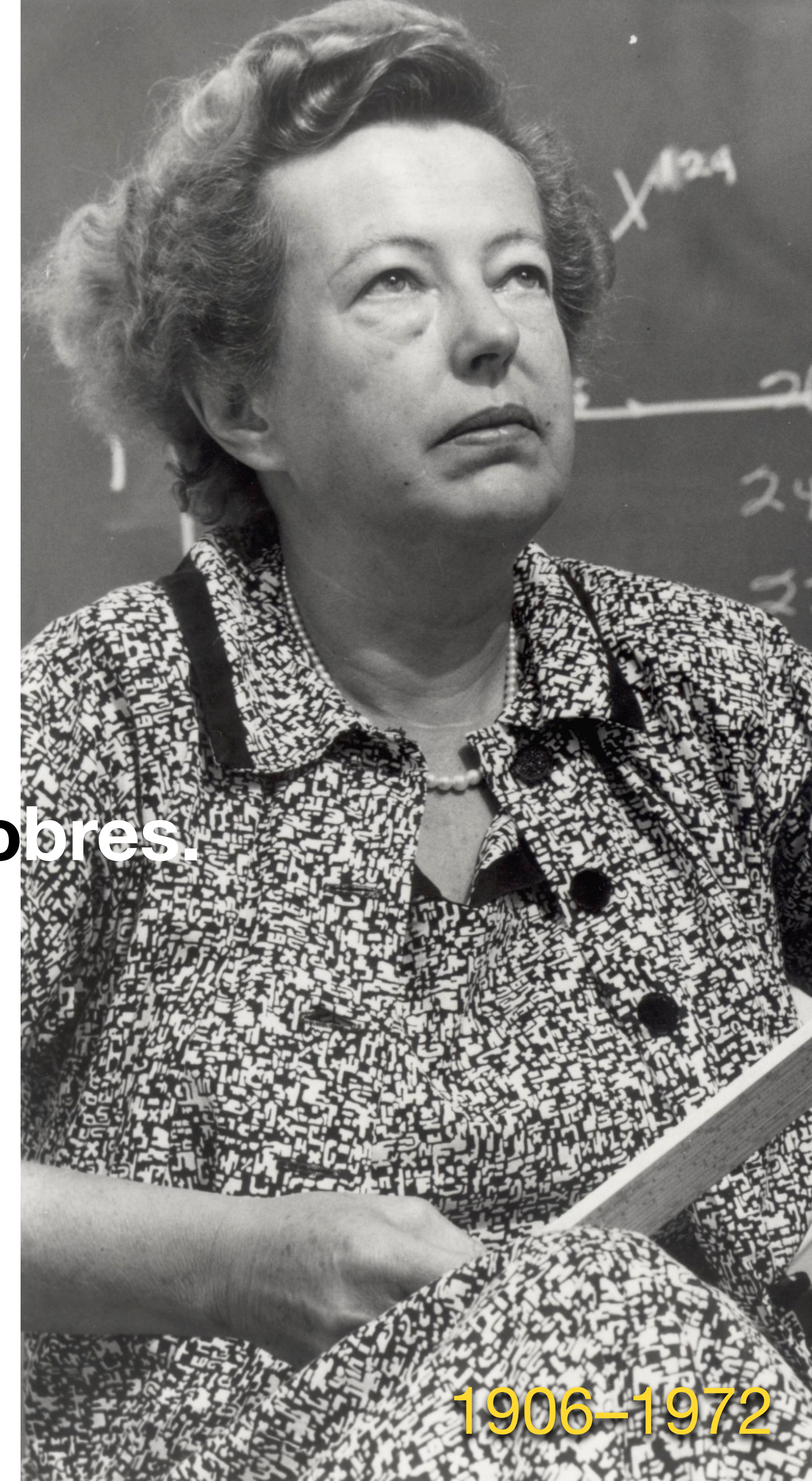


Física — 12.º ano

13 — LASERs. E o princípio da incerteza dos pobres.



José Pedro do Amaral zp.amaral@colegiodestomas.com

1906–1972

**LASER — «Light Amplification by
Stimulated Emission of Radiation»**

Objetivos

- O que é a emissão estimulada?
- Como é que um laser produz luz tão especial?
- Para que serve isso na prática?

- Antes de falar de laser, convém consolidar a base quântica.
- Os átomos e moléculas não podem ter qualquer valor de energia. Têm **níveis de energia discretos**.
- Se um electrão passar de um nível mais energético para um nível menos energético, poderá emitir um fotão com energia:

$$\Delta E = hf$$

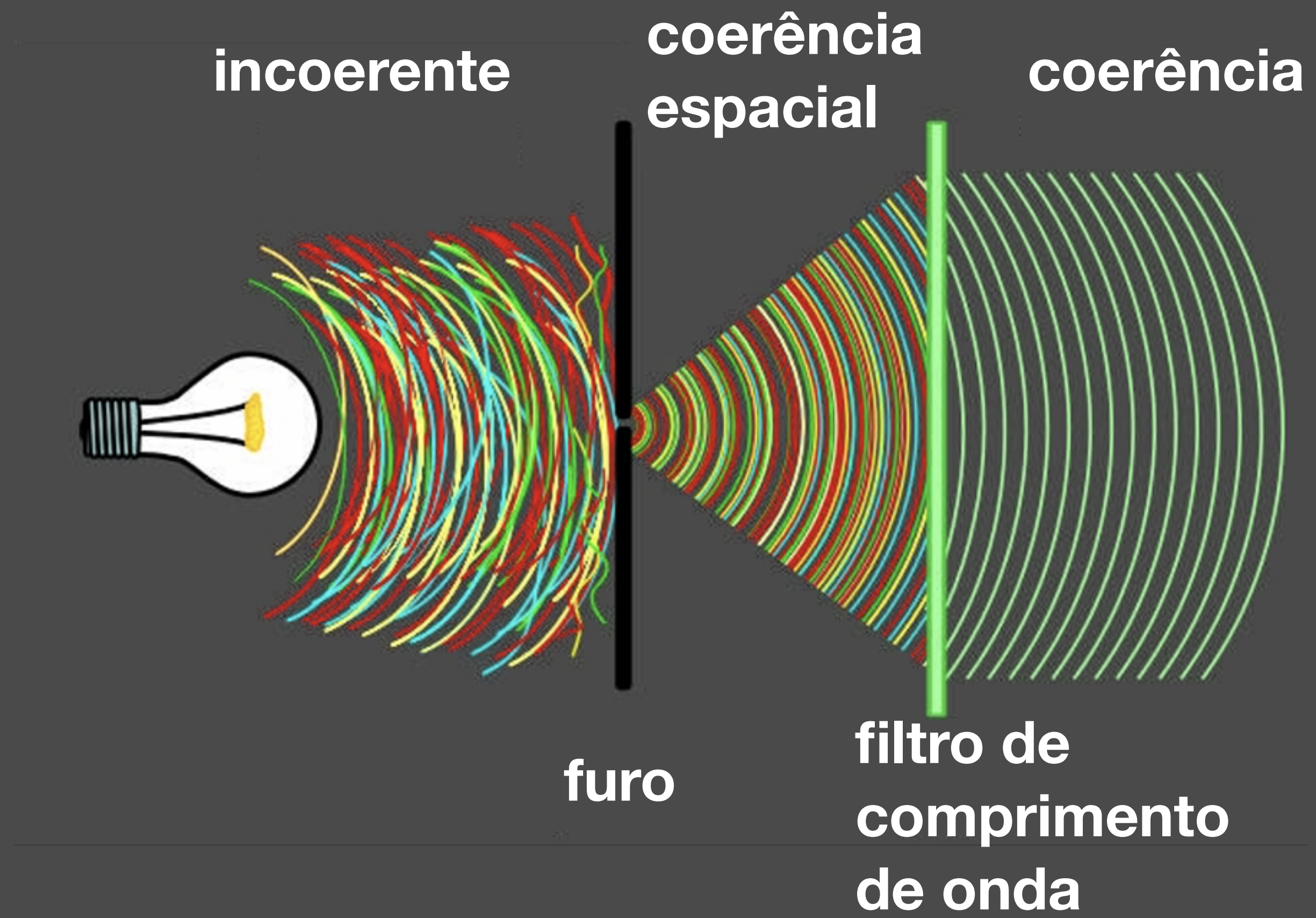
ou

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$$

Emissão espontânea e emissão estimulada

Emissão espontânea

- Um átomo pode estar num estado excitado. Isso significa que tem um electrão num nível de energia superior ao do estado fundamental. Esse átomo pode, ao fim de algum tempo, regressar espontaneamente a um nível inferior, emitindo no processo um fotão. Isto chama-se **emissão espontânea**.
- Características da emissão espontânea: o fotão emitido,
 1. sai num instante imprevisível;
 2. pode sair numa direcção aleatória;
 3. tem fase aleatória em relação aos outros;
 4. contribui para a luz desorganizada.
- A maior parte das fontes de luz correntes funciona assim em larga medida: lâmpadas; chamas e labaredas; Sol; muitas descargas eléctricas.



Emissão espontânea e emissão estimulada

Emissão estimulada

- Na emissão estimulada, a presença de uma onda electromagnética com a frequência certa favorece a transição do átomo excitado para um nível de energia inferior. Ao ocorrer essa transição, o átomo liberta a sua energia reforçando a onda já existente.
- Em termos de fótons, isto significa que, se já havia um fóton nesse modo de radiação, passaria a haver dois.
- O fóton emitido e o fóton incidente têm:
 1. a **mesma frequência**;
 2. a **mesma direcção**;
 3. a **mesma fase**;
 4. e a **mesma polarização**.

Stimulated Emission in a Mirrored Laser Cavity

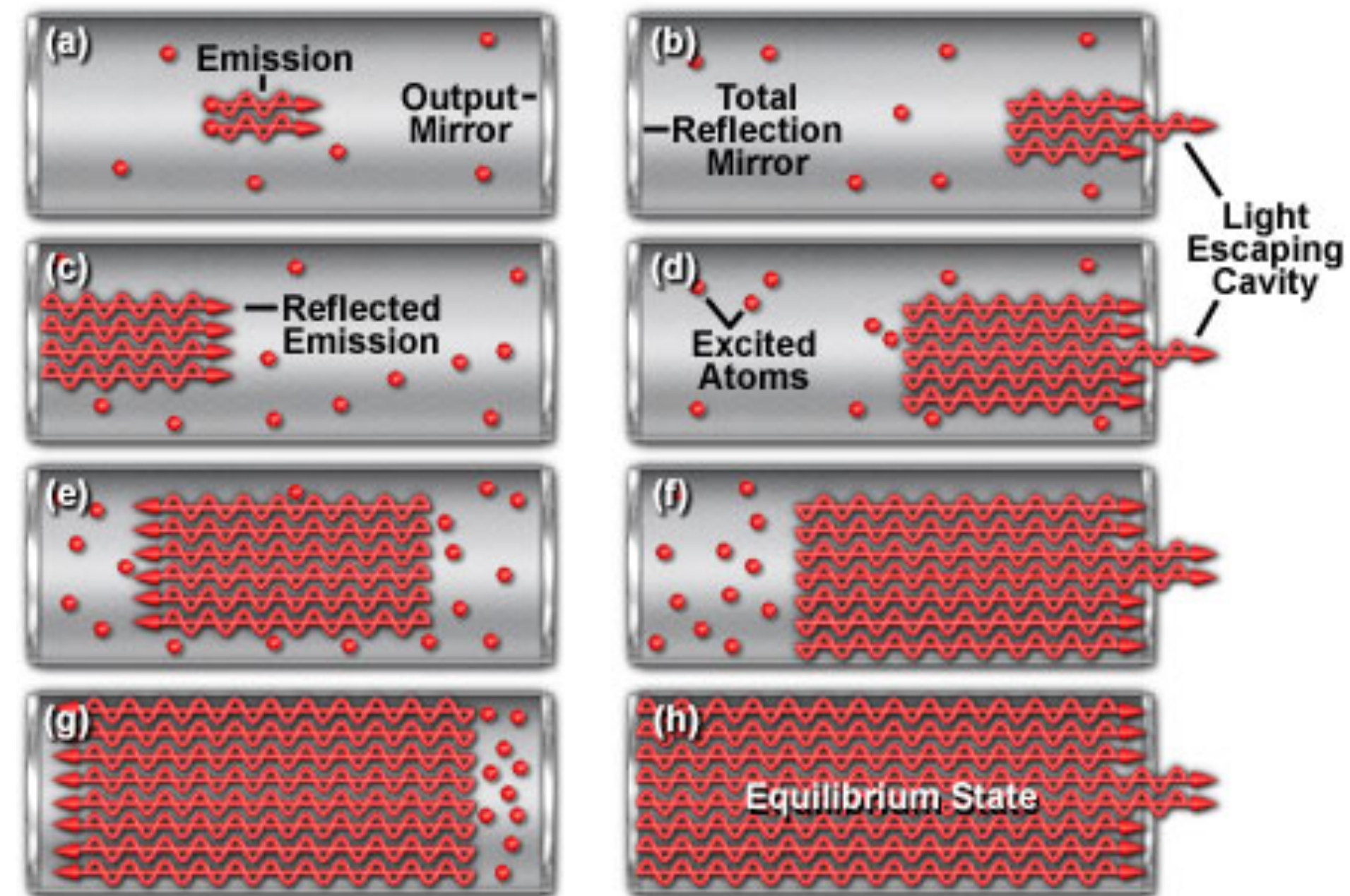
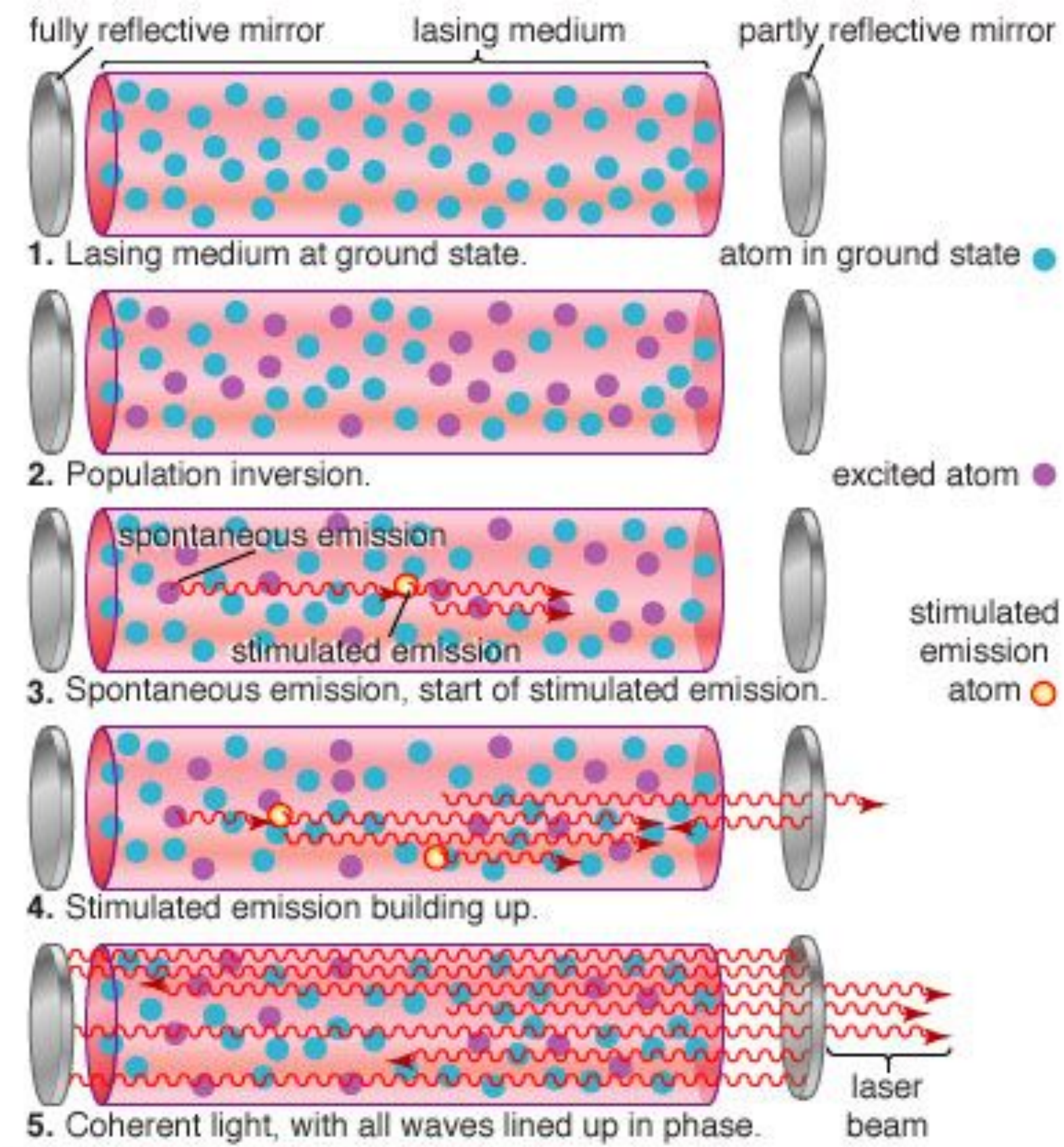


Figure 1



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

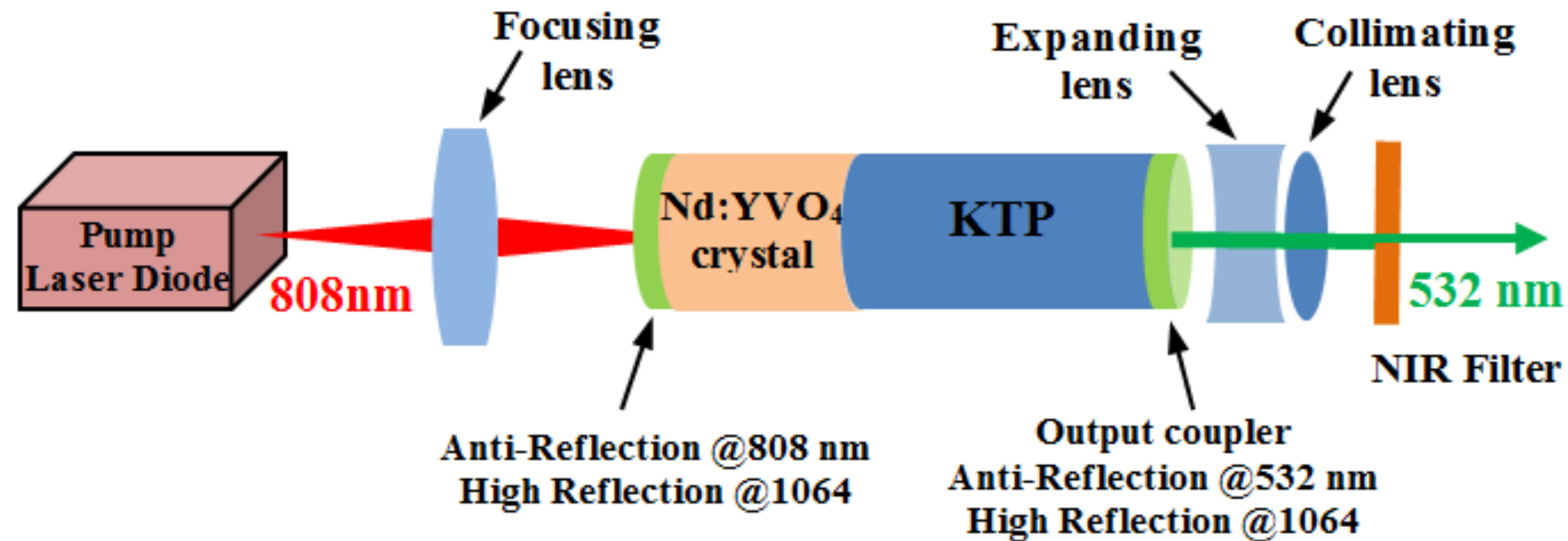
- Frase-chave: *emissão estimulada = um fóton provoca a emissão de outro fóton gêmeo.*
- Consequência: *se houver muitos átomos excitados, um fóton pode desencadear uma cascata:*
- $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow \dots$
- É daqui que vem o conceito de **amplificação da luz**.

O laser

Como funciona?

- Problema fundamental em relação ao que foi descrito anteriormente.
- Se num material houver mais átomos no estado de menor energia do que no estado excitado, a luz que passa tanto poderá estimular emissões como ser absorvida.
- Para haja ganho líquido de luz, terá que haver *mais átomos excitados do que não excitados* num certo par de níveis. A este estado chama-se: **inversão de população**.
- Assim quando há inversão de população haverá uma situação em que há mais partículas num nível excitado do que num nível inferior relevante. Em equilíbrio normal, isso não acontece. Portanto, é preciso forçar o sistema com **bombeamento**.

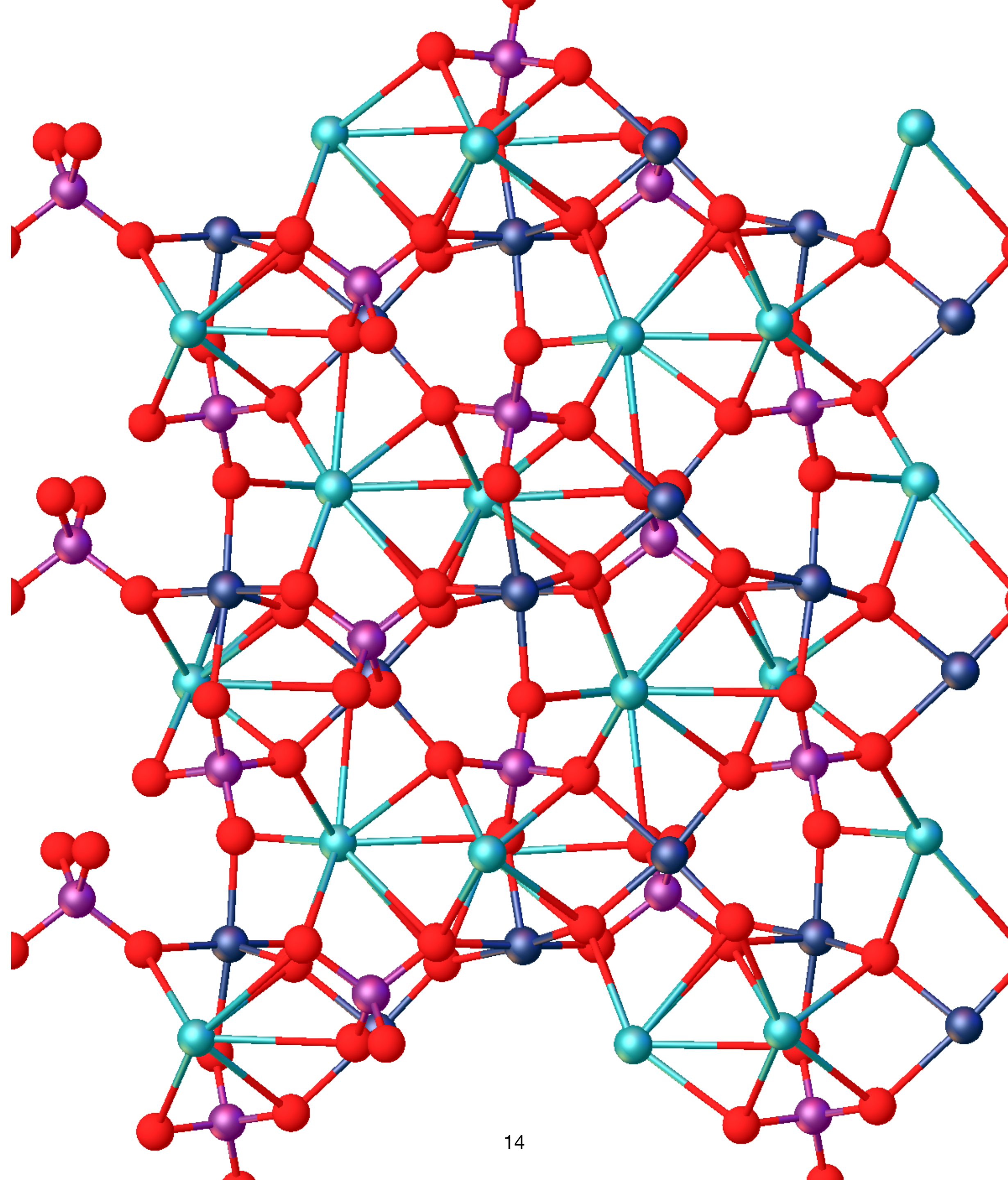
- Bombeamento: para excitar os átomos do meio activo, é necessário fornecer energia.
- O bombeamento pode ser feito por:
 1. descarga eléctrica;
 2. outra fonte luminosa;
 3. reacções químicas;
 4. corrente eléctrica;
 5. outro laser.
- No laser de rubi clássico, uma lâmpada intensa excita os átomos do cristal.



KTP fosfato de titanilo de potássio, cristal *não-linear** usado para duplicação de frequência

Nd:YVO₄ é ortovanadato de ítrio dopado com neodímio

NIR, «near infrared filter», filtra radiação a 808 e 1064 nm



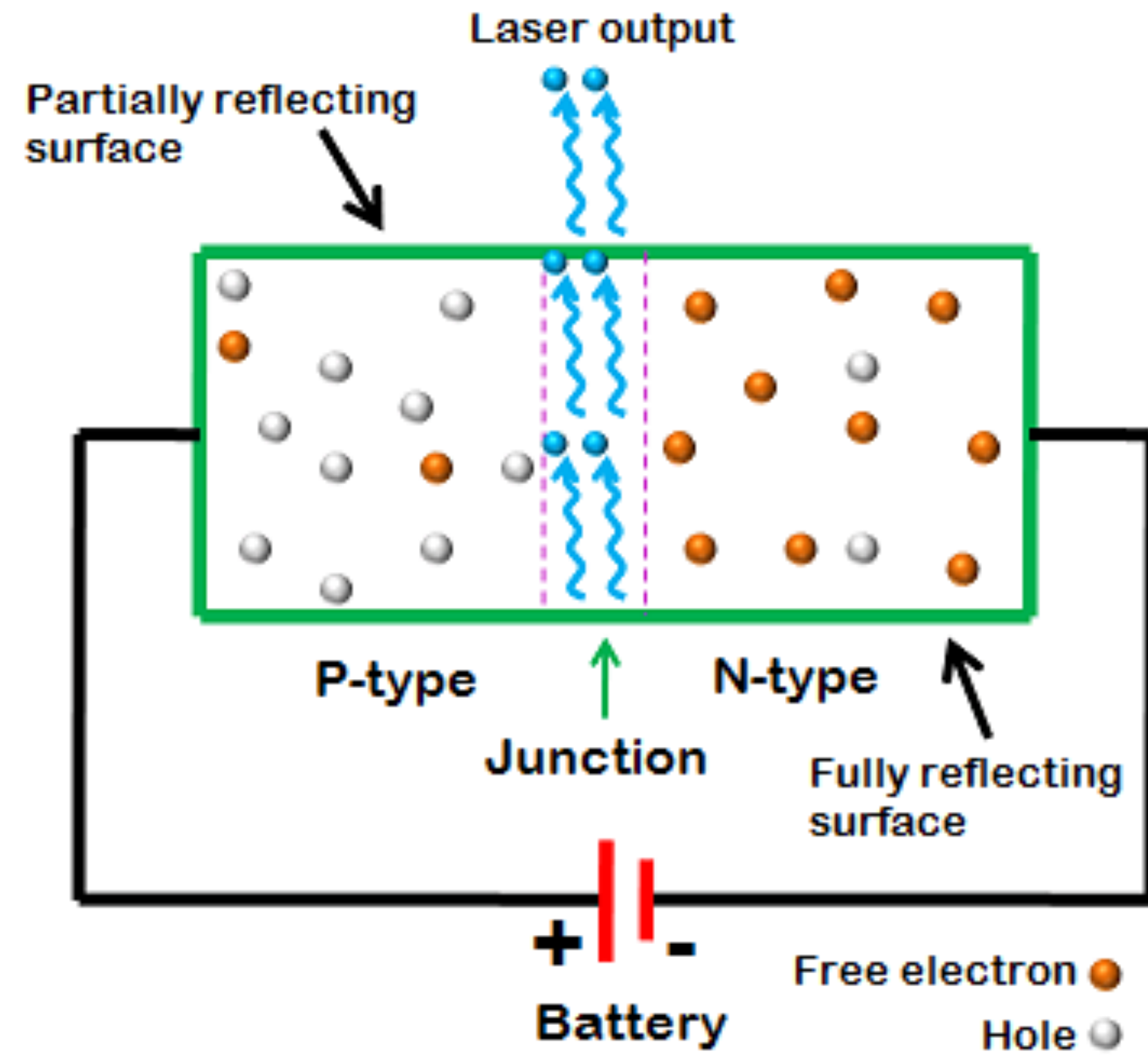
KTP fosfato de titânio
de potássio

Laser de díodo

- Num laser de díodo, o dispositivo é feito a partir de dois semicondutores diferentes na sua dopagem: um material tipo n, rico em electrões livres, e um material tipo p, rico em lacunas, que são ausências de electrões e se comportam como cargas positivas móveis. Quando estes dois materiais são postos em contacto, forma-se uma junção p-n.
- Se se aplicar uma tensão no sentido directo, os electrões do lado n e as lacunas do lado p são forçados a deslocar-se para uma zona comum, chamada região activa. Aí, electrões e lacunas encontram-se e recombina-se. Nessa recombinação, a energia libertada pode surgir sob a forma de fotões. Quando isso acontece, fala-se de **recombinação radiativa**. Se os fotões produzidos atravessarem um meio adequado, podem estimular novas recombinações radiativas idênticas, produzindo mais fotões com a mesma energia, fase e direcção. Esse processo chama-se **emissão estimulada** e é a base do funcionamento do laser.

- Nos díodos laser modernos, a região activa é frequentemente extremamente fina e pode constituir um *poço quântico*, isto é, uma camada tão delgada que confina electrões e lacunas numa pequena espessura, aumentando a probabilidade de recombinação radiativa e melhorando a eficiência do dispositivo. Além do confinamento dos portadores eléctricos, a estrutura também confina a própria luz.
- As duas faces extremas do cristal, geralmente obtidas por clivagem do material, funcionam como espelhos parciais. Entre elas forma-se uma cavidade óptica, dentro da qual a luz se reflecte repetidamente, sendo amplificada a cada passagem pela região activa. Uma parte dessa luz acaba por sair por uma das faces, constituindo o feixe laser.

- Assim, os elementos fundamentais de um laser de díodo são: a camada tipo p, a camada tipo n, a região activa onde a luz é gerada, os contactos eléctricos que permitem injectar corrente, e a cavidade óptica que selecciona e amplifica a radiação. O papel essencial dos materiais p e n é fornecer os portadores eléctricos cuja recombinação dá origem à luz laser.



Laser diode

Physics and Radio-Electronics

Óptica não-linear*

Óptica não-linear (NLO) é um ramo da óptica que estuda o caso quando as propriedades ópticas da matéria dependem da intensidade da fonte luminosa.

Alguns exemplos de óptica não-linear

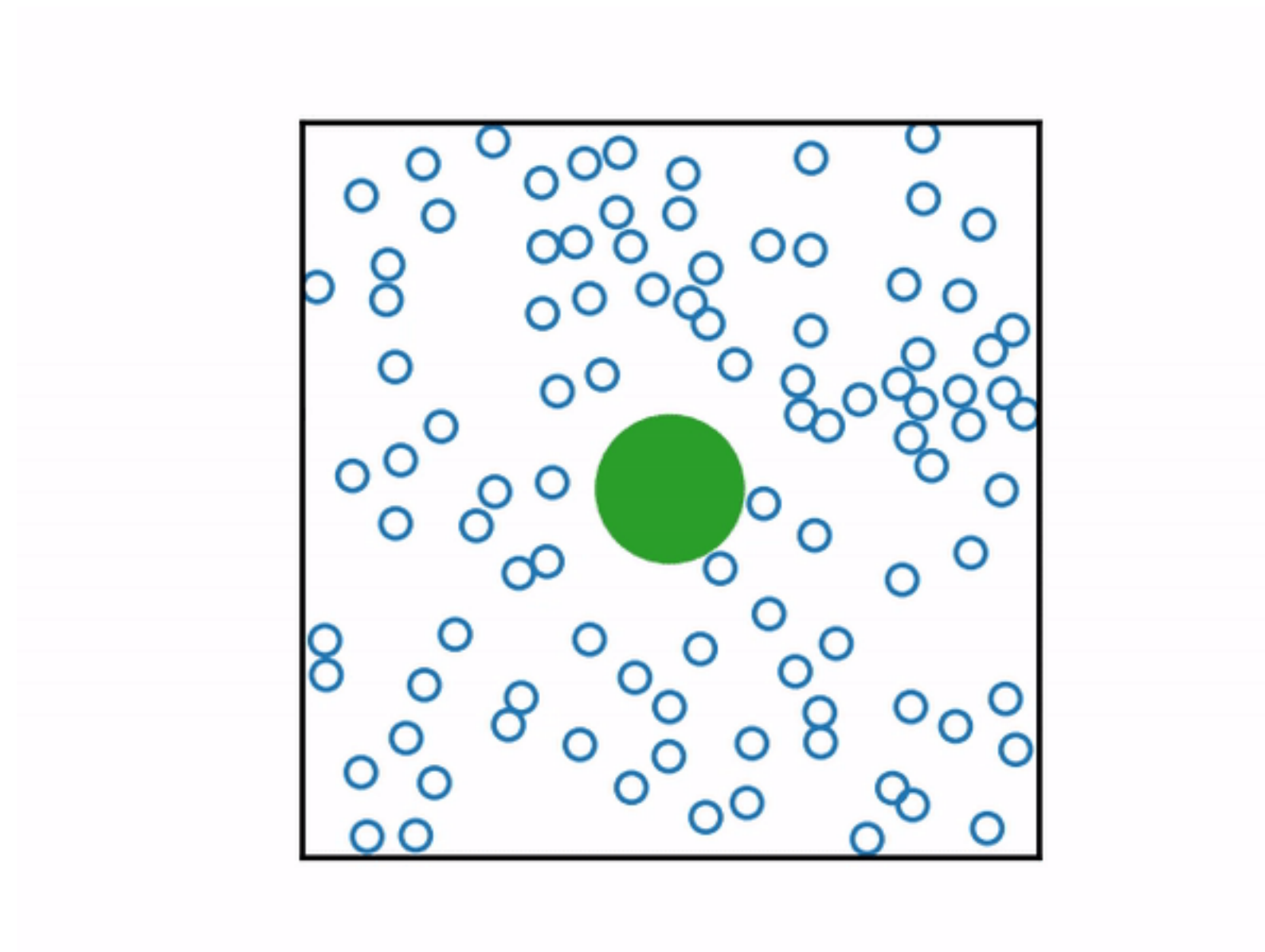
Geração de segunda harmónica (SHG)	duplicação de frequência (metade do comprimento de onda)	dois fótons destruídos; um criado com frequência duplicada
Geração de terceira harmónica (THG)	triplicação de frequência (um terço do comprimento de onda)	três fótons destruídos; um criado com frequência triplicada
Geração de harmónica elevada (HHG)	geração de frequências de luz muito superiores à original	tipicamente entre 100–1000 vezes
Geração de soma de frequências (SFG)	geração de luz cuja frequência é o somatório de duas outras frequências	dois fótons destruídos (de frequências distintas); um criado com as frequências somadas
Geração de diferença de frequências (DFG)	geração de luz cuja frequência é a diferença entre duas outras frequências	um fóton de maior frequência destruído; dois fótons criados: um à frequência de diferença, outro idêntico ao fóton de menor frequência

Aplicações práticas

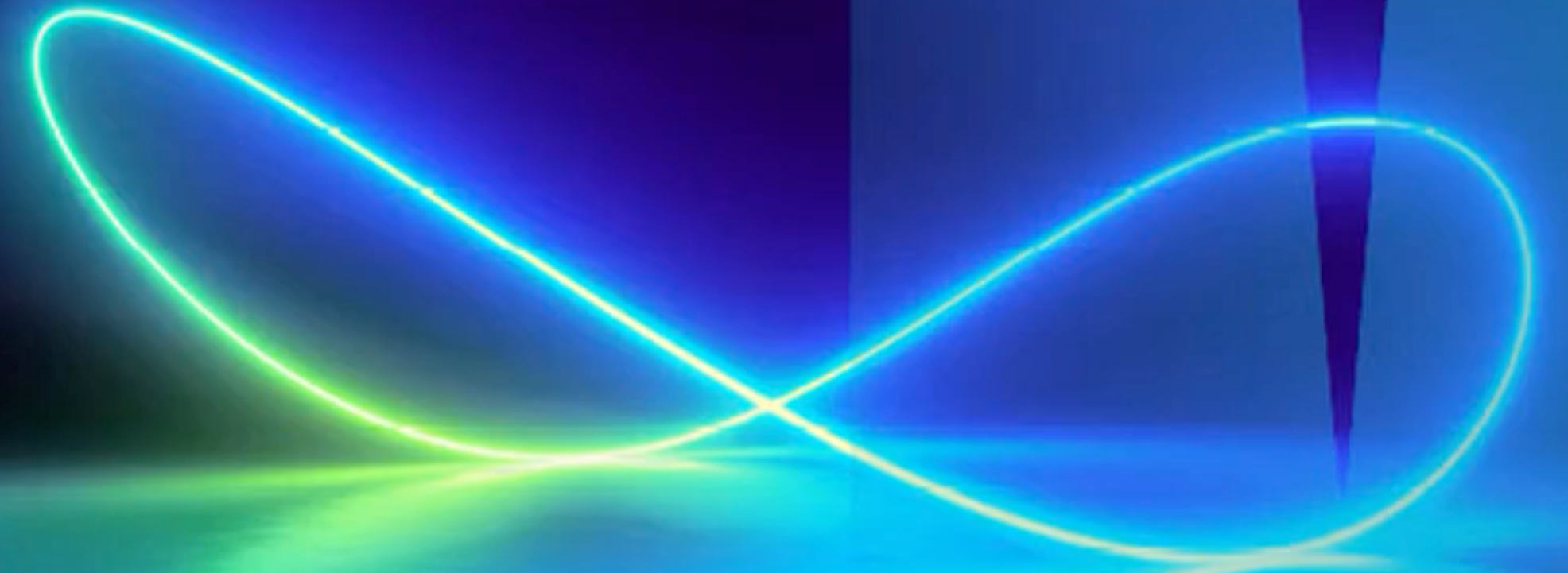








movimento browniano





Princípio da incerteza (dos pobres)





DONNIE DARKO



$$a_0 \approx 5,29 \times 10^{-11} m$$

$$V \sim \frac{4}{3} \pi a_0^3 \approx 6,2 \times 10^{-31} m^3$$

$$v \sim \alpha c \approx 2,2 \times 10^6 m/s \quad \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

$$\dot{V} \sim \pi r^2 v$$

$$t \sim \frac{V}{\pi r^2 v} \quad t \sim \frac{4a_0^3}{3r^2 v}$$

$$r \approx 2,82 \times 10^{-15} m \Rightarrow t \sim 11,4 \times 10^{-9} s$$

**8,77193 x 10⁷ volumes por
segundo**