目 次

1 電子による電磁波の散乱 3
1.1 電子と電磁場との相互作用 3
1.2 散乱断面積 4
1.2.1 電荷による散乱 –Thomson 散乱– 6
1.2.2 X 線磁気散乱 6
1.2.3 共鳴散乱 6
1.3 Thomson 散乱，磁気散乱，共鳴散乱の整理 8
1.4 X 線回折 10
1.4.1 結晶構造因子と回折強度 10
1.4.2 散乱と回折 10
1.4.3 各散乱機構による回折の具体例 11

2 異方的電荷分布による非共鳴 Thomson 散乱 13

3 非共鳴 X 線磁気散乱 15
3.1 スピン磁気形状因子と軌道磁気形状因子 15
3.2 偏光依存性の簡単な解釈 16
3.3 行列を用いた表記 17
3.4 散乱振幅演算子 17
3.5 Thomson 散乱と磁気散乱の干渉 18
3.6 ほとんど直線偏光した楕円偏光ビームの利用 — 強磁性体での磁気散乱の観測 — 19
3.6.1 散乱面内に磁場をかけるときの Flipping Ratio 19
3.6.2 偏光度因子 20
3.6.3 磁場方向と観測される磁気モーメント：$2\theta = 90°$ 21

4 共鳴 X 線散乱 23
4.1 電気双極子 ($\boldsymbol{E1}$) 遷移と電気四極子 ($\boldsymbol{E2}$) 遷移 23
4.2 共鳴散乱における原子散乱因子テンソル 24
4.2.1 $\boldsymbol{E1}$ 遷移による共鳴散乱 24
4.2.2 原子モデル 25
4.2.3 電気四極子による原子散乱因子テンソル表記 27
4.2.4 $\boldsymbol{E2}$ 遷移による共鳴散乱 27
4.3 偏光依存性と方位角依存性 28
4.3.1 偏光依存性 28
4.3.2 方位角依存性（アジマス角依存性） 29
4.4 多極子演算子を使った散乱振幅の表記，およびエネルギースペクトルの扱い 30
4.4.1 共鳴の散乱振幅とそのエネルギー依存性 30
4.4.2 長尾・五十嵐の方法 31
4.5 共鳴 X 線回折 34
4.5.1 結晶構造因子と回折強度 34
4.6 具体例 I: DyB_2C_2 における反強磁性および反強四極子秩序の観測 35
4.7 具体例 II: CeB_6 における磁場誘起磁気八極子秩序 — 磁場反転効果 — 39
4.8 格子非整合ならせん磁気秩序 – incommensurate magnetic order – 42
4.9 その他の例 45
4.9.1 $Ce_{0.7}La_{0.3}B_6$ における磁気八極子秩序 45

4.9.2 $\mathrm{SmRu_4P_{12}}$ における磁場誘起電荷秩序 — Thomson 散乱と $\boldsymbol{E2}$ 共鳴散乱の干渉 — 45
4.10 長尾・五十嵐による共鳴 X 線散乱の表式 46
4.11 多極子と多極子演算子 48
4.11.1 多極子 48
4.11.2 多極子演算子 49

5 Stokes パラメータを使った電磁波の偏光状態と散乱強度の表現 51
5.1 直線偏光，円偏光，楕円偏光 51
5.1.1 電磁波 51
5.1.2 直線偏光，円偏光，楕円偏光 51
5.2 Stokes パラメータ 54
5.3 位相の表記法：$(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}-\omega t)$ か $(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r})$ か 55
5.4 散乱振幅演算子 $\hat{\boldsymbol{G}}$ を用いた散乱断面積と散乱後の偏光状態の計算 56
5.4.1 散乱振幅演算子 $\hat{\boldsymbol{G}}$ 56
5.4.2 散乱断面積（散乱強度） 57
5.4.3 散乱後の偏光状態 58
5.5 非共鳴 Thomson 散乱への適用 59
5.5.1 散乱振幅演算子 $\hat{\boldsymbol{G}}$ 59
5.5.2 散乱断面積 59
5.5.3 散乱後の偏光状態 （Stokes パラメータ） 59
5.5.4 アナライザー結晶での偏光解析 60
5.6 直線偏光 X 線を使った偏光解析 62

6 透過型 X 線移相子による偏光制御 65
6.1 基本原理 65
6.1.1 $\boldsymbol{\sigma}$ 偏光と $\boldsymbol{\pi}$ 偏光の位相差 65
6.1.2 移相子としての働き 66
6.1.3 位相差と吸収の相反関係 67
6.2 移相子を透過した X 線の偏光ベクトル 70
6.3 移相子を透過した X 線の Stokes Parameter 71
6.3.1 $\boldsymbol{\varepsilon_x}$, $\boldsymbol{\varepsilon_y}$ を使った表記 72
6.3.2 $\boldsymbol{\chi}$ と $\boldsymbol{\delta}$ の関数としての表記 73
6.4 SPring-8, BL22 における 2 重連結移相子システム 76
6.4.1 システム全体の構成と座標軸の定義 76
6.4.2 移相子 1 と 2 での Bragg 反射 77
6.4.3 色収差の補償 77
6.4.4 2 重連結移相子を透過した X 線の偏光状態 I：$\boldsymbol{\chi_{\text{PR}}=-45^\circ}$ の場合 79
6.4.5 2 重連結移相子を透過した X 線の偏光状態 II：$\boldsymbol{\delta_1=\mp\pi/2,\delta_2=\pm\pi/2}$ の場合 80
6.4.6 Direct Beam を使ったオフセット値の決定 82

A 電磁波 84
A.1 Maxwell 方程式 84
A.2 ベクトルポテンシャル 84
A.3 Maxwell 方程式の解 — 電磁波 — 85
A.4 周期境界条件の導入による振幅の規格化 85
A.5 電場と磁場 86

B　電磁場の量子化 — photon — **88**
B.1　電磁場のエネルギー 88
B.2　調和振動子との等価性 89
B.3　電磁場の量子化 90
B.4　位相部分の表記法 91

C　遷移確率の計算 **92**
C.1　Thomson 散乱 92
C.2　磁気散乱 93
C.3　共鳴散乱 93

D　E1, E2, M1 共鳴項の導出 **96**

E　結晶構造因子の記述法：$e^{i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ か $e^{-i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ か **100**
E.1　$e^{-i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ になる場合 100
E.2　$e^{i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ になる場合 101
E.3　定義を意識する必要性 102

履歴

- 2016.12.12: 散乱ベクトルを $\boldsymbol{\kappa} = \boldsymbol{k}' - \boldsymbol{k}$ にする．これまでは単にいくつかの理論の教科書が逆の定義を使っているというだけで深く考えずに $\boldsymbol{k} - \boldsymbol{k}'$ にしていた．空間反転対称性がある場合はどちらでもよかったが，chiral 結晶で右と左を区別する必要が出てきたため，構造因子の仕組みを再検討した結果，やはり素直に $\boldsymbol{k}' - \boldsymbol{k}$ にすることに決めた．構造因子にも $e^{i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ の流儀と $e^{-i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ の流儀があり，混在していて混乱するが，この違いの起源もわかってきたので，Appendix に載せた．波の位相表記も $(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r} - \omega t)$ の流儀と $(\omega t - \boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r})$ の流儀があり，どちらを使うかで円偏光の左右が逆転するが，これについても考察を加えた．chirality を扱うとき，定義で右と左が逆になるポイントがたくさんある．やはり，$\boldsymbol{\kappa} = \boldsymbol{k}' - \boldsymbol{k}$，位相は $(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r} - \omega t)$，構造因子は $e^{-i\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}}$ でしょう．
- 2016.11.16: 偏光ベクトルを記述する座標軸の取り方を変更．円偏光も含めて統一的に扱えるよう，$\boldsymbol{\varepsilon}_\sigma \times \boldsymbol{\varepsilon}_\pi = \hat{\boldsymbol{k}}$ の座標系にする．これまでは，図の見た目がいいという単純な理由で $\boldsymbol{\varepsilon}_\pi \times \boldsymbol{\varepsilon}_\sigma = \hat{\boldsymbol{k}}$ を使っていたが，直線偏光だけなら不都合はなくても，円偏光を扱うにはこれは不都合である．なぜ $\boldsymbol{\varepsilon}_\sigma \times \boldsymbol{\varepsilon}_\pi = \hat{\boldsymbol{k}}$ としなければならないか，円偏光を扱い始めてようやくわかってきた．
- 2016. 3. 7: 初版．移相子を使った実験の蓄積や Springer の教科書執筆等があり，これまでのノート類をまとめた．