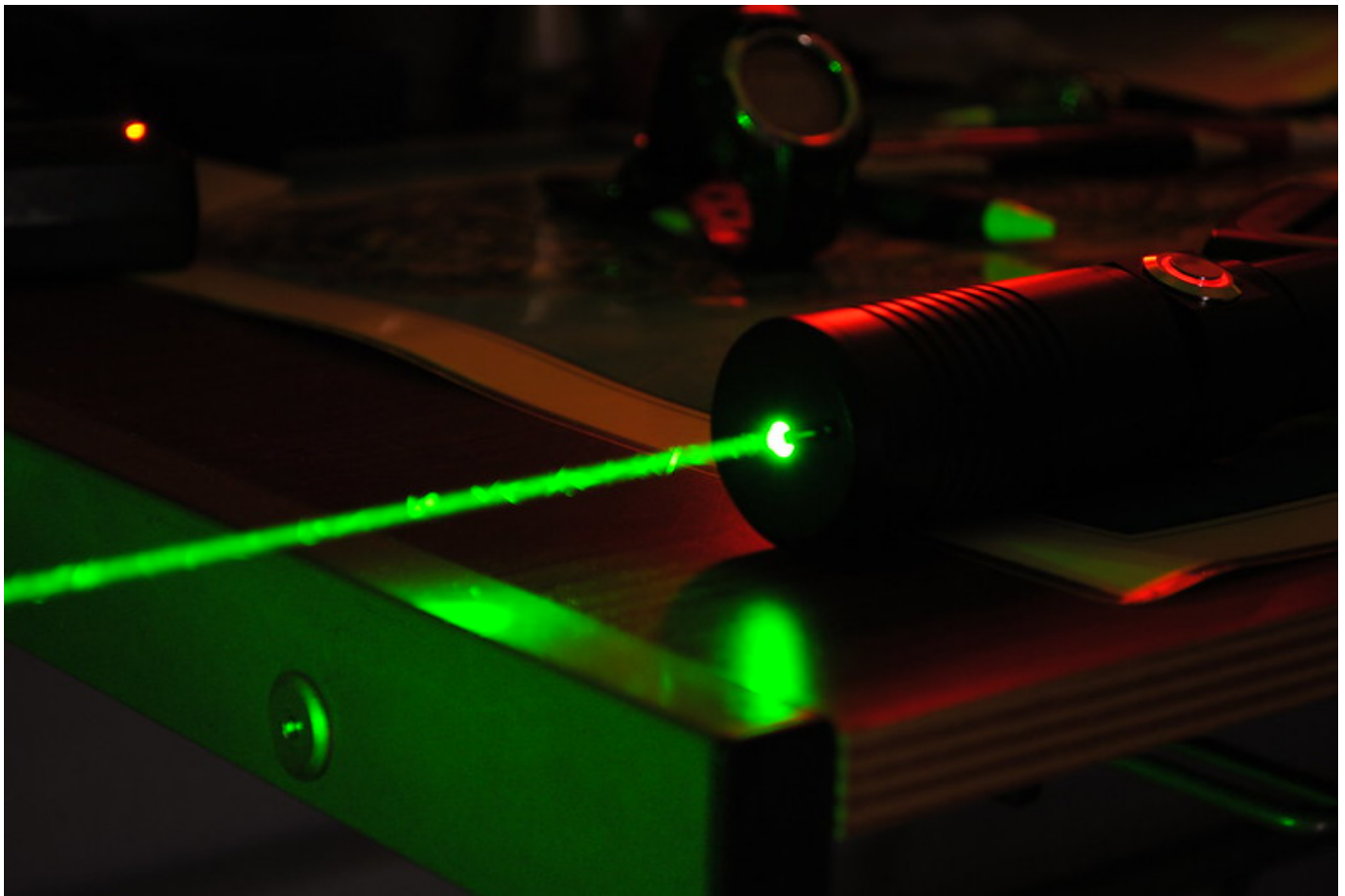


Lasers

Welke uitvinding uit de 20^e eeuw de grootste impact maakt in ons dagelijks leven is moeilijk te achterhalen. Lasers behoren in elk geval tot de belangrijkste mechanismes die we tegenwoordig kunnen gebruiken in ons dagelijks leven. Maar hoewel deze apparaten zo veel voorkomen, is het niet voor iedereen even duidelijk hoe ze werken. Dit artikel beschrijft de basisprincipes van lasers.



Afbeelding 1. Een laser. Afbeelding: [Andrew Adams](#).

Voordat ik in de theorie en de praktijk van de laser duik, wil ik kort verklaren waarom lasers zo belangrijk zijn, en beschrijven wat de geschiedenis van deze apparaten is. Laat ik eerst een lijstje geven van toepassingen van lasers. Je vindt ze bijvoorbeeld in:

- Barcodescanners,
- Optische communicatie via glasvezel,
- Spectroscopie – het achterhalen van materiaaleigenschappen en samenstellingen met behulp van licht,
- Printers,
- Positie- en bewegingsbepalingen,
- Fabricatie van microchips.

Vooraf de fabricatie van microchips is een goede indicator van het moderne belang van deze technologie. De bovenstaande toepassingen zijn allemaal mogelijk doordat laserlicht een aantal bruikbare eigenschappen heeft. Nog maar een lijstje: de belangrijkste eigenschappen van laserlicht zijn

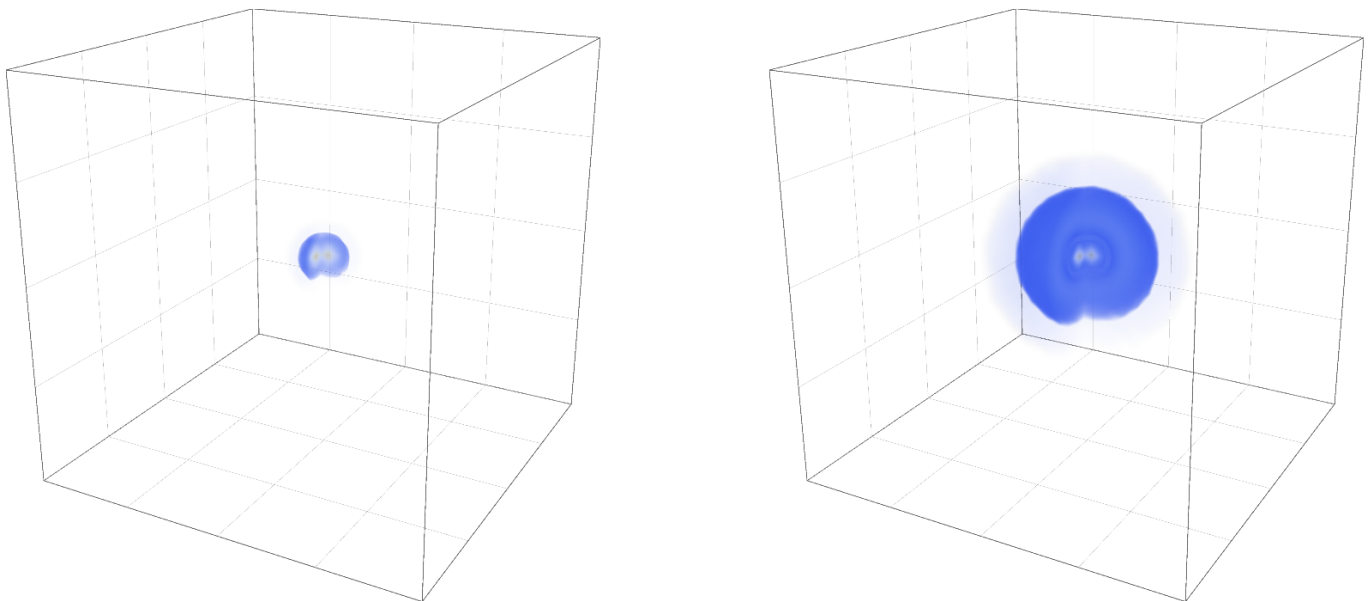
- De fotonen die de laser-lichtbundel opmaken hebben allemaal precies dezelfde energie – oftewel: dezelfde frequentie en golflengte.
- De lichtbundel blijft heel consistent over tijd en ruimte: als de lichtbundel een paar seconden (of zelfs veel langer) in een bepaalde richting beweegt, zal die na deze afgelegde afstand en tijd nog steeds precies dezelfde eigenschappen hebben – dezelfde frequentie, intensiteit, enzovoort – als waar de bundel begon.
- De lichtbundel zal heel geconcentreerd blijven: laserlicht dat begint in een bundel, blijft heel lang in een ongeveer even grote bundel.
- Lasers zijn heel goed te ‘tunen’ op deze eigenschappen: we kunnen heel precies apparaten bouwen die licht produceren dat we nodig hebben.
- Lasers kunnen heel kleine bundels produceren, met zeer veel energie in de bundel en dus een hoge intensiteit van licht.

Vrijwel al deze eigenschappen zijn lastig voor elkaar te krijgen met conventionele lichtbronnen. Zoals veel moderne natuurkunde, vindt ook de fysica van de laser zijn oorsprong bij Albert Einstein. In 1917 publiceerde Einstein een artikel over gestimuleerde emissie van licht, een fenomeen dat ten grondslag ligt aan de laser, en waarvan de naam zelfs terug te vinden is in de naam van het apparaat: “LASER” is namelijk niets anders dan een afkorting voor **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. In het Nederlands: versterking van licht door gestimuleerde emissie van straling.

De naam 'LASER' verklaapt technisch gezien al precies wat een laser doet, maar het vereist wat inspanning om elke term in de afkorting te begrijpen, en in te zien hoe de verschillende fenomenen samenwerken. Laten we beginnen met de 'E en de R', de emissie (**E**mission) en de straling (**R**adiation). Daarna beschrijf ik wat de 'amplification' (versterking) betekent, en hoe dit kan resulteren in laserlicht.

Emissie en straling

Licht dat in de buurt van een atoom komt, kan worden geabsorbeerd. Deze absorptie kan worden verklaard met behulp van de quantummechanische beschrijving van atomen. Atomen hebben namelijk discrete energieniveau's - alleen heel bepaalde waarden van de energie zijn mogelijk - en de absorptie van een foton betekent dat het atoom van een laag-energetische toestand naar een toestand met hogere energie wordt gebracht. Neem als voorbeeld het waterstofatoom. De laagste-energietoestand die dit atoom kan hebben (ook wel 'grondtoestand' genoemd) en een hoger-energetische toestand (ook wel 'aangeslagen toestand') zijn weergegeven in afbeelding 2.



Afbeelding 2. Twee energietoestanden van waterstof. De linker afbeelding is een voorbeeld van waar het elektron van waterstof zich zou kunnen bevinden als het in de grondtoestand zit. Als het waterstof in een aangeslagen toestand is, kan het elektron zich bevinden op de plekken zoals te zien zijn in de rechter afbeelding.

De energie van het atoom wordt bepaald door de toestand van het elektron in het atoom. Het elektron van het waterstofatoom kan zich in beide toestanden bevinden, maar het kan niet

zomaar van de grondtoestand naar de aangeslagen toestand toe. Daarvoor heeft het extra energie nodig. Deze energie kunnen we toedienen in de vorm van licht. Het quantummechanische deeltje dat licht beschrijft heet een 'foton'. Als je een groot aantal fotonen op een atoom afstuurt, kan het gebeuren dat er een foton wordt geabsorbeerd, waardoor het elektron in een hogere-energietoestand kan komen. Niet élk foton kan echter geabsorbeerd worden: alleen fotonen die precies de juiste energie hebben kunnen dat. Dat feit zit al besloten in de term 'quantum': energie is gequantiseerd (in stukjes opgedeeld). Een foton dat te weinig energie heeft zal dus niet worden geabsorbeerd, evenmin als een foton dat te veel energie met zich meedraagt.

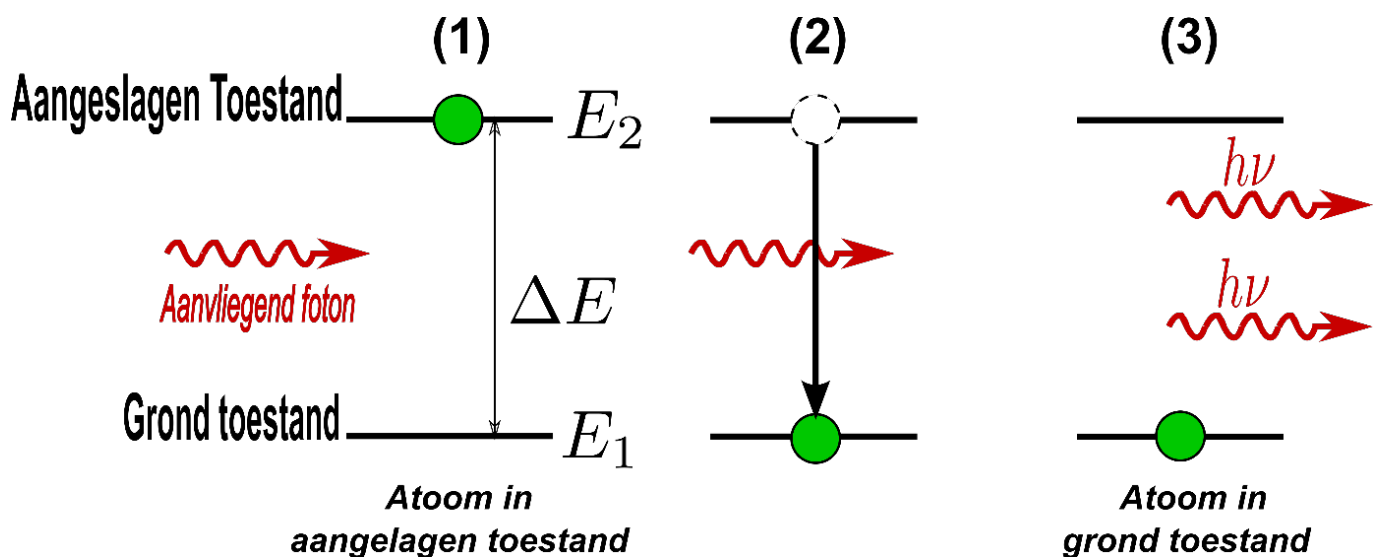
Wat gebeurt er nu als we het proces omdraaien? Stel dat ons atoom zich op een bepaald tijdstip in de aangeslagen toestand bevindt. Je kunt je dan voorstellen dat het vervolgens vervalt naar de grondtoestand en daardoor energie vrijgeeft in de vorm van een foton. Dit fenomeen wordt vaak beschreven als 'spontane emissie van licht'. De precieze theoretische beschrijving van dit fenomeen is overigens helemaal niet eenvoudig, en vereist kennis van moderne natuurkunde in de vorm van quantumveldentheorie. De quantumveldentheorie die deze interactie kan beschrijven heet *quantum electrodynamics* (QED). Uit die theorie blijkt inderdaad dat een aangeslagen atoom spontaan kan vervallen en een lichtdeeltje kan uitzenden.

Kortom: het proces kan twee kanten opgaan! Uiteraard is energie daarbij behouden, dus een atoom dat terugvalt naar de grondtoestand zendt precies hetzelfde soort lichtdeeltje uit als het geabsorbeerd heeft. Deze spontane emissie vormt de bron van ons laserlicht.

Licht versterken door stimulatie

Een atoom kan dus licht uitzenden, maar dat verklaart nog lang niet hoe een laser werkt. Een laser zendt immers veel meer licht dan een enkel foton uit. Laserlicht bestaat uit véle fotonen, die ook nog eens allemaal precies dezelfde eigenschappen hebben. De oorzaak van het feit dat er zoveel fotonen zijn ligt in de 'gestimuleerde emissie van licht'. Het fenomeen dat Einstein beschreef vindt als volgt plaats: een foton dat in de buurt komt van een aangeslagen atoom, kan een interactie aangaan met dit atoom, met als verrassend gevolg dat ook dit atoom gestimuleerd wordt om een foton uit te zenden. Het atoom zal op zo'n manier vervallen, dat het foton dat het uitzendt precies dezelfde energie heeft als het foton

waarmee het atoom de interactie aanging. Daarnaast zal het nieuwe foton ook nog eens precies dezelfde richting opgaan als het originele foton. Uiteraard kan niet elk foton een atoom stimuleren om te vervallen: het passerende lichtdeeltje moet wel het ‘juiste type’ foton zijn. In het bijzonder: het passerende foton moet een foton zijn dat dezelfde energie heeft als dat het atoom zou uitzenden. Afbeelding 3 geeft dit proces van ‘gestimuleerde emissie’ schematisch weer. Er zijn belangrijke verschillen tussen dit proces en *spontane* emissie: bij gestimuleerde emissie wordt er niet een willekeurig foton uitgezonden, maar wordt een heel specifiek lichtdeeltje geproduceerd, met bijvoorbeeld een heel specifieke richting. Door dit proces te blijven herhalen kunnen we een laser maken.

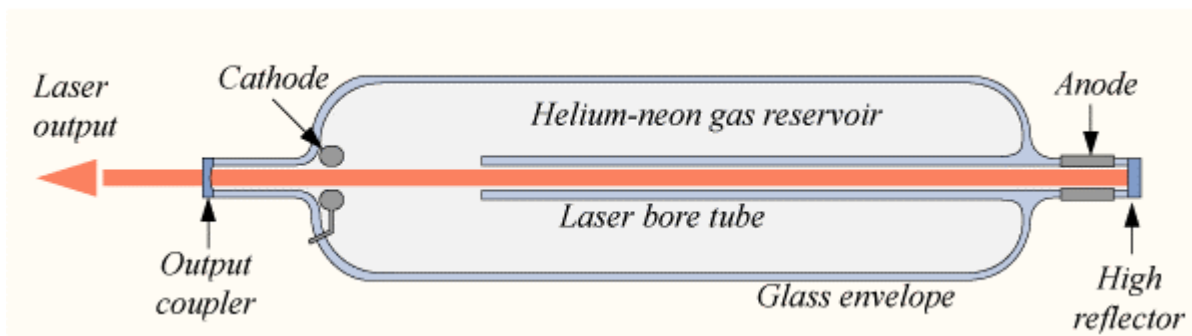


Afbeelding 3. Schematische weergave van gestimuleerde emissie. Bij (1) bevindt een elektron zich in de aangeslagen toestand, en een foton nadert dit atoom. Het aangeslagen atoom (2) gaat een interactie aan met het foton, en wordt gestimuleerd om een nieuw foton uit te zenden. Het aangeslagen atoom (3) heeft een extra foton uitgezonden met dezelfde eigenschappen als het foton in stap (1). Oorspronkelijke afbeelding: [Wikimedia Commons](#).

Zo bouw je een laser

Een eenvoudig voorbeeld van een laser ziet er als volgt uit. We stoppen een groot aantal atomen in een glazen buis waarvan de uiteinden spiegels zijn. De atomen tussen de spiegels kunnen bijvoorbeeld een kristal zoals robijn vormen (daarmee werd de eerste laser gemaakt) of gasvormig zijn - een mengsel van helium en neon komt bijvoorbeeld veel voor. Laten we uitgaan van een voorbeeld met een gas. Stel nu dat er een foton tussen de twee spiegels heen en weer beweegt, en dat alle atomen in het gas in een aangeslagen toestand zijn. Dan

zou het foton kunnen zorgen voor gestimuleerde emissie, waarna er twee fotonen zijn die tussen de spiegels heen en weer bewegen, en die elk weer een nieuw foton kunnen stimuleren - enzovoort. Daarbij ontstaat wel een aantal praktische problemen. Een foton blijft bijvoorbeeld niet voor altijd gevangen tussen de twee spiegels. Door ongewenste processen zal elk systeem om fotonen vast te houden altijd een klein beetje imperfect zijn: fotonen zullen in de loop van tijd ontsnappen. Het is dus van belang dat we genoeg atomen stimuleren om te vervallen, zodat er een goede toevoer van nieuwe lichtdeeltjes is. Als we meer lichtdeeltjes produceren door gestimuleerde emissie, dan dat we kwijtraken door ongewenste processen, dan zitten we goed: we produceren netto nieuw licht. Een laser kunnen we dan simpelweg maken door één van de twee spiegels een klein beetje doorzichtig te maken. Sommige fotonen ontsnappen dan door deze spiegel, en die zullen in een rechte lijn verder bewegen. Omdat al deze fotonen precies dezelfde eigenschappen hebben, krijgen we een hele strakke bundel van fotonen met precies één golflengte: een laser!



Afbeelding 4. Schematische weergave van een laser. Een glazen reservoir bevat een gasmengsel van helium en neon. Aan beide uiteindes zijn spiegels gemonteerd: rechts een 'high reflector', wat betekent dat deze spiegel niets doorlaat; links een 'output coupler', wat betekent dat dit een doorschijnende spiegel is. De 'laser bore tube' is aanwezig om ongewenste aangeslagen toestanden van het helium-neongas te 'filteren': het gas kan ongewenste energie kwijtraken door tegen het glas van de 'bore tube' te botsen. De 'cathode' en 'anode' zorgen voor een hoge spanning waardoor de atomen in het gas in een aangeslagen toestand worden gedreven. Afbeelding: [Wikimedia Commons](#).

Een praktisch probleem is de vraag hoe we ervoor zorgen dat de atomen tussen de spiegels in een aangeslagen toestand worden gebracht. Immers: een atoom dat al vervallen is naar een lagere energietoestand kan niet nóg een keer op dezelfde manier licht uitzenden. We moeten het elektron in zo'n atoom dus weer 'omhoog pompen' naar een aangeslagen

toestand. Daarvoor zijn verschillende trucs. In het geval van het helium-neongas wordt er gebruik gemaakt van een elektrische ontlading: door een hoge spanning aan te brengen tussen een kathode en een anode (twee polen, denk aan de rode en zwarte kabels bij een auto-accu) met het gas ertussen, kun je de atomen in het gas in een hogere-energietoestand dwingen. Iets vergelijkbaars gebeurt bijvoorbeeld bij een blikseminslag, waar luchtdeeltjes geïoniseerd worden door een hoog potentiaalverschil (spanning) tussen wolk en grond. Door atomen zo continu aan te slaan naar hogere-energietoestanden, kunnen ze door de al aanwezige fotonen in de glazen buis ook continu gestimuleerd worden om licht uit te zenden.

In het geval van een kristal als robijn, kunnen we de atomen in het kristal in aangeslagen toestanden brengen door met een normale lamp op het kristal te schijnen. Het licht uit zo'n lamp bevat voldoende fotonen om de atomen in het kristal te stimuleren naar hogere-energietoestanden, waarna ze weer nieuwe, 'gerichte' fotonen kunnen uitzenden.

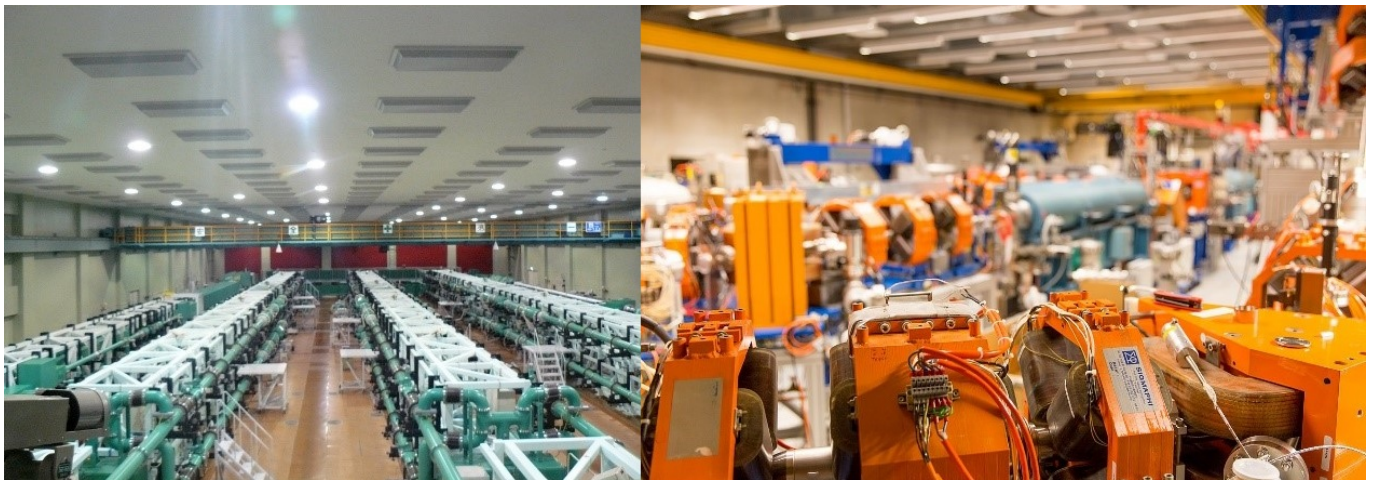
Wat ik nog niet heb verteld is waar het 'initiële foton' in de laser, die het hele proces op gang brengt, vandaan komt. Om verval te stimuleren moet er immers in de eerste plaats één foton aanwezig zijn. Dit foton komt echter vanzelf tevoorschijn, door het proces wat helemaal aan het begin van dit artikel is beschreven: *spontaan verval*. Er zal vanzelf op een gegeven moment (en meestal: heel snel) een atoom vervallen naar een lagere-energietoestand, waarbij een foton vrijkomt met precies de juiste eigenschappen. Zo hebben we een werkende laser gebouwd. Eigenlijk is een laser dus geen heel complex apparaat: met de juiste ingrediënten - al zijn die natuurlijk niet allemaal even makkelijk te verkrijgen - zou je er zelf één kunnen bouwen. Lasers zijn overigens nog best gevaarlijke apparaten: ze kunnen een menselijk oog gemakkelijk verblinden. Wellicht is het dus ook niet heel verstandig om thuis een laser-lab te bouwen!

Meer over lasers

We weten nu hoe een laser wordt gebouwd, maar er zijn nog allerlei leuke weetjes over lasers die de moeite waard zijn. Bijvoorbeeld: niet elke laser is gebaseerd op quantummechanische eigenschappen van materie. Zo is er bijvoorbeeld ook een zogeheten 'free electron laser' (vrije-elektronenlaser). Een dergelijke laser werkt door elektronen in cirkelbewegingen te versnellen. Het licht dat hierbij vrijkomt wordt beschreven door klassieke natuurwetten als de wetten van Maxwell: er komt geen quantummechanica aan te pas!

Een voorbeeld waar de quantummechanische eigenschappen juist wel een heel belangrijke rol spelen is dat van de LED-lamp. LED-lampen bestaan uit 'light emitting diodes' en zijn technisch gezien ook bronnen die laserlicht produceren. Daarbij is de aandrijving simpelweg een elektrische stroom, en wordt het licht geproduceerd doordat elektronen in de diode van hoge naar lage energietoestanden vervallen.

Een ander leuk feit is dat laserlicht zo krachtig kan zijn, dat er momenteel wordt onderzocht of lasers gebruikt kunnen worden om atomen te laten fuseren voor het opwekken van energie. Door een stukje materiaal van alle kanten te beschijnen met een gigantisch sterke laser, zou je in theorie het materiaal zo heet kunnen maken, en zo veel kunnen samenpersen (licht kan ook druk uitoefenen) dat er kernfusie tot stand komt. De lasers die hiervoor gebouwd zijn, zijn ongeveer zo groot als een voetbalveld!



Afbeelding 5. Twee lasers. Links [een van de krachtigste lasers](#) ter wereld die gebruikt wordt voor kernfusie onderzoek in Osaka, Japan. Rechts een foto van de machines van de [free electron laser](#) van de Radboud Universiteit in Nijmegen.

Een laatste feit gaat over iets wat ook veel in het nieuws is geweest: de EUV-machines van ASML. Dit zijn nieuwe machines, gefabriceerd door de Nederlandse chipmachinefabrikant ASML, momenteel de beste apparaten ter wereld voor de productie van computerchips. Een van de obstakels voor de ontwikkeling van deze machines, is dat EUV-licht (wat staat voor 'extreem ultraviolet') niet gemaakt kan worden door een atoom te 'stimuleren', zoals hierboven is beschreven. Om dat wel voor elkaar te krijgen moet gebruik gemaakt worden van laserlicht dat wordt uitgezonden door plasma's. Het onderliggende proces is erg complex (en explosief: de plasma's kunnen behoorlijk wat schade aanrichten als je er niet goed mee om gaat!), en het heeft jarenlang onderzoek nodig gehad om tot bruikbare lasers te leiden.

Een technisch hoogstandje dat misschien nog wel eens een onderwerp wordt van een artikel op zich.

Kortom: de ontwikkeling en werking van lasers is een rijk vakgebied waar veel technologische en economische winst in zit; zelfs nu we sinds Einstein al bijna een eeuw aan ontwikkelingen achter de rug hebben.

In de zomerperiode publiceert de QU-site elke vrijdag een artikel. In september gaan we weer terug naar het schema van twee artikelen per week: elke dinsdag en elke vrijdag.