

目次

第1章 X線の非線形光学	1
1.1 歴史的なこと	1
1.2 X線の非線形光学の面白さ	2
第2章 X線と物質の相互作用の基礎	5
2.1 電磁波に対する物質の応答	5
2.1.1 電場とベクトルポテンシャル	5
2.1.2 電流密度と電場の関係	6
2.1.3 分極率	8
2.1.4 非線形な電流の場合	9
2.2 電流密度の計算	11
2.2.1 電流密度の表式	11
2.2.2 時間に依存する摂動	12
2.2.3 ハミルトニアン	14
2.2.4 1次摂動を受けた波動関数	15
2.2.5 線形な電流密度	16
2.2.6 双極子近似	17
2.2.7 等方的な場合	18
2.2.8 吸収と異常分散補正	20
2.3 2次の非線形性をもつ電流密度	21
2.3.1 非線形電流を与える行列要素	21

2.3.2	非線形電流密度の計算例	22
2.3.3	2 次の非線形分極率	23
2.4	散乱理論	25
2.4.1	線形過程のファインマン図	25
2.4.2	2 次の非線形過程のファインマン図	27
2.5	古典論との対応	27

第3章 X線の散乱の基礎 29

3.1	X線の散乱	29
3.1.1	ボルン近似の散乱振幅	29
3.1.2	微分散乱断面積	30
3.1.3	電子による散乱と古典電子半径	31
3.1.4	原子による散乱と原子散乱因子	32
3.2	結晶による散乱	33
3.2.1	結晶の分極率	34
3.2.2	格子のフーリエ変換と逆格子	34
3.2.3	無限に大きい結晶	35
3.2.4	単位構造のフーリエ変換と結晶構造因子	36
3.2.5	有限サイズの結晶とラウエ関数	37
3.2.6	熱振動の効果	38
3.2.7	格子面と逆格子ベクトル	38
3.2.8	ダイヤモンド型構造の結晶構造因子	40
3.3	ダーウィン流のX線回折理論	41
3.3.1	ブラッグ反射	41
3.3.2	ダーウィン流の考え方	42
3.3.3	格子面の反射波	42
3.3.4	格子面の透過波	44
3.3.5	結晶の反射率と透過率	44
3.3.6	一般の結晶の場合	46
3.3.7	結晶の反射率曲線	46

3.3.8	ブラッグ反射の幅	48
3.3.9	全反射	49
3.4	X線の光学理論	49
3.4.1	格子面の透過波の位相と屈折率	49
3.4.2	全反射ミラー	51
3.4.3	多層膜ミラー	52
3.5	ラウエ流の動力学的X線回折理論	52
3.5.1	ミクロなマクスウェルの方程式	52
3.5.2	波動方程式	53
3.5.3	結晶中の基本方程式	54
3.5.4	分極率と感受率と局所場補正	55
3.5.5	ブラッグ条件から遠い場合	56
3.5.6	2波近似	56
3.5.7	2波近似の分散面	57
3.5.8	複屈折	58

第4章 基本的なX線光学系 59

4.1	X線光源	59
4.1.1	蓄積リング	59
4.1.2	X線自由電子レーザー	62
4.1.3	光源比較	64
4.2	光学素子	65
4.2.1	分光器	65
4.2.2	デューモンド図	66
4.2.3	KBミラーによる集光	67
4.2.4	分光測定	69
4.3	検出器	71
4.3.1	フォトダイオード	71
4.3.2	シンチレーション検出器	74
4.4	X線非線形結晶	74

4.4.1	平面波光学系	75
4.4.2	ダイヤモンド結晶の評価	76
第5章 非線形な散乱過程		77
5.1	3つとも X 線の場合の 2 次の非線形分極率	77
5.1.1	\mathbf{u} の計算	77
5.1.2	\mathbf{B} の見積り	79
5.1.3	反転対称性の影響	79
5.1.4	結晶の 2 次の非線形分極率	80
5.1.5	非線形分極率の大きさ	80
5.2	第 2 高調波発生	81
5.2.1	電流密度	81
5.2.2	第 2 高調波の波動方程式	82
5.2.3	運動学的な解	83
5.2.4	近似的な解	84
5.2.5	位相整合と非線形回折	85
5.2.6	動力的な位相整合の可能性	87
5.2.7	第 2 高調波発生の実験	87
5.3	X 線パラメトリック下方変換	88
5.3.1	X 線パラメトリック下方変換の位相整合条件	88
5.3.2	X 線パラメトリック下方変換の実験例	89
5.3.3	X 線パラメトリック下方変換の展開	90
第6章 長波長領域への X 線パラメトリック下方変換		93
6.1	回折限界	93
6.1.1	波長と回折限界	93
6.1.2	回折限界が与える制限	94
6.1.3	回折限界を超える方法	95
6.2	アイドラーが長波長領域の場合の 2 次の非線形分極率	95

6.2.1	μ の計算	96
6.2.2	非線形分極率と局所光学応答	98
6.3	結合波動方程式	99
6.3.1	電流密度と波動方程式	99
6.3.2	パラメトリック下方変換の基本方程式	99
6.3.3	位相整合の取り方	101
6.3.4	結合波動方程式の解	102
6.3.5	実験との比較	107
6.4	ファノ効果	110
6.4.1	自動イオン化スペクトル	110
6.4.2	ファノ効果の量子論	111
6.4.3	コンプトン散乱とパラメトリック下方変換のファノ効果	113
6.5	X線非線形感受率の共鳴効果	116
6.5.1	炭素のK吸収端でのパラメトリック下方変換	116
6.5.2	規格化されたエネルギーの表式	118
6.5.3	ロッキングカーブの解析結果	118
6.5.4	非線形感受率の共鳴効果	119
6.6	ダイヤモンドの局所光学応答	120
6.6.1	X線パラメトリック下方変換の逆格子ベクトル依存性	120
6.6.2	線形感受率の再構成	121
6.6.3	ローレンツ模型との比較	122
6.7	和周波発生の実験	123

第7章 非線形な吸収過程 125

7.1	高強度 X 線と物質との相互作用	125
7.2	X 線吸収の基礎	126
7.2.1	水素様原子の吸収断面積	126
7.2.2	吸収端近傍	129
7.2.3	K 殻ホール状態からの緩和	130
7.2.4	緩和過程のカスケード	131

7.3	逐次的な 2 光子吸収	132
7.3.1	K 殻 2 重イオン化	132
7.3.2	レート方程式	133
7.3.3	パルス幅効果	135
7.3.4	強度揺らぎの効果	136
7.3.5	クリプトンの K 殻 2 重イオン化実験	138
7.4	直接 2 光子吸収	139
7.4.1	X 線の直接 2 光子吸収断面積	140
7.4.2	ゲルマニウムの直接 2 光子吸収実験	143
7.4.3	電子配置ダイナミクスのシミュレーション	145
7.4.4	パルスエネルギー依存性の解釈	147
7.4.5	基底状態の直接 2 光子吸収分光	148
7.5	吸収の飽和と増大	148
7.5.1	可飽和吸収	149
7.5.2	X 線レーザー	149
7.5.3	共鳴による吸収増大	150

第 8 章 X 線非線形光学の展望

151

8.1	既知の未踏領域	151
8.1.1	“明るい”未来	151
8.1.2	X 線の量子光学	152
8.1.3	基底状態を測定できる限界	153
8.1.4	誘導過程が可能な強度	153
8.1.5	ポンデロモータティブエネルギー	154
8.1.6	シュウインガー極限	154
8.2	真空の非線形光学	155
8.2.1	光子-光子散乱	155
8.2.2	光子-光子散乱実験	156

付録	159
A.1 単位系について	159
A.2 フーリエ変換	159
A.2.1 フーリエ変換の定義	159
A.2.2 畳み込み積分のフーリエ変換	160
A.2.3 パルス幅とスペクトル幅の関係	160
A.2.4 線幅と寿命の関係	160
A.3 X線自由電子レーザーを使った研究の概要	161
参考文献	163
索引	169