

工学系大学教育連携協議会単位互換eラーニング科目  
磁気光学入門第1回 —この講義で学ぶこと—

佐藤勝昭

東京農工大学

# はじめに

- こんにちは、東京農工大学の佐藤勝昭です。
- 私の専門分野は、応用物性・結晶工学ですが、特に磁性、磁気光物性の研究が専門です。
- この科目では光と磁気のむすびつきに焦点をあて、その基礎から応用までを講義します。
- この授業は、工科系12大学の教育連携単位互換科目として、e-ラーニングで授業を行うものです。
- わからないところは繰り返して学ぶことができます。
- 光と磁気の結びつきのおもしろさを提供したいと思っています。

# この講義のねらい

- 磁気光学効果(ファラデー効果、磁気カー効果など)は、日常的に応用されている物理現象です。
- この現象の起源を探る「学び」の過程で、電磁気学、古典電子論、量子論、固体物理、磁性論、材料科学など、学部で学んだ知識を実のあるものにすることができます。
- また、測定法、デバイス応用などを通じて、基礎科学がいかに先端技術に結びついているかを学びます。

# 教科書・参考書：光と磁気

- この講義は、拙著「光と磁気(改訂版)」(2002年朝倉書店刊)に基づいています。
- この本の初版は1988年に出版され、日本応用磁気学会から出版賞を受賞しました。
- その後、2001年に改訂版を出版しました。



# 学習支援システムMoodle

- この講義では、LMS(学習支援システム)として moodleを使います。
- Moodleには、毎回の講義のポイント、教材(資料、パワーポイント)、課題が入っています。
- 課題に対するレポートは、Moodleにファイルをアップロードする方法で提出します。

# この講義のシラバス

第1回 光と磁気序論

第2回 磁気光学効果とは何か

第3回 電磁気学に基づく磁気光学の理論(1)誘電率テンソル

第4回 電磁気学に基づく磁気光学の理論(2)マクスウェルの方程式

第5回 電磁気学に基づく磁気光学の理論(3)反射と磁気光学

第6回 磁気光学効果の電子論(1)古典電子論

第7回 磁気光学効果の電子論(2)量子論

第8回 中間評価課題提示

第9回 磁気光学効果の測定法

第10回 磁気光学スペクトルと電子構造

第11回 磁気光学効果の応用(1)光磁気記録

第12回 磁気光学効果の応用(2)光通信用磁気光学素子

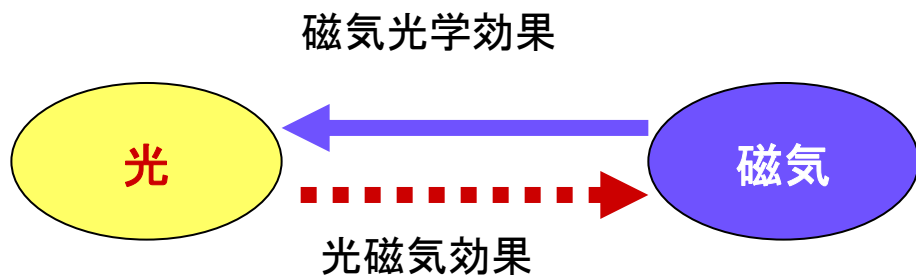
第13回 磁気光学効果の応用(3)その他の磁気光学応用

第14回 磁気光学効果の最近の進展

第15回 期末評価課題提示

# 光と磁気のむすびつき

- 光と磁気のつながりには、
  - 物質の光応答に磁気が寄与する「磁気光学効果」と
  - 物質の磁性に光が影響する「光磁気効果」があります。



# 広義の磁気光学効果

- おなじみのファラデー効果、磁気カー効果などいわゆる狭義の磁気光学効果と、ゼーマン効果、磁気共鳴、マグネトプラズマ効果など磁気が電磁波の応答に影響を与えるすべての効果が含まれます。



# 光磁気効果のいろいろ

- 光磁気効果にもいろいろな種類があります。
  - 光誘起磁気効果、光誘起磁化(逆ファラデー効果)、光誘起スピン再配列、熱磁気効果が含まれます。
  - 光磁気ディスクの記録には、レーザ光の熱を用いた熱磁気効果が使われています。
- この講義では、主として狭義の磁気光学効果に焦点を当ててお話しします。

## 第2回 磁気光学効果とは(1)

- はじめに「偏光とは何か」から出発して、光学活性(物質に直線偏光が入射したときに、偏光の傾きが変化したり、楕円偏光になったりする効果)を説明します。

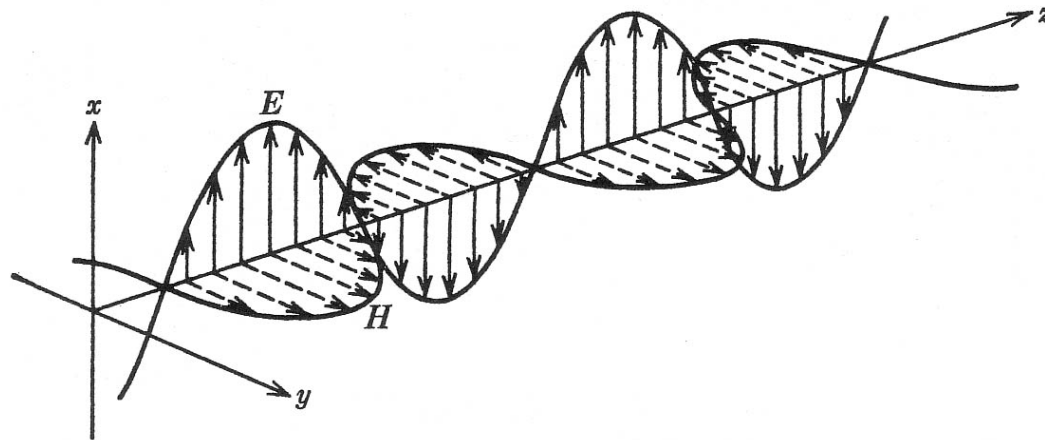
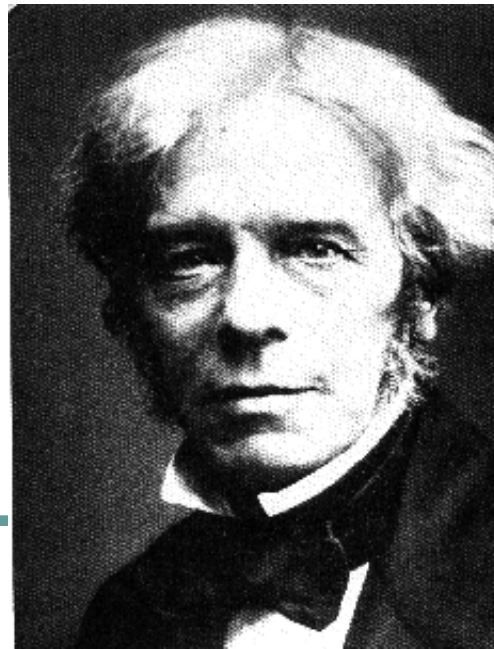


図 2.1 電磁波の電界ベクトル( $E$ )と磁界ベクトル( $H$ )

## 第2回 磁気光学効果とは(2)

- つぎに磁性体(磁化をもつ物質)に直線偏光が入射したときの光学活性(旋光性と円二色性)を磁気光学効果とよびます。これには、ファラデー効果、カー効果などがあることをのべます。



ファラデーの肖像

# 第3回 電磁気学に基づく磁気光学の理論

## (1)誘電率テンソル

- ここでは次のスライドのように旋光性や円二色性が左右円偏光に対する物質の応答の差に基づいて生じることを説明します。
- 直線偏光の電界ベクトルの軌跡は振幅と回転速度が等しい右円偏光と左円偏光との合成で表されます。
- 透過後の光の左円偏光が右円偏光よりも位相が進んでいたとするとこれらを合成した電界ベクトルの軌跡は、もとの直線偏光から傾いたものになります。
- 右円偏光と左円偏光のベクトルの振幅に差が生じたとき、それらの合成ベクトルの軌跡は楕円になります。

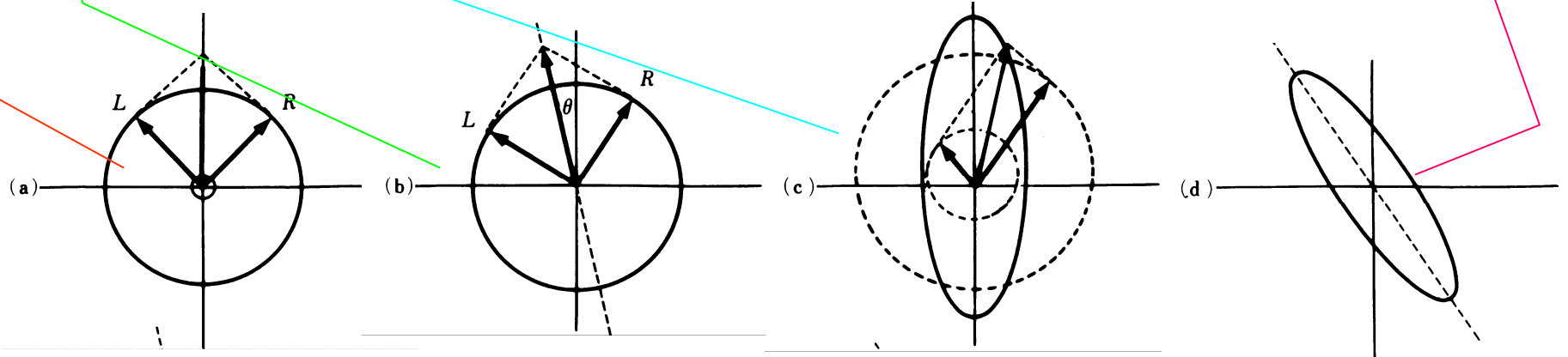
# 円偏光と磁気光学効果

直線偏光は等振幅等速度の左右円偏光に分解できる

媒質を通ることにより左円偏光の位相と右円偏光の位相が異なると**旋光**する

媒質を通ることにより左円偏光の振幅と右円偏光の振幅が異なると**楕円**になる

一般には、主軸の傾いた楕円になる



# 媒体の応答を与える物理量：誘電率

- 電磁波の伝搬において、媒体の応答を与えるのが、誘電率  $\epsilon$  または伝導率  $\sigma$  です。
- 磁性体中の伝搬であるから透磁率が効いてくるのではないかと考える人があるかも知れませんが、光の振動数くらいの高周波になると巨視的な磁化はほとんど磁界に追従できなくなるため、透磁率を  $\mu \cdot \mu_0$  としたときの比透磁率  $\mu$  は1として扱ってよいのです。ここに  $\mu_0$  は真空の透磁率でありSI単位系特有のもので、 $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$  H/mです。

# 誘電率テンソル

$$D = \tilde{\epsilon} \epsilon_0 E$$

$$D_i = \epsilon_{ij} \epsilon_0 E_j$$

$D$  も  $E$  もベクトルなのでベクトルとベクトルの関係を与える量である  $\epsilon$  は2階のテンソル量となります。  
2階のテンソルというのは、2つの添字をつかって表される量で、 $3 \times 3$ の行列と考えてさしつかえありません。

# 第4回 電磁気学に基づく磁気光学の理論

## (2) マクスウェルの方程式

- マクスウェルの方程式を使って光の伝搬を考えます。
- マクスウェルの方程式に、第3回の誘電率テンソルを代入し、このような物質中で磁化方向に伝搬する電磁波の固有状態は円偏光であることを導きます。
- 磁気光学効果、すなわち、磁化をもつ物質の左右円偏光に対する複素屈折率の差は、誘電率テンソルの非対角成分から生じていることを導きます。



# 連続媒体での光の伝搬とMaxwell方程式

- 連続媒体中の光の伝わり方はマクスウェルの方程式で記述されます。学部の電磁気学で学んだと思いますが、電磁波の電界と磁界との間の関係を与える2階の微分方程式であると理解しておいてください。

$$\text{rot rot } E(\omega, t) + \frac{\tilde{\epsilon}(\omega, t)}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(\omega, t) = 0$$

この式に $E(\omega)$  の波動関数  $E \exp(-i\omega t + i\omega N r/c)$  を代入し、固有値  $N$  を求めます。

# 第5回 電磁気学に基づく磁気光学の理論

## (3) 反射の磁気光学効果

- 第5回では、反射の磁気光学効果である「磁気カー効果」について、電磁気学に基づいて学びます。
- 光の反射率は、境界面での電界や磁界の面内成分の連続性から計算されます。
- 反射に対する磁気光学効果の理論は、やや複雑な式が続くので、エッセンスだけを理解してください。

# 第6回 磁気光学効果の電子論

## (1) 古典電子論

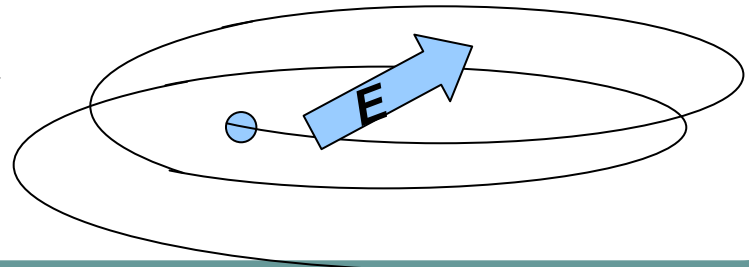
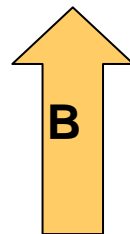
- この回はミクロな立場に立って磁気光学効果を考えます。ミクロといっても、ここでは、古典的なローレンツの運動方程式にもとづいて、磁界中の電子の運動を扱い、誘電率の周波数依存性を導きます。磁界のある場合、誘電率の非対角成分は、磁界の1次に比例することが導かれます。
- 古典電子論で強磁性体の磁気光学効果を説明するには、とてつもない強い磁界が物質中に働いていると考えないと説明できないことを示し、次の回に述べる量子力学の重要性を示します。

# 電界・磁界のもとにおける荷電粒子の運動

- 古典力学の運動方程式を考えます。
  - 荷電粒子の電荷  $q$  [C], 質量  $m$  [kg]
  - 荷電粒子の変位  $u$  [m]
  - 慣性力  $m d^2 u / dt^2$
  - 摩擦力  $m \gamma du / dt$
  - Lorentz力  $q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q(\mathbf{E} + du / dt \times \mathbf{B})$

$$m d^2 \mathbf{u} / dt^2 + m \gamma d\mathbf{u} / dt = q(\mathbf{E} + d\mathbf{u} / dt \times \mathbf{B})$$

これにもとづいて変位  $u$  を求め、  
それから分極を求め、それを  
用いて誘電率を求めます。



## 第6回 磁気光学効果の電子論(2)量子論

- この回では「磁気光学効果を量子論で考えたらどうなるか」について、説明します。ちょっと面倒な式が続きますが、「こんなものかな」と気軽に考えておつきあい下さい。
- 電子分極による誘電率の対角・非対角成分を量子論に立って計算します。
- 量子論はわかりにくいので、図を使って、光学遷移と、磁気光学効果の関係を説明します。
- 量子論によって初めて、強磁性体の磁気光学効果を説明できるのです。

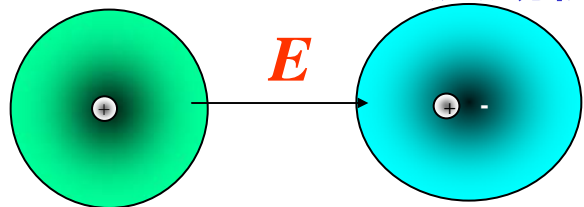
# 電子分極のミクロな扱い

電界の摂動を受けた  
波動関数

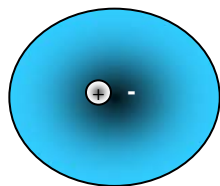
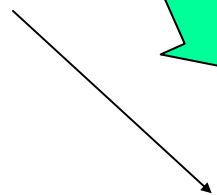
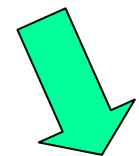
$$\chi_{xx}(\omega) = \frac{2Nq^2}{\hbar\epsilon_0} \sum_j \omega_{j0} |\langle j|x|0\rangle|^2 \left[ \frac{1}{\omega_{j0}^2 - \omega^2} \right]$$

$$= \frac{2Nq^2}{\hbar\epsilon_0} \left( \frac{\omega_{10} |\langle 1|x|0\rangle|^2}{\omega_{10}^2 - \omega^2} + \frac{\omega_{20} |\langle 2|x|0\rangle|^2}{\omega_{20}^2 - \omega^2} + \dots \right)$$

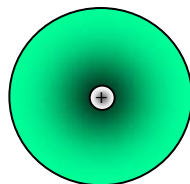
無摂動系の  
波動関数



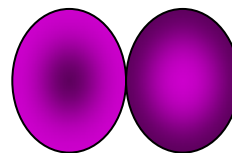
$E$



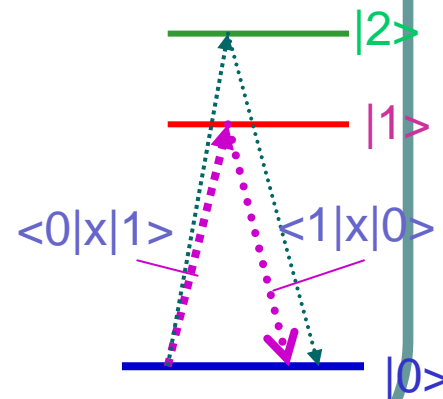
摂動を受けた  
波動関数



s-電子的

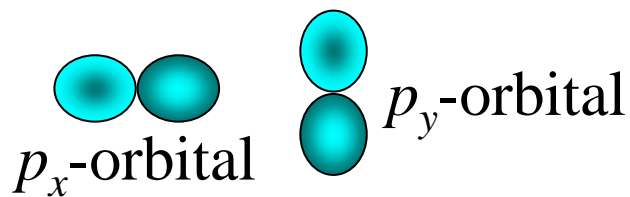


p-電子的

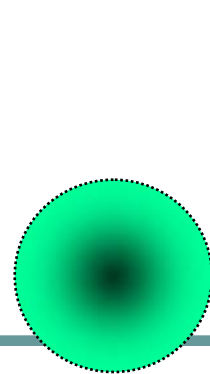
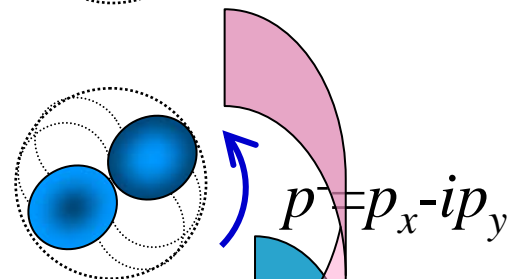
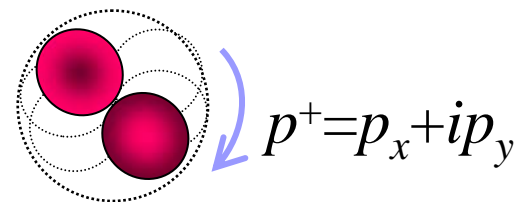
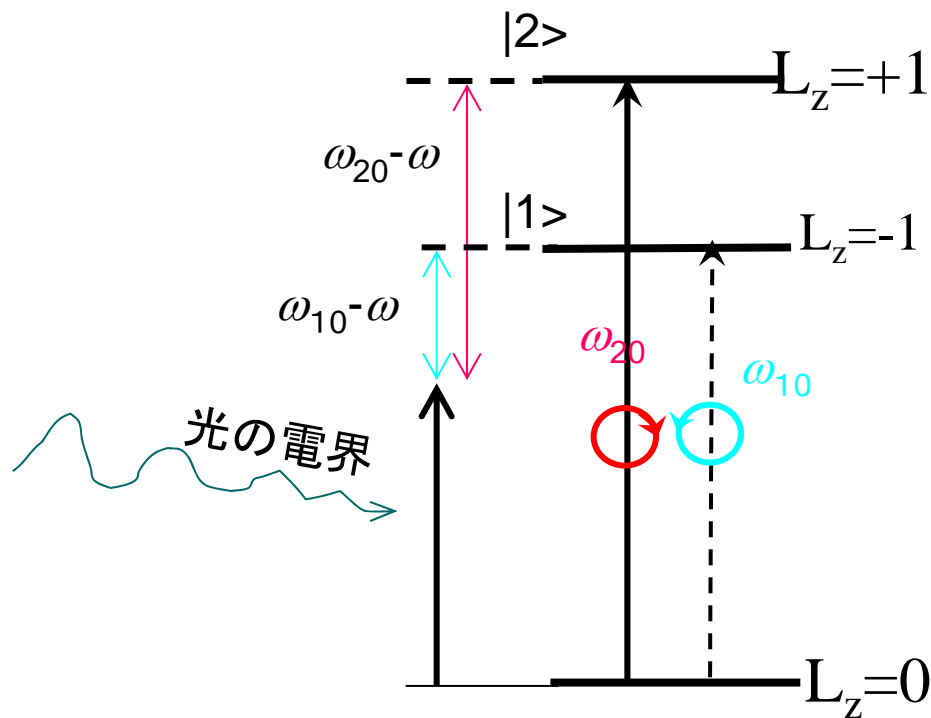


無摂動系の固有関数で展開

# 円偏光の吸収と電子構造



$$\chi_{xy}(\omega) = \frac{Nq^2}{2i} \left( -\omega_{10} \frac{|\langle 0|x^-|1 \rangle|^2}{\omega_{10}^2 - \omega^2} + \omega_{20} \frac{|\langle 0|x^+|2 \rangle|^2}{\omega_{20}^2 - \omega^2} \right)$$



$\omega_{10}$ は $\omega_{20}$ より光エネルギー $\omega$ に近いので左回りの状態の方が右回り状態より多く基底状態に取り込まれる

## 第8回 中間評価 課題の提示

- 第1回から第7回までに学んだことを復習し、自分なりに理解するためのコーナーです。レポート課題を出しますので、指示に従って提出してください。

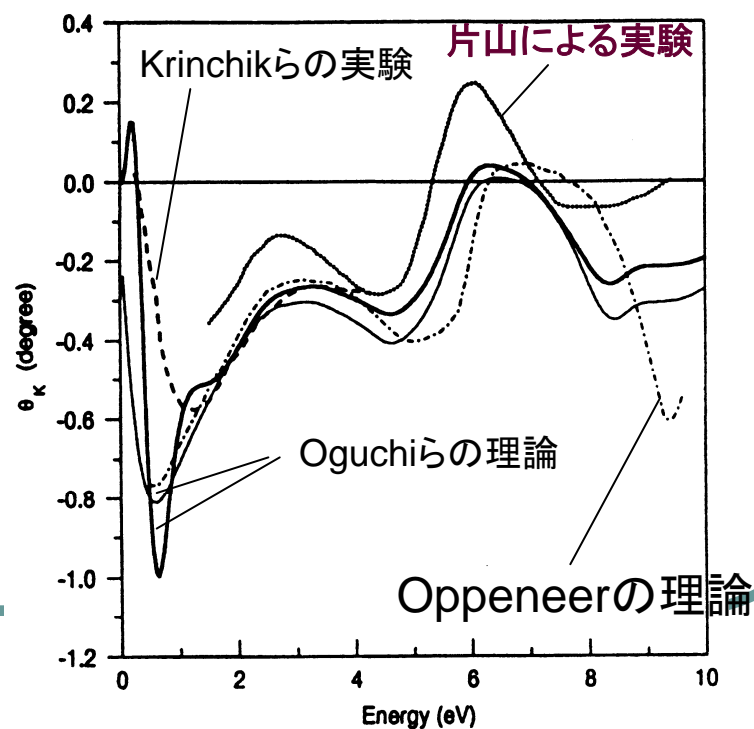


# 第9回 磁気光学効果の測定法

- 磁気光学効果の測定法としてよく用いられるものを紹介し、その原理を理解します。
- 直交偏光子法
- 振動偏光子法
- 回転検光子法
- ファラデー変調法
- 光学遅延変調法
- スペクトル測定システム
- 楕円率の評価

# 第10回 磁気光学効果と電子構造

- 物質の電子構造を探る手段としての磁気光学スペクトルに注目し、第1原理計算結果と、実験結果の対応などについて説明します。
- 図はFeの磁気光学スペクトルの理論と実験の対応です。



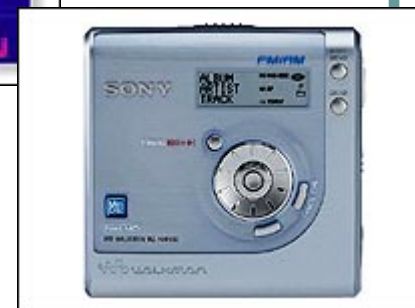
# 第11-13回 磁気光学効果の応用

- 光磁気記録(記録情報の読み出し)
- 光アイソレータ(光通信における方向性結合)
- 高圧電流測定(磁気光学センサ)
- 空間光変調器(光画像処理)
- 微小磁区観察(磁気光学顕微鏡)

など磁気光学の実用化例をご紹介し、その中でどのような開発と発展がなされているかを説明します。

# 第11回 光磁気記録

- 光で情報を磁気記録する
- 磁気記録された情報を光で読む



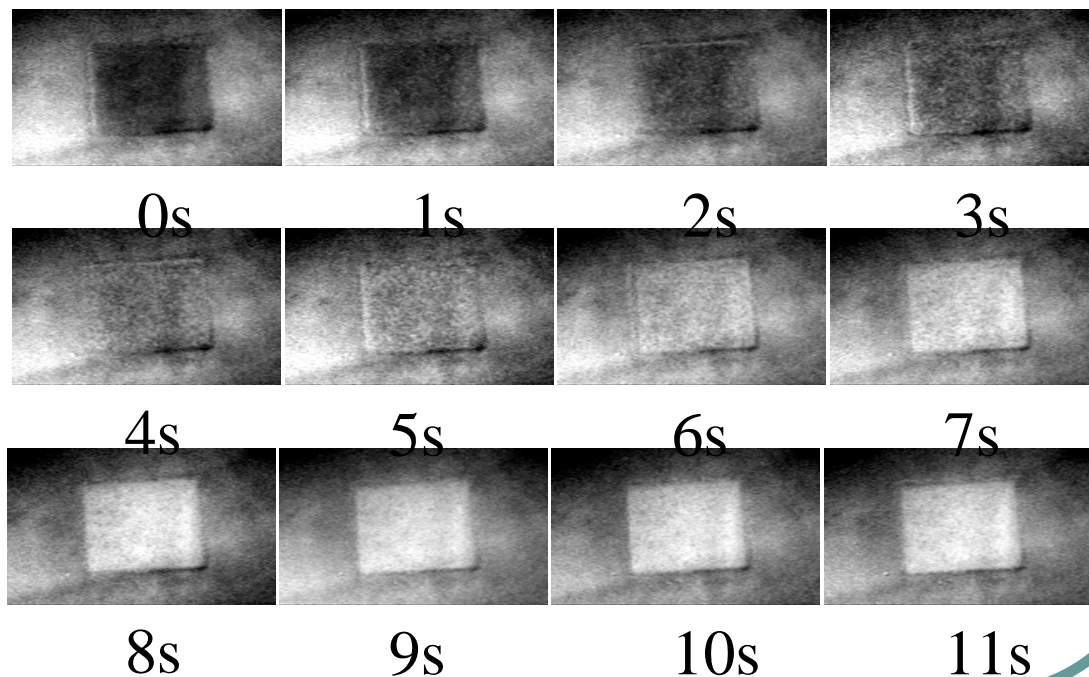
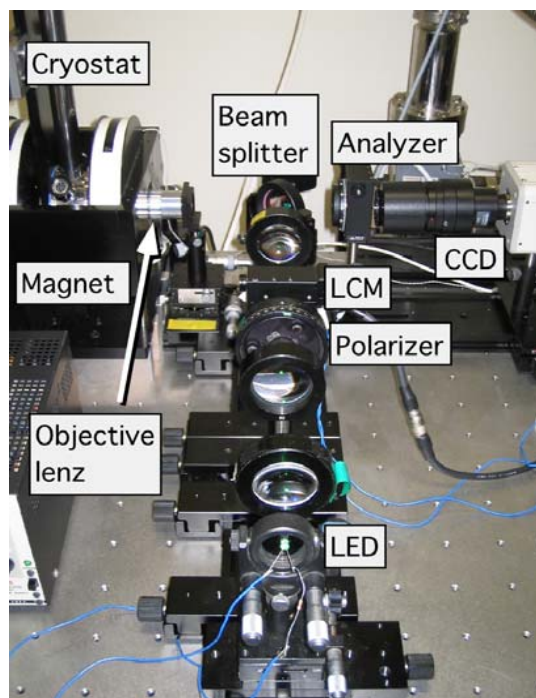
# 第12回 光通信用アイソレータ

- 戻り光が半導体レーザーに入射して不安定化することを避けるために、磁気光学効果を用いて光を一方通行にするデバイス



# 第13回 磁気光学イメージング

- 磁気光学効果を用いて磁区や磁束のイメージングを行う。



# 第14回 磁気光学研究の最近の展開

- ここでは、最近の研究動向について述べます。
- 近接場磁気光学効果
- 非線形磁気光学効果
- その他の磁気光学効果
  - X線磁気円二色性
  - サニャック干渉計
  - ポンププローブ法による時間分解磁気光学測定

# 今回のまとめと次週への課題

- ここまで、私の一連の講義を通じて何を学ぶかをご紹介してきました。
- 次回は、磁気光学効果とは何かについて学びます。教科書「光と磁気」をお持ちの方は、第2章をお読みください。
- Web siteから「光と磁気」第2章の原稿をダウンロードすることが可能です。