

物理学実験3 レーザー

レーザーとは何か
誘導放出とは？
レーザー発振

質問

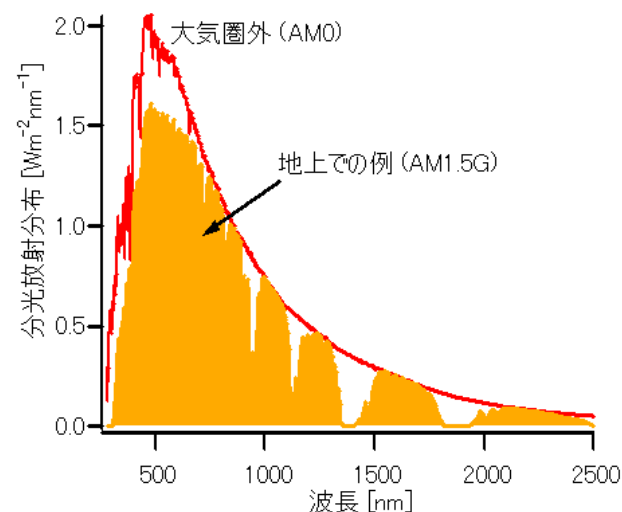
- レーザーとは何か？
 - 2準位レーザーで反転分布が作れないのはなぜ？
 - なぜ誘導放出という現象が起こる？
 - レーザーの原理には量子力学が必要？
-
- 誘導放出光、自然放出光の特徴は？
実験ではどのように観測できるか？

レーザー光の強さはどのくらい？

レーザーポインター < 1mW

地球大気表面の単位面積に垂直に入射する
太陽のエネルギー流束密度(強度)

太陽定数 1366 W/m² (大気圏外)
地上、日本では最大1000W/m² 程度



レーザー1mW はビーム直径1mm程度とすると1mW/mm²=1000W/m²
したがって、1mWのレーザーを直接見ることは太陽を直接見ることに
匹敵(*) レーザー光は太陽光よりも集光性がよいので、数mWでも
(失明することはないが)網膜に局所的にダメージが入る可能性あり
(*)瞳孔径は2mm程度はあるので太陽を見る方が目に入る光量は多い

高出力のレーザーを使用するとき、レーザー保護眼鏡
(ゴーグル)を使用
レーザー保護眼鏡は予期できない反射や散乱光が目
に入るのを防ぐため、横方向もガードしてある



http://www.sigma-koki.com/index_sd.php?lang=jp&smcd=C040305

3年実験 レーザー

1mWの窒素レーザー(337nm)

数mWの半導体レーザー(648nm)

～100mWのグリーンレーザー(532nm)

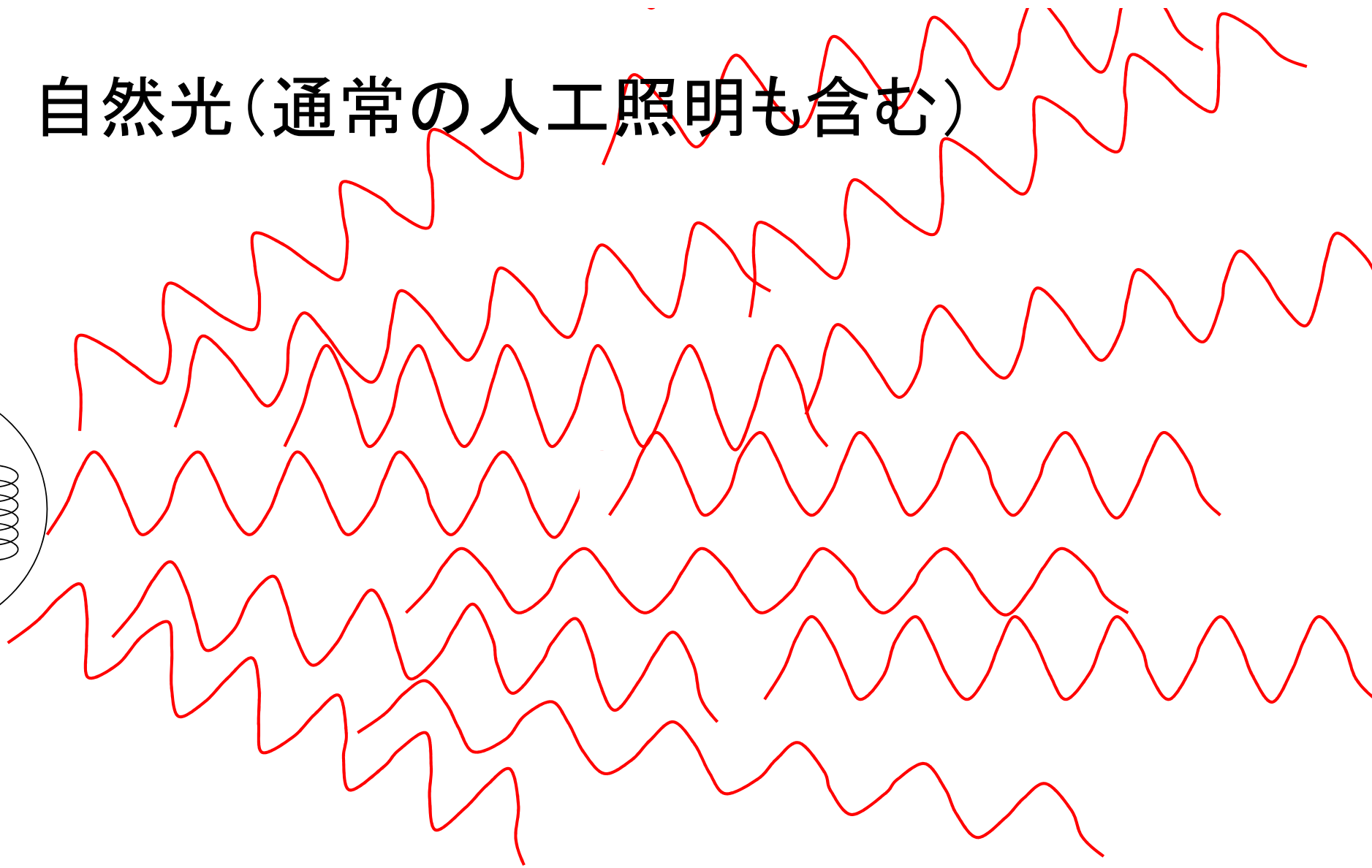
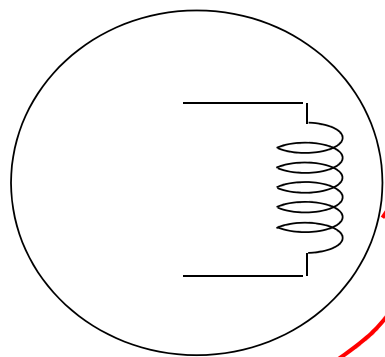
HeNeレーザー(ホログラフィー) ～1mW

レーザーとは何か？

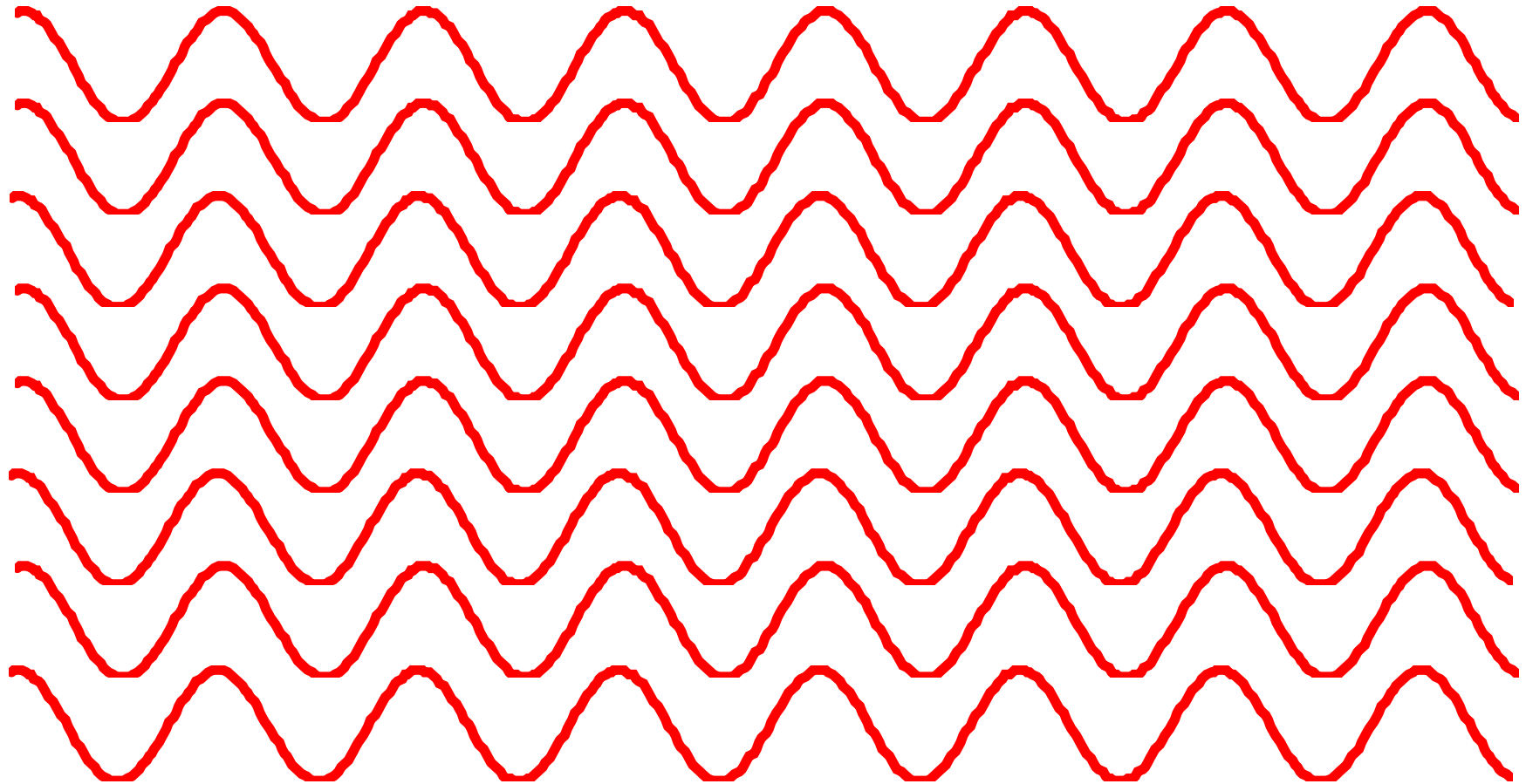
Light **A**mplification by **S**timulated
Emission of **R**adiation

放射の誘導放出による光増幅
自然放出光との違いは？

自然光(通常の人工照明も含む)



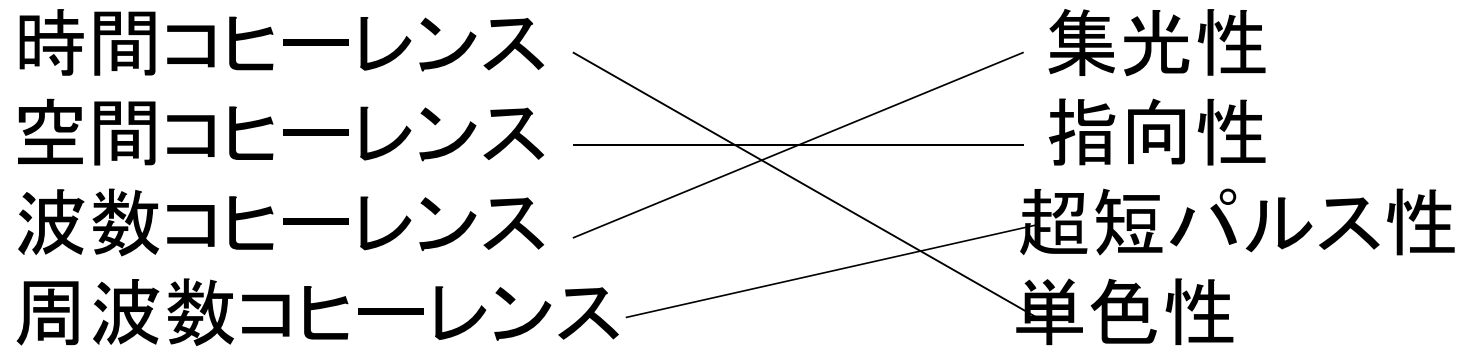
レーザー光



レーザー光 = コヒーレント光

←→ インコヒーレント光

問題: 左と右で関係の深いもの同士をつなげ



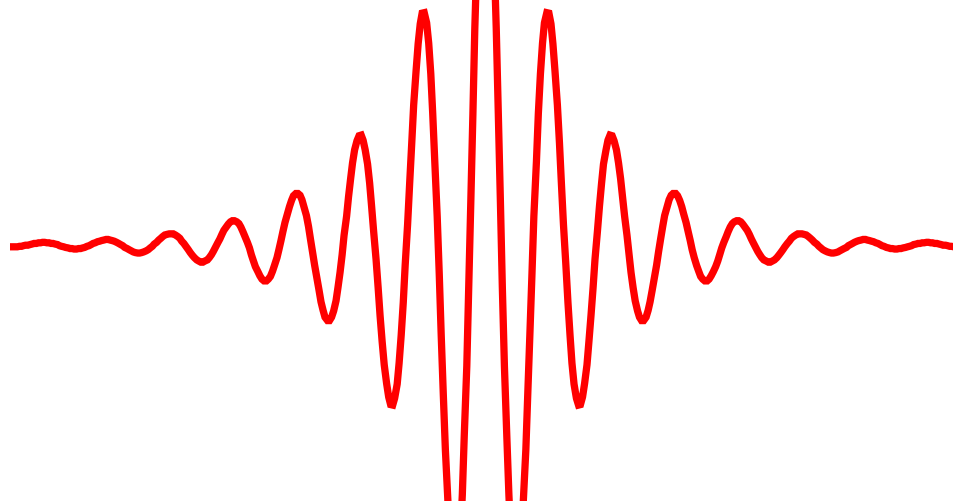
人類が作り出した夢の光 レーザー

ω エネルギーが特定の周波数(波長)に集中

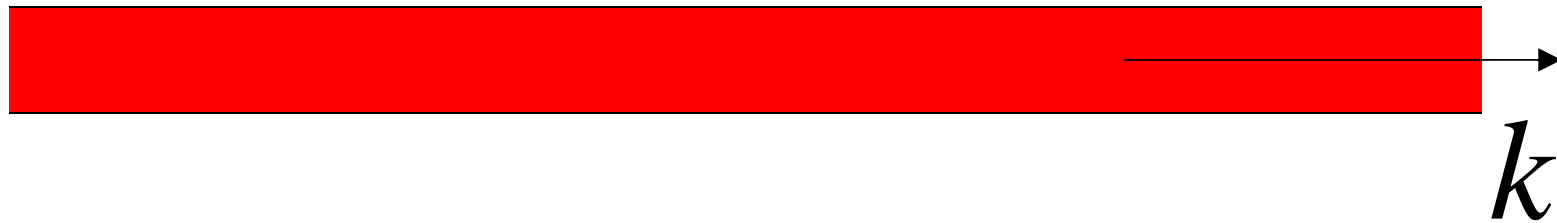


非常に短い時間にエネルギーが集中したパルス

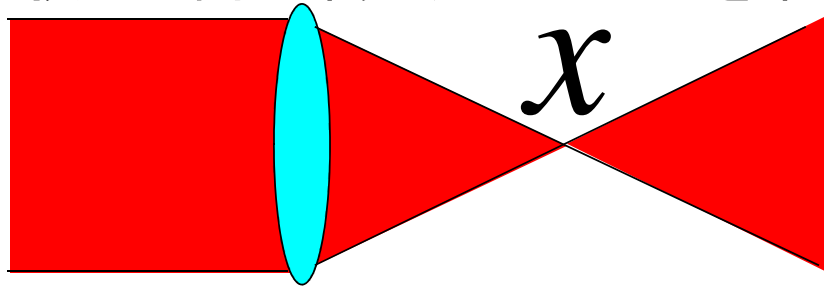
t



一定の方向(k)にエネルギーが集中(いつまでも広がらないで進む)



狭い空間に集光(エネルギーを集中)することができる



特定の ω, t, k, x にエネルギーを集中できる

$$\sin(\omega t - kx)$$

$$\sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

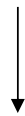
角周波数 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

コヒーレンスのまとめ

$$E = E_0 \sin(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

時間コヒーレンス	t	$\delta(\omega - \omega_0)$	単色性
周波数コヒーレンス	ω	$\delta(t - t_0)$	超短パルス性
空間コヒーレンス	\mathbf{r}	$\delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0)$	指向性
波数コヒーレンス	\mathbf{k}	$\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$	集光性

ある空間でコヒーレンスがよい(幅が広く位相がそろっている)



そのフーリエ逆空間でエネルギーが1点に集中

ウィーナー・ヒンチンの定理

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t)E^*(t-\tau)dt \quad \text{振幅干渉}$$

$$\text{干渉光強度 } I^{(1)}(\tau) = G(\tau) / (\text{積分時間}) \equiv \langle E(t)E^*(t-\tau) \rangle$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} E(t)E^*(t-\tau)dt \right] e^{-i\omega\tau}d\tau \\ &= E(\omega)E^*(\omega) = |E(\omega)|^2 \quad \text{パワースペクトル} \end{aligned}$$

地上の太陽光の電場

$$1000\text{W/m}^2$$

$$10^3 [\text{W/m}^2] = 0.1 [\text{W/cm}^2] = \epsilon_0 E^2 c / 2$$

$$I = \epsilon_0 E^2 c / 2 [\text{W/m}^2]$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

$$E \sim 10^3 \text{V/m}$$

分子内、原子内電場

水素原子

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad r = 0.53\text{\AA}, q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$E = 9.0 \times 10^9 \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right] \times \frac{1.6 \times 10^{-19}}{(0.53 \times 10^{-10})^2} \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right]$$

$$= \frac{9.0 \times 1.6}{0.53^2} \times 10^{10} \text{ N/C}$$

$$= 5.1 \times 10^{11} \text{ N/C} = 5.1 \times 10^{11} \text{ V/m}$$

$$E \sim 5 \times 10^{11} \text{ V/m}$$

超短レーザーパルスの電場

最も普及している市販のフェムト秒増幅パルス

1 mJ, 100 fs, 1 kHz のとき、 10^{10} W

$0.1 \times 0.1 \text{mm}^2$ に集光

$$10^{18} [\text{W}/\text{m}^2] = 10^{14} [\text{W}/\text{cm}^2] = \epsilon_0 E^2 c / 2$$

$$I = \epsilon_0 E^2 c / 2 [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$$

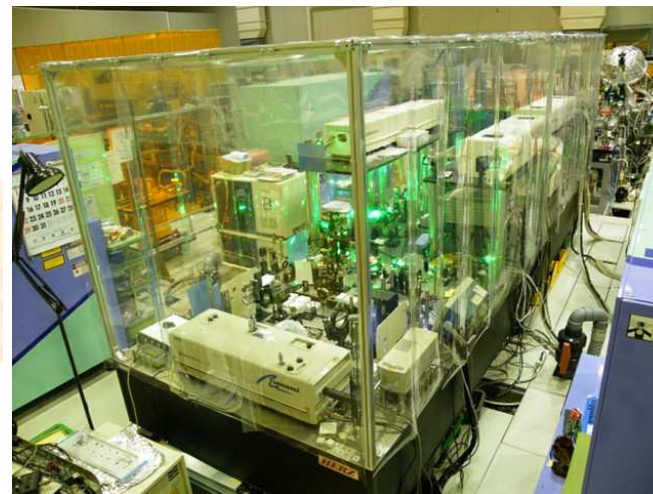
$$E \sim 3 \times 10^{10} \text{V}/\text{m}$$

分子内電場 $10^{11} \sim 10^{12} \text{V}/\text{m}$

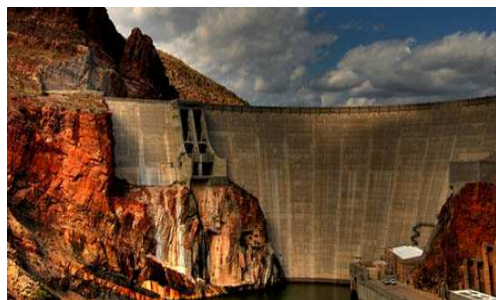
高強度レーザーとは

瞬間的な光の出力(ピークパワー)

$$\text{ピーク出力 [W]} = \frac{\text{光パルスのエネルギー [J]} \quad 10 \text{ mJ}}{\text{光パルスの持続時間 [sec]} \quad 10^{-14} \text{ sec}} = 10^{12} \text{ W}$$



全世界の総発電量(電力消費量)は 約 2.5 TW (=2.5 x 10¹² W)(2013年)
それに匹敵する出力をもつ光パルスを実験室内で発生



水力

+



火力

+



原子力

物性研
板谷

光と物質の非線形相互作用

非線形光学

分極 $P = \epsilon_0 (\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 \dots)$

二倍波発生 $\omega \rightarrow 2\omega$

光整流

三倍波発生 $\omega \rightarrow 3\omega$

四光波混合

二光子吸収

吸収飽和

自己収束

フotonエコー

光-光相互作用 光-電子相互作用
光エレクトロニクスデバイスに不可欠



赤外レーザダイオード $\sim 800\text{nm}$

Nd³⁺:YVO₄レーザ 1064nm

非線形結晶KTiOPO₄ 532nm

レーザーとは何か？

Light **A**mplification by **S**timulated
Emission of **R**adiation

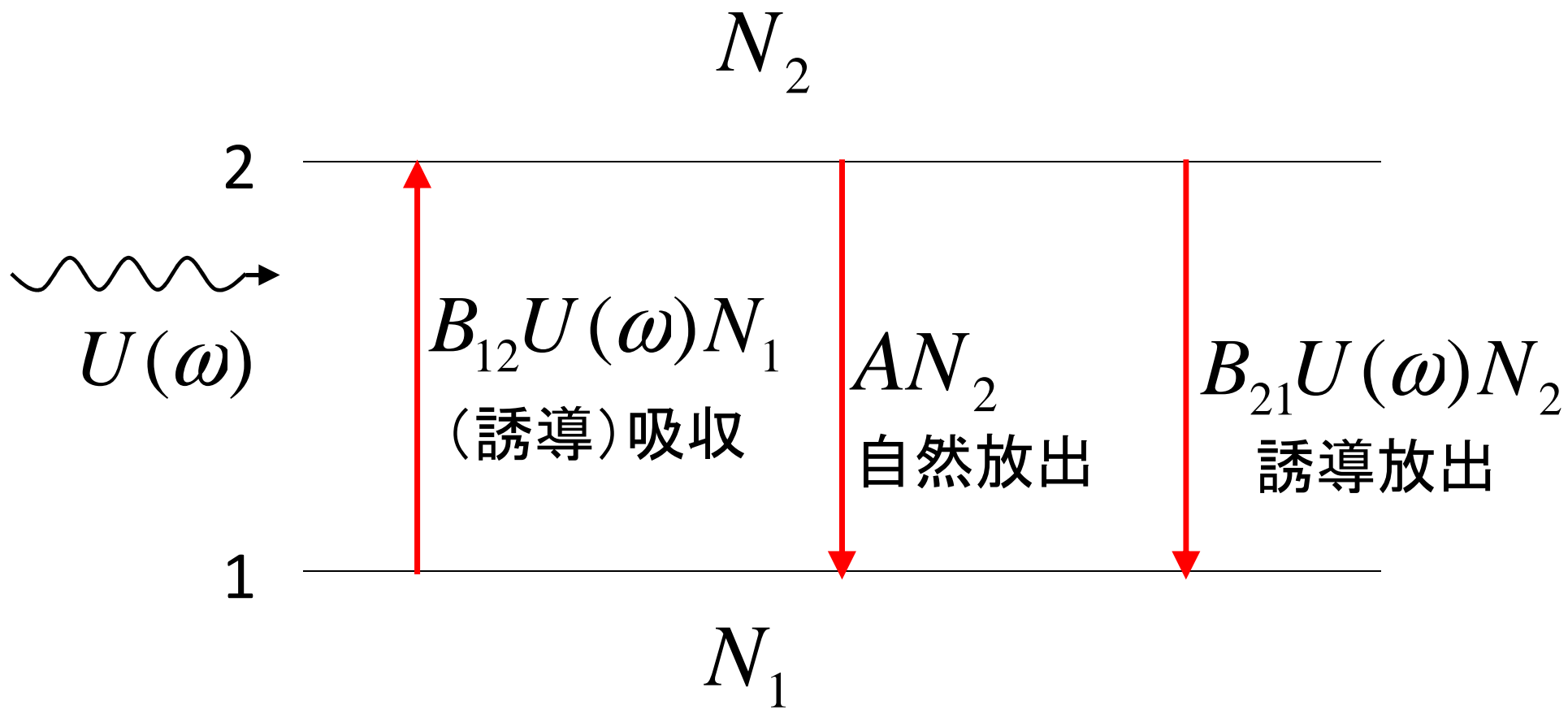
放射の誘導放出による光増幅

誘導放出とは何か？

アインシュタイン 1916
A係数 B係数

準位2の原子あるいは分子は入射した光に誘導されて、同じ周波数、同じ位相、同じ偏光状態の光を放出して準位1へ移る。

これを誘導放出 (stimulated emission) と呼ぶ。



Planckの熱輻射式

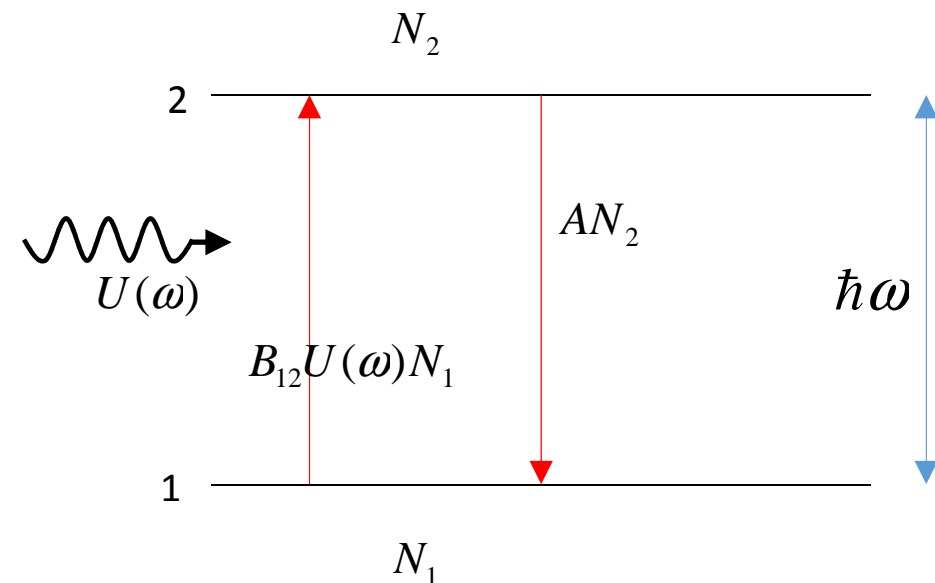
$$U(\omega)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega d\omega}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$$

輻射の分光エネルギー密度

熱輻射(電磁波)と原子系が
温度Tで熱平衡

Planckの熱輻射式

$$U(\omega)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega d\omega}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$$



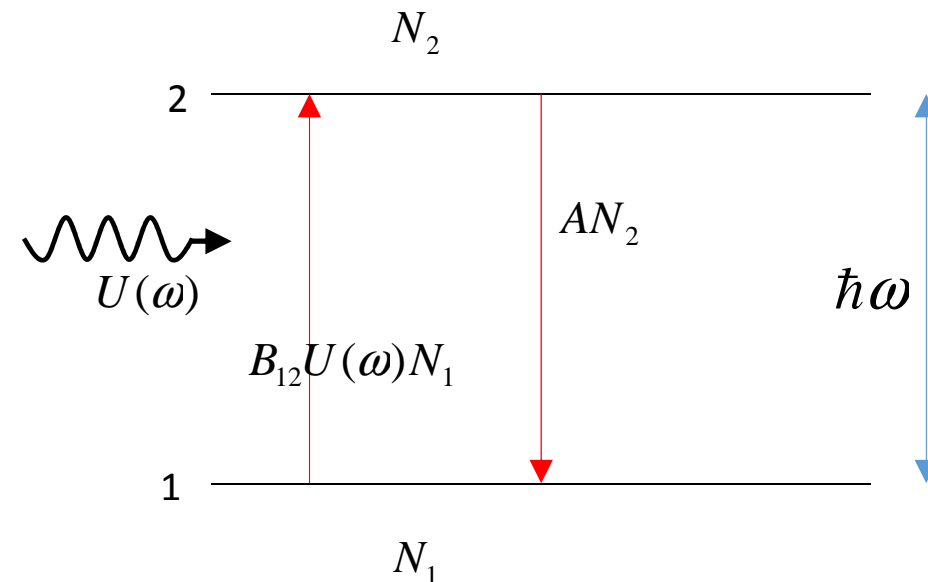
Planckの熱輻射式

$$U(\omega)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega d\omega}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$$

$$N_1 B_{12} U(\omega) = N_2 A \quad N_2 = N_1 e^{-\hbar\omega/k_B T}$$

$$U(\omega) = \frac{A}{B_{12}} \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T}}$$

熱輻射のエネルギー密度 $U(\omega)$ のもと
で吸収と放出の光子数は等しい



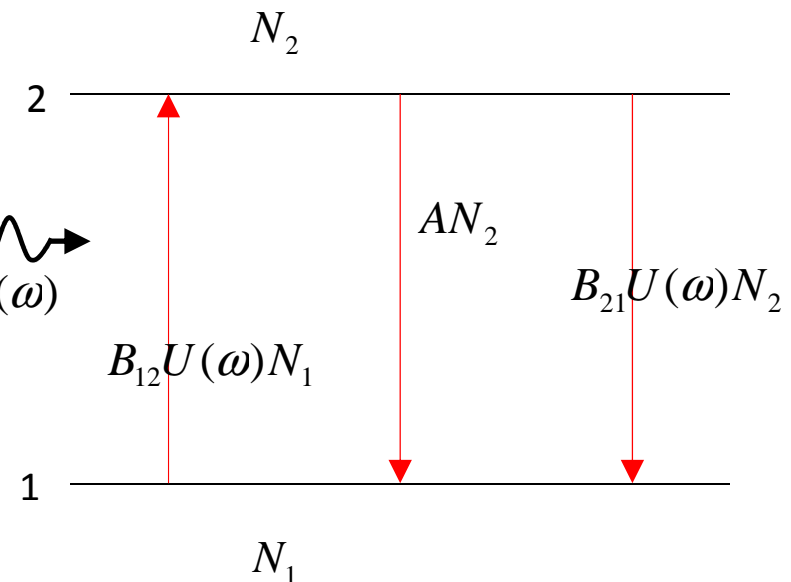
Planckの熱輻射式

$$U(\omega)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar\omega d\omega}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}$$

$$N_1 B_{12} U(\omega) = N_2 [A + B_{21} U(\omega)] \quad N_2 = N_1 e^{-\hbar\omega/k_B T}$$

$$U(\omega) = \frac{N_2 A}{N_1 B_{12} - N_2 B_{21}} = \frac{N_1 e^{-\hbar\omega/k_B T} A}{B(N_1 - N_1 e^{-\hbar\omega/k_B T})}$$

$$= \frac{A}{B} \frac{1}{(e^{\hbar\omega/k_B T} - 1)} \quad B_{12} = B_{21} = B \quad \frac{A}{B} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3}$$



熱平衡状態

$$N_2 = N_1 e^{-\hbar\omega/k_B T} \quad N_2 < N_1$$

誘導放出 > 誘導吸収 つまり増幅が起こるためには

$$N_2 > N_1 \quad \text{反転分布}$$

実現したレーザー

ルビーレーザー 3準位 1960

色素レーザー

半導体レーザー 4準位

気体レーザー

2準位レーザーがないのはなぜか？
反転分布が作れないから

誘導放出はPlanckの式から理論的洞察で導かれた

Planckの式 電磁波のエネルギーがエネルギー量子 $\hbar\omega$ の整数倍

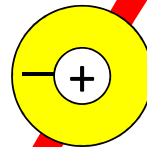
誘導放出を説明するには量子力学が必要？

光学遷移

分極

400~700nm

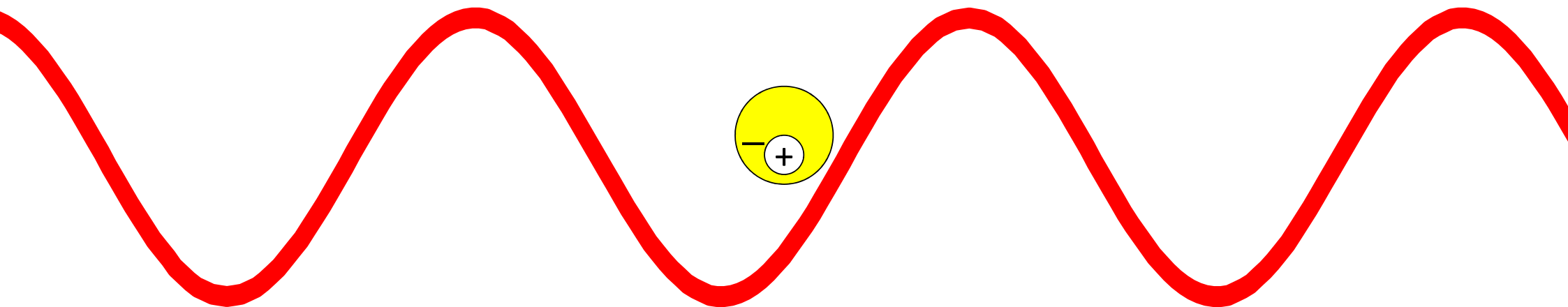
1nm



分子は一様な電場を感じる
光電場によって電気双極子が誘起される

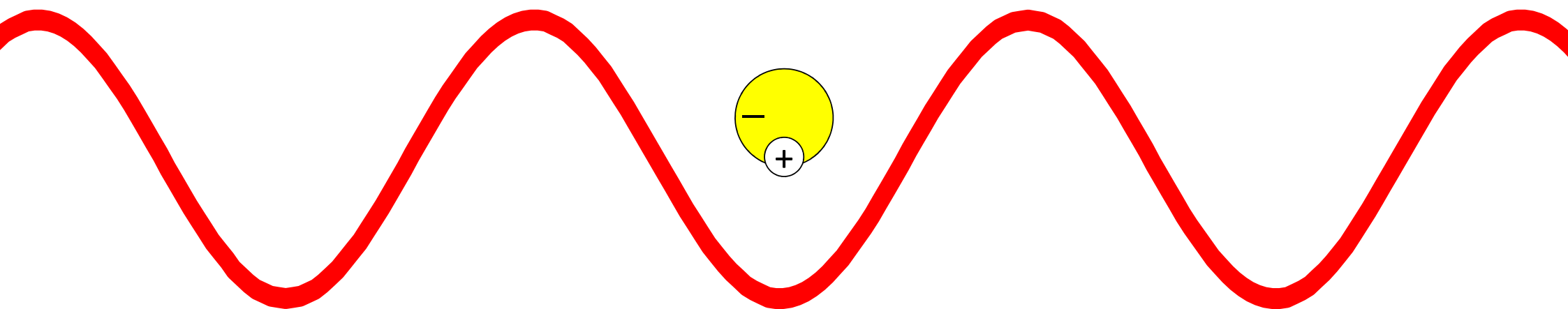
光学遷移

分極



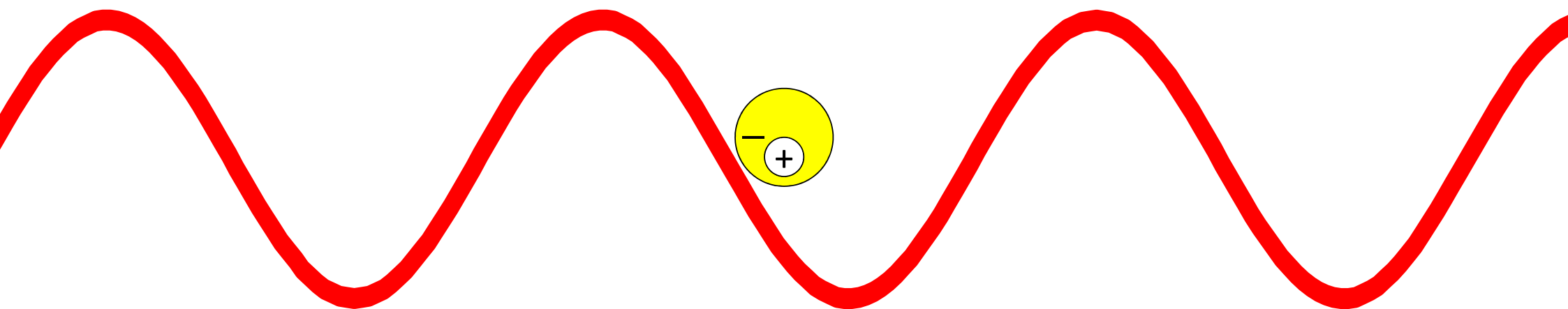
光学遷移

分極



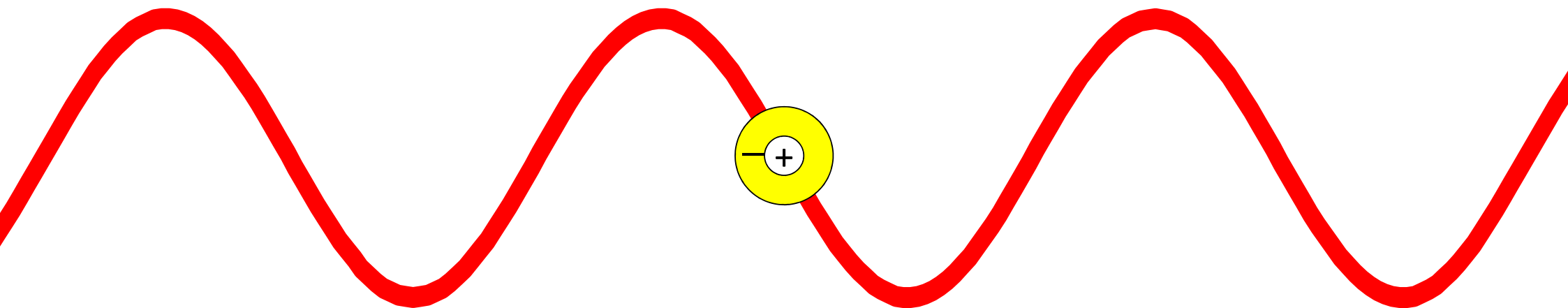
光学遷移

分極



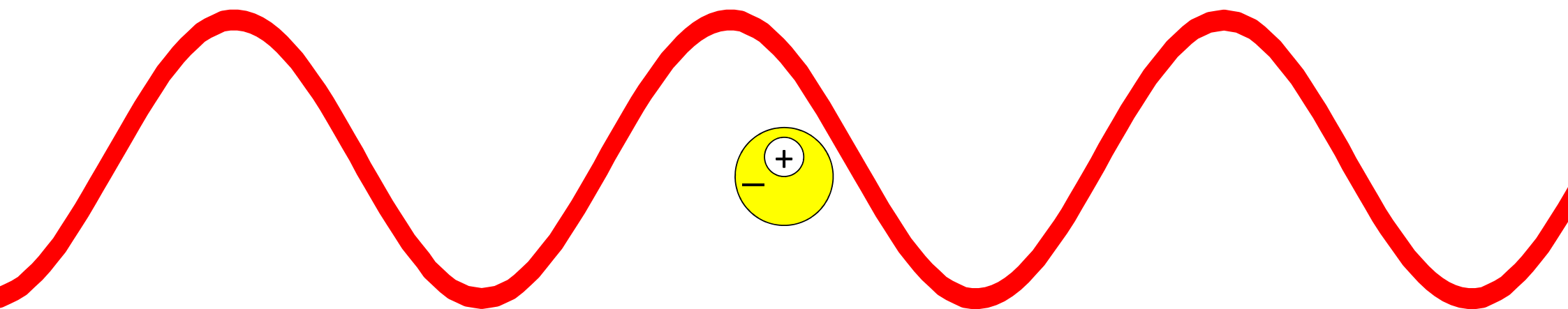
光学遷移

分極



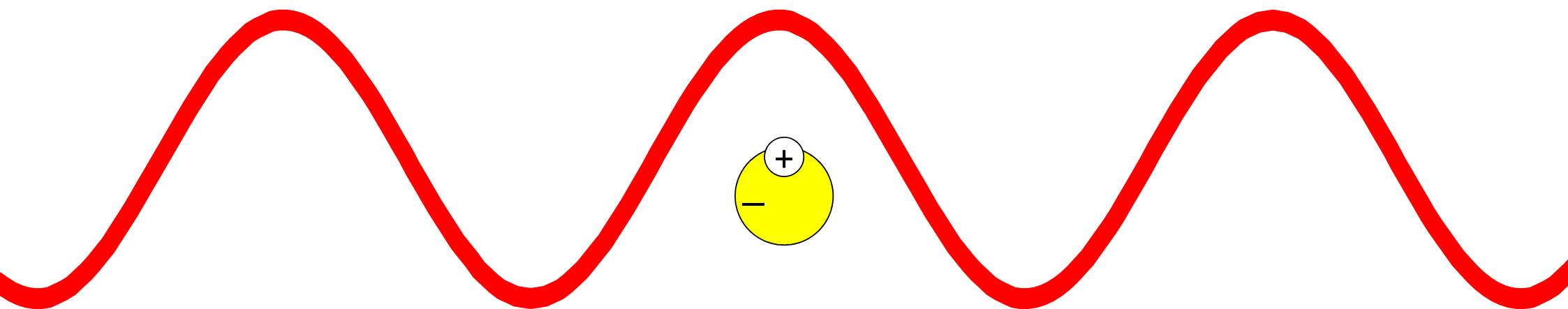
光学遷移

分極



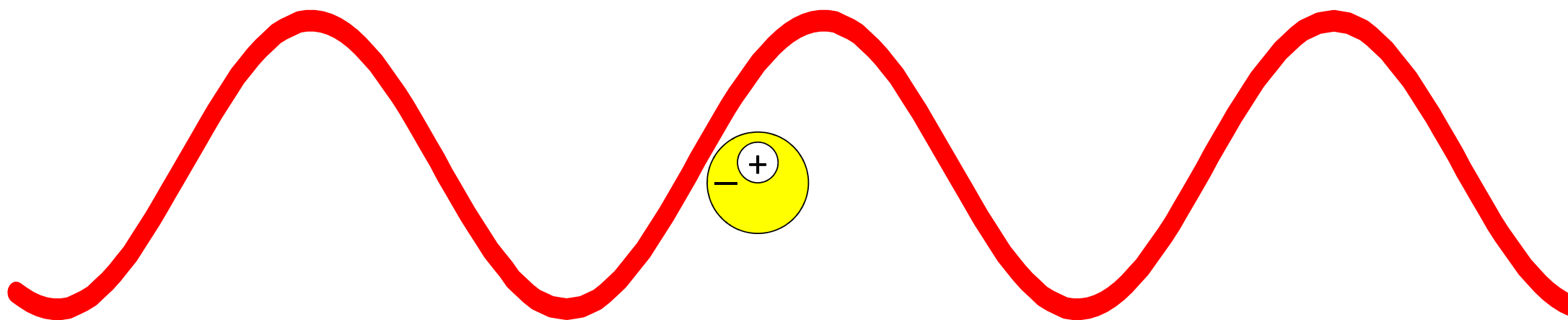
光学遷移

分極



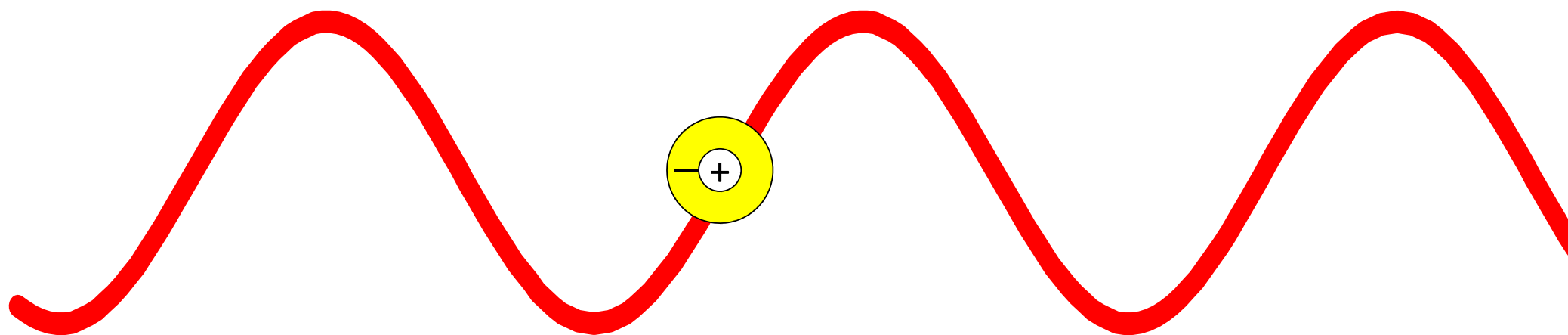
光学遷移

分極



光学遷移

分極



光と物質の相互作用の古典モデル

カ学振動子モデル、ローレンツモデル

固有周波数 ω_0 のバネでつながれた質量 m の電荷 q
(電気双極子＝調和振動子)

$$m\left(\frac{d^2}{dt^2}x + \Gamma_0 \frac{d}{dt}x + \omega_0^2 x\right) = qE$$
$$= qE_0 e^{i\omega t}$$

$$x = x_0 e^{i\omega t}$$

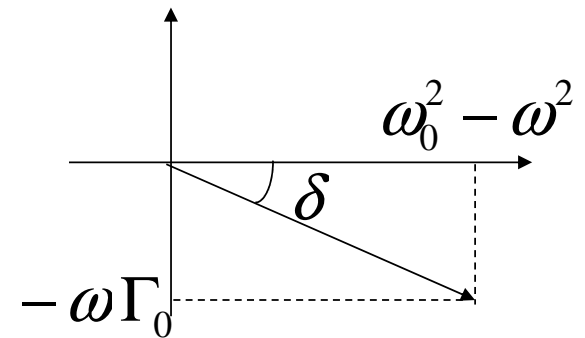
$$x_0 = \frac{q/m}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma_0} E_0 = \xi(\omega) E_0$$

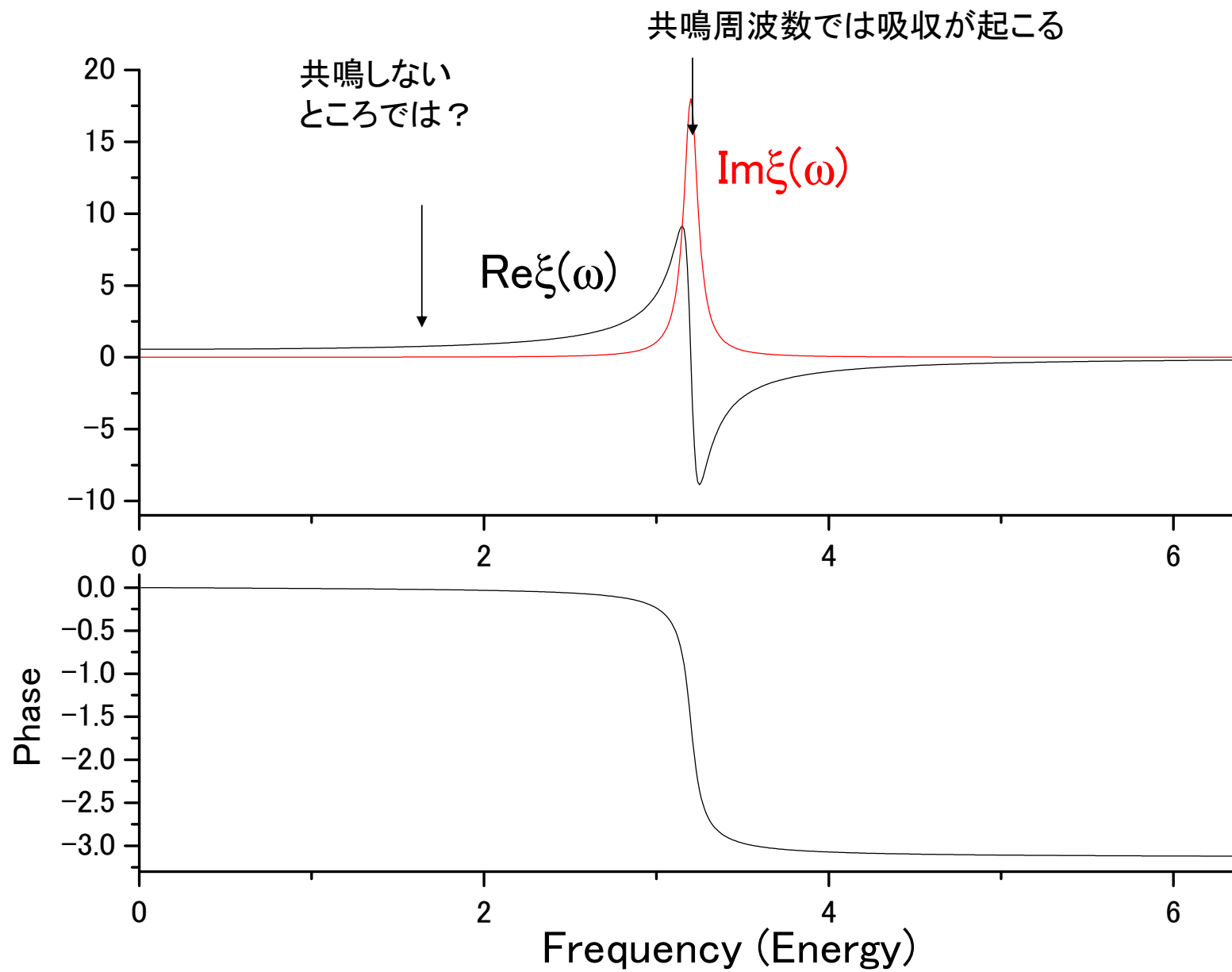
$$= \frac{q/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\Gamma_0^2}} e^{i\delta(\omega)} E_0 = |\xi(\omega)| e^{i\delta(\omega)} E_0$$

$$p = qx = qx_0 e^{i\omega t} = q|\xi(\omega)| E_0 e^{i(\omega t + \delta(\omega))}$$

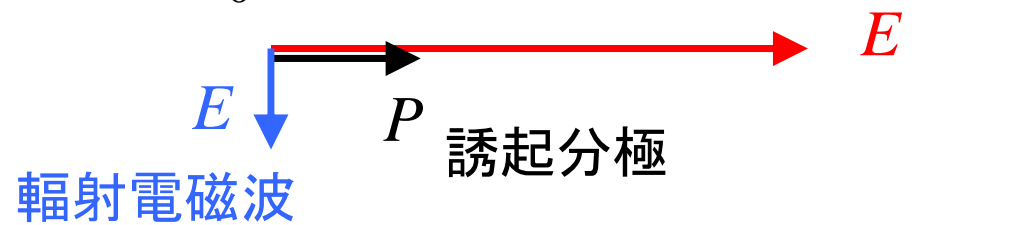
$$P = \frac{N_0}{V} p = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E \quad \text{マクロな分極}$$

$$\chi^{(1)}(\omega) = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{N_0}{V} \frac{q^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma_0}$$





$$\omega \ll \omega_0$$

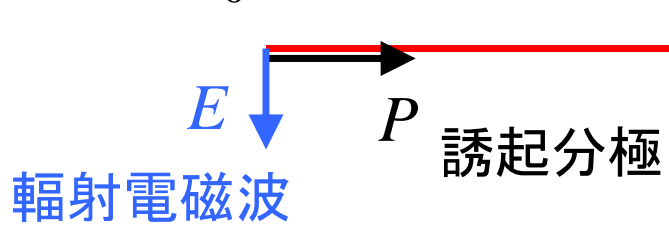


$$P \propto E$$

$$i = \frac{dP}{dt} \propto jE$$

$$\omega \ll \omega_0$$

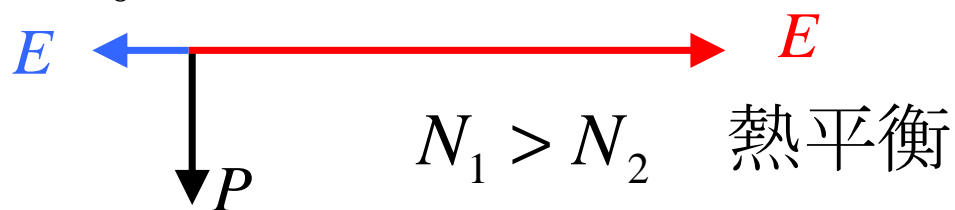
入射電磁波



$$P \propto E$$

$$i = \frac{dP}{dt} \propto jE$$

$$\omega \approx \omega_0$$

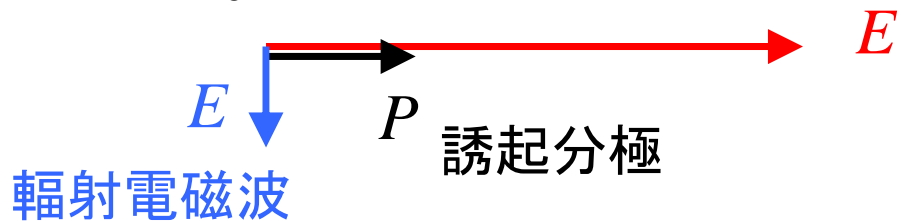


$$P \propto -jE$$

$$i = \frac{dP}{dt} \propto E$$

$$\omega \ll \omega_0$$

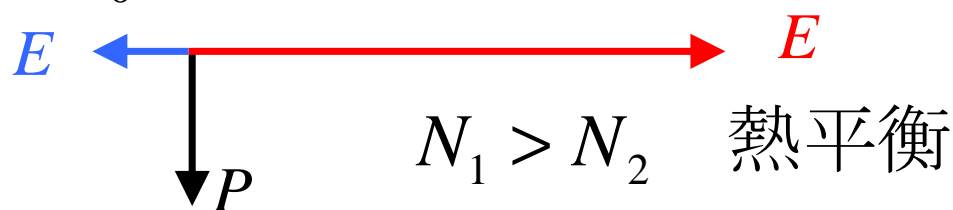
入射電磁波



$$P \propto E$$

$$i = \frac{dP}{dt} \propto jE$$

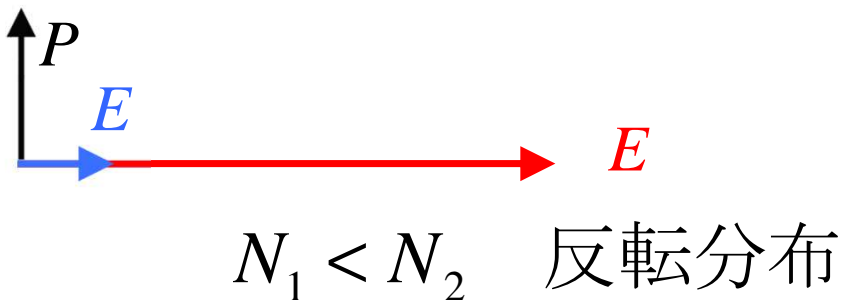
$$\omega \approx \omega_0$$



$$P \propto -jE$$

$$i = \frac{dP}{dt} \propto E$$

$$\omega \approx \omega_0$$



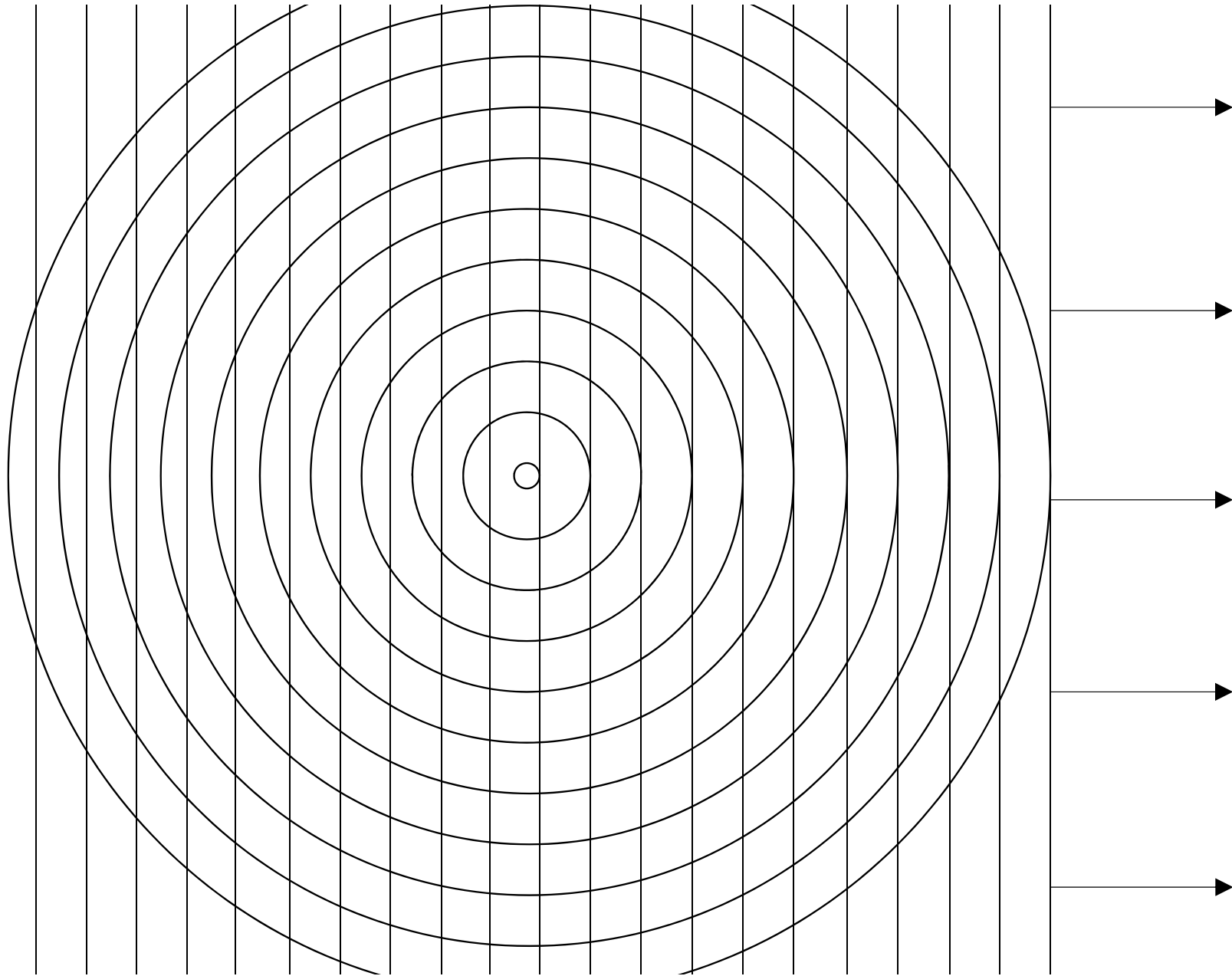
$$P \propto jE$$

$$i = \frac{dP}{dt} \propto -E$$

$\omega \approx \omega_0$ で

$$\Gamma_0 < 0$$

負性抵抗と等価

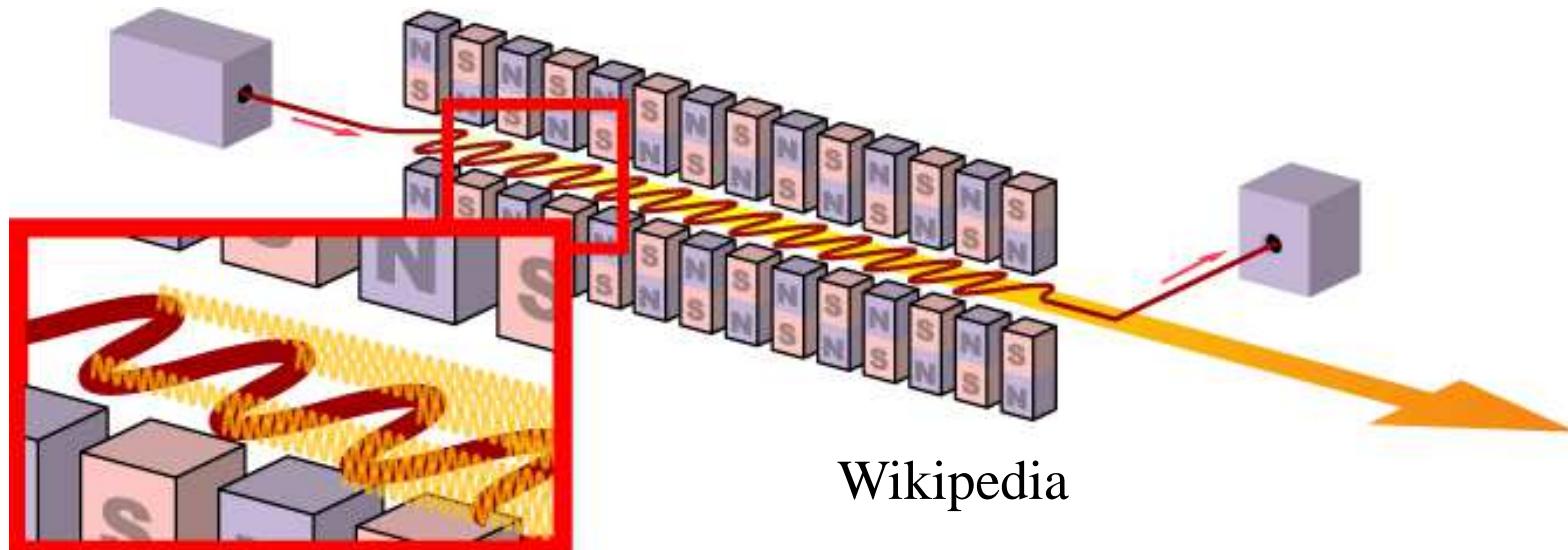


by 霜田光一

自由電子レーザー

自由電子のビームと電磁場との共鳴的な相互作用によって
コヒーレント光を発生させる方式のレーザー

媒質によって発する光の波長が決まる一般のレーザーと異なり、
磁場・電子エネルギーを変えることによって波長可変という特徴
を持ち、軟X線、紫外線、可視光線、遠赤外線まで幅広い波長の
光を取り出せる



シンクロトロン放射光

電磁波の発生

制動輻射、シンクロトロン輻射

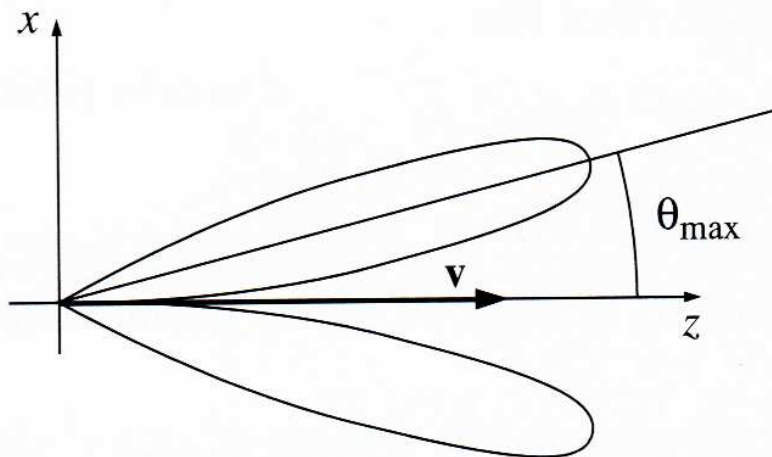


Figure 11.14

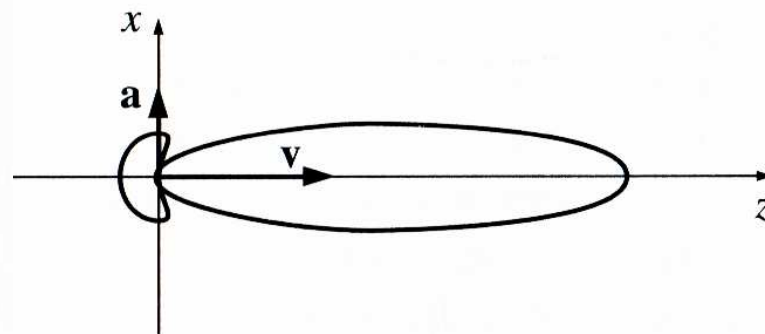


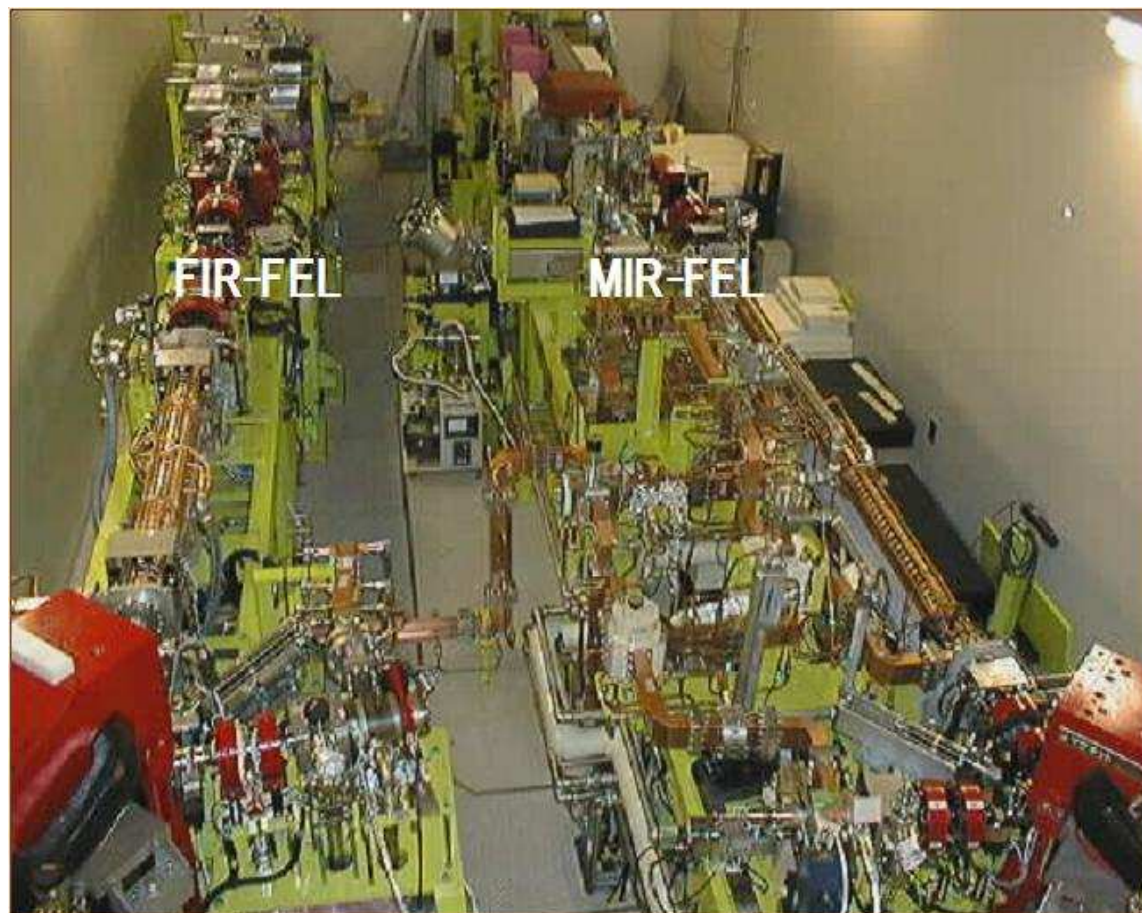
Figure 11.16

Griffiths Intro. ElectroDynamics

<http://webphysics.davidson.edu/applets/sync/default.html>

応用 軌道放射光 自由電子レーザー

理科大FEL



MIR(中赤外)-FEL が稼動 4~16 μm 75THz~19THz

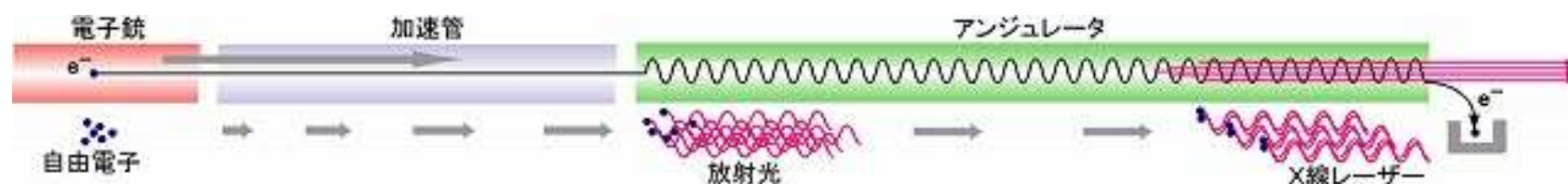
夢のレーザー X線自由電子レーザー

2009年4月
1.5 Åで発振

X線自由電子レーザー計画 日本(理研)、米国、EU



2011年3月
0.8 ÅのX線発生



自由電子レーザーの発振原理

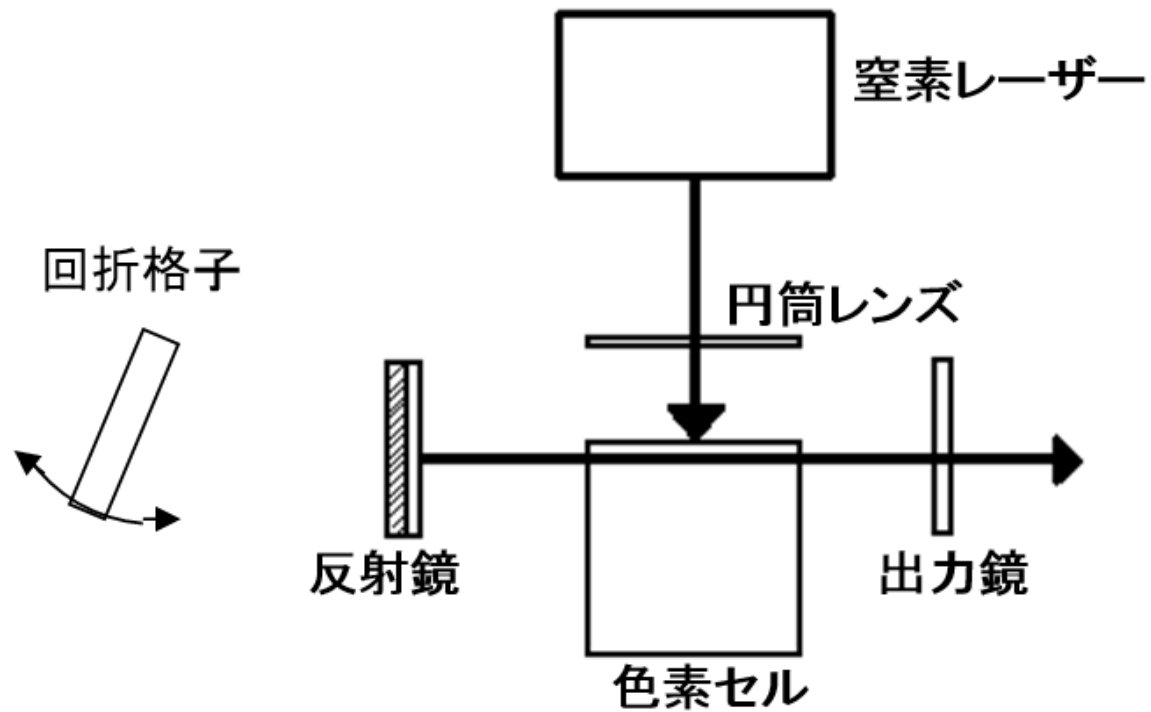
自由電子の磁場中での運動と、電磁波との相互作用は全て特殊相対性理論と古典電磁気学で記述できる。

自然放出とは何か？

問1.1 レーザー光の大きな特徴はコヒーレンス(可干渉性)の良さである。具体的には、単色性(時間コヒーレンス)、指向性(空間コヒーレンス)、集光性(波動ベクトルコヒーレンス)、超短パルスの発生可能性(周波数コヒーレンス)などがある。これらを説明せよ。

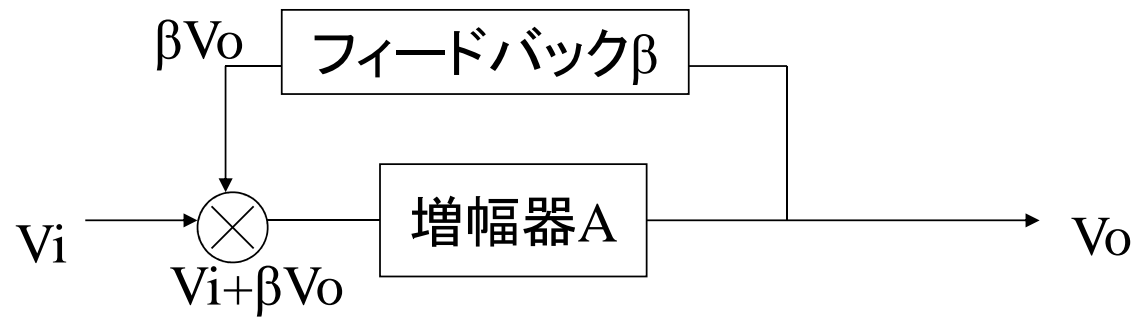
問1.3 レーザー光の問1.1の特徴は誘導放出によってもたらされる。一方、レーザー光以外の身の周りの光は自然放出光である。自然放出は光も量子化した扱い(第2量子化)でなければ説明できない(といわれる)が、誘導放出は(反転分布を単に利得媒質として与えれば)吸収の逆過程として古典的な振動子モデル(ローレンツモデル)の延長で解釈可能である。このことを説明せよ。(従って自然放出光よりもむしろレーザー光の方が古典的な電磁波として記述しやすい)

色素レーザーの発振



Traveling -Wave Dye Laser

発振



$$V_o = A(V_i + \beta V_o) \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 - \beta A} \quad \beta A = 1 \quad \text{発振}$$

負性抵抗

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad V = RI \quad Q = CV \quad I = \frac{dQ}{dt}$$

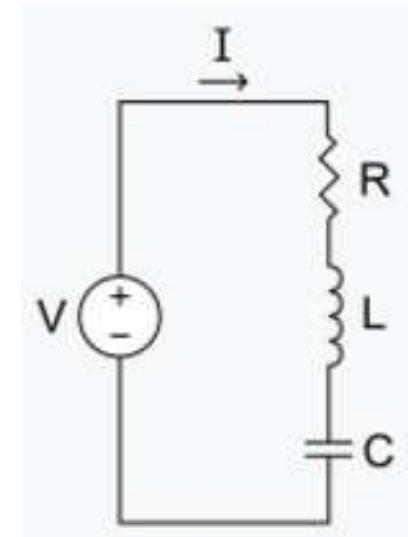
$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = V \quad V = V_0 e^{j\omega t} \quad Q = Q_0 e^{j\omega t}$$

$$\left(-\omega^2 L + j\omega R + \frac{1}{C}\right) Q_0 e^{j\omega t} = V_0 e^{j\omega t}$$

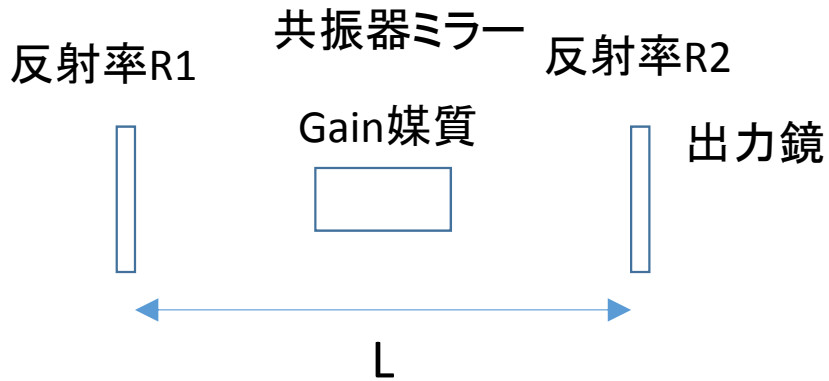
$$R = 0, \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} \text{ のとき } -\omega^2 L + \frac{1}{C} + j\omega R = 0$$

$V_0 = 0$ でも電流発生 発振

($R > 0$ なら減衰振動, $R < 0$ なら…)



レーザー発振の条件



1passの利得係数 G

1passの損失係数 K

1passの増幅率 $A^{1/2} = e^{(G-K)L}$

1往復の増幅率 $A = e^{2(G-K)L}$

フィードバック $\beta = R_1 R_2$

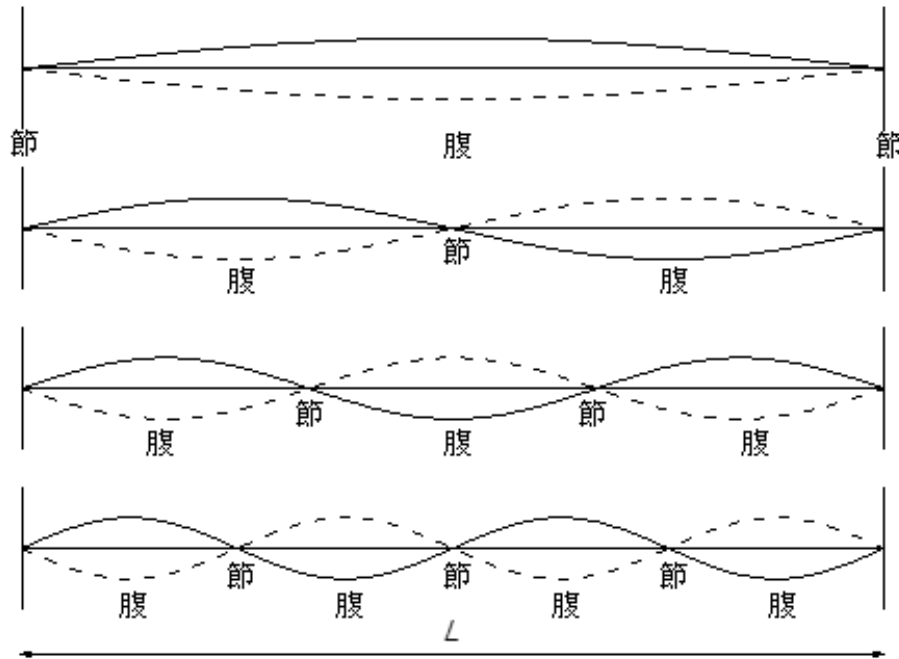
発振条件 $\beta A = 1$

共振器中の定在波

弦を伝わる横波の速さを V とすると、定常波の振動数は

$$f_n = \frac{V}{\lambda_n} = n \frac{V}{2L} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

で与えられる。これらの定常波を弦の固有振動といい、その振動数を固有振動数という。固有振動のうち $n=1$ のものを基本振動、 $n=2, 3, \dots$ のものを倍振動 (2 倍振動、3 倍振動、 \dots) という。基本振動によって生じる音を基本音、倍振動による音を倍音 (2 倍音、3 倍音、 \dots) という。



$$\lambda_1 = \frac{2L}{1} = 2L \quad f_1 = \frac{V}{2L}$$

$$\lambda_2 = \frac{2L}{2} = L \quad f_2 = \frac{2V}{2L}$$

$$\lambda_3 = \frac{2L}{3} \quad f_3 = \frac{3V}{2L}$$

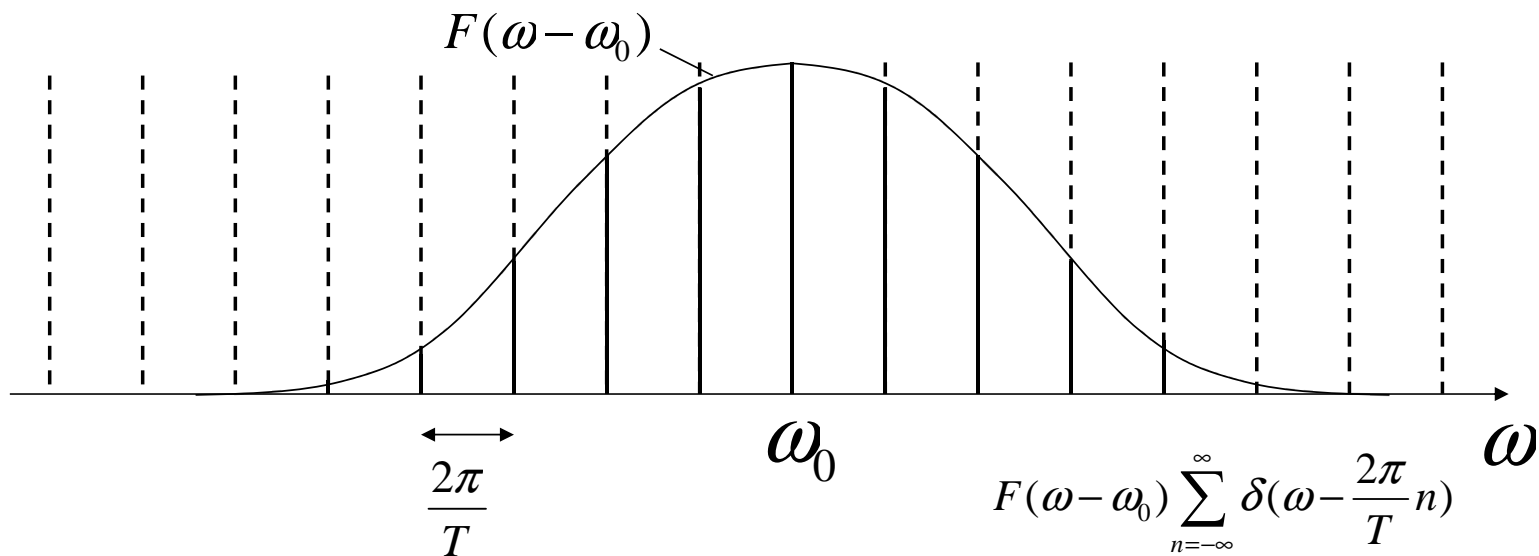
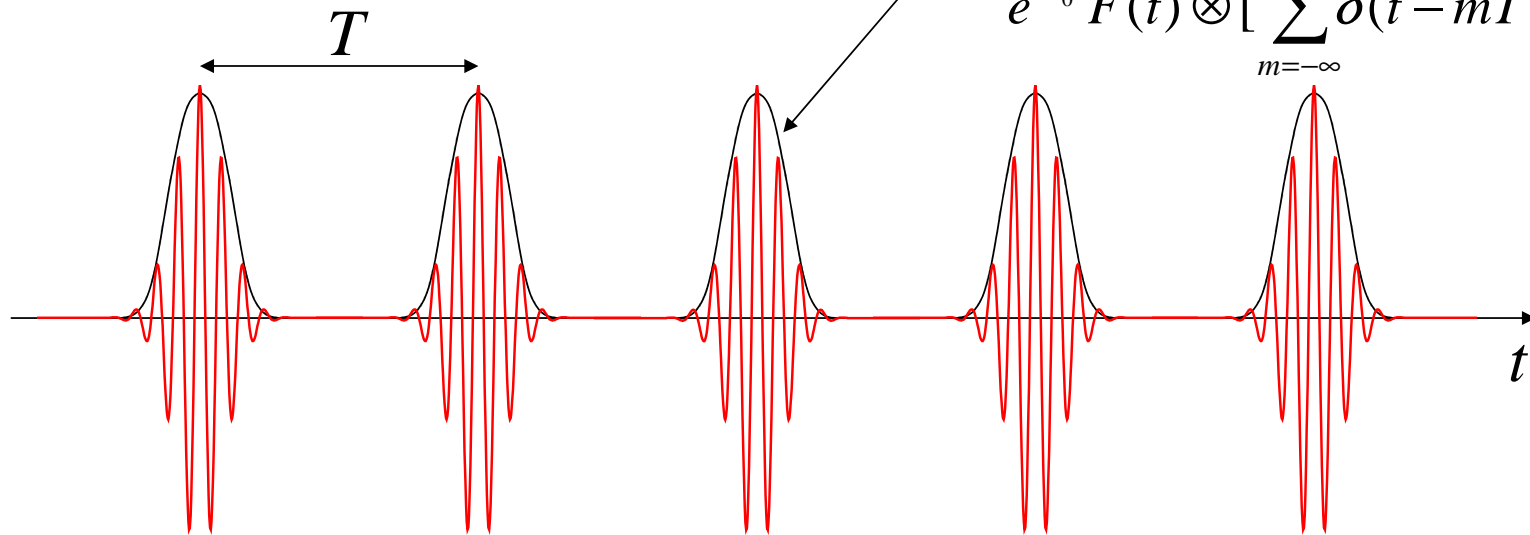
$$\lambda_4 = \frac{2L}{4} = \frac{L}{2} \quad f_4 = \frac{4V}{2L}$$

Fabry-Perot干渉計

川村ら しっかり学べる基礎物理学
波動 by 徳永

$$\frac{1}{2\pi} \int F(\omega - \omega_0) e^{i\omega t} d\omega = e^{i\omega_0 t} \frac{1}{2\pi} \int F(\omega - \omega_0) e^{i(\omega - \omega_0)t} d\omega = e^{i\omega_0 t} F(t)$$

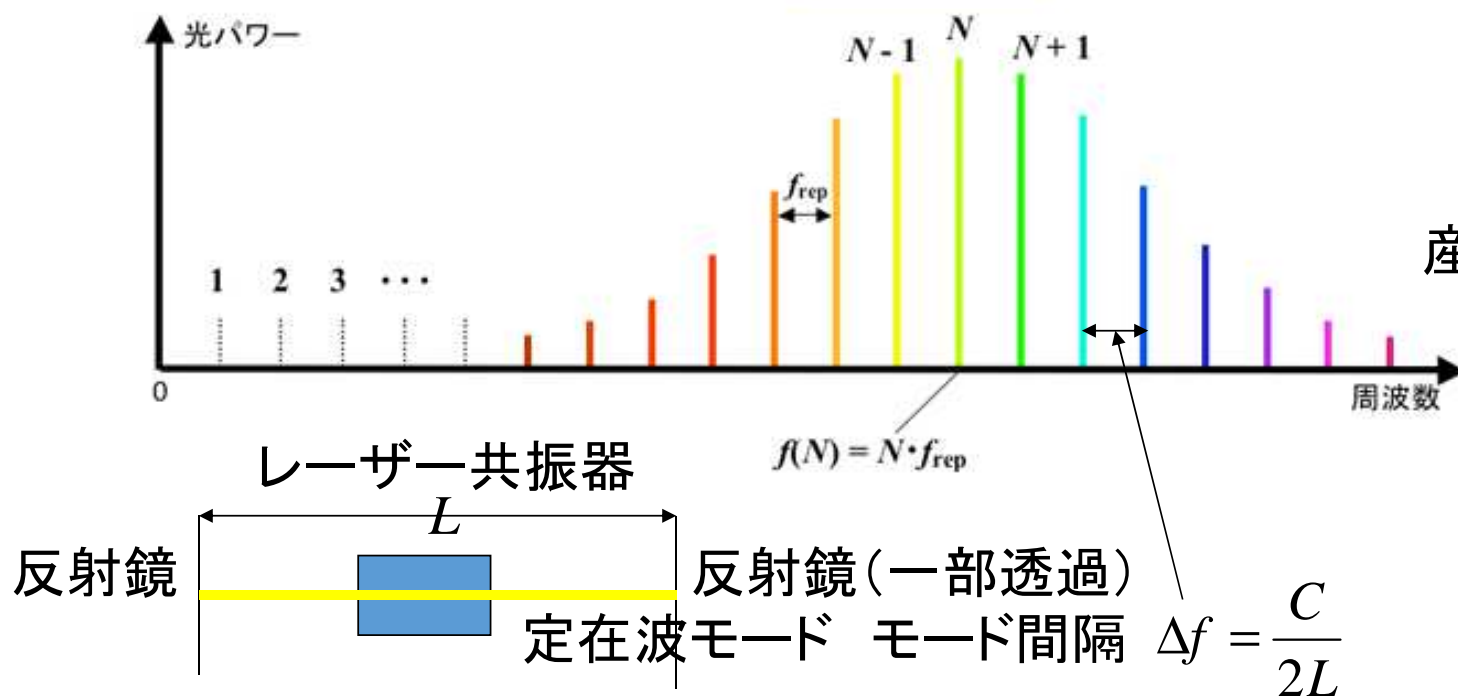
$$e^{i\omega_0 t} F(t) \otimes \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT) \right]$$



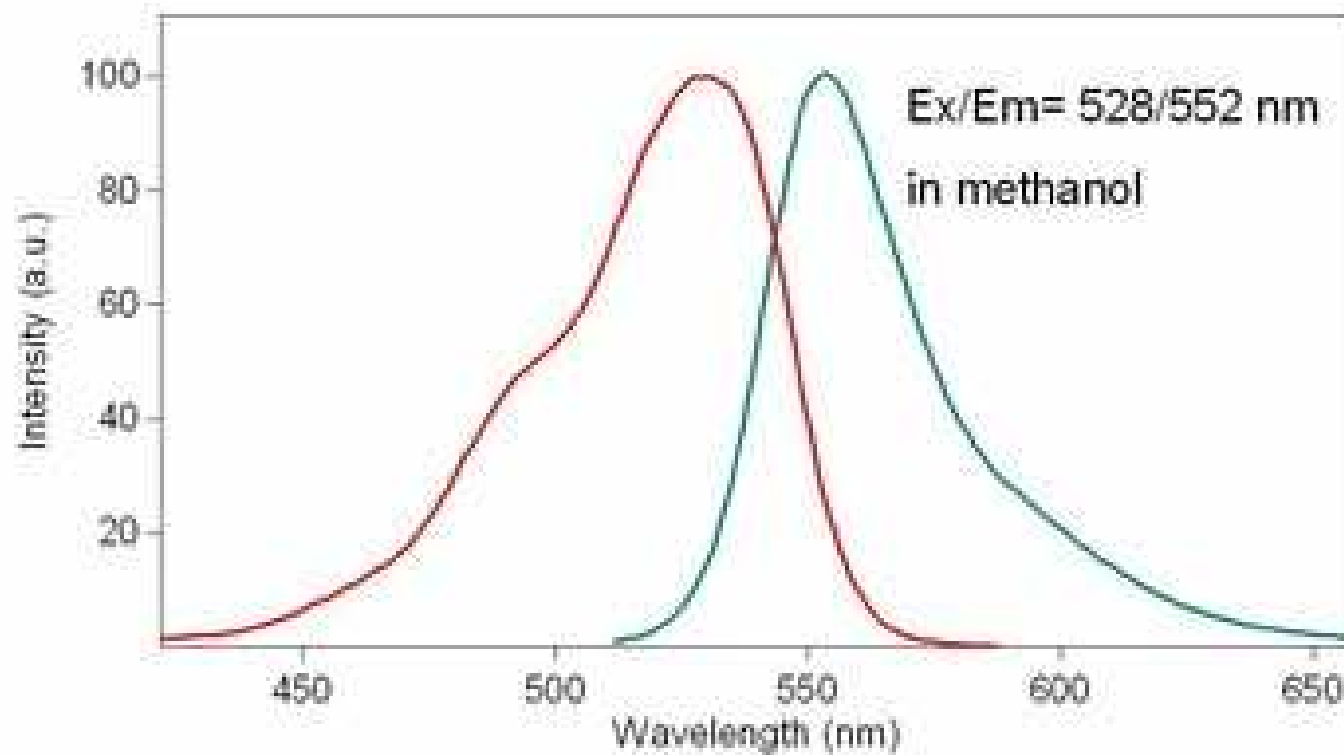
光周波数コム

◆光周波数コム

モード同期レーザーと呼ばれる超短光パルスレーザーから出力される、広帯域かつ櫛状のスペクトルを持つ光のこと。モード同期レーザーが発生する超短光パルス列は、光周波数コムの模式図にあるように、繰り返し周波数(f_{rep})で決まる間隔を持った細いスペクトル成分(モード)を持つ。このスペクトルの形状がくし(comb)に似ていることから「光周波数コム(comb)」と呼ばれる。繰り返し周波数 f_{rep} を、協定世界時に同期すれば、光周波数コムを「光周波数のものさし」として用いることができる。[\[参照元へ戻る\]](#)



Rhodamine 6G



<https://www.scbt.com/scbt/ja/product/rhodamine-6g-989-38-8>

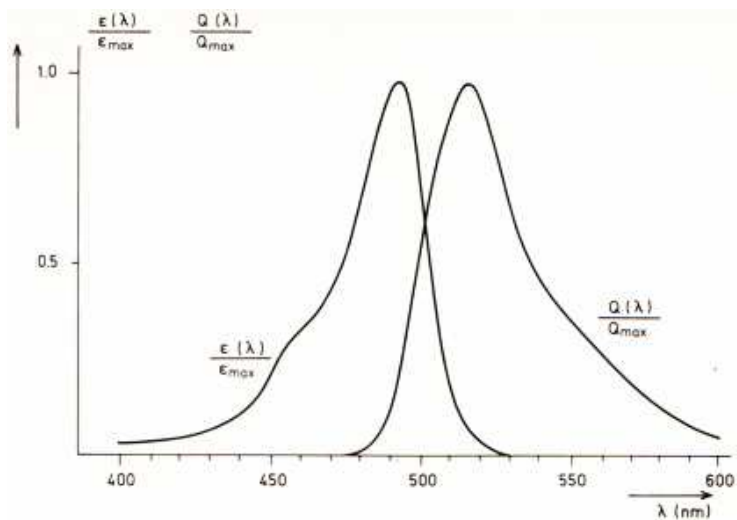


Fig. 1.7. Absorption spectrum, $\epsilon(\lambda)/\epsilon_{\max}$, and fluorescence spectrum, $Q(\lambda)/Q_{\max}$, of a typical dye molecule (fluorescein-Na in water)

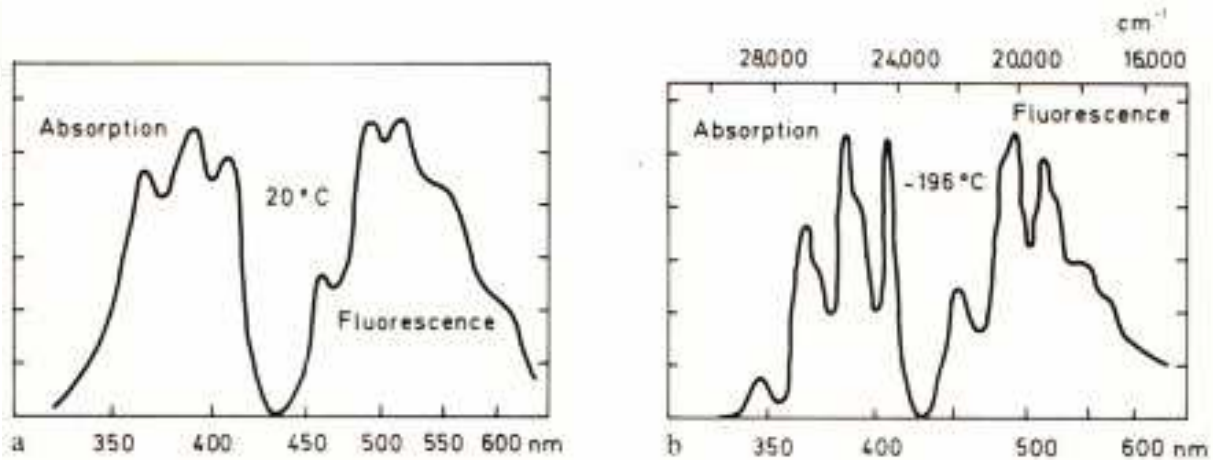


Fig. 1.8. Absorption and fluorescence spectra of diphenyloctatetraene in xylene. (a) at 20°C , (b) at -196°C . (From Hausser et al. 1935)

“Dye Lasers” 3rd edited by F.P.Schafer

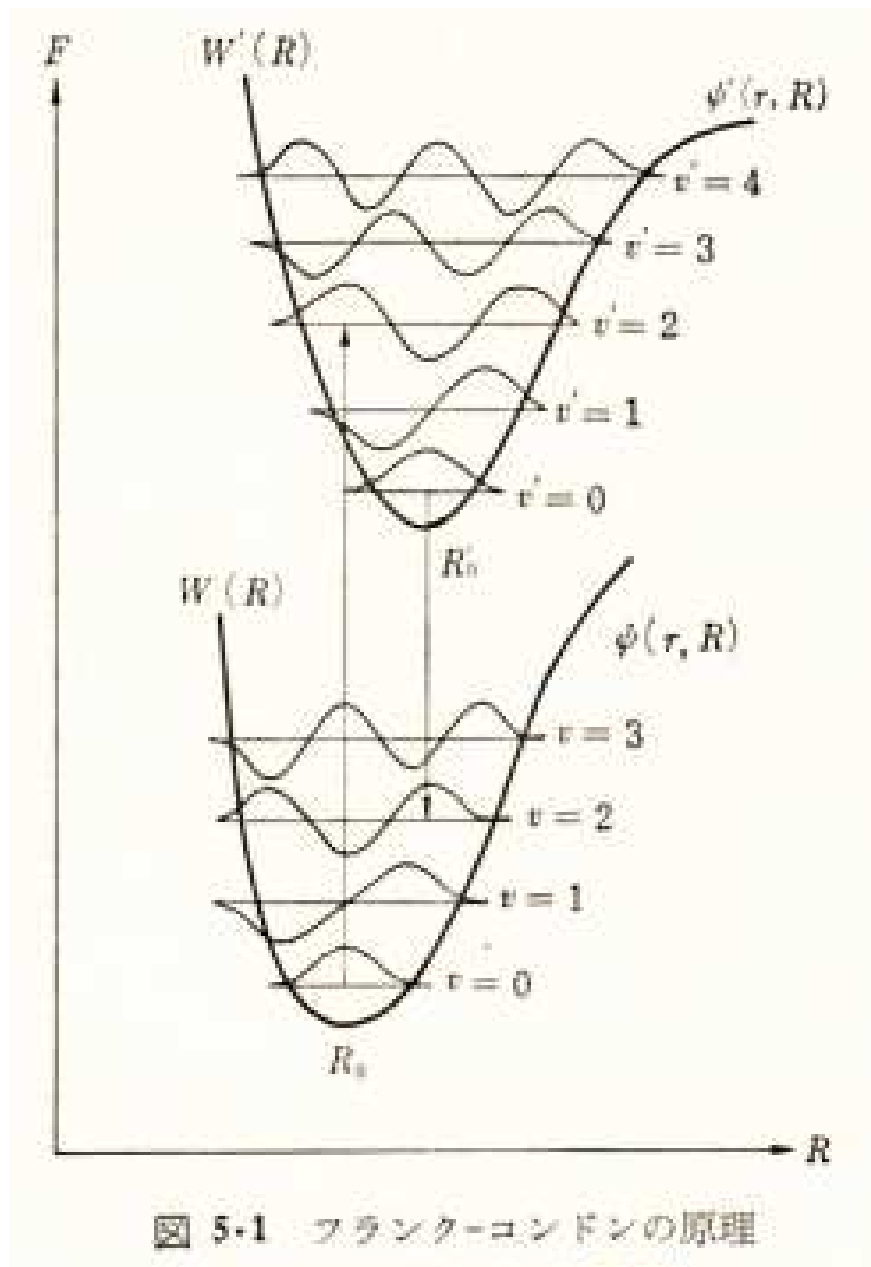


図 5-1 フランク-コンドンの原理

「光生物学のための量子物理学序説」
右衛門佐重雄

問2. 2 球面レンズでなく、円筒レンズを使う理由を述べよ。強い発振を得るには、励起光を色素溶液のどこに集光するとよいか。理由とともに述べよ。

問2. 4 色素レーザーはHeNeレーザーのような気体レーザーと比べて幅広い発振スペクトルを持っている。この特徴は単原子気体とは異なる有機色素分子の吸収・発光特性に由来する。これを説明せよ。