

# 目次

第1章	マルチフェロイクスの面白さ	1
第2章	マクスウェル方程式と電気磁気効果	5
2.1	物質中のマクスウェル方程式	5
2.1.1	電気分極とは	6
2.1.2	電気分極の測定方法	8
2.1.3	磁化とは	10
2.1.4	磁化の測定方法	14
2.1.5	物質の誘電応答と磁気応答	14
2.2	電気磁気効果とは	16
第3章	物質中の磁気双極子	19
3.1	原子波動関数と周期表	19
3.1.1	原子波動関数	19
3.1.2	元素の周期表	22
3.2	磁性イオン	23
3.2.1	結合性軌道と反結合性軌道	23
3.2.2	遷移金属イオンの形式価数	27
3.2.3	配位子場分裂	27

3.2.4	フントの規則とスピンの合成	28
3.2.5	磁性イオンの磁気双極子	29
3.2.6	軌道角運動量の凍結	30
3.2.7	スピン軌道相互作用	30
3.2.8	遷移金属化合物における $d$ 電子の役割	31
3.3	電子スピン間に働く相互作用	33
3.3.1	双極子-双極子相互作用	33
3.3.2	対称交換相互作用	33
3.3.3	反対称交換相互作用	35

## 第4章 電気磁気効果の熱・統計力学 37

4.1	熱力学における電気と磁気の取り扱い	37
4.1.1	熱力学の第一法則と第二法則	37
4.1.2	電界による仕事	38
4.1.3	磁界による仕事	38
4.1.4	自由エネルギーと電気分極, 磁化	39
4.2	相転移の熱・統計力学	40
4.2.1	熱力学からみた強磁性相転移	40
4.2.2	統計力学から見た強磁性相転移	41
4.3	双安定性と履歴曲線	43
4.3.1	強磁性体	43
4.3.2	強誘電体	45
4.3.3	フェロイクス	45
4.4	磁気秩序	46
4.4.1	反強磁性, フェリ磁性	46
4.4.2	幾何学的フラストレーション	47
4.5	磁気配列の決定方法	49
4.5.1	スピン非偏極中性子回折実験	49
4.5.2	偏極中性子回折実験	50

## 第5章 線形の電気磁気効果 51

5.1	線形電気磁気効果が存在するためには . . . . .	51
5.1.1	対称性についての要請 . . . . .	51
5.1.2	線形電気磁気効果の上限 . . . . .	52
5.2	線形電気磁気効果を生み出す微視的要素 . . . . .	54
5.2.1	トロイダルモーメント . . . . .	54
5.2.2	磁気単極子モーメント . . . . .	56
5.2.3	磁気四極子モーメント . . . . .	57
5.3	電気磁気効果の測定方法 . . . . .	58
5.3.1	外部磁場による電気分極変化の測定 . . . . .	58
5.3.2	外部電場による磁化変化の測定 . . . . .	59
5.4	$\text{Cr}_2\text{O}_3$ の電気磁気効果 . . . . .	60
5.5	$\text{GaFeO}_3$ の電気磁気効果 . . . . .	62

## 第6章 非線形の電気磁気効果 67

6.1	非線形電気磁気効果を実現するには . . . . .	67
6.2	磁気秩序が創る強誘電性 . . . . .	68
6.2.1	$\text{TbMnO}_3$ の磁気強誘電性 . . . . .	68
6.2.2	強誘電性と結晶の対称性 . . . . .	71
6.2.3	結晶点群の表現法 . . . . .	72
6.2.4	磁気双極子に対する対称操作と磁気点群 . . . . .	72
6.2.5	磁気点群からみた磁気強誘電性 . . . . .	73
6.2.6	線形電気磁気効果とスピン由来の電気双極子 . . . . .	74
6.2.7	磁気的なフラストレーション . . . . .	75
6.2.8	対称性の高い磁性体 . . . . .	76
6.3	磁気強誘電性の発現機構 . . . . .	77
6.3.1	磁気強誘電性とスピン軌道相互作用 . . . . .	77
6.3.2	磁気交換歪による電気分極発生 . . . . .	78

6.3.3	サイクロイド型らせん秩序による電気分極発生 . . . . .	80
6.3.4	配位子混成の磁気的な変調による電気分極発生 . . . . .	85
6.4	相転移型の電気磁気効果 . . . . .	91
6.4.1	MnWO <sub>4</sub> における電気分極回転 . . . . .	91
6.4.2	ペロブスカイト型希土類マンガン酸化物における電気分極回転 . . . . .	94
6.4.3	Gd <sub>0.25</sub> Dy <sub>0.75</sub> FeO <sub>3</sub> における電場誘起強磁性転移 . . . . .	96
6.5	分域壁移動型の電気磁気効果 . . . . .	99
6.5.1	強誘電分域壁と磁壁の結合 . . . . .	99
6.5.2	強誘電強磁性体における分域壁 . . . . .	99
6.5.3	CoCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> における磁場誘起電気分極反転 . . . . .	100
6.5.4	Tb <sub>0.3</sub> Dy <sub>0.7</sub> FeO <sub>3</sub> における電場誘起磁化反転 . . . . .	102
<b>第7章 光学応答の古典論と量子論</b>		<b>105</b>
7.1	電磁波の方程式 . . . . .	105
7.1.1	光学応答関数 . . . . .	105
7.1.2	ベクトルポテンシャル . . . . .	107
7.2	振動子模型 . . . . .	108
7.2.1	強制振動による光吸収の理解 . . . . .	108
7.2.2	光吸収の量子論 . . . . .	110
7.2.3	振動子強度：古典論と量子論の橋渡し . . . . .	110
7.3	高次の遷移過程：多極子展開 . . . . .	112
<b>第8章 マルチフェロイクスの光学応答</b>		<b>115</b>
8.1	電気磁気光学効果の研究の歴史 . . . . .	115
8.2	電気磁気効果の周波数拡張 . . . . .	116
8.3	方向二色性の測定方法 . . . . .	118
8.4	電気磁気光学のスペクトル . . . . .	120

8.4.1	3 準位模型 . . . . .	120
8.5	CuB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> における方向二色性 . . . . .	122
8.6	GaFeO <sub>3</sub> における X 線方向二色性 . . . . .	127
8.7	電気マグノン：振動電場によるスピンの励起 . . . . .	129
8.7.1	マグノン . . . . .	129
8.7.2	電気マグノン . . . . .	130
8.7.3	TbMnO <sub>3</sub> における電気マグノン . . . . .	130
8.7.4	Ba <sub>2</sub> CoGe <sub>2</sub> O <sub>7</sub> におけるテラヘルツ帯の方向二色性 . . . . .	132

付録	参考文献	135
----	------	-----