

9-5 Sirona, absorptio, emissio ja stimuloitu emissio

Absorptio ja emissio

Oheisessa kuvassa 9-31 on esitetty absorptio-prosesseja ja niitä tyypillisesti seuraavia emissioprosesseja.

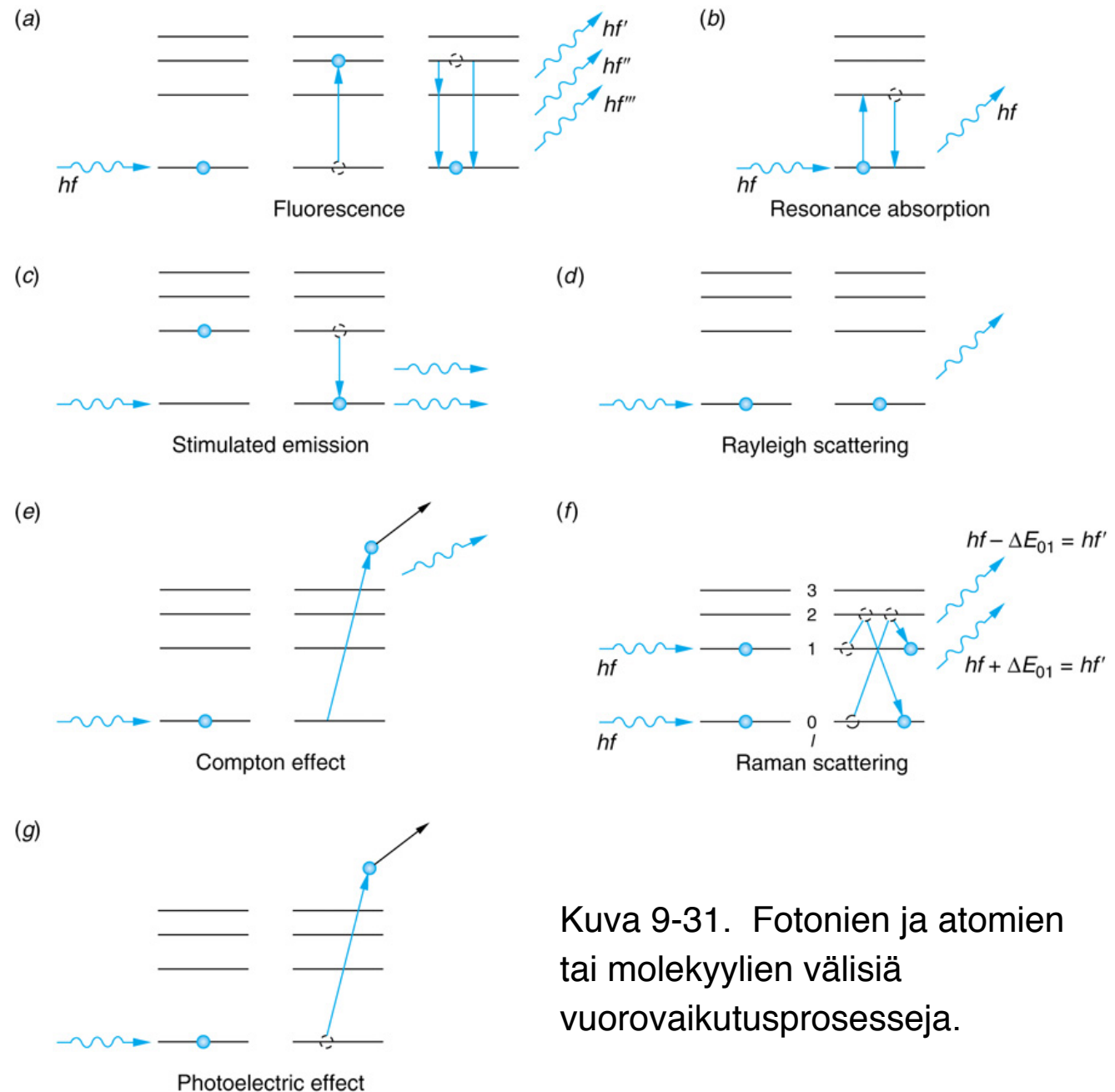
Sirona

Fotonien sirona atomeista ja molekyyleistä voi olla elastista tai epäelastista.

Elastisessa sironnassa fotonin energia ei muutu ja tätä prosessia sanotaa Rayleigh-sironnaksi.

Rayleigh- ja Raman-sironnat ovat

"yksivaiheisia" tapahtumia ja niissä tuleva ja lähtevä fotonit ovat korreloituneita.



Kuva 9-31. Fotonien ja atomien tai molekyyliden välisiä vuorovaikutusprosesseja.

Stimuloitu emissio

Tarkastellaan kuvan 9-31(c) emissiota, jonka aiheuttaa eli stimuloi toinen fotoni. Tässä tapahtumassa **fotoni, joka on bosoni, stimuloi transition**, jonka seurauksena sen **kvanttitilaan syntyy toinenkin identtinen fotoni**. Näiden fotonien sanotaan olevan **koherentteja keskenään**.

Fermin kultaisen säännön mukaan (*stimuloidun*) *absorption* ja *stimuloidun emission* **transitiotodennäköisyydet B ovat samat**, joten transitionopeuksille saadaan $W_{12} = B_{12} u = W_{21} = B_{21} u$. Siis, **Einsteinin B-kertoimet ovat samat $B_{12} = B_{21} = B$** .

Koska termisessä tasapainossa tilojen miehitykset noudattavat **Boltzmannin jakautumaa**, niin

$$N_2 / N_1 = \exp(-hf / kT). \quad (9-35)$$

Mutta koska $W_{12} = W_{21}$, on oltava vielä ainakin yksi (kolmas) transitioprosessi. Tämä on **spontaani emissio**, jolle $W'_{21} = A_{21}$.

Tasapainossa $N_1 W_{12} = N_2 (W_{21} + W'_{21})$, joten

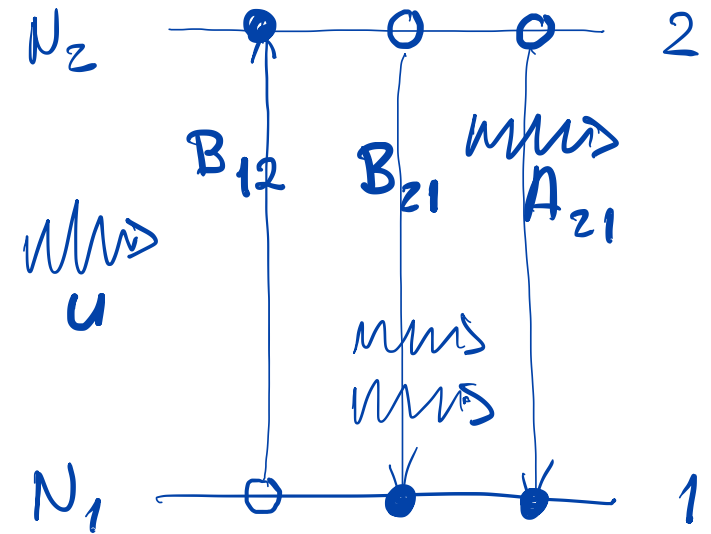
$$N_1 B u = N_2 (B u + A). \quad (9-36)$$

Vertaamalla tätä Boltzmannin jakautumaan saadaan

$$N_2 / N_1 = B u / (B u + A) = \exp(-hf/kT), \quad (9-37)$$

josta edelleen

$$u = (A/B) / [\exp(hf/kT) - 1]. \quad (9-38)$$



Näin saatiin **Planckin säteilylaki** (8-57) $u(f) = [8\pi hf^3 / c^3] / [e^{hf/kT} - 1]$, sillä ehdolla, että

$$\underline{A/B = 8\pi h(f/c)^3.} \quad (9-41)$$

Toisaalta, lähtemällä Planckin säteilylaista ja Boltzmannin jakautumasta, voidaan päätellä, että

$$B_{12} = B_{21} = B. \quad (9-40)$$

Boltzmannin jakautuma (9-35) saadaan taas **Planckin** säteilylaista ja **Fermin** kultaisesta säännöstä lähtien.

Yhtälöstä (9-38) voidaan kirjoittaa

$$A/Bu = \exp(hf/kT) - 1, \quad (9-42)$$

josta voidaan arvioida spontaanin ja stimuloidun emission suhdetta. Spontaani emissio hallitsee, kun $hf \gg kT$, ja stimuloitu emissio, kun $hf \ll kT$.

Esim. 9-8. Tarkastele spontaanin ja stimuloidun emission suhdetta huoneen lämpötilassa

(a) näkyvän valon aluella ja (b) mikroaaltoalueella.

$kT = 26 \text{ meV} = 0.026 \text{ eV}$

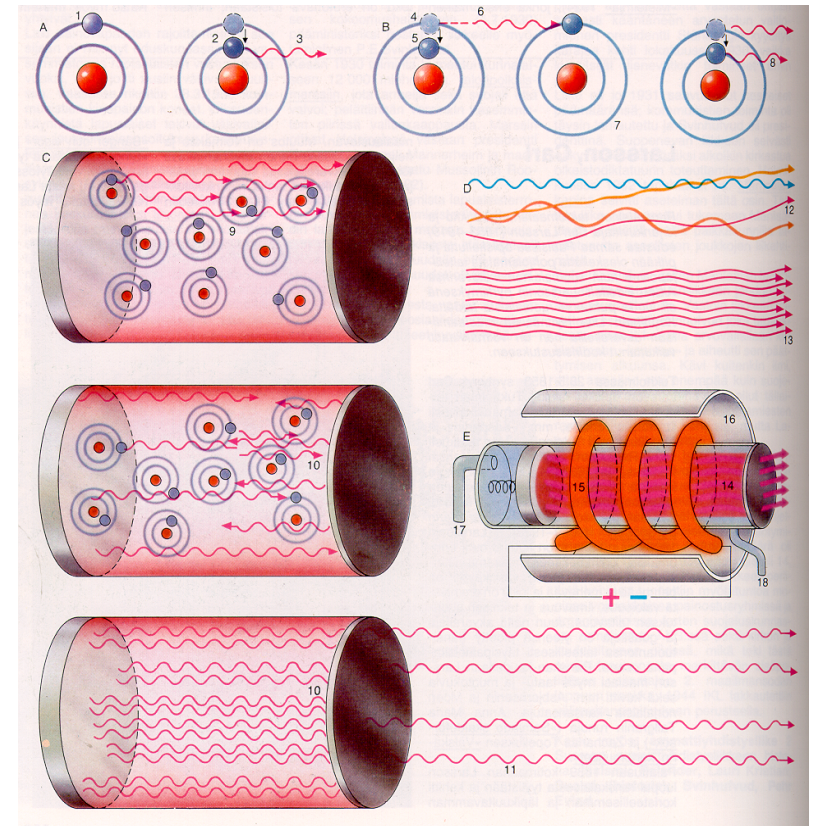
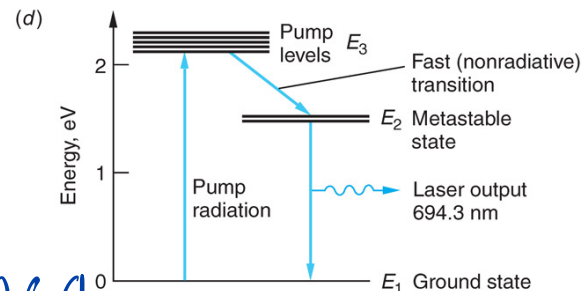
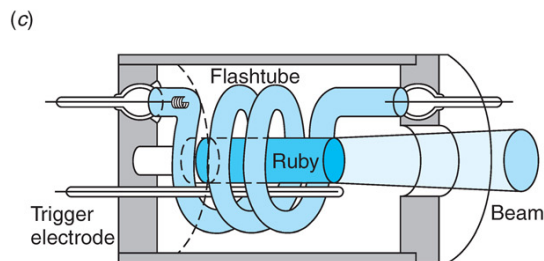
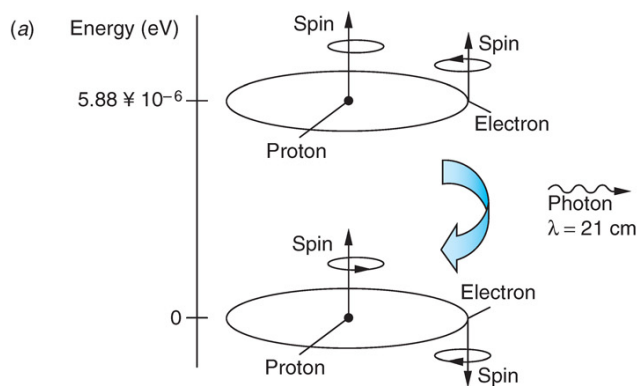
a) $hf \approx 2 \text{ eV}$
 $u = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{A}{Bu} = e^{77} - 1 \approx 3 \times 10^{33}$

b) $hf \approx 10^{-4} \text{ eV} \quad \Rightarrow \quad \frac{A}{Bu} = e^{0.0038} - 1 \approx 0.0038$

9-6 LASER ja MASER

Historiaa (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- A. Einstein v.1917: Stimuloidun emission idea
- C.Townes v. 1953: MASER
- Townes ja A. Schawlow v. 1958: LASERin idea
- Theodore Maiman 1960: RubiiniLASER
- Nobel-palkintoja:
 - v. 1964 C.Townes, N. Basov, A. Prokhorov
 - v. 1981 N. Bloembergen, A. Schawlow
 - ...
 - v. 1999 A. Zewail



Kuva 9-33. (a) Vetymaserin hyperhienorakenne tasot (c) rubiinilaserin kaaviokuva, samoin yllä, ja (d) kromin energiatasokaavio rubiinissa.

Korundi-ryhmä

Al_2O_3 Cr^{3+} , johon seostetaan

$Cr \rightarrow$ rubiini
 Ti (tai Fe) $\rightarrow$ safiiri

Rubiinilaser

Tarkastellaan edellisen sivun rubiinilaserin toimintaa vaiheittain:

- **laserväliaineen** ($\text{Cr@Al}_2\text{O}_3$) **pumppaus** salamavalolampulla
- fotonien emissio kuvan (9-33) (b) kaavion mukaisesti
- **resonaattoriin** jäävien fotonien aih. **stimuloitu emissio** ja **vahvistuminen** (engl. gain) seisovaksi aalloksi **populaatioinversion** vuoksi
- puoliläpäisevä peili päästää osan fotoneista ulos eteneviksi aalloiksi laservalona.

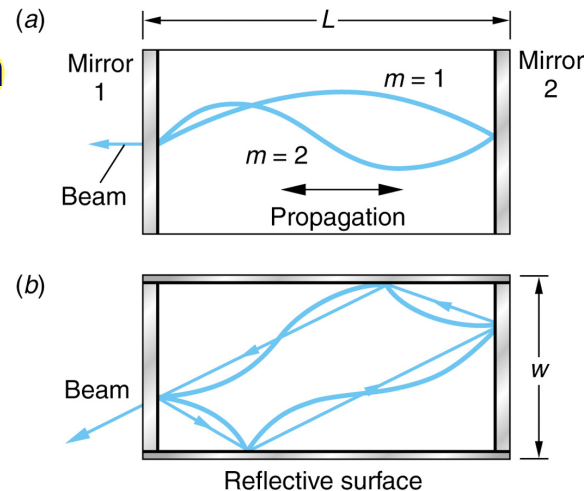
Rubiinilaserin valo syntyy pulsseina

pumppauksen ja resonaattorin mukaan aallonpituuksilla λ , kun

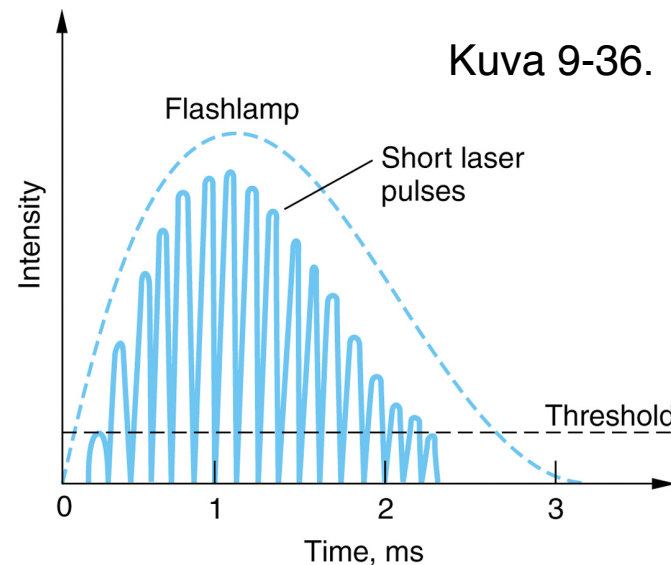
$$L = m \lambda / 2.$$

Laservalon ominaisuudet:

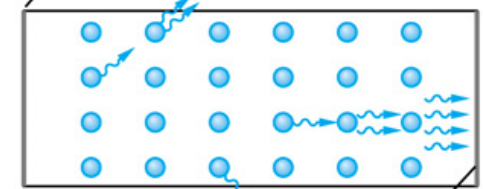
- **koherenssi**
- **monokromaattisuus**
- **yhdensuuntaisuus**
- **suuri tehotiheys**



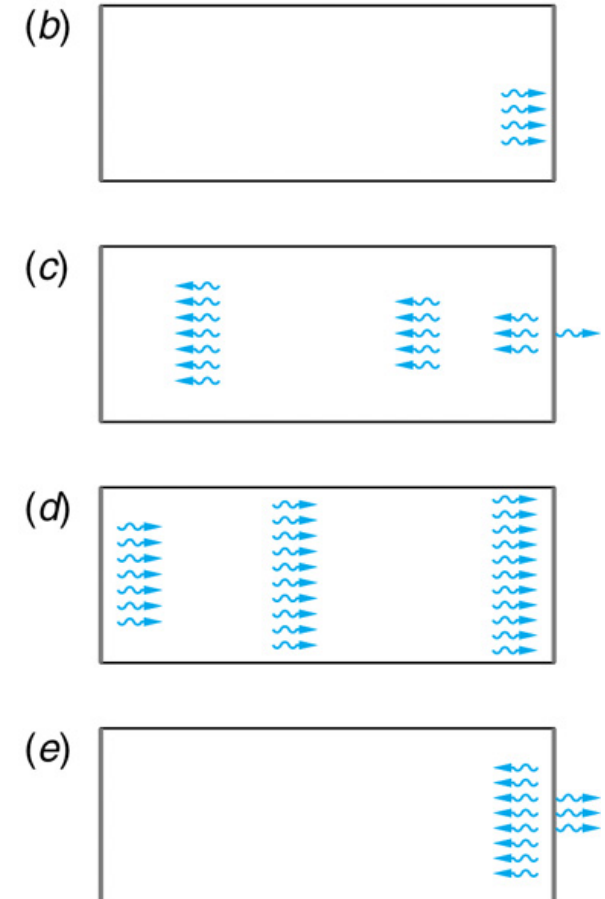
Kuva 9-36.



(a) Silvered end Kuva 9-35.

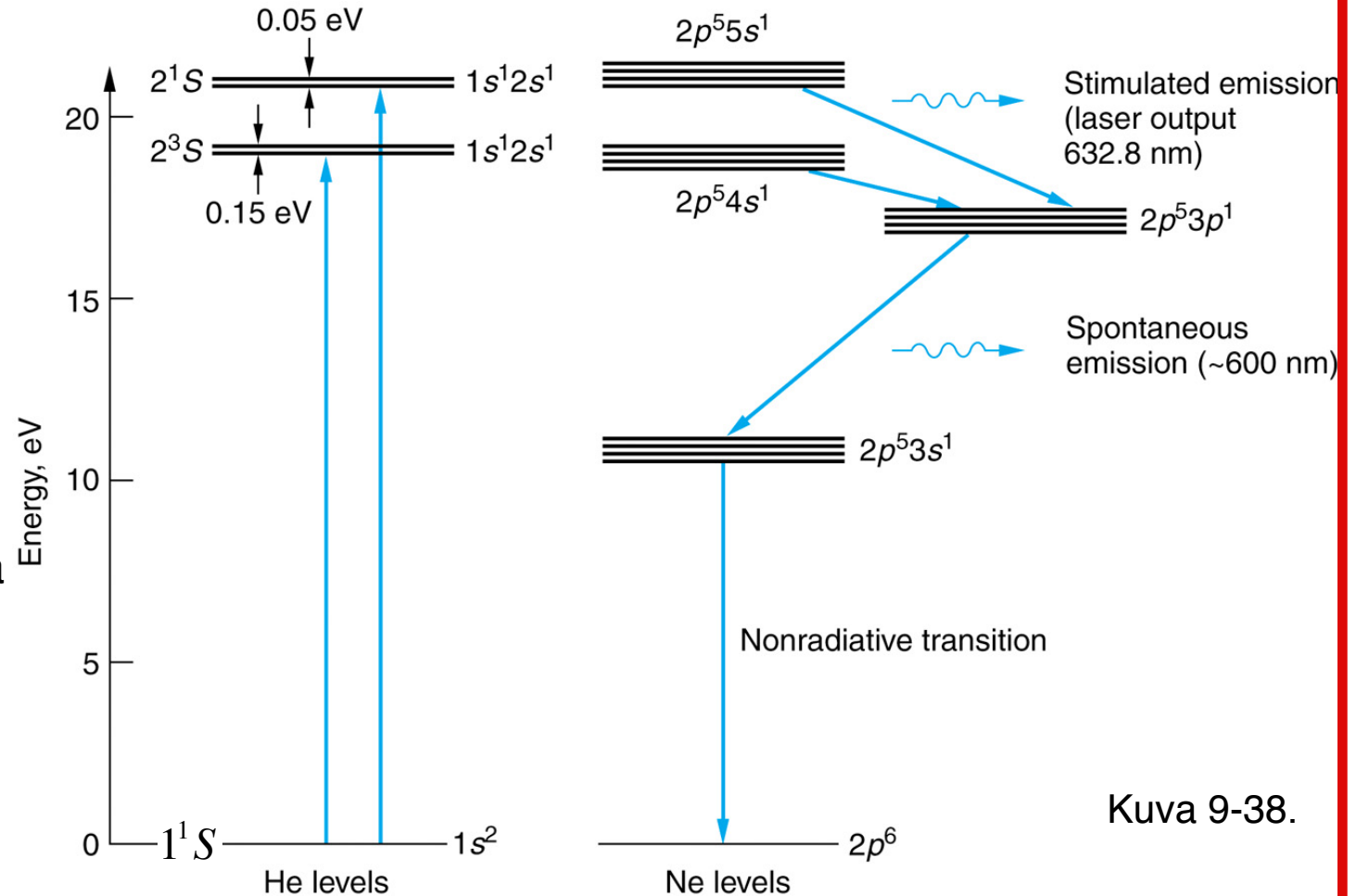


Partially silvered end

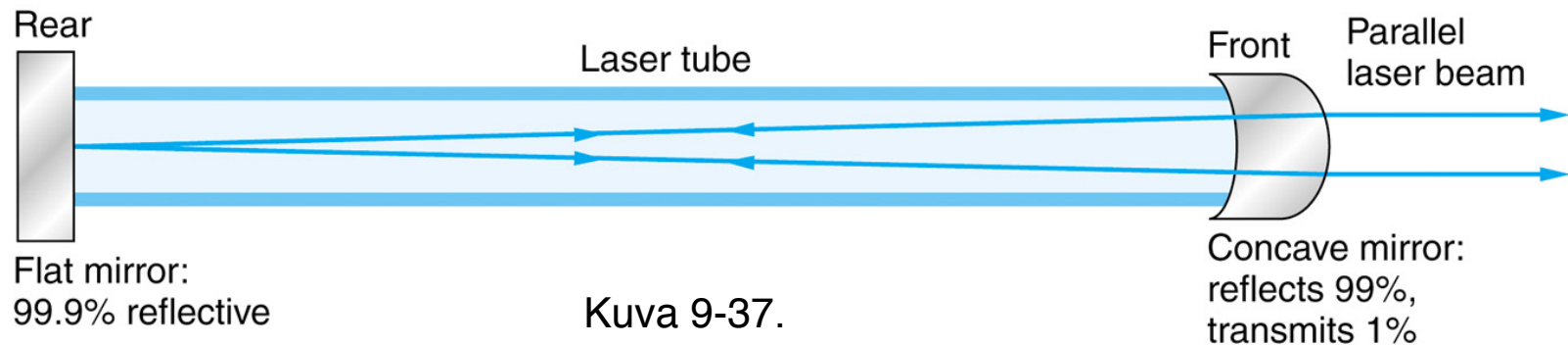


Helium–neon-laser

Tämän ensimmäisen kaasulaserin toteuttivat Javan, Bennet ja Herriot v. 1961. Sen väliaineena on He–Ne-kaasuseos (15%/85%), jossa He-atomeja viritetään korkeajännite-purkauksella, jonka jälkeen viritystilan energia siirtyy törmäyksen välityksellä Ne-atomeille. Tämä laser on **jatkuvatoiminen** (engl. continuous wave, CW).



Kuva 9-38.



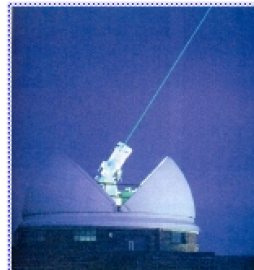
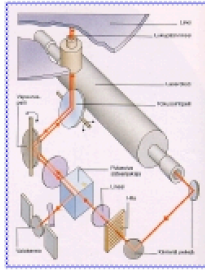
Kuva 9-37.

Laserin sovellutuksia

FL 40v 19.11.99 5

"TAVALLISIA" SOVELLUTUKSIA

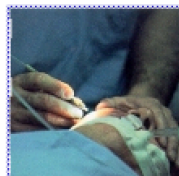
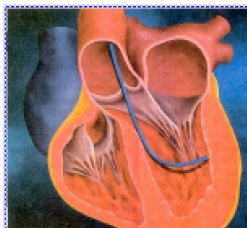
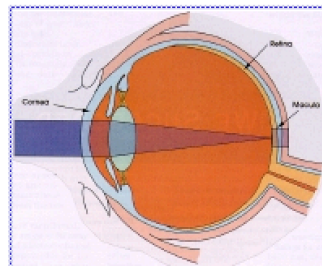
- Laserkirjoitin
- CD-soitin
- Suuntaaminen, tähtäminen, ...
- Etäisyyden mittaaminen: hyvin suuret ja hyvin pienet etäisyydet



FL 40v 19.11.99 7

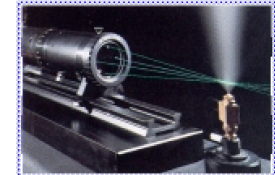
KIRURGIN VEITSENÄ

- Silmäkirurgia
- Näön korjaaminen
- Sydänkirurgia
- ...



TYÖSTÖÄ, MITTAUSTA, ...

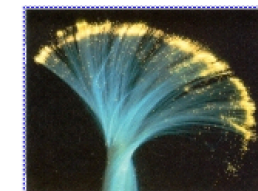
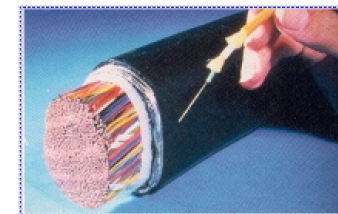
- Materiaalien työstö, pinnoitukset
- Suuntaaminen, tähtäminen, ...
- "Laser-kemia"
- Ydinfuusio



FL 40v 19.11.99 8

TIEDONSIIRTO (SEKÄ TALLENNUS JA LUKEMINEN)

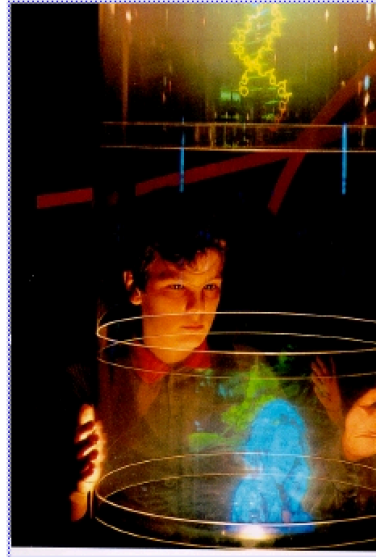
- Kuituoptiikka
- Laser-TV
- DVD, CD



FL 40v 19.11.99 9

HOLOGRAFIA

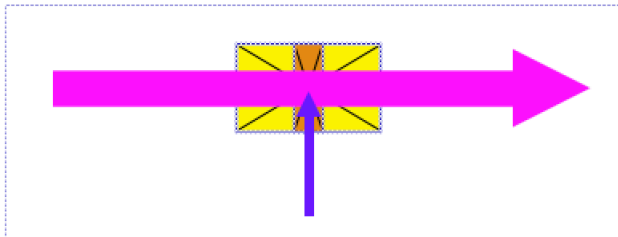
- 3-ulotteiset kuvat
- 3-ulotteiset muistit



FL 40v 19.11.99 11

TULEVAISUUDEN LASERTEKNIIKKAA

- Optinen tiedonkäsittely

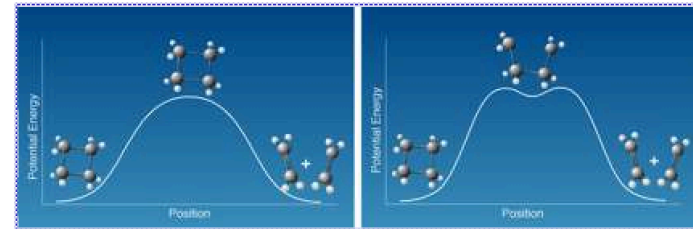


- Uudet epälineaarisen optiikan materiaalit
- ...

FL 40v 19.11.99 10

TUTKIMUS

- Optinen spektroskopia
- Femtosekuntikemia (v. 1999 kemian Nobel)



• ...

Lisätietoa LASER-fysiikan luentomateriaalista:

<http://www.tut.fi/~trantala/opetus/files/LAS-7206015.Laserfysiikka/iki.fi/trantala>

(Ti) 8.9.20
9-10h (ti) 25.1.22