 943 - 7