量子計測学 II

担当：鳥井　寿夫（とりい　よしお）　居室：１６号館224Ａ
tel: 03-5454-6757 (内線46757)
e-mail: ytorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp
http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii

授業日：毎週金曜１限（9:00～10:30）、
4月14日～7月14日（計13回）
（注１）6月2日は鳥井が出張のため休講
（注２）7月11日（火）は金曜日の授業を行う

講義資料

http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lectures/OE/index.htm
(東京大学教養学部HP＞専攻＞相関基礎科学系＞物性物理・一般物理＞鳥井寿夫)
にて
・レジュメ (講義で配ったもの)
・スライド資料 (講義で使用したもの)
を公開します。

評価

レポートおよび出席点

レポートの提出期限：次回の授業の開始前。教室にて回収。

講義内容

光エレクトロニクスの基礎を解説する

- 電磁波の伝播 (ガウシアンビーム光学, ファイバー光学, 光共振器)
- 原子と光の相互作用 (自然放出と誘導放出、吸収と分散、均一幅と不均一幅)
- 非線形媒質中の電磁場の伝播 (非線形光学)
- レーザーの原理、各種レーザー
- 光の変調法および光の検出法

この講義の目標

レーザー光を用いたあらゆる実験に必要な基本的知識を習得する

・光学素子（波長板、AOM、EOM、ファイバー、共振器、光検出器）の動作原理を理解する。

・物質の光学的特性（複屈折性、吸収と分散、非線形感受率）と、その起源を理解する。

・光波長変換（第二高調波発生（SHG）、光パラメトリック発振（OPO））の原理を理解する。

参考書

①Amnon　Yariv著「光エレクトロニクス･基礎編／展開編」（丸善）

②霜田光一著「レーザー物理入門」（岩波書店）

③Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich「Fundamentals of Photonics」（Wiley）

レーザー（メーザー）に関係したノーベル物理学賞

1964 **Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov, Aleksandr Mikhailovich Prokhorov** for fundamental work in the field of quantum elec nstruction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle

レーザー（メーザー）の発明

1981 **Nicolaas Blo chawlow** for their contribution t ctroscopy

レーザー（非線形）分光学

1989 **Norman F. Ramsey** for the invention of the separated oscillatory fields metho nd other atomic ocks

水素メーザーによる原子時計

1997 **Steven Chu, D. Phillips** for development ith laser light

レーザー冷却

2001 **Eric A. Cornell**, **Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman** for the achievement ases of alkali atoms, and fo rties of the condensates

原子のボース凝縮（原子レーザー）

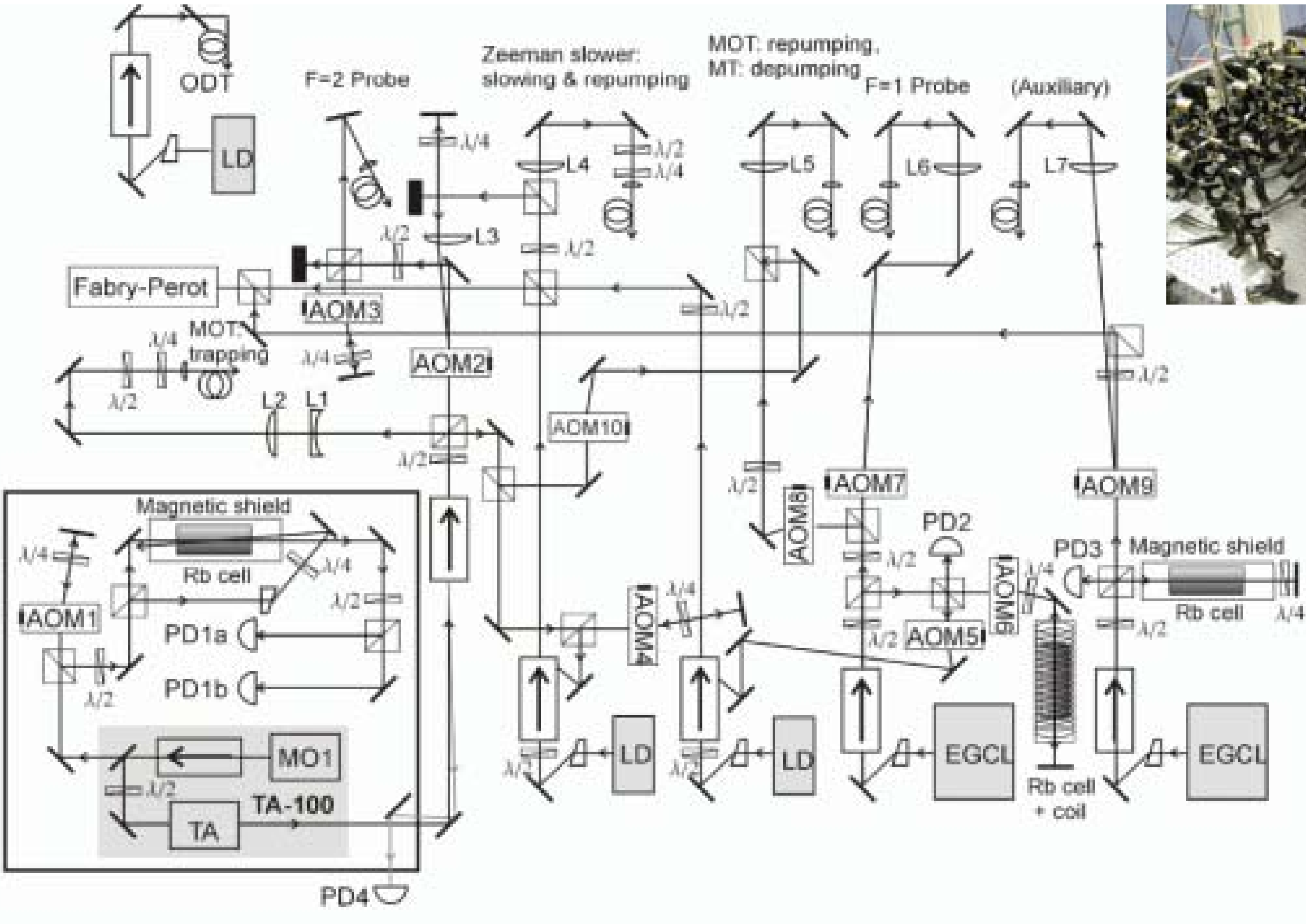
2005 **Roy J. Glauber** for his contribution to the quantum theory of optical coherence"

John L. Hall ons to the development ncluding the optical frequency comb technique

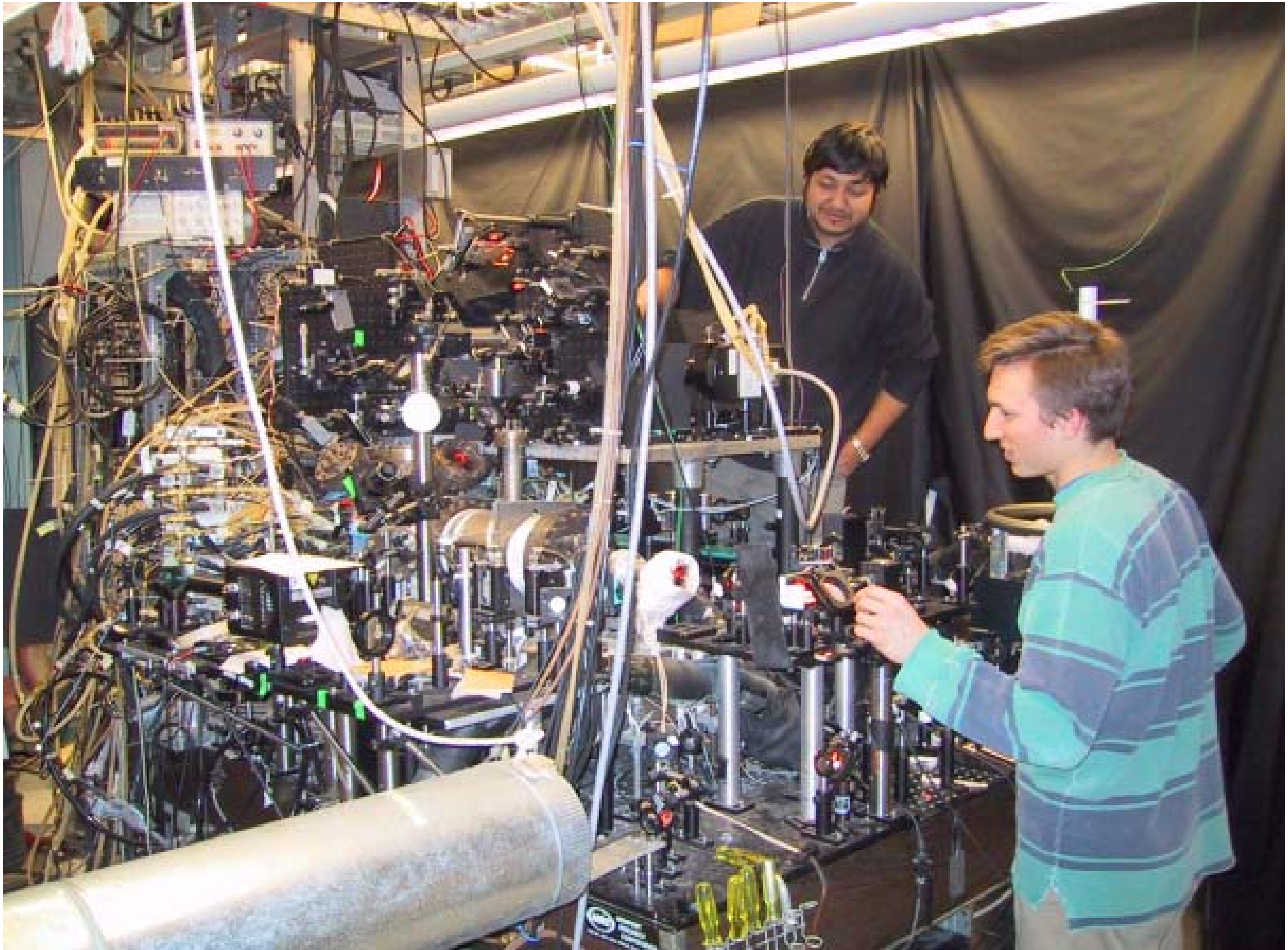
光のコヒーレンス

光の絶対周波数測定

(例) ボース凝縮生成のための光学系



BEC**実験装置**@MIT



デモ実験

- 偏光板実験 (量子Zeno効果のデモ実験)
- セロテープの光物性 (複屈折性および分散特性)
- 方解石の不思議 (複屈折によるウォークオフ)

電磁気学
(マックスウェル方程式)
の復習

マクスウェル方程式 (積分形)

時間変化する電磁場の基本方程式

$$\varepsilon_0 \int_S \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{S} = \int_V \rho dV$$ ガウスの法則

$$\int_C \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{r} = -\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S}$$ 電磁誘導の法則

$$\oint_C \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{r} = \mu_0 \int_S \left(\boldsymbol{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \right) \cdot d\boldsymbol{S}$$ アンペール・マックスウェルの法則

$$\int_S \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} = 0$$ 磁場のガウスの法則

マクスウェル方程式 (微分形)

$$\varepsilon_0 \nabla \cdot \boldsymbol{E} = \rho$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \left(\boldsymbol{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

基本的に、これだけ知っていればいい
(いつでも (物質中でも) 正しい)

真空中のマクスウェル方程式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \quad \left(c \equiv \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \right)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

波動方程式の導出①

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$ の両辺に左から∇をかけると

左辺＝ $\nabla \times \left(\nabla \times \boldsymbol{E} \right) = \nabla \left(\nabla \cdot \boldsymbol{E} \right) - \left(\nabla \cdot \nabla \right) \boldsymbol{E} = -\Delta \boldsymbol{E}$

右辺＝ $-\nabla \times \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \times \boldsymbol{B} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \right)$

$$= -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}$$

したがって $\Delta \boldsymbol{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}$ ←3次元波動方程式

波動方程式の導出②

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$$ **の両辺に左から∇をかけると**

左辺＝ $\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{B}) = \nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{B}) - (\nabla \cdot \nabla)\boldsymbol{B} = -\Delta \boldsymbol{B}$

右辺＝ $\dfrac{1}{c^2}\nabla \times \dfrac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial}{\partial t}\left(\dfrac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\right)$

$$= -\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2}$$

したがって $\Delta \boldsymbol{B} = \dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t^2}$ **←3次元波動方程式**

波動方程式の解

$$\boxed{\Delta \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t^2}}$$

成分をあからさまに書けば

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\begin{pmatrix} E_x(\boldsymbol{r},t) \\ E_y(\boldsymbol{r},t) \\ E_z(\boldsymbol{r},t) \end{pmatrix} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\begin{pmatrix} E_x(\boldsymbol{r},t) \\ E_y(\boldsymbol{r},t) \\ E_z(\boldsymbol{r},t) \end{pmatrix}$$

電場はy軸方向を向いている（y軸方向に偏光している）とする

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)E_y(\boldsymbol{r},t) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}E_y(\boldsymbol{r},t)$$

$$E_x(\boldsymbol{r},t) = E_z(\boldsymbol{r},t) = 0$$

ところで、マックスウェル方程式 $\nabla \cdot \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)=0$ より

$$\frac{\partial}{\partial x}E_x(\boldsymbol{r},t)+\frac{\partial}{\partial y}E_y(\boldsymbol{r},t)+\frac{\partial}{\partial z}E_z(\boldsymbol{r},t)=0$$

であるので、これと $E_x(\boldsymbol{r},t)=E_z(\boldsymbol{r},t)=0$ より、必然的に

$$\frac{\partial}{\partial y}E_y(\boldsymbol{r},t)=0$$

となる。したがって、y軸方向を向いた電場の波は、y軸方向には空間依存性がない。つまり、電場の波はy軸方向に進行できない

↓

電磁波は横波

電場の波は$+x$軸方向に進行しているとする（z軸方向の空間依存性はないとする）と、波動方程式は1次元に帰着できる

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y(x,t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_y(x,t)$$

一般的な解の形は$E_y(x \pm ct)$と表せるが、振動する解は

$$E_y(x,t) = E\cos(kx - \omega t) \quad \text{ただし} \quad c = \frac{\omega}{k} = \lambda f$$

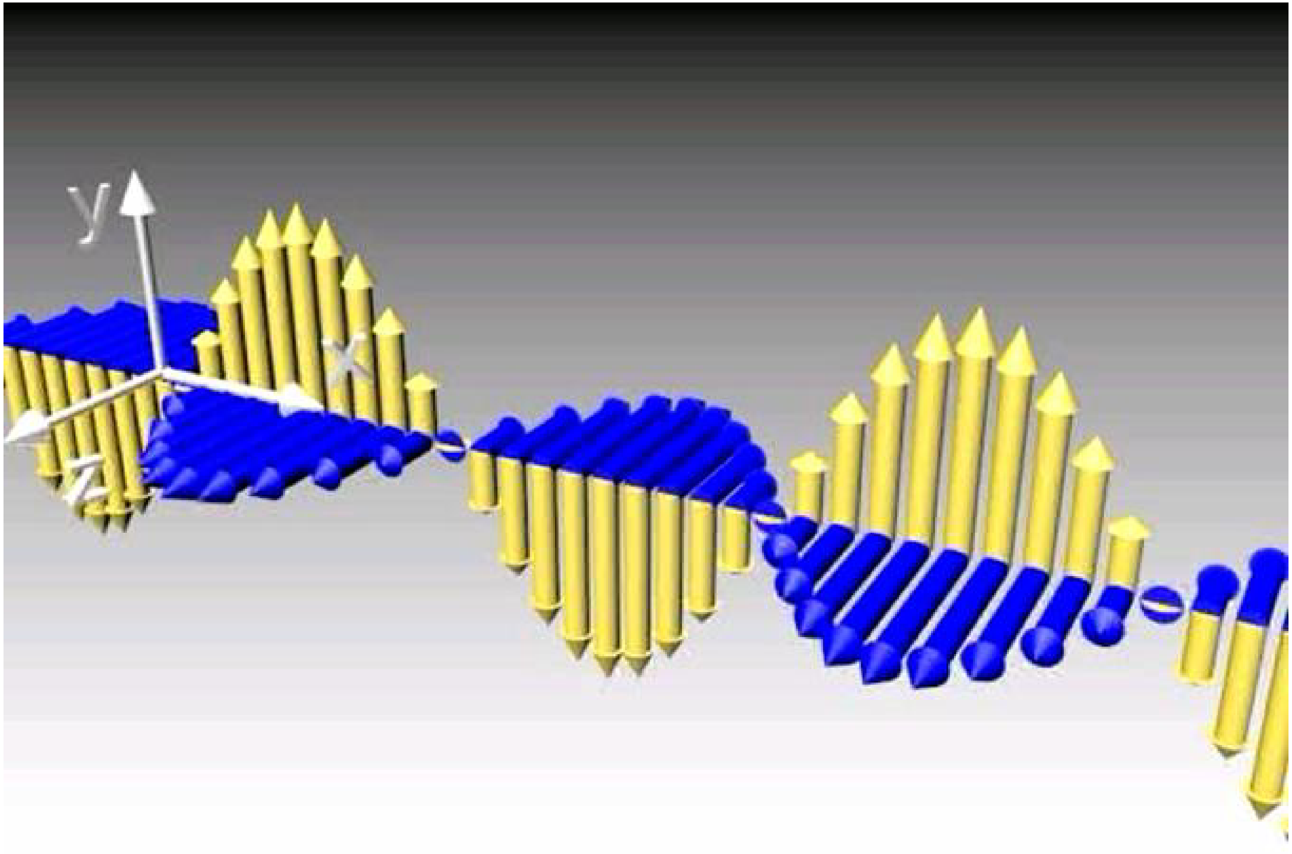
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{：波数} \qquad \omega = 2\pi f \quad \text{：角周波数}$$

（λ：波長、 f：周波数）

対応する磁場の解は

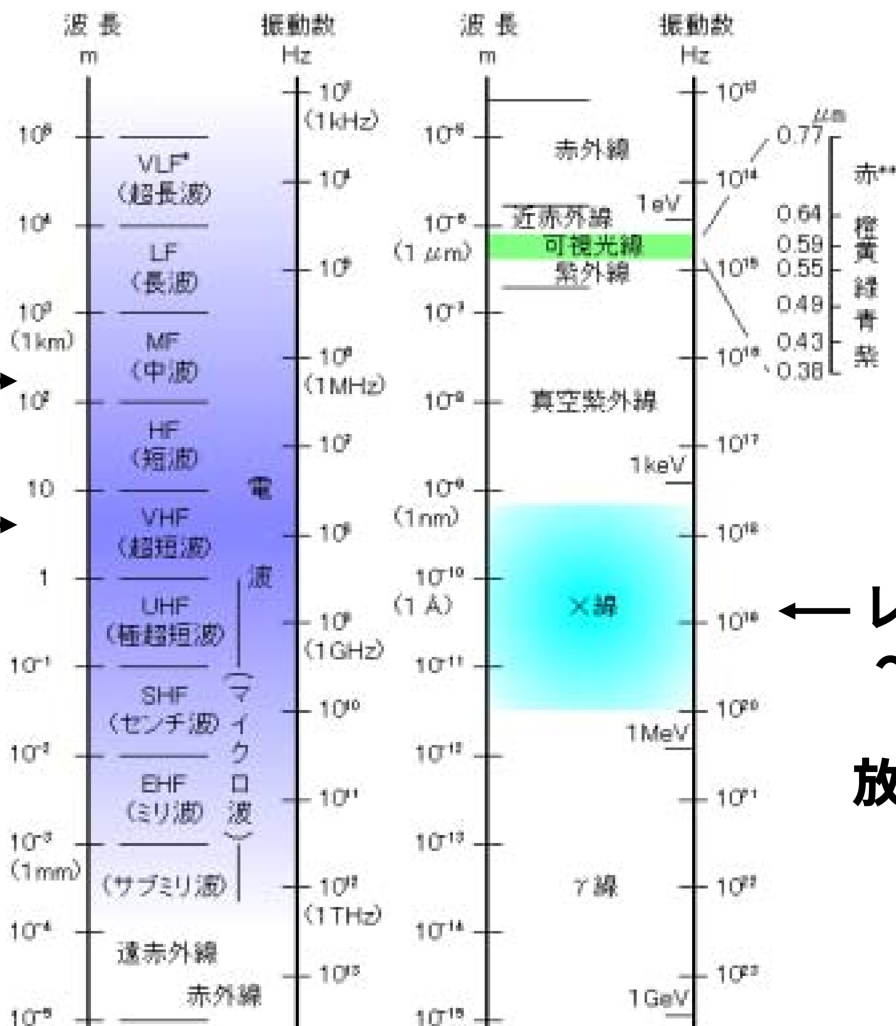
$$B_z(x,t) = B\cos(kx - \omega t) \quad \text{ただし} \quad B = E/c$$

＋x方向に進行する電磁波



http://web.mit.edu/8.02t/www/

表1　電磁波の波長と振動数



AMラジオ →

FMラジオ →

電子レンジ
無線LAN
衛星放送

遠赤外線ヒーター

医療用レーザー → 10.6 μm

可視光線
400 nm〜800 nm

← レントゲン
〜0.1 nm

放射線

＊：電波の周波数帯の英字による呼び方は国際電気通信条約無線規則による。
＊＊：可視光線の限界ならびに色の境界には個人差がある。

[出典] 国立天文台(編): 理科年表 平成10年版、丸善株式会社、(1997年11月29日) p.501