

Stimulerad emission

19 okt. 2026, 5 min läsning

UTKAST

#fysik #optik #fenomen

Kurs: F0005T Förkunskaper: Fotonen, Bohrs atommodell

En atom växlar mellan energinivåer på tre sätt. Vid absorption tar den upp en foton vars energi matchar en energiövergång i atomen. Vid spontan emission faller den tillbaka av sig själv och sänder ut en foton med samma frekvens men slumpmässig riktning och fas. Vid stimulerad emission träffar en foton en redan exciterad atom och två fotoner går ut — varje ingående foton genererar alltså en extra. Resonansen mellan foton och atom gör att de två får samma riktning, fas och polarisation: de är koherenta. Det är en oväntad kvanteffekt och hela grunden för ljusförstärkning.

Formeln, symbol för symbol

$$\underbrace{\frac{dN}{dt}}_{\text{fotonernas tillväxt}} \propto \underbrace{(n_{ex} - n_g)}_{\text{övertvikt i det övre tillståndet}} \underbrace{N}_{\text{fotoner i strålen}}$$

Varje foton i strålen kan antingen stimulera en exciterad atom eller absorberas av en atom i grundtillståndet, och det som avgör vilket som vinner är bara vilket tillstånd som har flest atomer. Eftersom tillväxten dessutom är proportionell mot N självt växer en förstärkt stråle som en lavin.

1. Resonansvillkoret

Betrakta en atom med ett grundtillstånd E_g och ett exciterat tillstånd E_{ex} . En foton kan bara växelverka med just den övergången om dess energi passar energiskillnaden, samma villkor som ger **linjespektrumet**:

$$hf = E_{ex} - E_g$$

Fotoner med andra energier går förbi utan att påverka övergången. Alla tre processerna nedan handlar om fotoner med exakt den här energin.

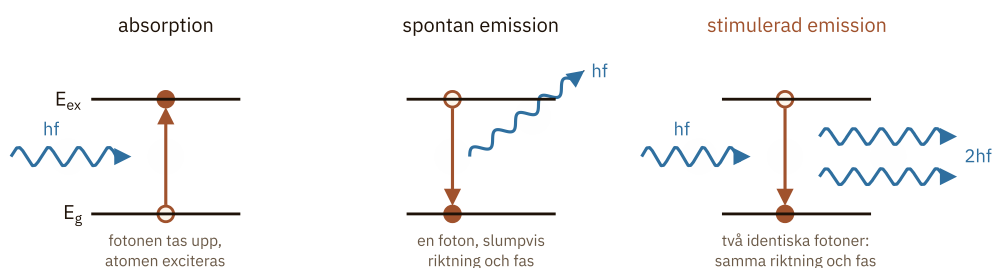
2. Tre processer

Absorption. En atom i grundtillståndet tar upp fotonen och hamnar i E_{ex} . Fotonen försvinner.

Spontan emission. En exciterad atom faller av sig själv tillbaka till E_g , typiskt inom 10^{-8} s, och sänder ut en foton med samma frekvens. Riktning och fas är slumpmässiga — varje atom strålar oberoende av de andra.

Stimulerad emission. En foton träffar en atom som redan är exciterad. Atomen faller till E_g och sänder ut en andra foton som är en kopia av den första: samma frekvens, riktning, fas och polarisation. Den inkommande fotonen fortsätter oförändrad. Energin i den nya fotonen kommer från atomen:

$$\underbrace{hf}_{\text{in}} + \underbrace{(E_{ex} - E_g)}_{\text{från atomen}} = \underbrace{2hf}_{\text{ut}}$$



De tre processerna som nivåschema. Ofylld ring: atomens tillstånd före, fylld prick: efter. Vid absorption försvinner fotonen, vid spontan emission går en foton ut åt ett slumpvis håll, och vid stimulerad emission går två identiska fotoner ut åt samma håll.

	Före	Efter	Utgående fotoner
Absorption	foton + atom i E_g	atom i E_{ex}	inga
Spontan emission	atom i E_{ex}	foton + atom i E_g	en, slumpmässig riktning och fas
Stimulerad emission	foton + atom i E_{ex}	två fotoner + atom i E_g	två, identiska och koherenta

Varje stimulerad emission fördubblar alltså antalet fotoner i just det tillståndet. Upprepas processen längs strålen växer en enda foton till en lavin av koherenta fotoner — det är förstärkningen i en **laser**.

3. Förstärkning eller dämpning

En foton som färdas genom en gas kan antingen absorberas av en atom i E_g eller stimulera en atom i E_{ex} . För en övergång mellan två enkla tillstånd är de två processerna lika sannolika per atom. Takterna blir därför proportionella mot hur många atomer som finns i respektive tillstånd:

$$R_{\text{abs}} \propto n_g \quad R_{\text{stim}} \propto n_{ex}$$

Varje absorption tar bort en foton och varje stimulerad emission lägger till en, så nettoförändringen av antalet fotoner N i strålen är

$$\frac{dN}{dt} \propto (n_{ex} - n_g) N$$

Är $n_{ex} < n_g$ dämpas strålen, är $n_{ex} > n_g$ förstärks den. I termisk jämvikt är nästan alla atomer i grundtillståndet, så ljuset absorberas. För förstärkning krävs **populationsinversion**.

Vanliga fel

- **Den inkommande fotonen absorberas.** Den gör det inte — den går vidare oförändrad, och en ny, identisk foton tillkommer.
- **Stimulerad emission skapar energi.** Den extra fotonens energi $E_{ex} - E_g$ tas från atomen, som hamnar i det lägre tillståndet.
- **Vilken foton som helst kan stimulera.** Fotonens energi måste stämma med övergången, $hf = E_{ex} - E_g$.
- **Spontan emission är koherent.** Spontan utsända fotoner har slumpmässig riktning och fas; bara stimulerad emission ger koherent ljus.
- **Stimulerad emission räcker för förstärkning.** Den konkurrerar med absorptionen, och vinner bara om $n_{ex} > n_g$.

4. Lösta exempel

Exempel — Neonövergången

Neonövergången som ger rött ljus har våglängden 632,8 nm.

1. Hur stor är energiskillnaden mellan nivåerna, i eV?
2. En foton med våglängden 632,8 nm träffar en neonatom i den övre nivån. Vad lämnar atomen, och hur stor är fotonernas sammanlagda energi efteråt?
3. Vad händer om i stället en foton med våglängden 500 nm träffar atomen, räknat bara med den här övergången?

 Lösning
1. Energiskillnaden.

$$E_{ex} - E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{632,8 \text{ nm}} = \boxed{1,96 \text{ eV}}$$

Fysika: Te (hc)

2. Stimulerad emission. Fotonen har rätt energi, så atomen sänder ut en andra foton med samma frekvens

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{632,8 \cdot 10^{-9}} = 4,74 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

och samma riktning, fas och polarisation. Två fotoner lämnar atomen, med sammanlagt

$$2hf = 2 \cdot 1,96 \text{ eV} = \boxed{3,92 \text{ eV}}$$

Den extra energin 1,96 eV kommer från atomen, som hamnar i den lägre nivån.

3. Fel energi. En foton med 500 nm har

$$hf = \frac{1240}{500} \text{ eV} = 2,48 \text{ eV} \neq 1,96 \text{ eV}$$

Den passar inte övergången och kan därför varken stimulera emission eller absorberas i den. Fotonen passerar.

Ej kontrollerat mot facit – två oberoende lösningar stämmer överens.

≡ Exempel – Stimulerad emission mot absorption i jämvikt

En gas med övergången 1,96 eV är i termisk jämvikt. Absorption och stimulerad emission antas vara lika sannolika per atom. Bestäm kvoten mellan takten för stimulerad emission och takten för absorption vid 300 K och vid 3000 K.

 Lösning

Kvoten är populationskvoten. Eftersom takterna är proportionella mot n_{ex} respektive n_g och Boltzmannfaktorn ger populationerna, se **Populationsinversion**:

$$\frac{R_{\text{stim}}}{R_{\text{abs}}} = \frac{n_{ex}}{n_g} = e^{-(E_{ex}-E_g)/k_B T}$$

Vid 300 K. $k_B T = 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 300 = 0,0259$ eV, så

$$\frac{E_{ex} - E_g}{k_B T} = \frac{1,96}{0,0259} = 75,8 \quad \frac{R_{\text{stim}}}{R_{\text{abs}}} = e^{-75,8} \approx \boxed{1,2 \cdot 10^{-33}}$$

Vid 3000 K. $k_B T = 0,259$ eV, så

$$\frac{E_{ex} - E_g}{k_B T} = 7,58 \quad \frac{R_{\text{stim}}}{R_{\text{abs}}} = e^{-7,58} \approx \boxed{5,1 \cdot 10^{-4}}$$

Även vid glödtrådstemperatur absorberas ljuset nästan två tusen gånger oftare än det förstärks.

Ej kontrollerat mot facit — två oberoende lösningar stämmer överens.

Läsning

- 39.4 The Laser