

Advanced Laser and Photon Science レーザー・光量子科学特論E

Laser fundamentals レーザーの基礎

Kenichi Ishikawa (石川顕一)

<http://ishiken.free.fr/english/lecture.html>

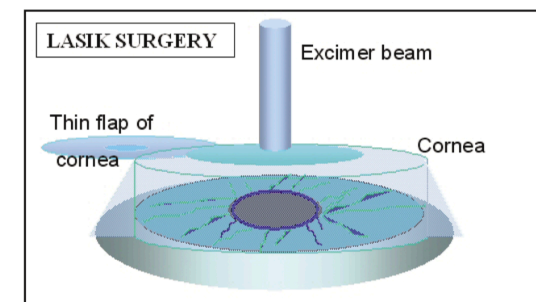
ishiken@n.t.u-tokyo.ac.jp



Laser : the greatest invention of the 20th century

レーザー：「20世紀最大の発明」

- Industrial, daily life
 - Laser processing (e.g. smart phone) レーザー加工 (スマホ等)
 - CPU (Lithography リソグラフィー)
 - CD, DVD, Blu-ray, Copy machine
 - Optical communication 光通信
 - 3D sensing, autonomous car 3Dセンシング、自動運転
- Medical
 - Hernia treatment, dental treatment, Laser scalpel, cancer therapy
腰痛の治療、歯科治療、手術(レーザーメス)、がん治療
 - LASIK レーシック、birthmark removal
あざ・しみ治療、hair removal 脱毛
 - Baby gender selection 子供の生み分け (性別)



Laser-related Nobel laureates

レーザー関連のノーベル賞

- Townes, Basov, Prokhorov (1964-Physics) invention of laser
- Gabor(1971-Physics) invention and development of holography
- Bloembergen, Schawlow (1981-Physics) laser spectroscopy
- Kroto, Curl, Smalley (1996-Chemistry) fullerenes
- Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips (1997-Physics) cool and trap atoms with laser light
- Zewail(1999-Chemistry) femtosecond chemistry
- Wieman, Ketterle, Cornell (2001-Physics) Bose-Einstein condensation
- Tanaka, Fenn (2002-Chemistry) mass spectrometric analyses of biological macromolecules
- Glauber (2005-Physics) quantum theory of optical coherence
- Hall, Hänsch (2005-Physics) optical frequency comb
- Kao (2009-Physics) optical fiber
- Haroche, Wineland (2012-Physics) cavity QED
- Akasaki, Amano, Nakamura(2014-Physics) blue LED
- Betzig, Hell, Moerner (2014-Chemistry) super-resolved fluorescence microscopy
- Weiss, Barish, Thorne (2017-Physics) observation of gravitational waves
- Ashkin, Mourou, Strickland (2018-Physics) optical tweezers, high-intensity, ultra-short optical pulses



Laser is omnipresent from basic science to our daily life.

レーザーの応用は基礎研究から日常生活までのすみずみにまで行き渡っている。

Unique properties of a laser

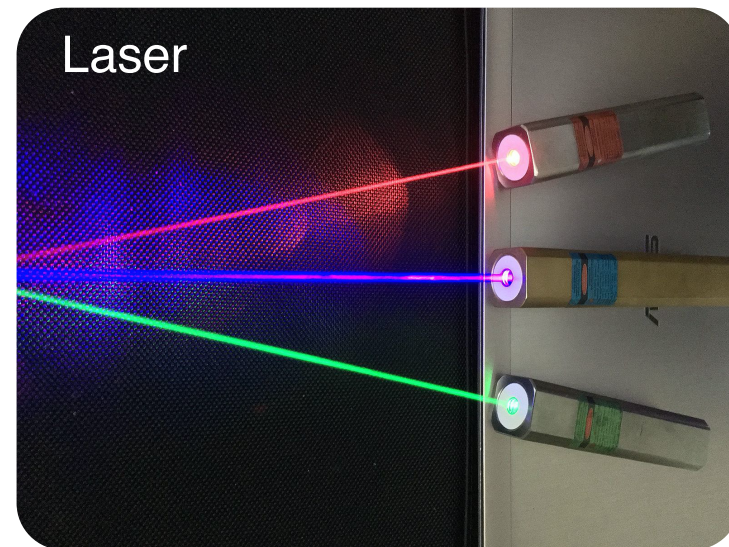
レーザーの特徴

- Directionality 指向性
- Monochromaticity 単色性



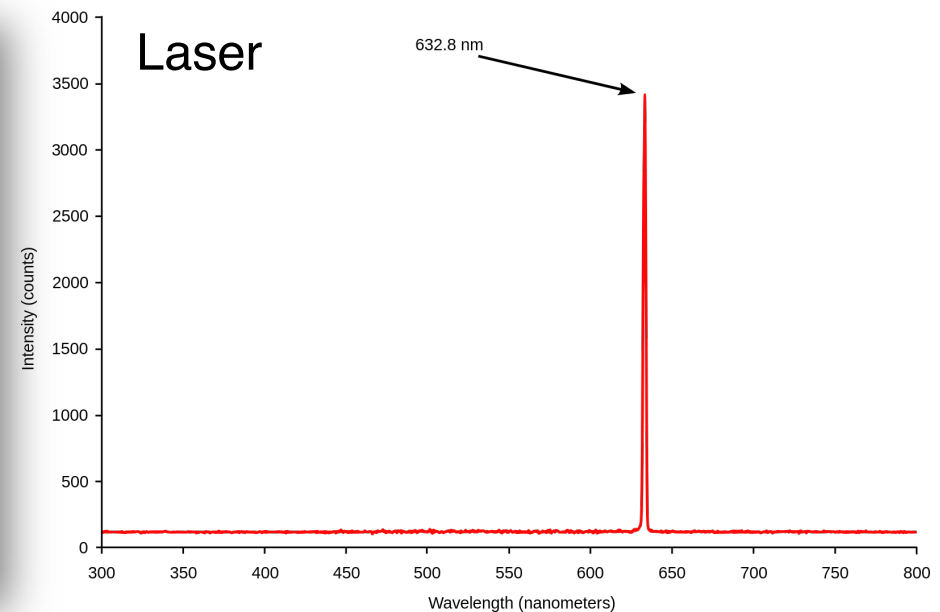
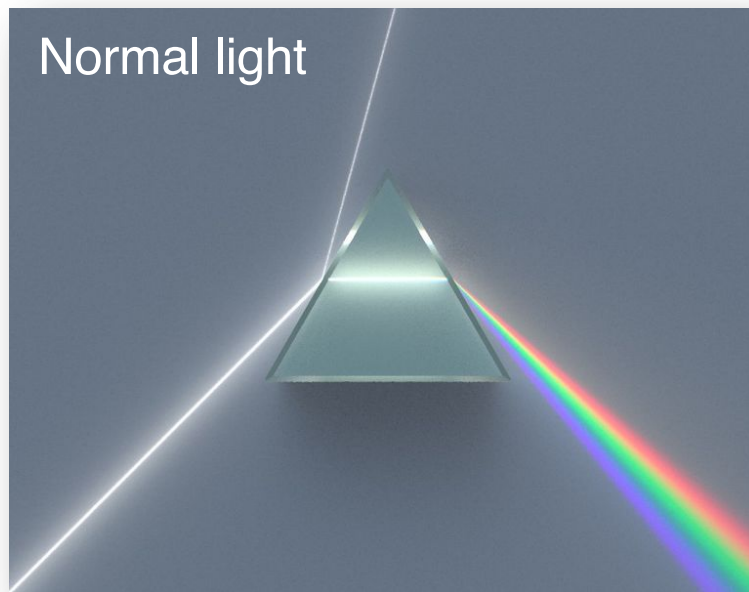
Directionality 指向性

- Laser light propagates straight with very little divergence.
- The laser energy is not lost during propagation.
- Easy to focus onto a small area with a simple lens.
- レーザー光は、細いビームになっていて、反射や屈折をさせない限り、ほとんど一直線に特定の方向のみへ進む。（平行光線）



Monochromaticity 単色性

- Laser light has a single frequency or wavelength (pure color).
- 各種のレーザー光は、それぞれある特定の波長のみを含み、その波長は時間的に一定である。

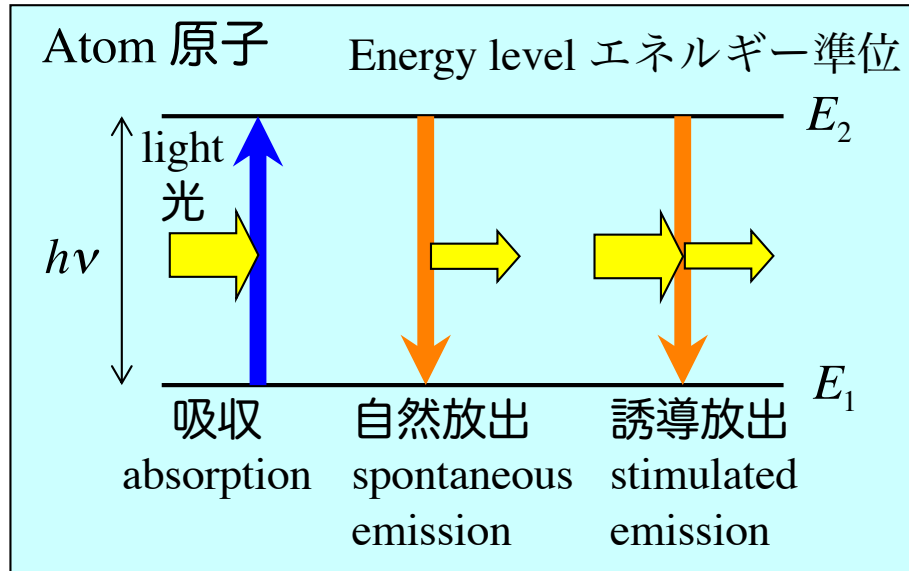


How come?



Absorption and emission of light 光の吸収と放出

Einstein アインシュタイン(1916年)



Bohr's condition ボーアの条件

$$h\nu = E_2 - E_1$$

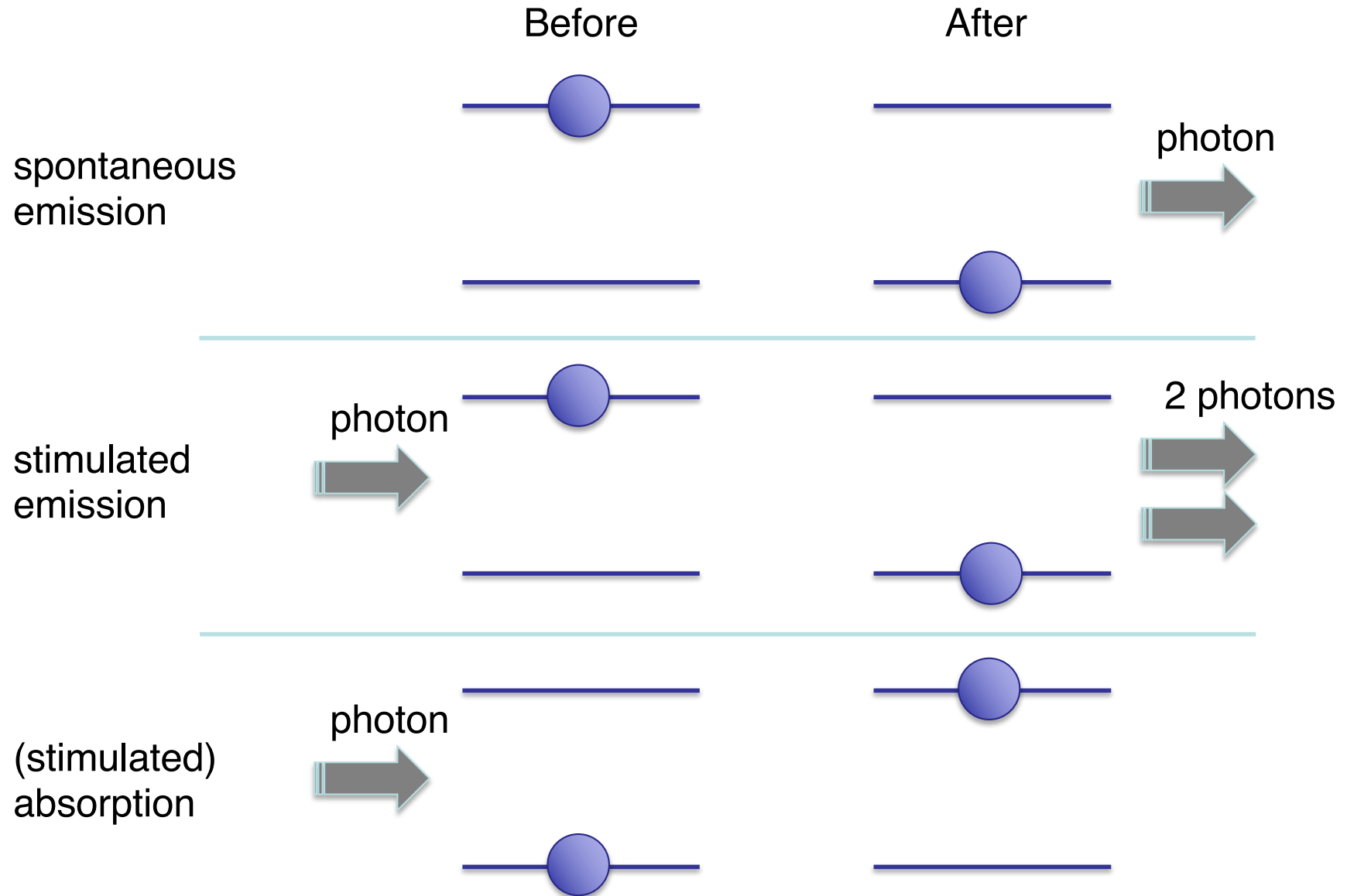
ν frequency 振動数

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Planck constant
プランク定数

Emission of light (photon) upon transition to a lower level 上の準位にある原子が下の準位に遷移する時、光を放出する。

- Spontaneous emission 自然放出: happens without an incident light 入射光がなくても起こる。
- Stimulated emission 誘導放出: emits a photon induced by the incident light 入射光につられて、光を放出する。



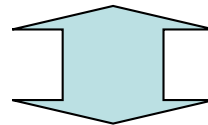
How is the laser different from the other light sources? レーザーとは

レーザー Laser

Light Amplification by **Stimulated Emission** of **Radiation**

= 誘導放出による光の増幅

➡ highly directional, high-intensity, very pure wavelength
光の波長・位相・方向・偏光がそろっている。



他の光源（太陽、電球、蛍光灯、蛍など） All the others (sun, light bulb, fluorescent lamp, firefly, ...)

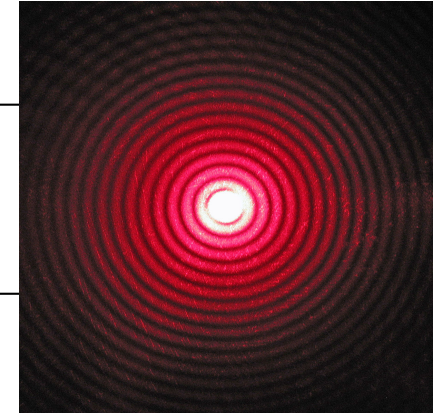
by spontaneous emission 自然放出を利用

➡ diverse direction and wavelength, low-intensity
光の波長・位相・方向・偏光はばらばら。

コヒーレンス Coherence

Unique properties of a laser レーザーの特徴

Directionality & monochromaticity
指向性・単色性



Classical electromagnetic wave 古典的電磁波

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - i\omega t + i\phi}$$

Polarization 偏光
Frequency (wavelength) 振動数 (→波長)
Direction 方向
Phase 位相

Laser is an ideal classical electromagnetic wave!
レーザーは理想的な古典的電磁波！

Wavelength regions 光の波長領域

電磁波は、波長によって次の表のようなスペクトル領域に分類できる。

	Wavelength 波長 (nm)
Hard X-ray 硬エックス線	< 1
Soft X-ray 軟エックス線	1~30
Extreme ultraviolet 極端紫外(XUV)	10~100
Vacuum ultraviolet 真空紫外(VUV)	100~200
Violet 紫外 (UV)	200~400
Visible 可視光	400~780
Near infrared 近赤外	780~1000
Middle infrared 中赤外	1000~10000
Far infrared 遠赤外	10000~1000000



Typical laser systems 代表的なレーザーシステム

レーザーのタイプ	波長	パルス幅
Argon ion/アルゴンイオン	488/514 nm	CW/連続
Krypton ion/クリプトンイオン	531/568/647 nm	CW/連続
He-Ne/ヘリウムネオン	633 nm	CW/連続
CO ₂	10.6 μ m	CW or pulse/連続またはパルス
Dye/色素	450 nm – 900 nm	CW or pulse/連続またはパルス
Diode/半導体 (ダイオード)	650 nm – 900 nm	CW or pulse/連続またはパルス
Ruby/ルビー	694 nm	1 – 250 μ s
Nd:YLF	1053 nm	100 ns – 250 μ s
Nd:YAG	1064 nm	100 ns – 250 μ s
Ho:YAG	2120 nm	100 ns – 250 μ s
Ho:YSGG	2780 nm	100 ns – 250 μ s
Er:YAG	2940 nm	100 ns – 250 μ s
Alexandrite/アレキサンドライト	720 nm	50 – 100 μ s
XeCl	308 nm	20 – 300 ns
XeF	351 nm	10 – 20 ns
KrF	248 nm	10 – 20 ns
ArF	193 nm	10 – 20 ns
Nd:YLF	1053 nm	30 – 100 ps
Nd:YAG	1064 nm	30 – 100 ps
Ti:Sapphire/チタンサファイア	700 nm – 1000 nm	5 fs – 100 ps

Continuous wave laser
連続波(CW)レーザー

Pulse laser
パルスレーザー

Short pulse laser
短パルスレーザー

超短パルスレーザー Ultrashort pulse laser

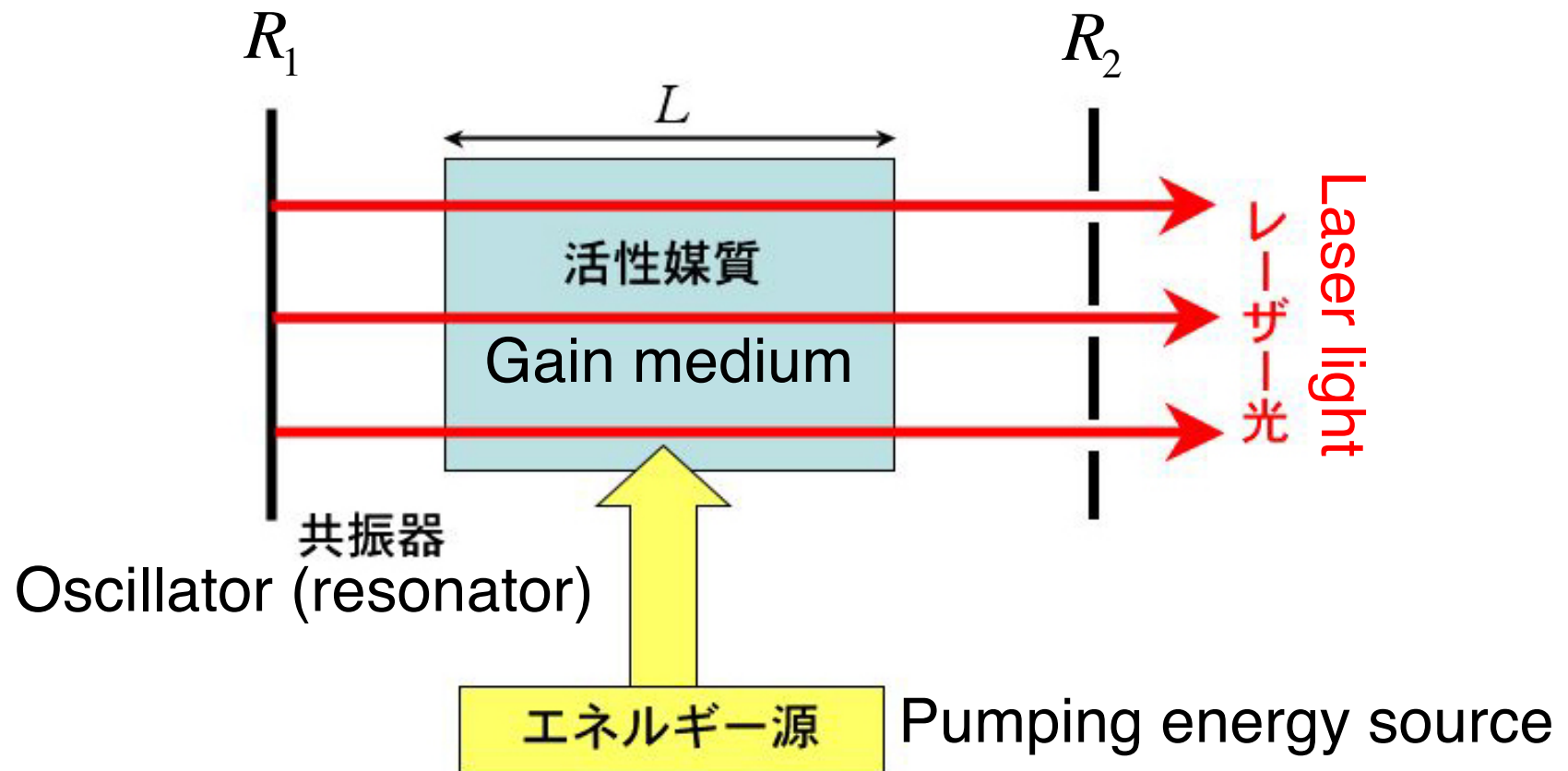


Principles of a laser レーザーの動作原理

参考書 (Reference): W. T. Silfvast, “Laser Fundamentals”



Basic structure of a laser レーザーの構造



Einstein A and B coefficients (1916)

アインシュタインの A , B 係数の理論(1916年)

Temporal evolution of population density N_1 and N_2 占位数密度 N_1, N_2 の時間変化

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt} = N_2 A - N_1 B_{12} W + N_2 B_{21} W$$

Thermal equilibrium (T)
熱平衡状態 (温度 T)

$$N_2 A - N_1 B_{12} W + N_2 B_{21} W = 0$$

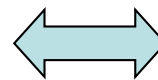
$$\Rightarrow W = \frac{A}{(N_1/N_2) B_{12} - B_{21}}$$

Boltzmann distribution ボルツマン分布

$$N_1/N_2 = \exp[(E_2 - E_1)/k_B T] = \exp[\hbar\omega/k_B T]$$

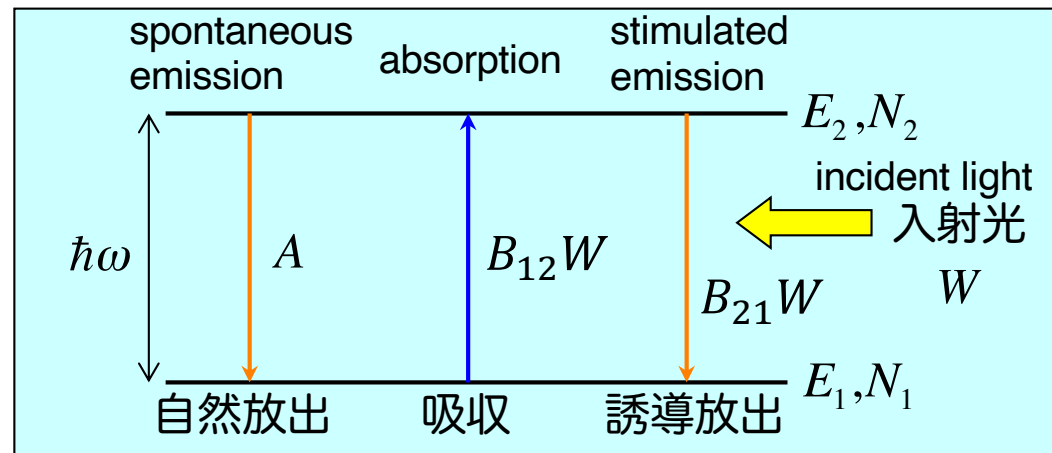
Planck's law for cavity radiation
プランクの黒体放射の法則

$$W(\omega) = \frac{A}{\exp[\hbar\omega/k_B T] B_{12} - B_{21}}$$

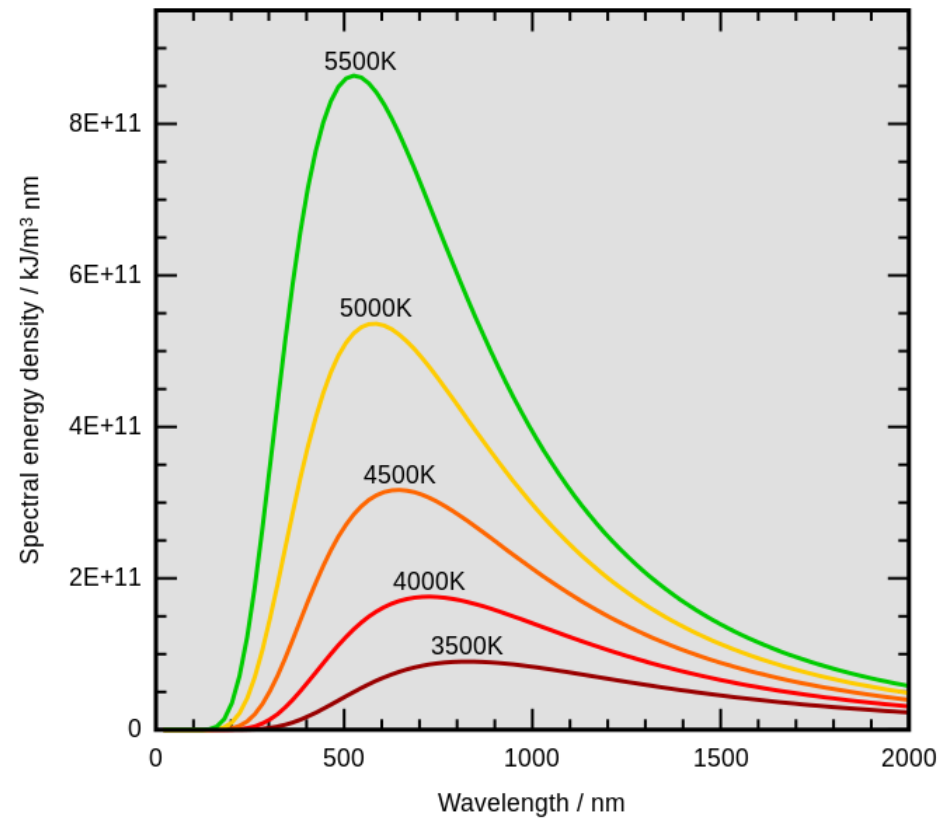


$$W_p(\omega) = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp[\hbar\omega/k_B T] - 1}$$

$$B_{12} = B_{21} \quad \text{および} \quad A = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B_{21}$$



Cavity (black body) radiation 黒体放射



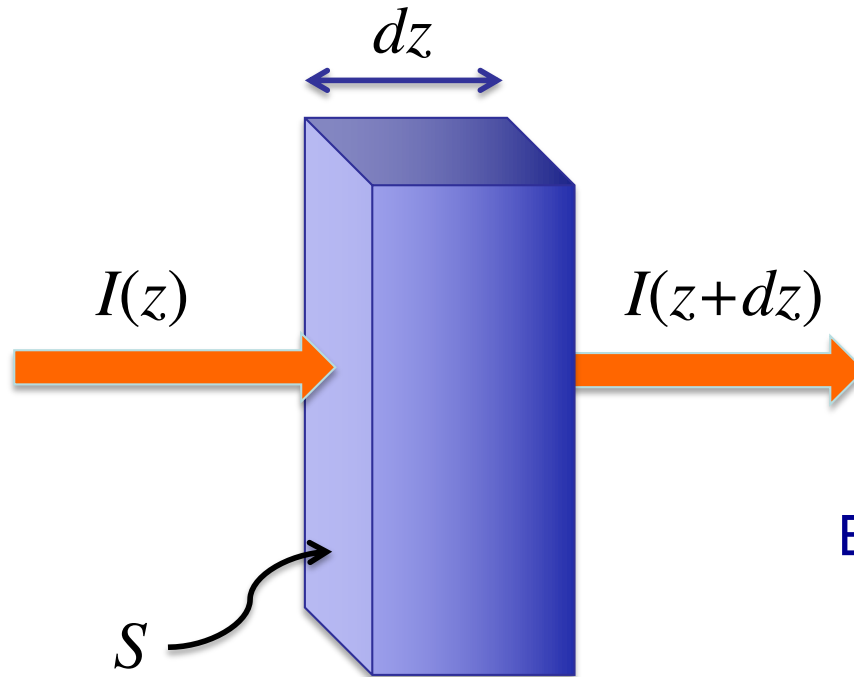
Conditions for producing a laser

レーザーが動作するための条件

- Population inversion 反転分布
- Saturation intensity 飽和強度
- Net gain per round trip/Lasing
発振



Gain ゲイン (利得)



$$\frac{dI}{dz} = \frac{B(N_2 - N_1)\hbar\omega}{c} I$$



Extended Lambert-Beer law

$$I(z) = I_0 e^{gz} = I_0 e^{\sigma(N_2 - N_1)z}$$

Gain coefficient

$$g = \frac{B(N_2 - N_1)\hbar\omega}{c}$$

$$\sigma = \frac{B\hbar\omega}{c}$$

Stimulated emission cross section for a variety of lasers

Laser	$\lambda(\text{nm})$	$\sigma(\text{m}^{-2})$
He-Ne	632.8	3.0×10^{-17}
Argon	488.0	2.5×10^{-16}
He-Cd	441.6	9.0×10^{-18}
Copper (CVL)	510.5	8.6×10^{-18}
CO ₂	10,600.0	3.0×10^{-22}
Excimer	248.0	2.6×10^{-20}
Dye (Rh6G)	577.0	2.5×10^{-20}
Semiconductor	800.0	1.0×10^{-22}
Nd:YAG	1064.1	6.5×10^{-23}
Nd:Glass	1062.3	3.0×10^{-24}
Ti:Sapphire	800.0	3.4×10^{-23}
Cr:LiSrAlF	850.0	4.8×10^{-24}



from W. T. Silfvast, “Laser Fundamentals”

反転分布 Population inversion

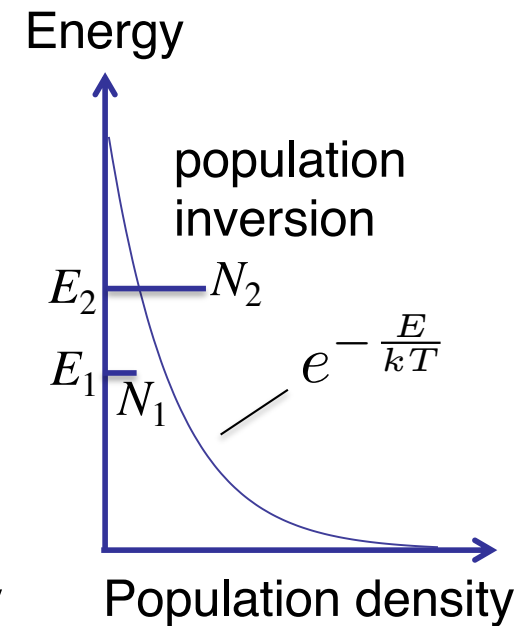
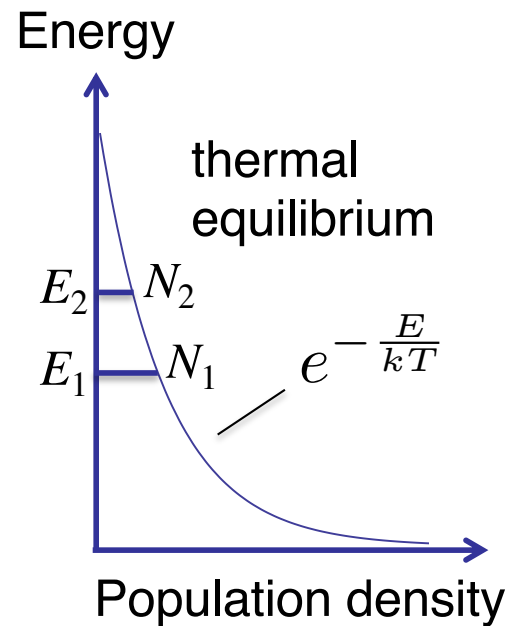
$$I(z) > I_0 \quad \text{for } z > 0 \quad \longrightarrow \quad N_2 > N_1 \quad \text{a necessary condition}$$

Stimulated emission > absorption

誘導放出 > 吸収

At thermal equilibrium
一方、熱平衡では

$$N_2 = N_1 \exp[-\hbar\omega/k_B T] \ll N_1$$

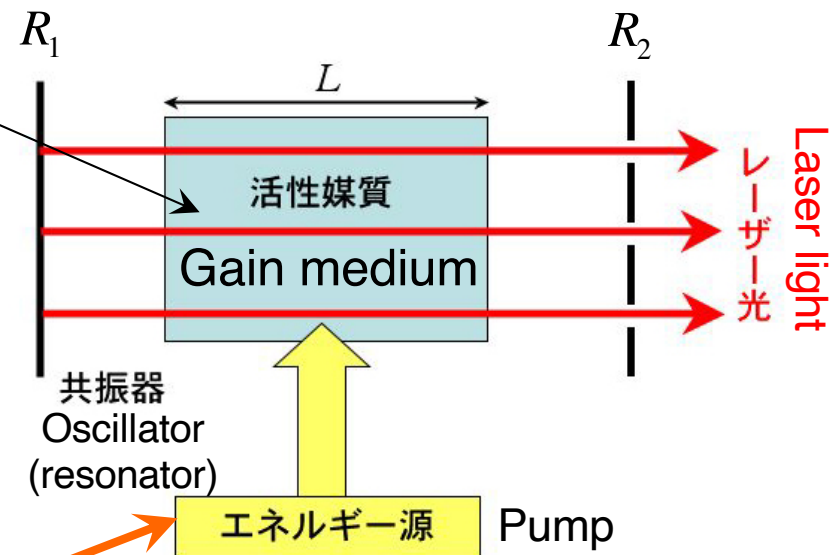


反転分布 Population inversion

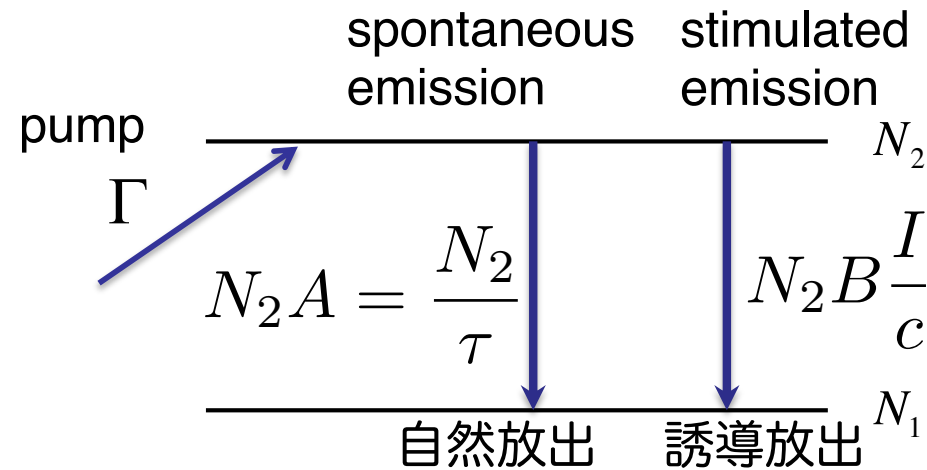
- Solid, liquid, gas 固体・液体・気体
- Plasma プラズマ
- Free electron 自由電子

Pumping energy source is necessary.
励起エネルギー源が必要

- Flash lamp フラッシュランプ
- LED 発光ダイオード
- Gas discharge ガス放電
- Electric current 電流
- Chemical reaction 化学反応
- Another laser, レーザー



Saturation intensity 飽和強度



steady state

$$\frac{dN_2}{dt} = \Gamma - N_2 \left(\frac{1}{\tau} + \frac{BI}{c} \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad N_2 = \frac{\Gamma}{\frac{1}{\tau} + \frac{BI}{c}}$$

Saturation intensity 飽和強度

stimulated emission (誘導放出) > spontaneous emission (自然放出)

$$I_{\text{sat}} = \frac{c}{B\tau} = \frac{\hbar\omega}{\sigma\tau} \quad \sigma = \frac{B\hbar\omega}{c}$$

sufficient condition

saturation length

empirically

$$gL_{\text{sat}} = \sigma(N_2 - N_1)L_{\text{sat}} \cong 12 \pm 5$$

$$e^{gL_{\text{sat}}} \sim 10^5$$



example: He-Ne laser

$$gL_{\text{sat}} = \sigma(N_2 - N_1)L_{\text{sat}} \cong 12 \pm 5$$

$$g = 0.15 \text{ m}^{-1} \quad \longrightarrow \quad L_{\text{sat}} \sim 80 \text{ m} !$$

$$L = 0.2 \text{ m} \quad \xrightarrow{\text{one path}} \quad e^{gL} \cong 1.03$$

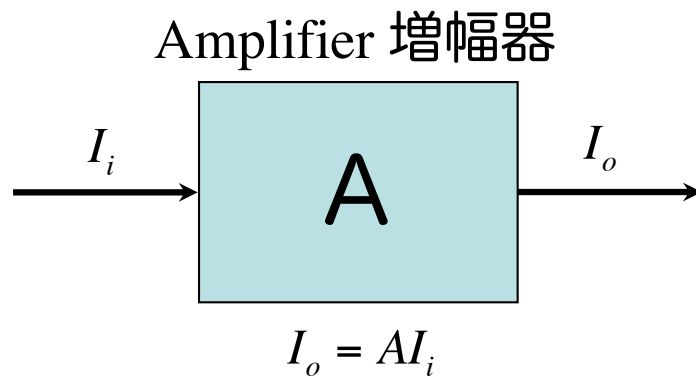
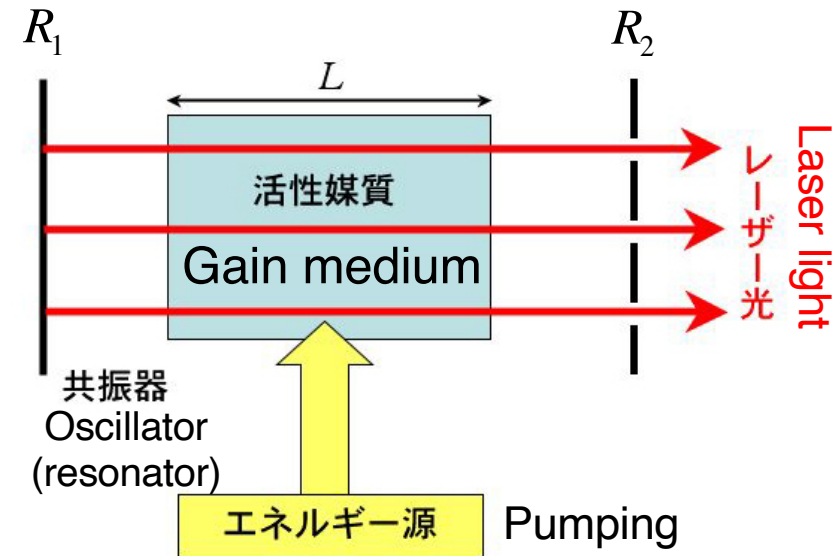
amplification by one path is small in general

$$\frac{L_{\text{sat}}}{L} \sim 400 \text{ paths} \quad \text{is necessary}$$

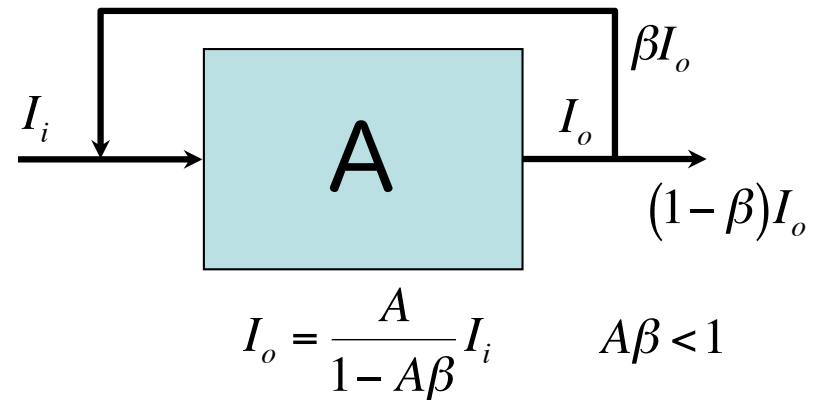


発振 Oscillation (lasing) in a resonator

The gain medium is put in a cavity (resonator) with two flat mirrors for lasing. レーザー光を発生するために、一般に活性媒質は一組の向かい合ったミラーからなる共振器の中に置かれる。

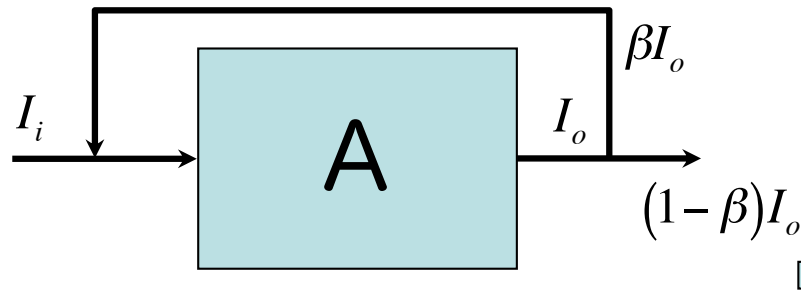


Feedback amplifier フィードバック増幅器



Net gain per round trip

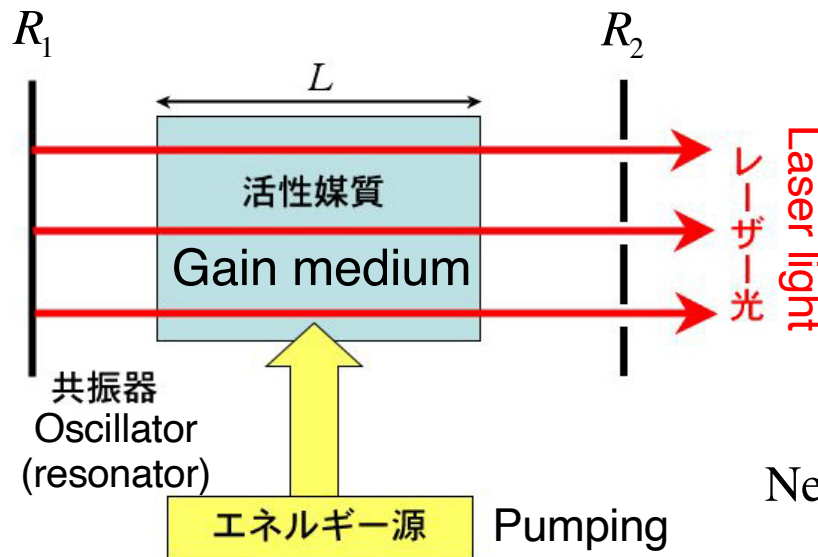
Feedback amplifier フィードバック増幅器



$$I_o = \frac{A}{1 - A\beta} I_i$$

$A\beta = 1 \Rightarrow$ Infinite amplification
増幅率無限大

Oscillation (lasing) without an incident light (seeded by spontaneous emission) 入射光がなくても、自然放出を種にして大きな出力が得られる(発振)。



Lasing condition 定常的なレーザー発振の条件

$$\underbrace{\exp[2(g - a)L]}_A \underbrace{R_1 R_2}_\beta = 1$$

この式と $g = (N_2 - N_1)\sigma$ から

Necessary population inversion 必要な反転分布は

$$N_2 - N_1 = \frac{a}{\sigma} - \frac{\ln R_1 R_2}{2L\sigma}$$

Amplifier parameters for various lasers

Laser	g (m ⁻¹)	L (m)	m
He-Ne	0.15	0.2	400
Argon	0.5	1.0	24
He-Cd	0.3	0.5	80
Copper (CVL)	5	1.0	2.4
CO ₂	0.9	1.0	13
Excimer	2.6	1.0	4.6
Dye (Rh6G)	500	0.02	1.2
GaAs	100,000	0.0001	1.2
Nd:YAG	10	0.1	12
Nd:glass	3	0.1	40



Basic structure of a laser レーザーの構造

