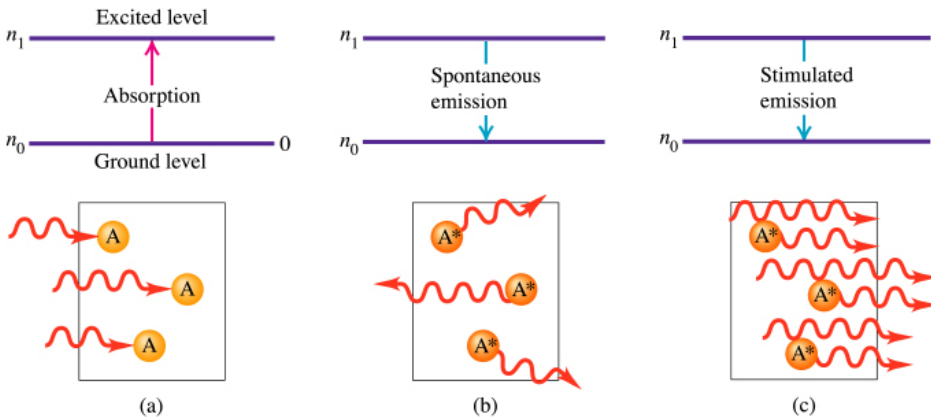


## 38.6 LASER

Sana **laser** on tunnuslyhenne (akronyymi) sanoista ”**l**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation” eli suomeksi ”valon vahvistaminen säteilyn stimuloitun emission avulla”. Kysymyksessä on siis optinen valon vahvistin.

Laserin toiminnan periaatteen optisena vahvistimena teki mahdolliseksi Albert Einsteinin jo vuonna 1916 esittämä *stimuloitun emission* olemassaolo. Teorialle ei löydetty sovellutuksia ennen kuin vuonna 1954 C. H. Townes *et al.* kehittivät mikroaaltoalueella toimivan ns. *maserin* (**m**icrowave **a**mplifier based on **s**timulated **e**mission of **r**adiation). Townesin idean laajensivat optiselle alueelle Townes ja Schawlow vuonna 1958, josta he saivat Nobelin palkinnon. Ensimmäisen varsinaisen laserin rakensi T. H. Maiman vuonna 1960.

Laserin toiminnan periaatteen ymmärtämiseksi on tutkittava kvanttimekaanisia atomaarisia energiatasoja ja fotonien vuorovaikutusta niiden kanssa. Kolme tunnettua valon ja materian vuorovaikutusprosessia on esitetty seuraavassa kuvassa.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Prosessit ovat (a) *absorptio*, (b) *spontaani emissio* ja (c) *stimuloitu emissio*. Tarkastellaan näitä lähemmin.

### Kuva (a) absorptio.

Oletetaan, että atomeilla on energiataso (excited level) energialla  $E$  perustason (ground level) yläpuolella. Perustasolla oleva atomi  $A$  voi absorboida fotonin, jonka energia  $E = hf$  vastaa viritetyn tason ja perustason energioiden erotusta. Absorptiossa fotonit häviävät ja atomi ottaa vastaan sen energian siirtyen ylemmälle energiatasolle. Merkitään tällaista viritettyä atomia symbolilla  $A^*$ .

### Kuva (b) spontaani emissio.

Olkoon atomi  $A^*$  aluksi viritetyllä (ylemmällä) energiatasolla. Se voi siirtyä itseksensä (spontaanisti) ilman ulkoista ärsykettä perustasolle emittoiden samalla energiatasojen eroa vastaavan fotonin, jonka energia on siis  $E = hf$ . Spontaanisti emittoituvien fotonien suunnat ja vaiheet ovat satunnaisia.

### Kuva (c) stimuloitu emissio.

Stimuloitu emissio edellyttää, että aluksi viritetyllä tasolla olevat atomit  $A^*$  ovat ulkoisessa fotonkentässä. Kun ulkoinen foton, jonka energia vastaa viritetyn tason ja perustason energiaeroa, ts. on  $E = hf$ , ohittaa atomin, se stimuloi (liipaisee) atomin siirtymään perustasolle. Prosessissa atomi vapauttaa fotonin, jonka *energia, suunta, vaihe* ja *polarisaatio* ovat samat kuin liipaisevalla fotonilla. Tuloksena on siis kaksi identtistä fotonia yhden sijasta, ts. säteen intensiteetti kasvaa. Stimuloitu emissio tekee näin valon vahvistumisen laserissa mahdolliseksi. Kahdella fotonilla on sama vaihe, joten ne ovat koherentteja keskenään. Laservalo on koherenttia.

Se miten paljon absorptioita ja spontaaneita sekä stimuloituja emissioita tapahtuu riippuu siitä, miten paljon atomeita on perustilassa ja toisaalta miten paljon niitä on viritetyssä tilassa. Kun atomit ovat termodynaamisessa tasapainossa, ts. normaalitilassa vakioämpötilassa, niin energiatasojen *miehitykset* (population) saadaan ns. Boltzmannin jakaumasta. Kahden energiatason 0 ja 1 miehitysten  $n_0$  ja  $n_1$  suhde saadaan lausekkeesta

$$\frac{n_1}{n_0} = e^{-(E_1 - E_0)/kT}, \quad (38.21)$$

missä  $E_0$  ja  $E_1$  ovat tasojen energiat,  $T$  on lämpötila (K) ja vakio  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K on ns. Boltzmannin vakio.

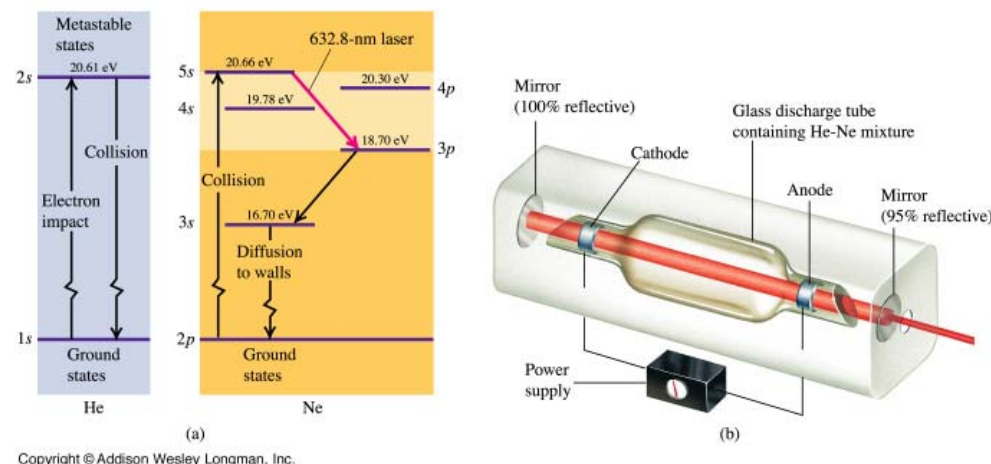
**Esimerkki:** Tarkastellaan hypoteettista atomia, jolla on kaksi energiatasoa, joiden energiaero vastaa aallonpituutta 633 nm. Oletetaan, että kaikki atomit ovat jommalla kummalla näistä energiatasoista. Mikä osa atomeista on ylemmällä energiatasolla huoneen lämpötilassa  $T = 300$  K.

Normaaliolosuhteissa lähes kaikki atomit ovat perustilassaan, joten stimuloituja emissioita ei juurikaan voi tapahtua. Todennäköisin prosessi on absorptio eikä laser voi toimia näissä olosuhteissa.

Miten saisimme viritetyn tason miehityksen suuremmaksi? Voimme yrittää sitä kohdistamalla atomeihin säteilyä, jonka taajuus (aallonpituus) vastaa energiatasojen välistä energiaeroa. Tapahtuu paljon absorptioita, jotka ”nostavat” atomeita ylemmälle tasolle ja miehityssuhde  $n_1/n_0$  tilapäisesti muuttuu. Näin päästään periaatteessa tilanteeseen, jossa ylätasoinen miehitys on sama kuin alatasoinen miehitys. Tämän jälkeen ulkoisen säteilyn aiheuttamia stimuloituja emissioita tapahtuu yhtä paljon kuin absorptioita eikä tilanne enää muutu.

Lasertoiminnan käynnistymisen *kynnysehtona* on, että ylemmän tason miehitys on *suurempi* kuin alemman tason miehitys. Tällaista termodynaamisen tasapainon mukaan käänteistä miehitystilannetta sanotaan *miehitysinversioksi*. Edellä kuvattu menetelmä ei johda miehitysinversioon eikä siis myöskään lasertoimintaan.

Miehitysinversio voidaan kuitenkin saavuttaa monellakin eri tavalla. Hyvän esimerkin tarjoaa tuttu helium-neon-laser (HeNe-laser).



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Laserissa helium- ja neonkaasun pienipaineinen ( $10^{-3}$  atm) seos on sijoitettu kaasupurkausputkeen (kuva b). Kun elektrodien (katodi ja anodi) väliin asetetaan korkea jännite, tapahtuu kaasussa osittaista ionisoitumista. Elektrodien välisessä sähkökentässä varatut hiukkaset (ionot ja elektronit) joutuvat kiihtyvään liikkeeseen ja virittävät törmäysten välityksellä eri tavalla kaasuatomeja.

Kuvassa (a) on esitetty HeNe-laserin energiatasokaavio. Tasojen symbolit ( $1s$ ,  $2p$ , jne.) viittaavat elektronisiin energiatasoihin. Laserissa varsinaisena *laserväliaineena* toimii neonkaasu ja lasersiirtymän ylätaso on taso  $5s$  ja alataso taso  $3p$  (katso kuva). Kysymys nyt on siis siitä miten neonin tason  $5p$  miehitys saadaan kasvamaan.

Sattuu niin, että heliumin  $2s$ -tason energia on lähes sama kuin neonin  $5s$ -tason energia. Heliumin  $2s$ -taso on lisäksi ns. *metastabiili* taso. Se ei voi purkautua normaalien valintasääntöjen puitteissa suoraan perustasolle, joten sen elinaika on hyvin pitkä. Tapahtuu seuraavaa: Kaasupurkausputkessa elektronitörmäykset (electron impact) virittävät helium-atomeita  $2s$ -tasolle, jonne niitä siis kertyy. Aika ajoin virittynyt helium-atomin törmänee neon-atomiin,

jolloin se luovuttaa viritysendergiansa sille. Helium-atomi putoaa perustasolle ja neon-atomi virittyy  $5s$ -tasolle. Miehitysinversio syntyy nyt helposti, koska lasersiirtymän alataso ( $3p$ ) ei ole perustaso, joten se on käytännössä tyhjä.

Miehitysinversion vallitessa tasojen  $5s$  ja  $3p$  välillä yksikin satunnainen spontaanin siirtymän synnyttämä fotoni voi käynnistää stimuloitun emission. Tuloksena on laser-valoa aallonpituudella 632,8 nm. Käytännössä syntyvän säteen annetaan kulkea neonkaasussa edestakaisin niin, että se vahvistuu hyvin voimakkaaksi. Tämä toteutetaan peilien avulla (katso kuvaa b). Toinen peileistä on osittain läpäisevä, joten valoa saadaan laserista uloskin.

**Esimerkki:** Neonissa  $5s$ -tason energia on 20,66 eV ja  $3p$ :n energia 18,70 eV. Laske energiaeroa vastaava aallonpituus.

Laservalolla on neljä sellaista ominaisuutta, jotka erottavat sen tavallisen valolähteen valosta ja tekevät sen käyttökelpoiseksi moniin sovellutuksiin. Nämä ominaisuudet ovat (1) monokromaattisuus, (2) koherenttisuus, (3) kirkkaus ja (4) yhdensuuntaisuus.

Lasereita on olemassa hyvin monen tyyppisiä ja miehitysinversio voidaan saada aikaan eri tavoilla. Esimerkiksi puolijohdelasereissa inversio saadaan aikaan johtamalla elektroneja sopivasti diodin  $pn$ -rajapintaan. Kemiallisissa lasereissa molekyyli voi suoraan syntyä viritettyyn tilaan tai viritysendergia saadaan eksotermisestä kemiallisesta reaktiosta. Eräissä hiilidioksidilasereissa miehitysinversio syntyy kaasun nopean laajenemisen seurauksena.

Lasereilla on monia käytännön sovellutuksia. Suurtehoisella lasersäteellä voidaan esimerkiksi työstää materiaaleja ja hitsata metalleja. Lasersäteen yhdensuuntaisuudesta seuraa, että se voi edetä pitkiä matkoja oleellisesti heikkenemättä. Lasereita käytetäänkin paljon etäisyysmittareissa ja kohteen paikantamisessa (sotilaskäytössä).

Lasereiden lääketieteelliset sovellutukset ovat lukuisia. Tehokkaita lasereita käytetään esimerkiksi kudosten höyrystämisessä. Laservalo viedään optisella kuidulla elimen sisään (keuhko, maksa, vatsa), jossa operaatio (kasvaimen poisto) tehdään. Myös silmän kaihileikkauksia tai irronneen verkkokalvon takaisin hitsaamiseen käytetään lasereita.