

# まえがき

超対称性<sup>[1]</sup>の破れに関する研究が、この20年間で飛躍的に進歩した。本書は、その発展を初学者に解説することを目的とする。超対称ゲージ理論<sup>[2]</sup>のダイナミクスに関して90年頃から爆発的な進展があったが、その中で用いられる技法とその現象論への応用をまとめた形で解説した本が少ないように思われる。初歩的な場の量子論の知識を有する学部学生・大学院生が、現在活発に議論されている超対称性理論の論文を読めるよう手助けすることができれば幸いである。

超対称性を持つ理論の重要性の一つは、理論間の双対性を取り扱うときに有用なことである。伝統的に考えられてきた摂動論に基づく場の理論の計算のみでは、理論を完全に理解することは困難である。それは、強結合領域における理論の振る舞いを知ることが極めて難しいからである。こうした側面を打開するために、もとの理論と対応がついている別の理論を用い、2つを合わせることで全貌を理解しようというのが双対性の概念である<sup>[3]</sup>。超対称ゲージ理論でこの双対性に関する研究が90年代に起こり、それ以降、統一理論の研究の仕方が一変したように感じられる。今では当たり前のように双対性の概念が使われるようになっていく。超対称性を保つ真空はエネルギーが零であり、他の真空への崩壊を考える必要がないことから、その真空を調べることは、超対称性がない場合と比較して容易である。この事実を基に、双対性の議論を進展させ、様々な理論的な知見をこれまで得てきた。その一つが閉じ込めに関する理解であろう。良く知られているように、QCDは低エネルギーで閉じ込め現象を起こすと考えられている。QCDの強結合の扱いは大変難しく一筋縄では行かない。しかし、閉じ込めの現象それ自体、あるいはそれに伴って生じると考えられているカイラル対称性の破れに関しては、異なるが似ている超対称ゲージ理論を用いることで理論的知見が十分に得られると期待できる。

現実的な観点からも超対称性の重要性はある。超対称性は時空の対称性を一般化した概念であり、自然にボソンとフェルミオンを統一的に扱う。また、この対称性は、ゲージ結合定数の振る舞いから自然と大統一理論を示唆している<sup>[4]</sup>。さらに重力まで含めた統一理論の候補としては超弦理論が提案されている。これは量子化できる重力理論であり、量子重力が重要な役割を果たすブラックホール、あるいは宇宙創成の理解には大変重要である。超弦理論では、ミクロスコピックな描像からブラックホールの熱的な性質を説明することに一部成功している。この点で極めて有望な統一理論であり、その枠組みで自然界を記述するモデルを構成することは意味のあることである。弦理論を矛盾なく構成する際に超対称性が大変重要な役割を果たしている。また、多くの現象論的なモデルの構成では、この超対称性を持つ超弦理論をもとに行われている。この意味で、超対称性に基づくモデルの構築は、弦理論から現実の世界を導くためにも重要である。こうした試みから得られた弦理論の真空に対する考え方は、新たな興味深い宇宙像を提起している。本書でもこの概念について最後に触れてみたい。

最近の加速器実験の結果を踏まえると、当初指摘されていた“理論の自然さ”をも解決するという意味での理想的な超対称性は、現実の世界では実現されていないようである。自然は易々とその全貌をつかませてはくれないことに大変面白みを感じる。一方で、プランクスケールの物理、あるいは標準模型との接点を考える上での超対称性の重要性は見過ごすことができない。この点を考慮すると、それでは“超対称性は一体どのスケールで破れたのであろうか？”という疑問がわく。プランクスケールなのか GUT スケールなのか、それとももっと低い中間的なスケールなのか？ この問いが今後の発展の重要な鍵となるだろう。この目的に沿って、本書では超対称性の破れを低エネルギーの場の理論から高エネルギーの弦理論まで幅広く紹介する。

本書は、主に著者がこれまで三者若手夏の学校、東京工業大学、北海道大学、山形大学、九州大学で行った講義、及び物理学会シンポジウム“クォーク閉じ込めとカイラル対称性”で行った講演に基づいている。また、本書の内容には、著者がこれまで共同研究を通して学んだ多くのことが含まれている。共同研究者の Chang-hyun Ahn, Bo Feng, Joseph Marsano, Chang-Soon Park, Jaewon Song, 伊部昌宏, 衛藤稔, 大栗博司, 大橋圭介, 奥田拓也, 笠井彩, 鎌田耕平, 川野輝彦, 北野龍一郎, 小林達夫, 小西憲一, 重森正樹, 立川裕二, 中井雄一郎, 平松尚志, 藤博之, 新田宗土, 濱田雄太, 花木健太郎, 八木太, 米本隆裕, 綿引芳之の各氏に感謝する。特に、大栗博司氏との一連の共同研究<sup>[5]–[12]</sup> に本書は基づいている。同氏からご教授頂いたことが多分に含まれていることを申し添えるとともに、カリフォルニア工科大学での研究の機会を与えて下さったことに、心より感謝の意を表したい。伊藤克司, 坂井典佑, 杉本茂樹, 橋本幸士の各氏には、議論を通して多くのことを教えて頂いた。この場を借りてお礼を申し上げたい。そこで深めた理解が本書に活かされている。また、中井雄一郎氏には、作成中の原稿において誤植の指摘と数々の助言を頂き感謝している。最後に、執筆作業が進まない中、辛抱強く原稿の完成を見守り、最後に原稿の校正をして下さったサイエンス社の高橋良太氏に心から感謝の意を表したい。

2016 年 10 月

大河内 豊

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>超対称ラグランジアンの構成</b>	<b>1</b>
1.1	超場形式	1
1.1.1	カイラル超場	2
1.1.2	ベクトル超場	5
1.2	超対称性を持つ QCD	10
1.3	$\mathcal{N} = 2$ 超対称性	12
<b>第 2 章</b>	<b>超対称性理論の性質</b>	<b>16</b>
2.1	ネーターカレント	16
2.2	カイラル環	19
2.3	非線り込み定理	23
2.3.1	超ポテンシャル	23
2.3.2	ゲージ場の運動項	25
2.3.3	$\mathcal{N} = 2$ ハイパー多重項のケーラーポテンシャル	25
2.4	走るゲージ結合定数	27
2.4.1	NSVZ ベータ関数	27
2.4.2	$\mathcal{N} = 2$ 超対称性理論のベータ関数	31
<b>第 3 章</b>	<b>超対称ゲージ理論の非摂動的ダイナミクス</b>	<b>32</b>
3.1	ゲージ理論の相構造	32
3.2	双対マイスナー効果	37
3.2.1	超伝導体とロンドン方程式	37
3.2.2	超伝導体と対称性の自発的破れ	39
3.2.3	双対マイスナー効果と閉じ込め	41
3.3	SQCD: 準備	43
3.3.1	$D$ 平坦条件	43
3.3.2	量子異常のない大域的対称性	44
3.4	SQCD と相構造	46
3.4.1	$N_f < N_c$ 真空のない理論 (ランナウェイ真空)	46
3.4.2	$N_f \geq N_c$ のときのモジュライ空間	49
3.4.3	カイラル対称性の破れ, 質量ギャップを伴わない閉じ込め現象	51
3.4.4	$N_f \geq 3N_c$ : 電氣的自由相	52

3.4.5	$\frac{3}{2}N_c \leq N_f \leq 3N_c$ の場合：非可換クーロン相	52
3.4.6	サイバーク双対性と磁気的自由相	54
3.5	サイバーク・ウィッテン理論	57
3.5.1	電磁気学における磁気単極子	57
3.5.2	電磁双対性	61
3.5.3	ウィッテン効果	65
3.5.4	BPS 質量公式	66
3.5.5	モノドロミーと大域的構造	70
3.5.6	モノポールの凝縮と閉じ込め	78
3.5.7	厳密解：インスタントン効果の足し上げ	80
3.6	QCD の特殊性	83
<b>第 4 章</b>	<b>超対称性の自発的破れ</b>	<b>85</b>
4.1	超対称性の破れ	85
4.2	モデルの構成	86
4.2.1	ポロニーモデル	86
4.2.2	オラファティモデル	87
4.2.3	より複雑なオラファティモデル	89
4.3	R 対称性と準安定状態	90
4.4	一般化されたオラファティモデル	92
4.5	宇宙定数とグラビティーノの質量	93
<b>第 5 章</b>	<b>ダイナミカルな超対称性の破れ</b>	<b>95</b>
5.1	アフレック・ダイン・サイバーク モデル	95
5.2	井沢・柳田・イントリゲータ・トーマス モデル	97
5.3	イントリゲータ・サイバーク・シイ モデル	99
5.4	モデル構築の柔軟性	101
<b>第 6 章</b>	<b>ゲージ伝達機構</b>	<b>102</b>
6.1	超対称性の破れとその伝達	102
6.2	ゲージ伝達：一般論	104
6.3	ゲージ伝達：具体的な議論	106
6.4	ゲージノの質量と準安定状態	109
6.5	ゲージノ遮蔽	110
6.6	北野・大栗・大河内 モデル	111

<b>第 7 章</b>	<b>準安定真空の崩壊</b>	<b>115</b>
7.1	真空の寿命の計算	115
7.1.1	バウンス作用	115
7.1.2	薄壁近似	117
7.1.3	三角近似	118
7.2	ソリトンによる偽真空崩壊の触媒効果	120
<b>第 8 章</b>	<b>拡張された超対称性の破れ</b>	<b>123</b>
8.1	超対称性を破る真空の構成法	123
8.1.1	ケーラー多様体	123
8.1.2	準安定状態の構成方法	125
8.1.3	摂動を加えたサイバーグ・ウィッテン理論	127
8.2	部分的超対称性の破れ	128
<b>第 9 章</b>	<b>ブレーン配位と超対称性の破れ</b>	<b>133</b>
9.1	D ブレーンの導入	133
9.2	ブレーン配位の基礎	135
9.3	弦理論における超対称性の破れ	138
9.3.1	ブレーンを用いた SQCD の構成	138
9.3.2	サイバーグ双対理論の構成と超対称性の破れ	141
<b>第 10 章</b>	<b>幾何学的転移と超対称性の破れ</b>	<b>145</b>
10.1	カラビ・ヤウ コンパクト化, モジュライ空間, 特殊幾何	145
10.1.1	カラビ・ヤウ コンパクト化	145
10.1.2	複素構造モジュライとケーラー構造モジュライ	147
10.2	ノンコンパクトな場合の議論	148
10.2.1	重力の切り離し	149
10.2.2	フリーズされたモジュライ	150
10.3	幾何学的転移とグコフ・バッファ・ウィッテンポテンシャル	153
10.3.1	BPS ドメインウォール	153
10.3.2	超ポテンシャルの生成	155
10.3.3	幾何学的転移	158
10.3.4	複素構造モジュライの固定と質量の階層性	161
10.4	幾何学的に実現された準安定状態	162
10.4.1	準安定状態の構成	162
10.4.2	準安定状態の崩壊率	164
10.4.3	不純物による触媒効果	165

第 11 章	ドジッター時空の構成	167
11.1	KKLT モデル	167
11.2	弦理論のランドスケープとマルチバース	172
参考文献		175
索引		181