

# 目 次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1. 序 論                               | 1  |
| 1.1 原子核の構成粒子および基本的構造                 | 1  |
| 1.2 基本的粒子の属性                         | 2  |
| 1.3 相互作用                             | 5  |
| 1.4 有用な物理量                           | 6  |
| 1.5 原子核の種類                           | 8  |
| tea time 相図 (核物質の QCD 相図)            | 10 |
| 2. 原子核の大まかな性質                        | 12 |
| 2.1 原子核の大きさ                          | 12 |
| 2.1.1 ラザフォード散乱                       | 12 |
| 2.1.2 電子散乱                           | 15 |
| 2.1.3 質量分布                           | 23 |
| 2.2 核子数密度および核子のフェルミ運動量               | 25 |
| 2.2.1 核子数密度                          | 25 |
| 2.2.2 フェルミ運動量: フェルミ気体模型, トーマス-フェルミ近似 | 25 |
| 2.3 質 量                              | 29 |
| 2.3.1 結合エネルギー: 実験データと特徴              | 29 |
| 2.3.2 質量公式 (ワイツゼッカー-ベータの質量公式): 液滴模型  | 37 |
| 2.3.3 質量公式の応用 (1): 安定線, ハイゼンベルクの谷    | 39 |
| 2.3.4 質量公式の応用 (2): 核分裂に対する安定性        | 41 |
| 2.3.5 原子力発電への応用                      | 51 |
| 2.3.6 核分裂異性体 (核分裂アイソマー)              | 54 |
| 3. 核力と二体系                            | 58 |
| 3.1 核力の基礎                            | 58 |
| 3.1.1 到達距離: 不確定性関係による単純な評価           | 58 |
| 3.1.2 動径依存性                          | 59 |
| 3.1.3 核力の状態依存性                       | 60 |

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 3.2   | 対称性 (不変性) の考察による核力の一般的構造              | 63  |
| 3.2.1 | 静的ポテンシャル                              | 64  |
| 3.2.2 | 速度に依存するポテンシャル                         | 66  |
| 3.3   | 重陽子の特性と核力                             | 66  |
| 3.3.1 | テンソル力の影響: アイススピン・スピン空間の波動関数           | 66  |
| 3.3.2 | 動径波動関数: 陽子・中性子間力の大きさの目安               | 69  |
| 3.4   | 核子 - 核子散乱                             | 70  |
| 3.4.1 | 低エネルギー散乱: 有効距離の理論                     | 70  |
| 3.4.2 | 高エネルギー散乱: 交換力                         | 73  |
| 3.4.3 | 高エネルギー散乱: 斥力芯                         | 75  |
| 3.4.4 | スピン偏極の実験                              | 77  |
| 3.5   | 微視的考察: 中間子論, QCD                      | 78  |
| 3.6   | 高精度で実用的な現象論的核力: 現実的ポテンシャル             | 81  |
| 3.7   | 自由空間での核力のまとめ                          | 84  |
| 3.8   | 核内での有効相互作用                            | 85  |
| 3.8.1 | G 行列 <sup>17)</sup>                   | 85  |
| 3.8.2 | 現象論的有効相互作用                            | 87  |
| 4.    | 電磁場との相互作用: 電磁多重極モーメント                 | 89  |
| 4.1   | 電磁相互作用のハミルトニアンおよび電磁多重極モーメント           | 89  |
| 4.1.1 | 双極子モーメントおよび四重極モーメントの演算子               | 90  |
| 4.1.2 | 様々な補正                                 | 91  |
| 4.1.3 | 磁気モーメントの測定: 超微細構造                     | 92  |
| 4.2   | 電磁多重極演算子                              | 94  |
| 4.3   | 電磁多重極演算子の性質                           | 95  |
| 4.3.1 | パリティ, テンソル性および選択則                     | 95  |
| 4.3.2 | 電磁モーメントの定義                            | 96  |
| 5.    | 殻構造                                   | 99  |
| 5.1   | 魔法数の存在                                | 99  |
| 5.2   | 平均場理論による魔法数の説明                        | 100 |
| 5.2.1 | 平均場                                   | 100 |
| 5.2.2 | 無限に深い箱型井戸模型の場合のエネルギー準位                | 101 |
| 5.2.3 | 調和振動子模型                               | 102 |
| 5.2.4 | 短距離力による静的ポテンシャルでの魔法数                  | 103 |
| 5.2.5 | スピン軌道相互作用                             | 105 |
| 5.3   | 二重魔法数 $\pm 1$ 核の基底状態および低励起状態のスピン・パリティ | 108 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 5.4      | 奇核の基底状態の磁気双極子モーメント: 1 粒子模型                      | 110 |
| 5.4.1    | シュミット線  | 111 |
| 5.4.2    | 配位混合および芯偏極                                      | 112 |
| 5.4.3    | 補足: クォーク模型による核子の異常磁気能率の理解                       | 114 |
| 5.5      | 準位間隔 $\hbar\omega$ の質量数依存性                      | 115 |
| 5.6      | スピン・軌道力の大きさと起源                                  | 116 |
| 5.7      | 陽子と中性子のポテンシャルの違い: レインポテンシャル                     | 116 |
| 5.8      | 二重閉殻 $\pm 2$ 核の低エネルギー状態のスピン・パリティと対相関            | 117 |
| 5.8.1    | ${}^{210}_{82}\text{Pb}$ の基底状態および低励起状態のスピン・パリティ | 117 |
| 5.8.2    | $\delta$ 型残留相互作用の影響: 対相関                        | 119 |
| tea time | 超重元素  | 121 |
| 6.       | 微視的平均場理論 (ハートリー - フォック理論)                       | 124 |
| 6.1      | ハートリー - フォック方程式                                 | 124 |
| 6.1.1    | 等価局所ポテンシャル, 有効質量                                | 125 |
| 6.1.2    | 核物質および局所密度近似                                    | 126 |
| 6.1.3    | 振る舞いの良いポテンシャルでの飽和性, 交換特性への制約                    | 129 |
| 6.2      | 有限核に対するスカーム・ハートリー - フォック計算                      | 129 |
| 6.2.1    | スカーム力   | 129 |
| 6.2.2    | ハートリー - フォック方程式                                 | 132 |
| 6.2.3    | エネルギー密度およびパラメータの決定                              | 132 |
| 6.2.4    | 実験データとの比較                                       | 135 |
| 6.2.5    | 状態方程式, 飽和性, スピノダル線, 核表面の厚み                      | 136 |
| 6.2.6    | ハートリー - フォックを越える: 核子 - 振動運動相互作用, $\omega$ 質量    | 142 |
| 6.3      | 相対論的平均場理論 ( $\sigma, \omega, \rho$ 模型)          | 143 |
| 6.3.1    | ラグランジアン   | 143 |
| 6.3.2    | 場の方程式   | 144 |
| 6.3.3    | 平均場理論   | 145 |
| 6.3.4    | 解き方への序章   | 146 |
| 6.3.5    | 非相対論的近似とスピン・軌道相互作用                              | 147 |
| 6.3.6    | パラメータセット  | 148 |
| 6.4      | 対相関   | 149 |
| 6.4.1    | 概観  | 149 |
| 6.4.2    | 対相関の多重極展開表示, 単極子対相関模型および擬スピン理論                  | 150 |
| 6.4.3    | BCS 理論  | 151 |
| 6.4.4    | ギャップパラメータの大きさ                                   | 155 |
| 6.4.5    | コヒーレンス長   | 156 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7. 原子核の形                         | 157 |
| 7.1 形に関する観測量：多重極モーメントおよび励起スペクトル  | 157 |
| 7.2 変形パラメーター                     | 159 |
| 7.3 変形殻模型                        | 163 |
| 7.4 変形した一体場の中での核子のエネルギー準位：ニルソン準位 | 165 |
| 7.5 変形した奇核の基底状態のスピン・パリティ         | 167 |
| 7.6 形の理論的推定                      | 168 |
| 7.6.1 ストラチンスキーの処方箋：巨視的・微視的方法     | 168 |
| 7.6.2 拘束条件付ハートリー-フォック計算          | 169 |
| tea time 超変形状態                   | 172 |
| 8. 原子核の崩壊および放射能                  | 174 |
| 8.1 アルファ崩壊                       | 174 |
| 8.1.1 崩壊幅                        | 175 |
| 8.1.2 ガイガー-ヌッタール則                | 182 |
| 8.2 核分裂                          | 183 |
| 8.3 ガンマ線放射による電磁遷移                | 185 |
| 8.3.1 多重極遷移, 換算遷移確率              | 185 |
| 8.3.2 選択則および大きさに関する一般的考察         | 187 |
| 8.3.3 単粒子評価：ワイスコップ単位および実測値       | 188 |
| 8.3.4 電磁遷移確率と原子核の形および集団運動との関連    | 191 |
| 9. 元素の誕生                         | 194 |
| 9.1 概観                           | 194 |
| 9.2 天体物理因子 (S 因子), ガモフ因子         | 194 |
| 9.3 ガモフピーク                       | 196 |
| 9.4 中性子捕獲断面積                     | 197 |
| 9.5 重い元素の誕生：s 過程および r 過程         | 198 |
| tea time 元素合成の概観                 | 199 |
| 10. 付 録                          | 201 |
| 10.1 散乱問題の基礎                     | 201 |
| 10.1.1 部分波展開                     | 201 |
| 10.1.2 ゾンマーフェルト-ワトソン変換           | 202 |
| 10.1.3 ボアソンの和公式                  | 203 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 10.2 半古典論の基礎 I：WKB 近似           | 204 |
| 10.2.1 波動関数                     | 205 |
| 10.3 半古典論の基礎 II：比較方程式法          | 206 |
| 10.3.1 比較方程式法の原理                | 206 |
| 10.3.2 WKB 波動関数の導出              | 208 |
| 10.4 アイコナール近似                   | 209 |
| 10.4.1 散乱振幅                     | 209 |
| 10.4.2 グラウバー理論                  | 209 |
| 10.5 非局所ポテンシャル                  | 211 |
| 10.5.1 微積分方程式                   | 211 |
| 10.5.2 等価な有効局所ポテンシャル：WKB 近似     | 211 |
| 10.6 テンソル代数 <sup>34)</sup>      | 214 |
| 10.6.1 テンソル演算子の定義               | 214 |
| 10.6.2 既約テンソルの例                 | 217 |
| 10.6.3 ウィグナー-エッカートの定理           | 217 |
| 10.6.4 射影定理                     | 218 |
| 10.6.5 スカラー積とランク 0 のテンソル積の関係    | 218 |
| 10.7 四重極モーメントと内部四重極モーメントの関係     | 219 |
| 10.8 ガモフ模型に基づくアルファ崩壊幅の公式の導出：直接法 | 220 |
| 10.9 電磁遷移の基礎                    | 222 |
| 10.9.1 全系のハミルトニアン               | 222 |
| 10.9.2 光子の波動関数：ベクトル球面調和関数       | 224 |
| 10.9.3 多重極展開と量子化                | 228 |
| 10.10 相対論的運動方程式およびディラック方程式の記号   | 229 |
| 文 献                             | 231 |
| 索 引                             | 235 |