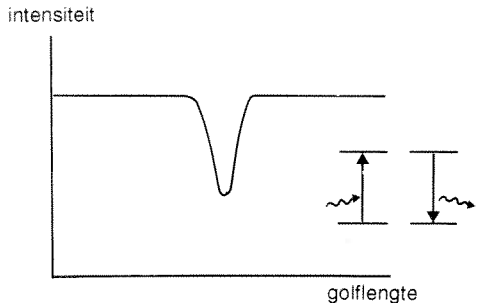
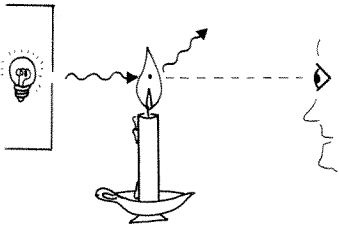
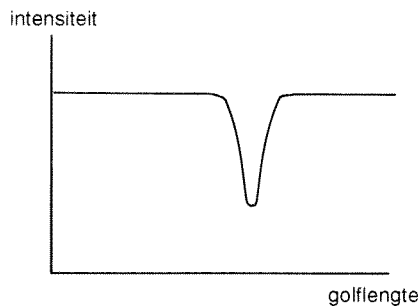
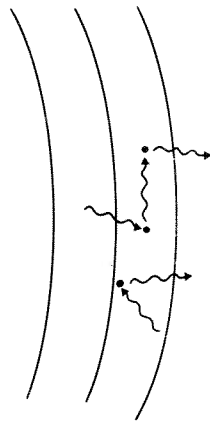


◀ **Schoolproef met natrium in vlam.** Je ziet heldere natriumlijnen omdat botsingsaanslag wordt gevolgd door stralingsdeëxcitatie. Zo wordt per fotoncreatie thermische bewegingsenergie omgezet in stralingsenergie. De sprong van het valentie-elektron van natrium tussen de rusttoestand en de aangeslagen toestand levert een extra mogelijkheid tot zulke omzetting. De natriumlijn is daarom in emissie boven het continuüm dat de vlam uitstraalt. De lijn wordt een beetje verbreed doordat de natriumatomen in allerlei richtingen door elkaar bewegen (Dopplereffect).



◀ **Schoolproef met een achtergrondbron.** Nu overheerst verstrooiing: stralingsaanslag wordt meestal gevolgd door stralingsdeëxcitatie. De ingevangen fotonen komen weer vrij, maar worden in willekeurige richtingen gestuurd. Er blijven er minder over in de richting naar de spectroscop. De natriumlijnen zijn daarom in absorptie.



◀ **De zon als verstrooiende natriumvlam.** In tegenstelling tot een laboratoriumvlam is de zon ondoorzichtig ('optisch dik'). Zijdelings verstrooide fotonen gaan daarom niet direct verloren. Ook kunnen fotonen uit andere richtingen naar de waarnemer toe worden verstrooid. Er is geen directe analogie met de beide schoolproeven. De meeste spectraallijnen van de zon zijn in absorptie omdat de temperatuur in de fotosfeer naar buiten toe afneemt.

Spectraallijnen: informatie op atomaire schaal

Als we de zonnestraling voldoende fijn in golflengte ontleden, blijkt het spectrum ervan te bestaan uit een *continuüm* dat de globale energieverdeling volgt van een zwart-gekleurd voorwerp met een temperatuur van ongeveer 5800 kelvin, en daarin talloze *spectraallijnen*. Alleen al het zichtbare deel van het zonnespectrum bevat meer dan 20.000 spectraallijnen. Elke lijn correspondeert precies met één van de discrete energiesprongen die de valentie-elektronen van de atomen in het zonnegas kunnen maken.

De spectraallijnen in het zonnespectrum zijn donkere *absorptielijnen*. Waarom? De sprong van een valentie-elektron naar een hogere baan ('aanslag' of 'excitatie') onder absorptie van een foton van de juiste golflengte biedt een extra mogelijkheid tot absorptie in vergelijking met het naastliggende continuüm. Door de extra absorptie is het gas ondoorzichtiger op de golflengte van de spectraallijn dan in het continuüm ernaast. Daardoor kijken we op die golflengte minder diep de zon in: *op de golflengte van een spectraallijn is de kijkdiepte geringer dan in het continuüm*. In de fotosfeer neemt de temperatuur van het gas naar buiten af. De straling die we waarnemen komt daarom op de lijngolflengte uit een koelere laag en heeft een *kleiner* lagere intensiteit.

De lijnen in het zonnespectrum zijn dus donker omdat de temperatuur in de fotosfeer naar buiten afneemt. In de chromosfeer neemt de temperatuur weer naar buiten toe; spectraallijnen die daar ontstaan (dat is het geval voor ultraviolette straling met golflengten groter dan 160 nm en ver-infrarode straling met golflengten groter dan 160 μm) zijn in emissie ten opzichte van het naastliggende continuüm.

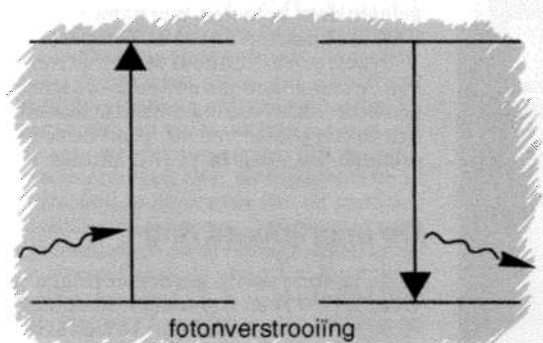
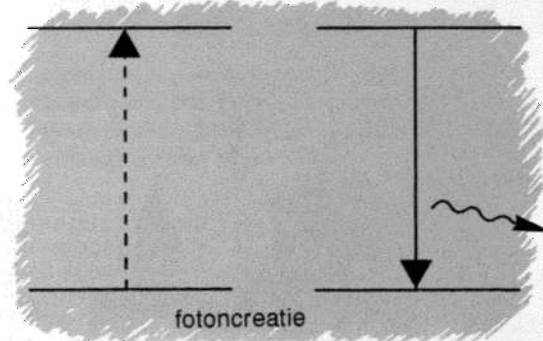
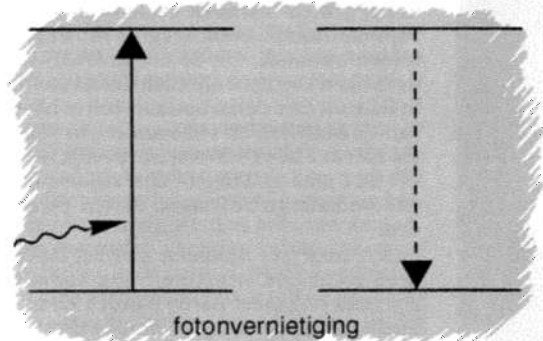
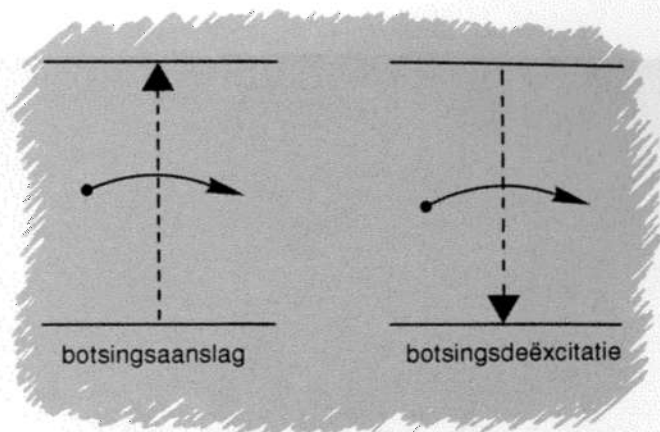
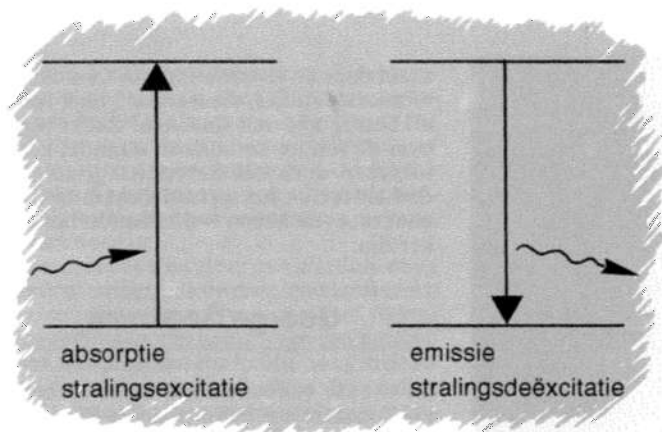
De vorming van de spectraallijnen in het zonnespectrum verschilt van die in laboratoriumproeven zoals u zich die wellicht van het natuurkundepracticum op school herinnert. In een bekend proefje wordt natrium (als keukenzout) in een vlam gestrooid; het spectrum daarvan bevat dan de heldere gele natriumlijn die we ook kennen van de gele verlichting langs de snelwegen (eigenlijk zijn het twee lijnen, vlak naast elkaar). In de vlam is de lijn in emissie. Hoe komt

dat? Daartoe moeten we ons verdiepen in de precieze atomaire processen die zich in de vlam afspelen. Het valentie-elektron kan op twee manieren worden aangeslagen, niet alleen door absorptie van een foton van de juiste energie (volgens $E = hf = hc/\lambda$, met E de aanslagenergie, h de constante van Planck, f de frekwentie, c de lichtsnelheid en λ de golflengte), maar ook in een botsing waarbij de benodigde aanslagenergie E wordt ontleend aan de kinetische energie van het onderhavige natriumatoom en een passerend ander deeltje.

In de vlam is de temperatuur voldoende hoog dat zulke bewegingsenergie rijkelijk voorhanden is. De zo per *botsingsaanslag* geëxciteerde natriumatomen vallen na verloop van tijd (van de orde van een miljardste seconde) terug, onder uitzending van een foton met de golflengte van de gele natriumlijn. Op deze wijze is een foton *gecreëerd* uit de thermische energie waarmee de deeltjes in de vlam bewegen. Het is een extra foton, gesuperponeerd op het zwakke continuüm van de vlam. Tezamen leveren de zo gecreëerde extra fotonen de heldere emissielijn.

In de natriumlampen langs de wegen wordt de aanslagenergie ook ontleend aan botsingen, echter niet middels thermische bewegingsenergie maar met deeltjesversnelling geleverd door een elektrisch potentiaalverschil. Zulke straling is *niet-thermisch*.

In een volgend practicumproefje straalt men de vlam aan met een helder achtergrondcontinuüm. Als men dan met een spectroscop door de vlam heen naar de achtergrondbron kijkt, verschijnt de natriumlijn als donkere absorptielijn in dat continuüm. Hoe zit dat? De aanslag van de valentie-elektronen naar de hogere baan in de natriumatomen wordt nu veel vaker geleverd door invanging van een passend foton uit de achtergrondbron dan door een botsing; nu zijn zulke fotonen immers volop voorhanden. Na een miljardste seconde valt zo'n aangeslagen elektron weer terug, waarbij net zo'n foton wordt uitgezonden als bij de aanslag werd ingevangen. Er is dus niets gebeurd, behalve dat doorgaans richtingsverandering optreedt om-



Aanslag en deëxcitatie van atomen, schematisch. Een elektron in een atoom kan op en neer springen tussen twee energietoestanden. Elke spectraallijn correspondeert met een specifieke sprong van een specifiek elektron in een specifieke ionisatietrap van een specifiek element (of molecuul, of atoomkern). Voor de gele natriumlijn is dat de sprong tussen de rusttoestand en de eerste aangeslagen toestand van een neutraal natriumatoom (NaI). Aanslag omhoog kan onder absorptie van een foton met de juiste golflengte, of door opname van bewegingsenergie in een botsing. Deëxcitatie omlaag gaat evenzo of door uitzending van zo'n foton of door afgifte van kinetische energie in een botsing. (Bovenste vier).

Combinaties van stralingsprocessen. Stralingsaanslag gevolgd door botsingsdeëxcitatie levert fotonvernietiging. De omgekeerde combinatie (botsingsaanslag gevolgd door stralingsdeëxcitatie) levert fotoncreatie. Verstrooiing is stralingsaanslag gevolgd door stralingsdeëxcitatie. (Onderste drie).

dat de her-uitzending van de fotonen gelijkelijk over alle richtingen is verdeeld. Dit proces heet *verstrooiing*. In de richting van de spectroscop zijn er minder fotonen overgebleven dan wanneer er geen vlam met verstrooiende natriumatomen in de bundel had gezeten. Op de golflengte van de natriumlijn zie je daarom minder fotonen dan in het continuüm aan weerszijden. De verstrooiing levert een absorptielijn.

Hoe zit het nu met de zon? In veel schoolboeken wordt de tweede proef aangehaald als verklaring dat de zon absorptielijnen toont, maar dat is voor de meeste zonnelijnen onjuist. In tegenstelling tot de laboratoriumvlam is de zon niet 'optisch dun' maar 'optisch dik'. De zon is ondoorzichtig; fotonen komen er niet doorheen. De zijdelings weggestrooide fotonen waren in het geval van de vlam definitief uit de bundel naar de spectroscop verloren, maar in de zon worden ze hoogstwaarschijnlijk weer opnieuw ingevangen. Ook kunnen fotonen uit allerlei andere richtingen juist de richting naar de waarnemer in worden verstrooid. Het is dus niet op voorhand duidelijk hoe verstrooiing uitpakt in de uiteindelijke som over alle processen.

Bovendien zijn de temperatuur en de deeltjesdichtheid in de zon voldoende hoog dat er ook veel fotoncreatie optreedt, zoals in de eerste proef hierboven. Omdat de fotonen de zon niet direct verlaten is ook het omgekeerde proces, fotonvernietiging, belangrijk. Daarin wordt na aanslag door fotonvangst de aanslagenergie omgezet in kinetische energie, middels deëxcitatie in een botsing.

Fotoncreatie en fotonvernietiging tezamen koppelen de straling in de zon, ook op de lijngolflengte, aan de lokale temperatuur. De temperatuur is immers een maat voor de snelheden waarmee de deeltjes bewegen, dus voor de beschikbare kinetische energie. Daarmee wordt de straling van de zon in eerste instantie beschreven door de lokale temperatuur. De reden dat de zon absorptielijnen toont is dat de temperatuurafval naar buiten wordt bemonsterd door de geringere kijkdiepte op de lijngolflengte. Als de temperatuur naar buiten toeneemt krijg je emissielijnen, zoals hierboven vermeld. Als de temperatuur niet met de hoogte in de zonsatmosfeer zou veranderen zouden er helemaal geen spectraallijnen zijn.

De situatie in de zon is dus heel anders dan in de laboratoriumproef. Alleen voor de allersterkste resonantielijnen in het zonnenspectrum gaat de tweede proef gedeeltelijk op als analogon. De verblijftijd in de aangeslagen toestand is voor zulke overgangen zo kort is dat er relatief weinig kans is op fotonvernietiging door botsingsdeëxcitatie. De aangeslagen atomen krijgen de tijd niet om een botsing te ondergaan. In dat geval overheerst verstrooiing.

Buiten de zonsrand, zoals waargenomen tijdens een zonsverduistering, gaat de eerste proef beter op als analogon. Kijkend langs de zon is er geen achtergrondbron, en langs de gezichtslinje is de zon dan optisch dun in plaats van optisch dik. Boven de zonsrand worden alle spectraallijnen daarom emissielijnen, net zoals in de eerste proef. De precieze overgang van absorptielijn naar emissielijn hangt af van de precieze aard van de verstrooiingsprocessen binnen de spectraallijn. Meting van de omslag tijdens een zonsverduistering levert daarom een gevoelige maat voor deze processen.

Voor de emissiepiek van de MgI 12μm lijn gaat geen van beide processen op als analogon. Die emissie is het gevolg van processen die meer lijken op wat zich in een laser afspeelt. In een laser treedt *populatie-inversie* op, wat wil zeggen dat er meer atomen in de hogere energie-toestand zitten dan in de lagere. Dat is bij de magnesium-lijn in de zon nog niet het geval, maar er is wel een voldoende grote overmaat aan extra atomen in de hogere toestand voor emissie boven de continue achtergrondintensiteit.

Meer in het algemeen bevatten spectraallijnen een schat aan informatie. Ze vertellen ons welke atomen in het zonnegas aanwezig zijn, hoeveel van elk element, wat de ionisatiegraad is, en wat de lokale aanslag- en ionisatiecondities zijn. Uit de laatste volgen de temperatuur en de druk van het gas ter plaatse. Met het Dopplereffect en het Zeemaneffect leveren spectraallijnen daarnaast gevoelige snelheidsmeters en magnetometers. *Spectraallijnen coderen de fysische omstandigheden ter plekke op atomaire schaal.* Bovendien is deze codering onafhankelijk van de afstand waar het licht over reist. Spectrale analyse gaat even goed voor de zon als voor een quasar aan de andere kant van het heelal – mits we een voldoende grote telescoop benutten om het spectrum ervan uiteen te rafelen.