

大学院工学研究科  
磁性工学特論第7回

—光と磁気(1)—

佐藤勝昭  
農工大副学長

# 今回学ぶこと:

- 磁気光学効果とはなにか
  - 光の偏り
  - 旋光性と円二色性
  - ガラスのファラデー効果
  - 強磁性体のファラデー効果
  - 磁気カー効果
  - 磁気光学スペクトル
  - その他の磁気光学効果
- 光磁気効果

# 光の偏り(偏光)

- 光は電磁波である。
- 電界ベクトル $E$ と磁界ベクトル $H$ は直交
- 偏光面： $H$ を含む面、振動面： $E$ を含む面

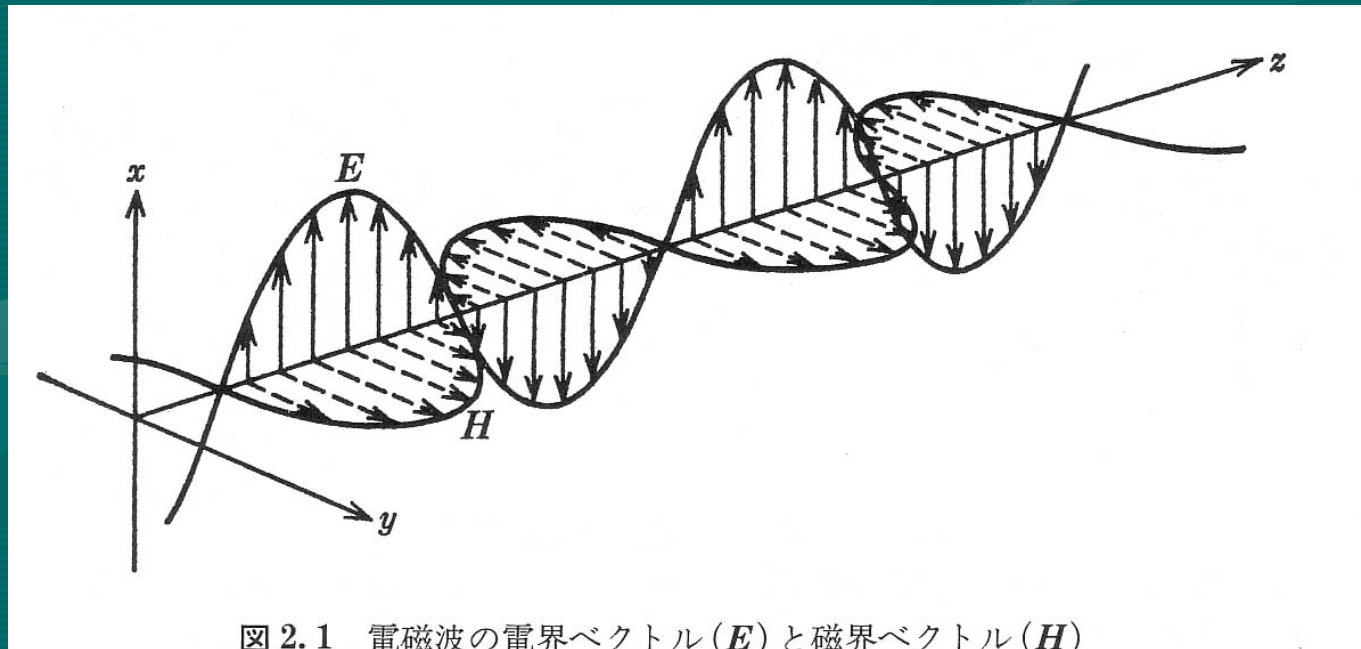


図 2.1 電磁波の電界ベクトル( $E$ )と磁界ベクトル( $H$ )

# 偏光の発見

- 1808年、ナポレオン軍の陸軍大尉で技術者のE.L. Malus がパリのアンフェル通りの自宅の窓からリュクセンブル宮の窓で反射された夕日を方解石の結晶を回転させながら覗いていた時発見された。

<http://www.polarization.com/history/history.html>



スケッチ  
リュクセンブル宮  
By K. Sato

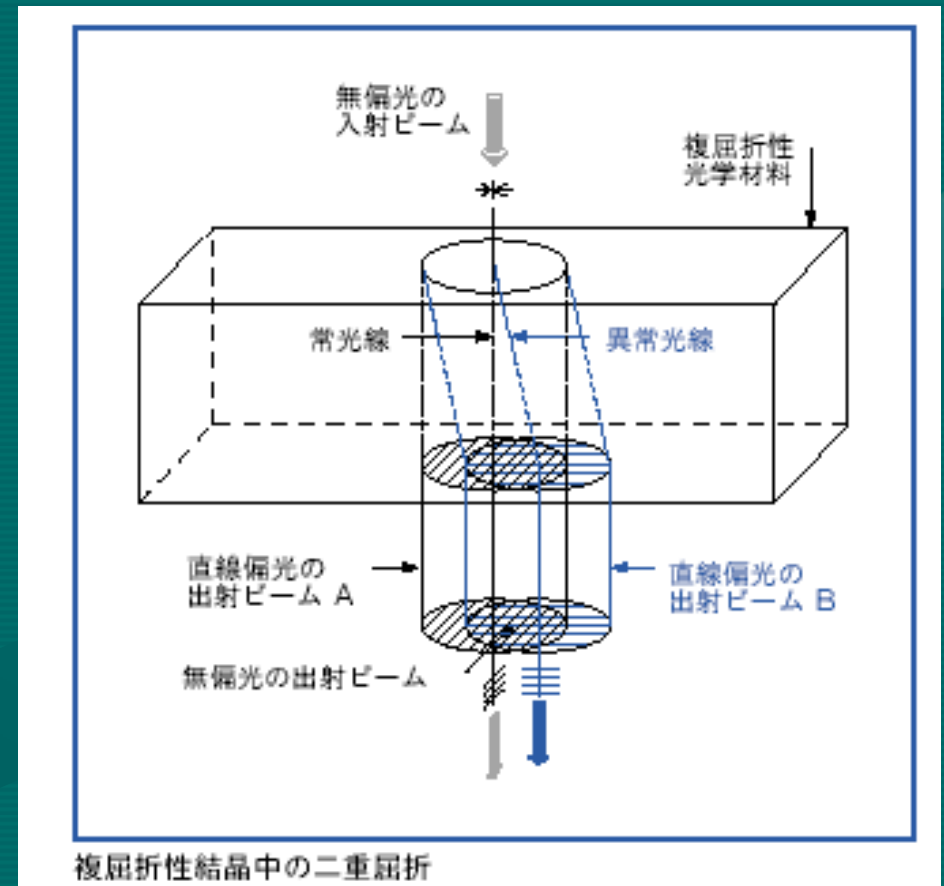
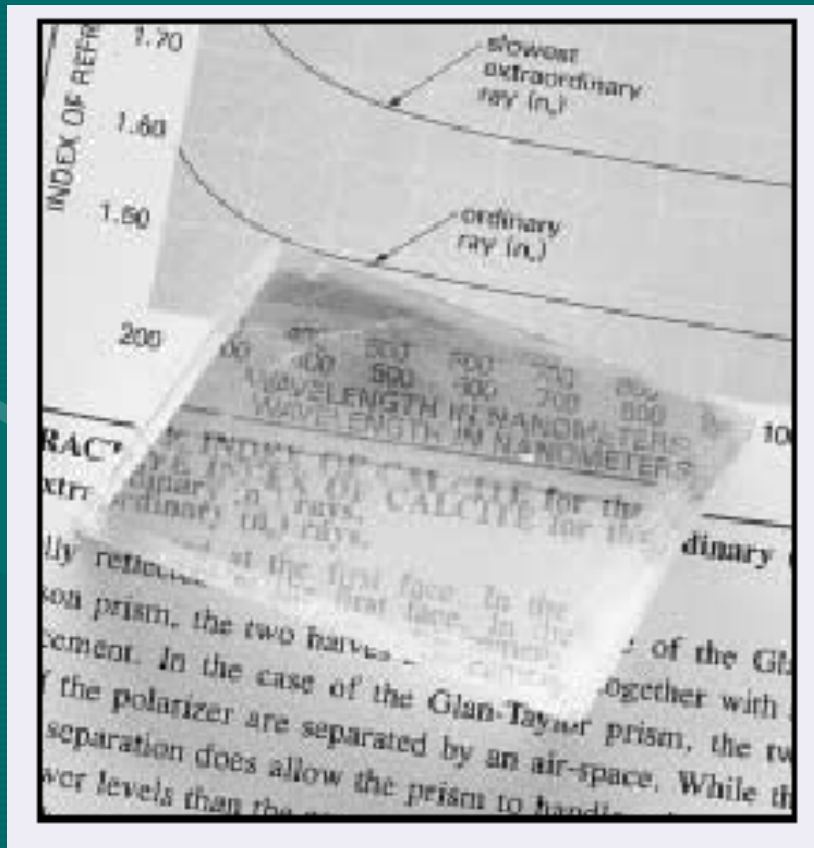
# 直線偏光

- 偏光面が一つの平面に限られたような偏光を直線偏光と呼ぶ。
- 直線偏光を取り出すための素子を直線偏光子という。
- 直線偏光子には、複屈折偏光子、線二色性偏光子、ワイヤグリッド偏光子、ブリュースタ偏光子などがある。

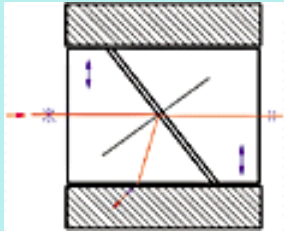


# 複屈折とは

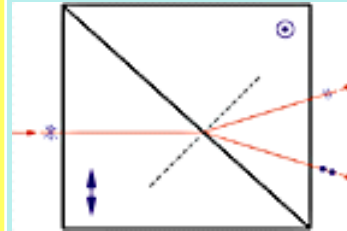
- 方解石(calcite)の複屈折  
– 文字が2重に見える。



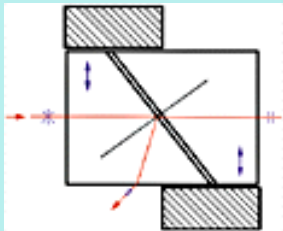
# 複屈折偏光子



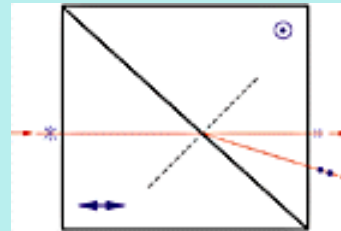
گرانテー  
ラー偏光子



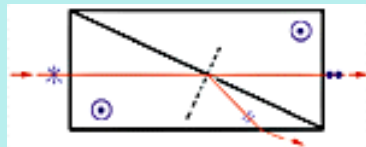
ウォラストン  
偏光子



گرانレー  
ザー偏光子



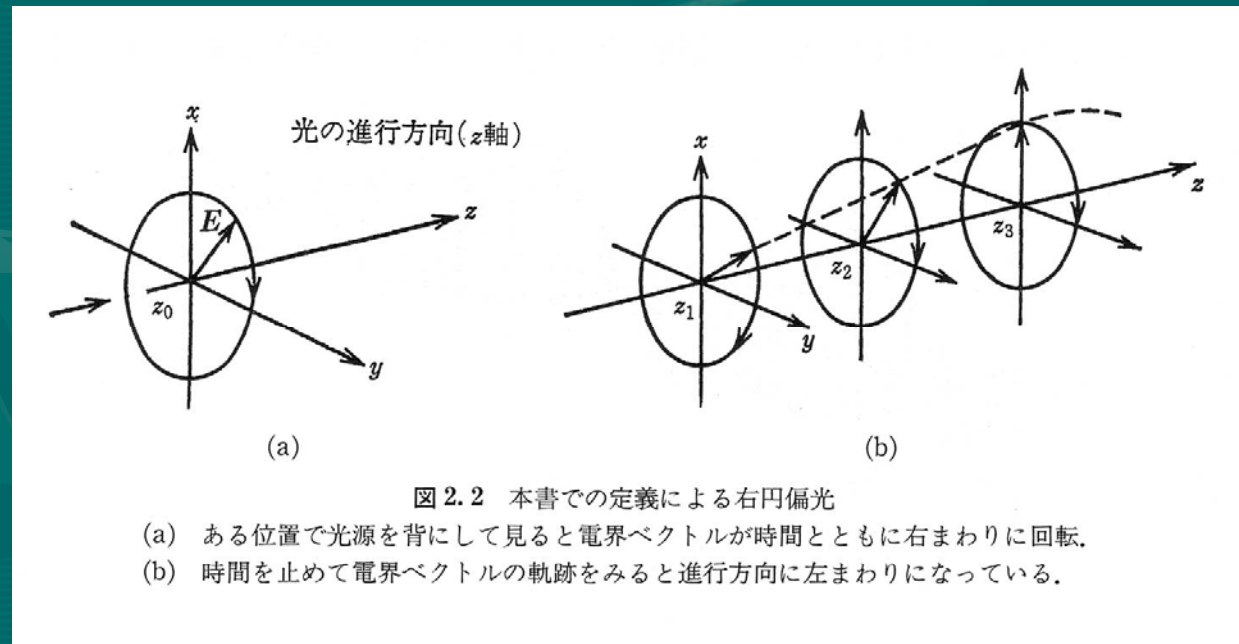
ロション偏光  
子



グラントムソ  
ン偏光子

# 円偏光

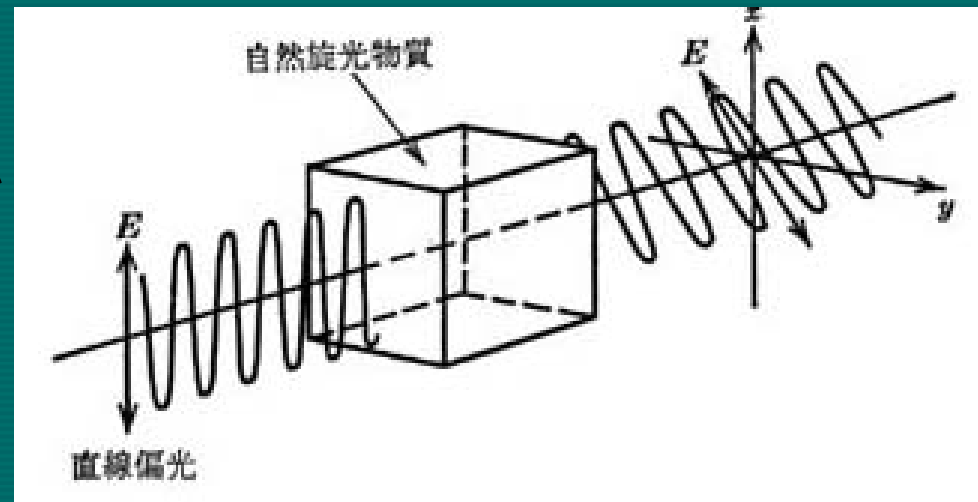
- ある位置で見た電界(または磁界)ベクトルが時間とともに回転するような偏光を一般に楕円偏光という。
- 光の進行方向に垂直な平面上に電界ベクトルの先端を投影したときその軌跡が円になるものを円偏光という。円偏光には右(回り)円偏光と左(回り)円偏光がある。どちらが右でどちらが左かは著者により異なっている。





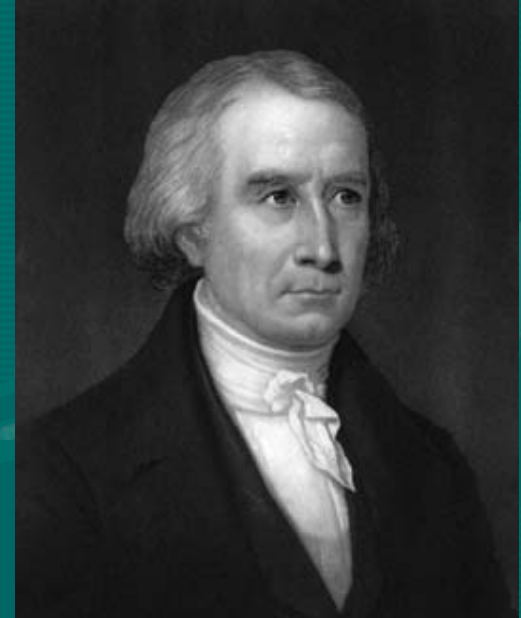
# 旋光性と円二色性

- 物体に直線偏光を入射したとき透過してきた光の偏光面がもとの偏光面の方向から回転していたとすると、この物体は旋光性を持つという。
  - － 例) ブドウ糖、ショ糖、酒石酸等
- これらの物質にはらせん構造があって、これが旋光性の原因になる。



# 旋光性の発見

- 物質の旋光性をはじめて見つけたのは、フランスの Arago (1786-1853) で、1811年に、水晶においてこの効果を発見した。Arago は天文学者としても有名で、子午線の精密な測量を Biot (1774-1862) とともにに行い、スペインでスパイと間違われて逮捕されるなど波瀾に満ちた一生を送った人である。Arago の発見は Biot に引きつがれ、旋光角が試料の長さに比例することや、旋光角が波長の二乗に反比例すること(旋光分散)等が発見された。



François Arago  
1786 - 1853

# 円二色性

- 酒石酸の水溶液などでは、右円偏光と左円偏光とに対して吸光度が違うという現象がある。これを円二色性という。この効果を発見したのはCottonというフランス人で1869年のことである。彼は図2.4のような装置をつかって眺めると左と右の円偏光に対して明るさが違うことを発見した。後で説明するが(3.1節)、円二色性がある物質に直線偏光を入射すると透過光は楕円偏光になる。

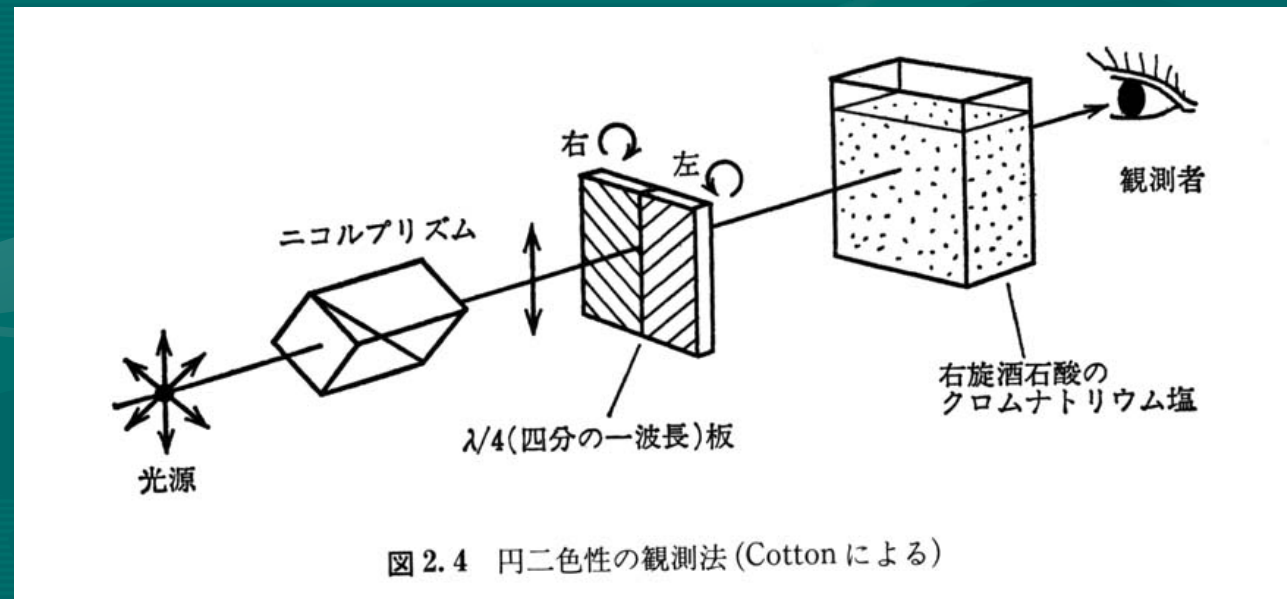


図 2.4 円二色性の観測法 (Cotton による)

# クラマース・クローニヒの関係

- 旋光性と円二色性は互いに独立ではなく、クラマース・クローニヒの関係で結びついている。
- 旋光角のスペクトルは、円二色性スペクトルを微分したような形状をもっている。
  - 物理現象における応答を表す量の実数部と虚数部は独立ではなく、互いに他の全周波数の成分がわかれば積分により求めることができるという関係

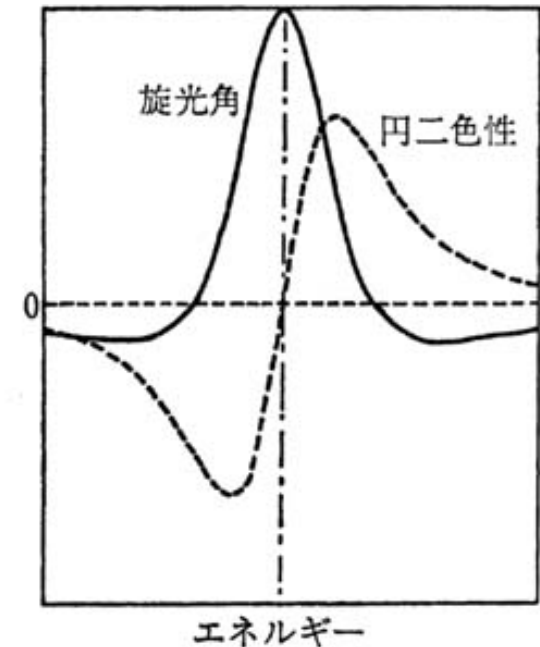


図 2.10 旋光分散 (実線) と円二色性分散 (点線)

# 光学活性

- 旋光性と円二色性をあわせて光学活性という
- 物質本来の光学異方性による光学活性を「自然活性」とよぶ。
- 電界(電気分極)によって誘起される光学活性を電気光学(EO)効果という。
  - ポッケルス効果、電気光学カー効果がある。
- 磁界(磁化)によって誘起される光学活性を磁気光学(MO)効果という。
- 応力による光学活性をピエゾ光学効果または光弾性という

# 非磁性体のファラデー効果

- ガラス棒にコイルを巻き電流を通じるとガラス棒の長手方向に磁界ができる。このときガラス棒に直線偏光を通すと磁界の強さとともに偏光面が回転する。この磁気旋光効果を発見者Faradayに因んでファラデー効果という。
- 光の進行方向と磁界とが同一直線上にあるときをファラデー配置といい、進行方向と磁界の向きが直交するような場合をフォークト配置という。

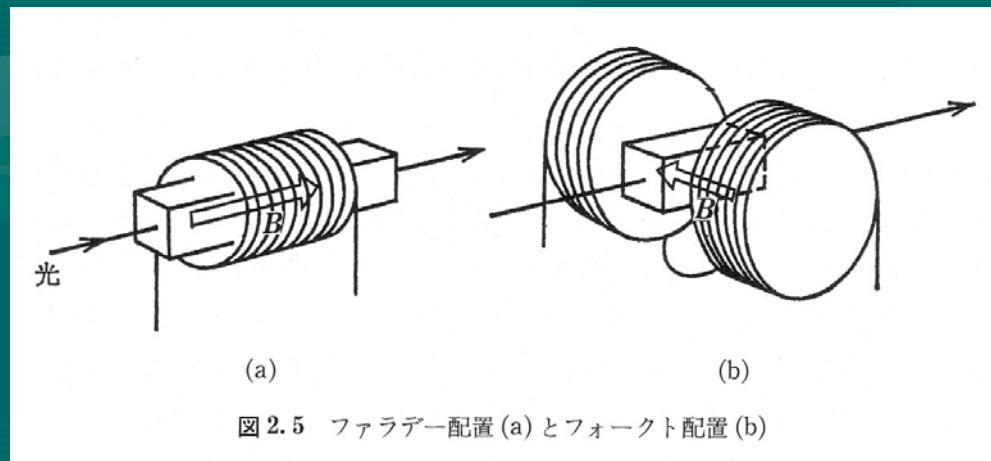
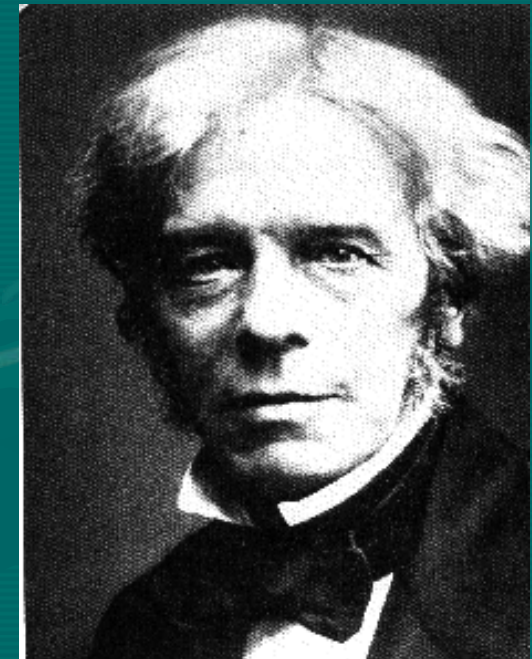
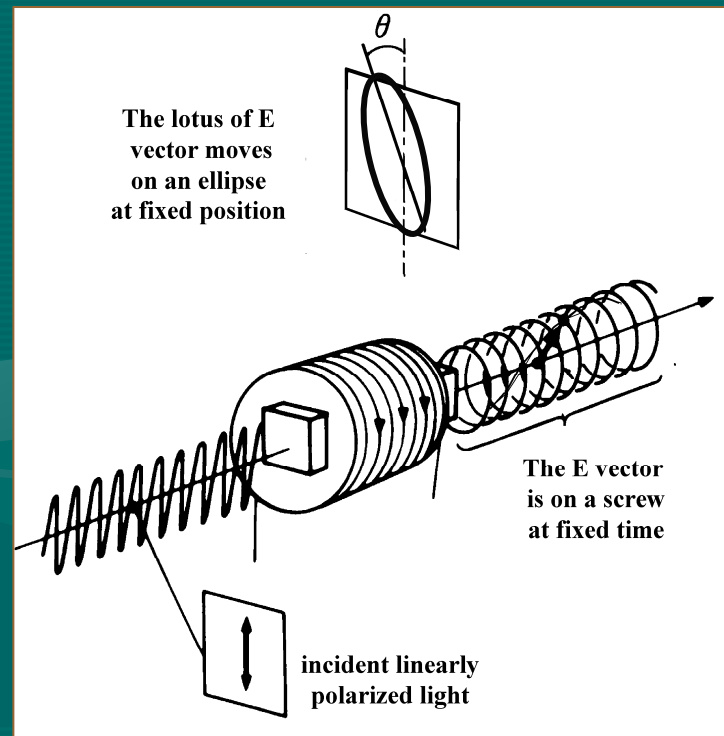


図 2.5 ファラデー配置 (a) とフォークト配置 (b)

# ファラデー効果

- ファラデー配置において直線偏光が入射したとき出射光が楕円偏光になり、その主軸が回転する効果



M. Faraday (1791-1867)

# ヴェルデ定数

- 強磁性を示さない物質の磁気旋光角を  $\theta_F$ 、磁界を  $H$ 、光路長  $l$  とすると、

$$\theta_F = V l H$$

と表される。 $V$  はと呼ばれ、物質固有の比例定数である。

ヴェルデ定数一覧表  $\lambda=546.1\text{nm}$  理科年表による

物質	$V$ [min/A]	物質	$V$ [min/A]
酸素	$7.598 \times 10^{-6}$	NaCl	$5.15 \times 10^{-2}$
プロパン	$5.005 \times 10^{-5}$	ZnS	$2.84 \times 10^{-1}$
水	$1.645 \times 10^{-2}$	クラウンガラス	$2.4 \times 10^{-2}$
クロロホルム	$2.06 \times 10^{-2}$	重フリントガラス	$1.33 \times 10^{-1}$



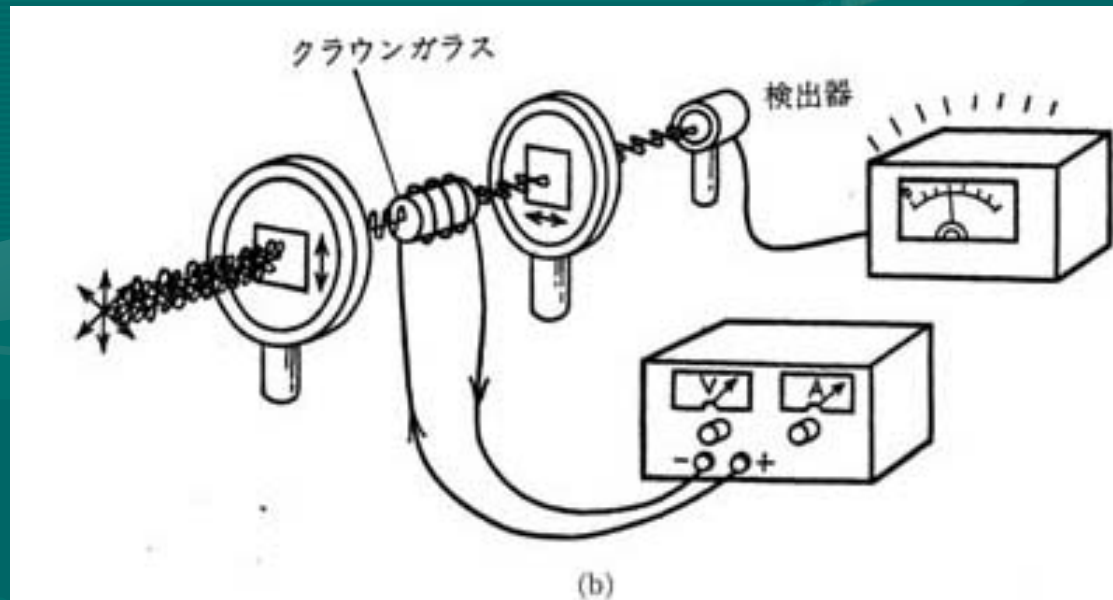
# 直交偏光子

- 2つの偏光子PとAを互いに偏光方向が垂直になるようにしておく。(クロスニコル条件)
- この条件では光は通過しない。



# ファラデー効果による光スイッチ

- PとAの間に長さ0.23 mのクラウンガラスの棒を置き  $10^6$  A/m(=1.3T)の磁界をかけたとすると、ガラス中を通過する際にほぼ $90^\circ$  振動面が回転して検光子Aの透過方向と平行になり光がよく通過する。



# ファラデー効果の非相反性

- ファラデー効果においては磁界を反転すると逆方向に回転が起きる。つまり回転角は磁界の方向に対して定義されている。ここが自然活性と違うところである。
- 図に示すように、ブドウ糖液中を光を往復させると戻ってきた光は全く旋光していないが、磁界中のガラスを往復した光は、片道の場合の2倍の回転を受ける。

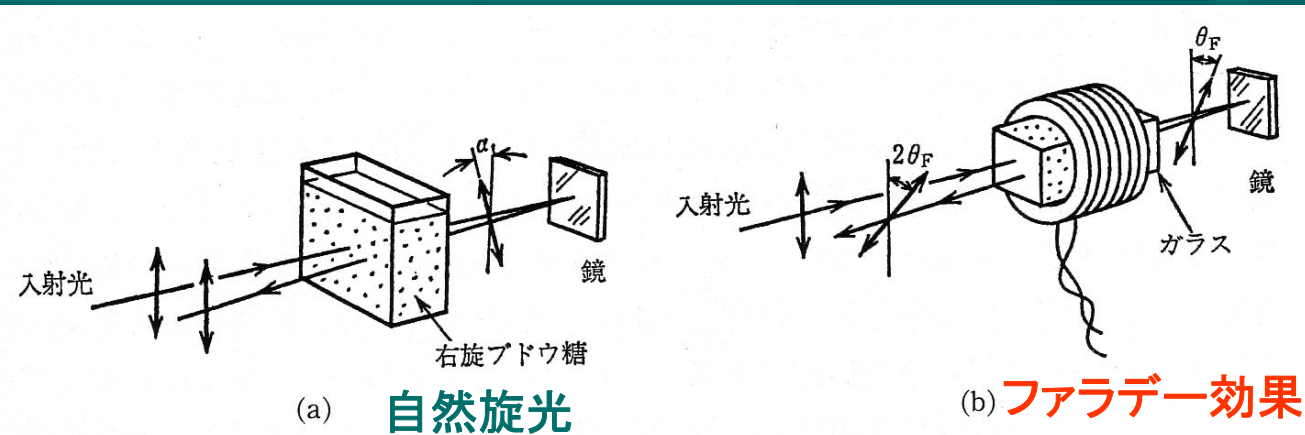


図 2.7 ファラデー効果の場合

ブドウ糖液中を往復した光は旋光しないが (a)、磁界中のガラスを往復した光は片道の2倍だけ旋光している (b)。

# 強磁性体のファラデー効果

- ガラスのファラデー効果に比べ、強磁性体、フェリ磁性体は非常に大きなファラデー回転を示す。
- 磁氣的に飽和した鉄のファラデー回転は1 cmあたり $380,000^\circ$ に達する。この旋光角の飽和値は物質定数である。
  - 1 cmもの厚さの鉄ではもちろん光は透過しないが薄膜を作ればファラデー回転を観測することが可能である。例えば30 nmの鉄薄膜では光の透過率は約70 %で、回転角は約 $1^\circ$ となる。

# 代表的な磁性体のファラデー効果

物質名	旋光角 (deg/cm)	性能指数 (deg/dB)	測定波長 (nm)	測定温度 (K)	磁界 (T)	文献
Fe	$3.825 \cdot 10^5$		578	室温	2.4	4)
Co	$1.88 \cdot 10^5$		546	"	2	4)
Ni	$1.3 \cdot 10^5$		826	120 K	0.27	4)
$Y_3Fe_5O_{12}$ *	250		1150	100 K		5)
$Gd_2BiFe_5O_{12}$	$1.01 \cdot 10^4$	44	800	室温		6)
MnSb	$2.8 \cdot 10^5$		500	"		7)
MnBi	$5.0 \cdot 10^5$	1.43	633	"		8)
$YFeO_3$	$4.9 \cdot 10^3$		633	"		9)
$NdFeO_3$	$4.72 \cdot 10^4$		633	"		10)
$CrBr_3$	$1.3 \cdot 10^5$		500	1.5K		11)
EuO	$5 \cdot 10^5$	104	660	4.2 K	2.08	12)
$CdCr_2S_4$	$3.8 \cdot 10^3$	35(80K)	1000	4K	0.6	13)

# ファラデー効果で磁化曲線を測る

- 強磁性体では旋光角は物質定数であるが、飽和していない場合には、巨視的な磁化に関する量となる。従って、ファラデー効果を用いて磁化曲線を測ることができる。
- ファラデー効果は磁化ベクトルと光の波動ベクトルとが平行なとき最大となり、垂直のとき最小となる、すなわち、磁化と波動ベクトルのスカラー積に比例する。測定に使う光のスポット径が磁区よりもじゅうぶん大きければ近似的にいくつかの磁区の平均の磁化の成分を見ることになる。

# ファラデー効果による磁化曲線測定

2003年度物シス実験III,IV

「磁性」

学生によるプレゼンテーション

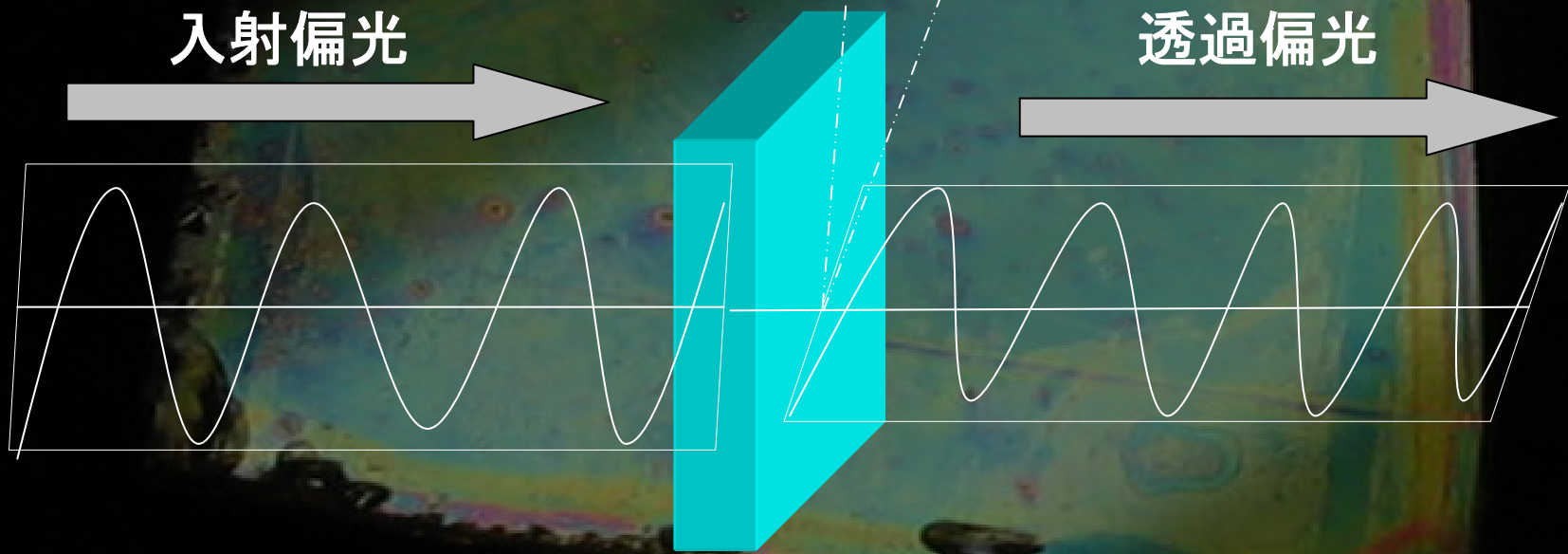
# 原理

ファラデー回転角  $\theta$

入射偏光

透過偏光

試料





# 装置

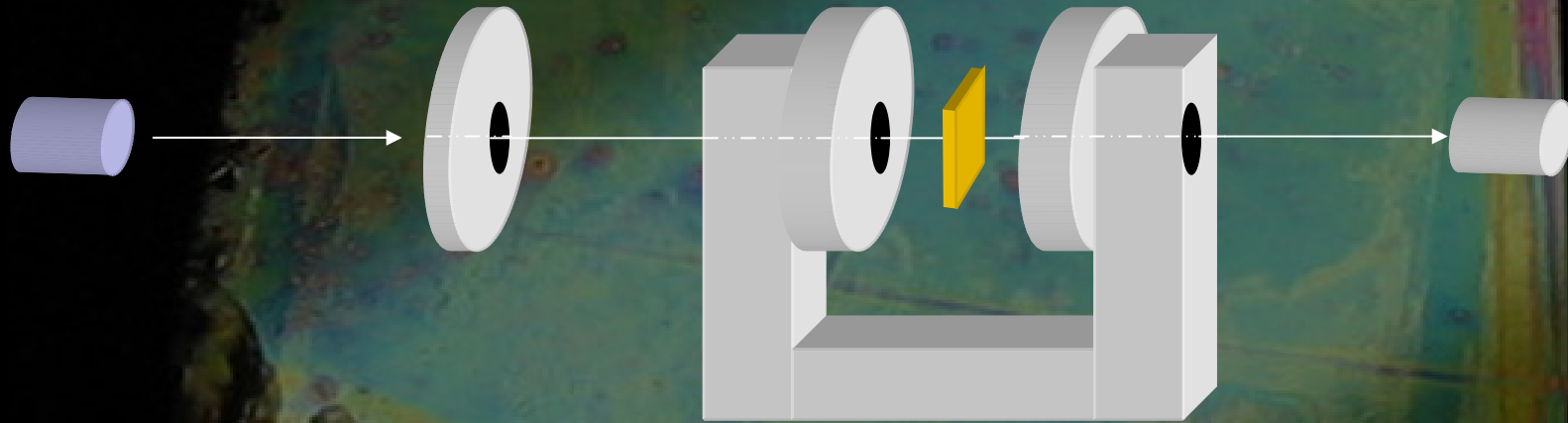
青色LED

偏光板

試料

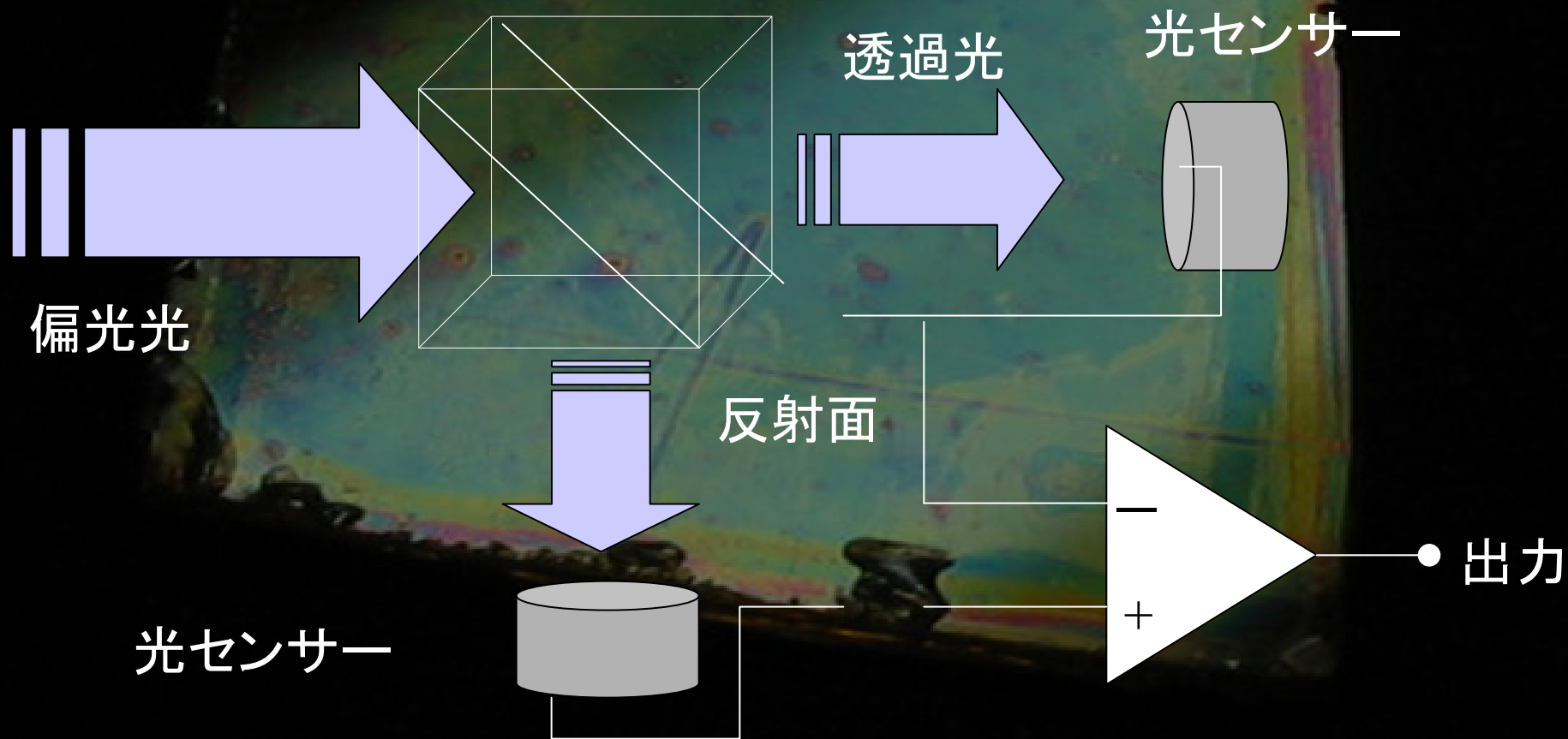
コイル

差動検出器



# 差動検出器の説明

偏光ビームスプリッタ



# 測定方法

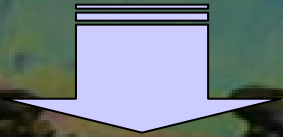
電流・磁場の校正

偏光板と差動検出器の校正



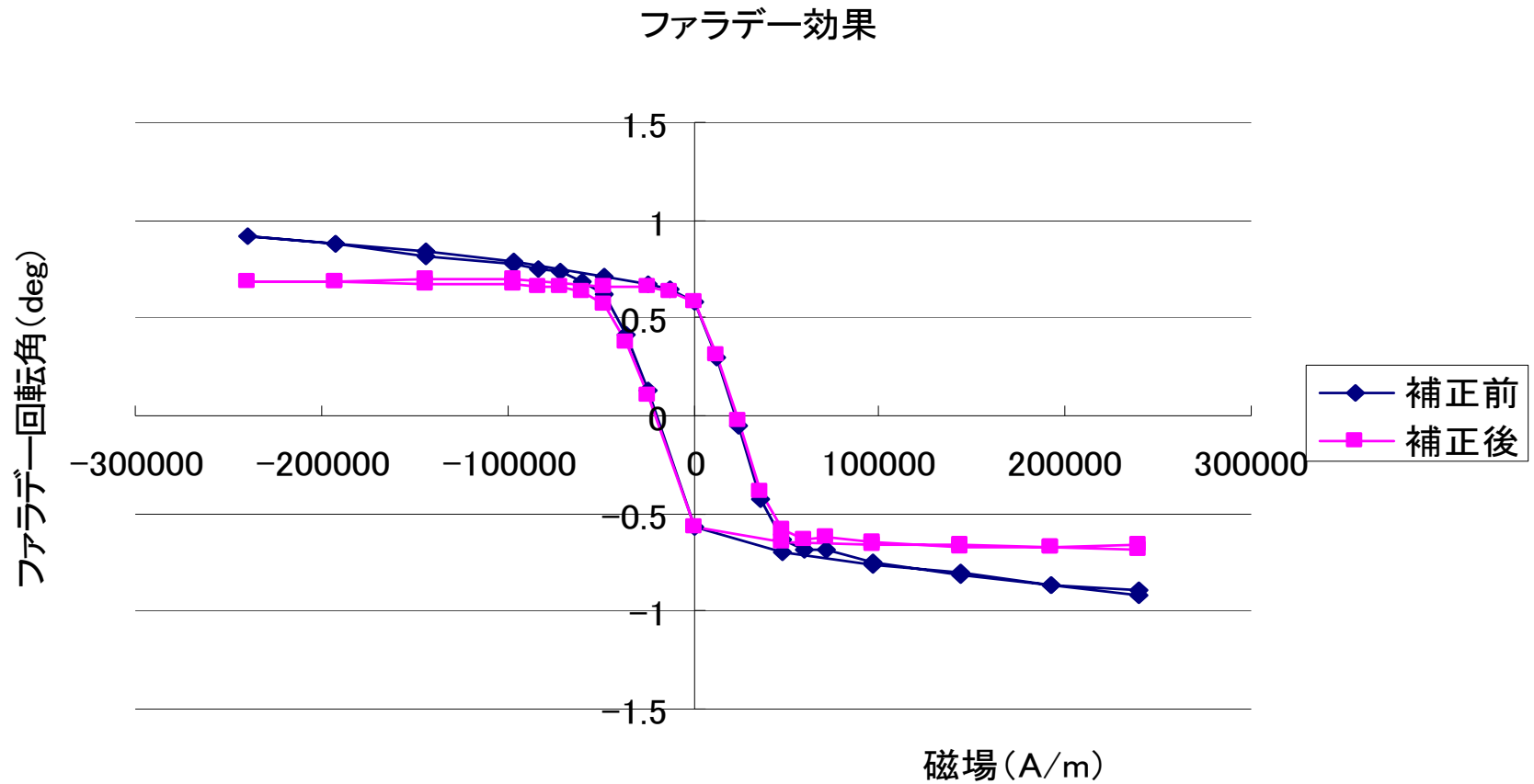
GBFGとガラスによる測定

ガラスのみによる測定



GBFGのみの結果を算出

# 結果



# 実験データより

単位厚さ(cm)当たりの回転角度(deg)

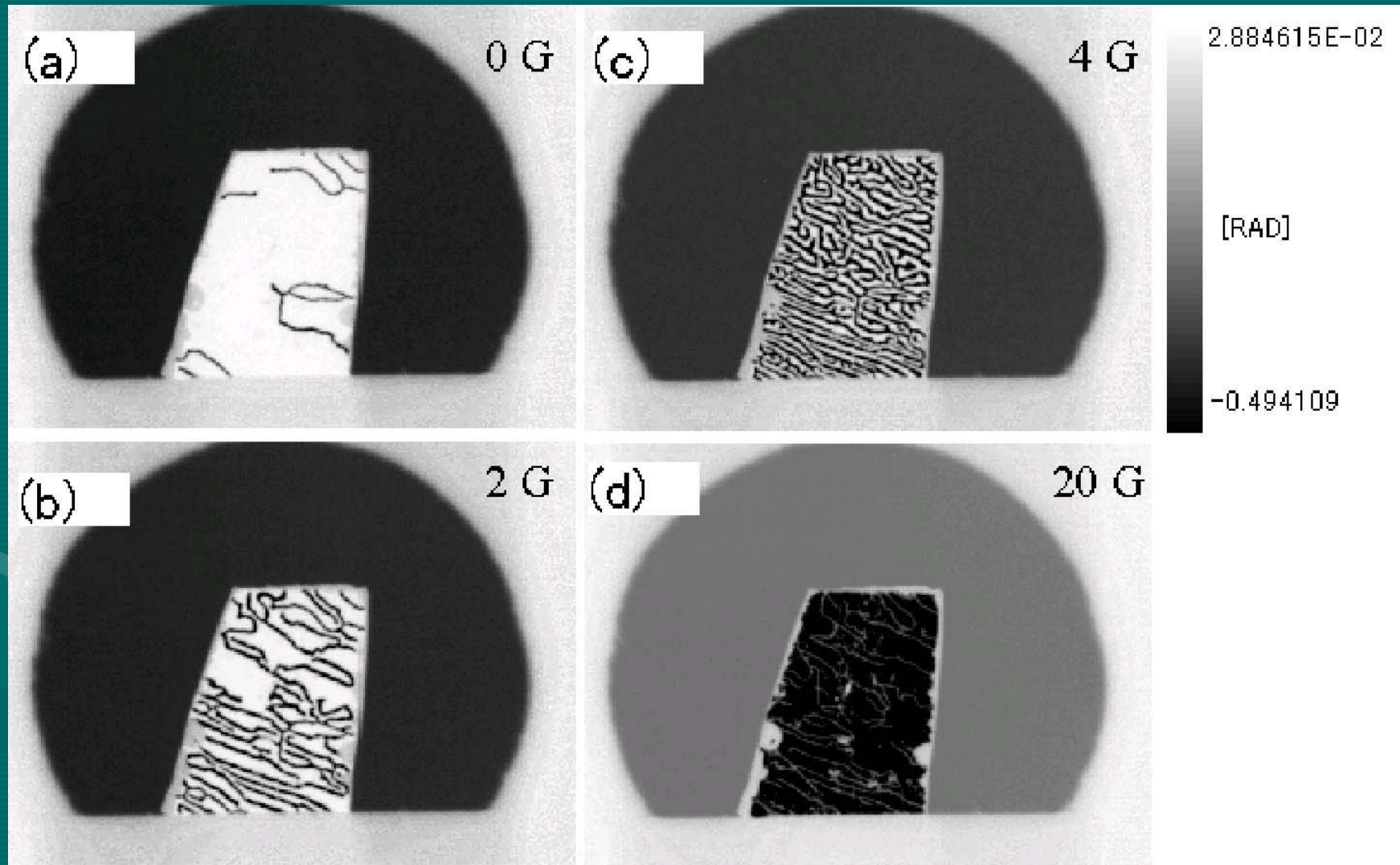
GBFG : 35000 (deg/cm)

ガラス : 3.9 (deg/cm)

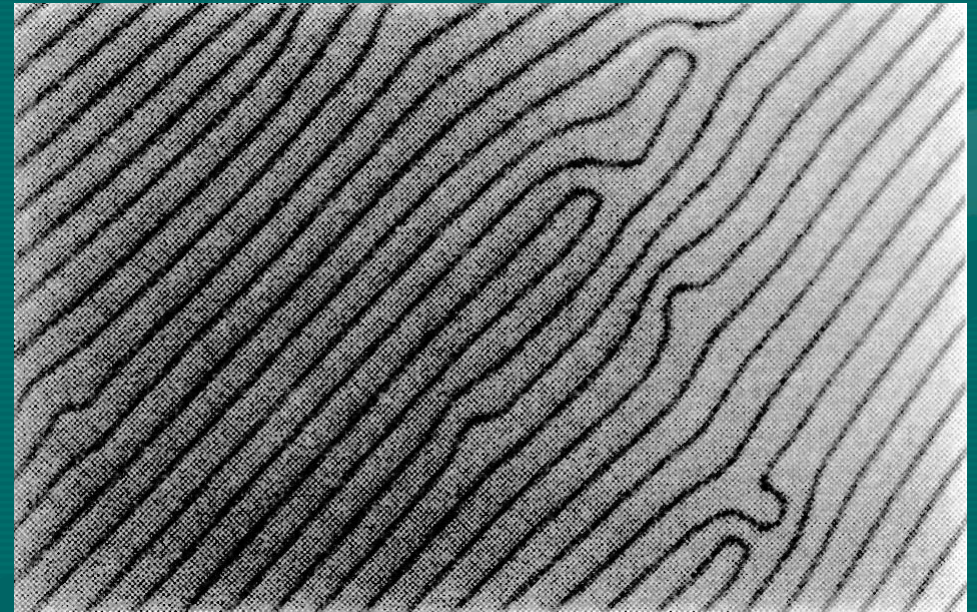
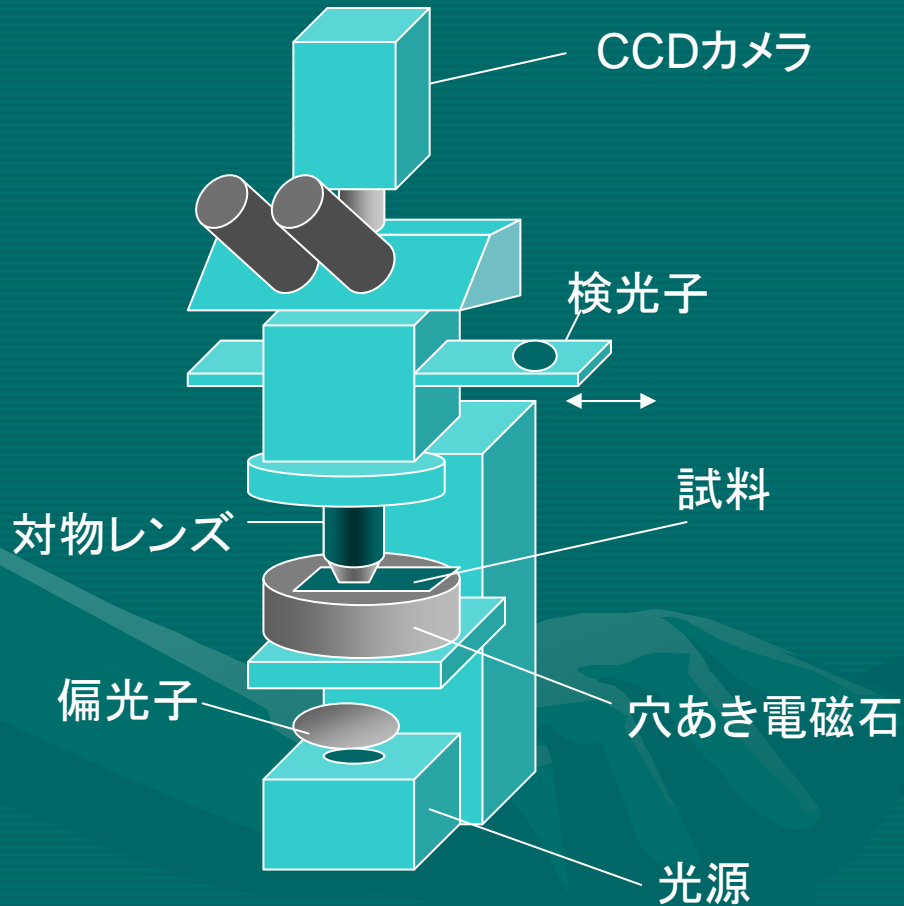


**ガラスに比べ大きな値になった！！**

# 磁性ガーネットの磁区の変化



# ファラデー効果を用いた 磁区のイメージング



ファラデー効果で観察した  
 $(\text{Gd,Bi})_3(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}$ の磁区  
NHK技研 玉城氏のご厚意による

# 問題

- 自然旋光性とファラデー効果の違いについて述べよ。
- 強磁性体と非磁性体のファラデー効果の違いについて述べよ。