

まえがき

2012年、ヒッグスボゾン（ヒッグス粒子）がスイス、ジュネーブ近郊にあるCERNのLHC（大ハドロン加速器、Large Hadron Collider）で発見された。その後の実験で、ヒッグスボゾンの存在は揺るぎないものになっている。クォーク、レプトン、ゲージボゾンとともに素粒子の標準理論で必要不可欠とされ、唯一未発見だった粒子が発見されたわけだ。しかし、ヒッグスボゾンの発見は、単に新粒子の発見というにはとどまらない大きな意味がある。

よく新聞や雑誌で、ヒッグスボゾンは万物の質量の根源を説明すると表現されることがある。これは、いささか不正確で誤解を招く表現である。我々が普段見る物質の大半の質量は陽子や中性子の質量で説明される。陽子や中性子の質量のうちヒッグスボゾンに起因する質量は2%ぐらいにすぎない。残りは強い相互作用によって生成されることがわかっている。これはP.W.ヒッグスがヒッグスボゾンを提唱するより以前に南部陽一郎によって明らかにされていた。

ヒッグスボゾンの発見の真の意味は別のところにある。電磁力と弱い力を統一する標準理論でヒッグスボゾンは不可欠の存在である。二つの異なる力が一つのものに統一されるためには、低エネルギーの世界で一つの力が二つの異なる力に分化するメカニズムが必要となる。この分化のプロセスにヒッグスボゾンは必要なのだ。言い換えれば、ヒッグスボゾンの発見によって力の統一という描像が確立されたのである。

だがヒッグスボゾンの正体がわかったわけではない。一つの力が二つの異なる力に分化する過程は、数学的にはゲージ対称性が部分的に自発的に破れる過程である。ゲージ対称性の自発的破れのメカニズムとしてヒッグス機構があり、標準理論に採用されている。この詳細は実験ではまだ確かめられていない。

ゲージ対称性の自発的破れのメカニズムとして別のメカニズムがある。細谷機構と呼ばれ、ゲージ場の5次元目の成分のダイナミクスにより4次元時空のゲージ対称性の自発的破れが引き起こされる。量子力学におけるアハロノフ・ボーム効果を5次元目に一般化したもので、ヒッグスボゾンはこのアハロノフ・ボーム位相の揺らぎとして現れる。ゲージ場とヒッグス場が統合され、この理論はゲージヒッグス統合理論と呼ばれる。ヒッグス場の相互作用はゲージ原理で規定され、ヒッグスボゾンの質量は量子効果で有限に生成されるなどの著しい性質がある。

細谷機構は1983年に発見されたが、当初はクォークやレプトンの弱い相互作用がカイラルであることをうまく説明できず、なかなか現実的な理論が作れなかった。その後、オービフォルド上の場の理論、ランドール・サンドラムのワープ空間などの理論的進歩があり、2010年代には電弱相互作用を記述する現実的なゲージヒッグス統合理論が構成されるに至った。

本書は、細谷機構とゲージヒッグス統合理論を基礎から総合的に解説する。対象は学部4年生から大学院生を念頭に置いているが、フロンティアの研究者にとっても有用になるようにまとめている。

る。ヒッグス機構と標準理論のおさらいをした後、第3章でアハロノフ・ボーム効果を非可換ゲージ理論に一般化する細谷機構を導入する。第4章では量子効果でゲージ対称性が自発的に破れることを有効ポテンシャルの計算を通して見る。

第5章では高次元での場の理論の特性を見た後、オービフォルド、普遍余剰次元理論を考察し、細谷機構を適用したゲージヒッグス統合モデルを構成する。第6章では、次のステップとしてランドール・サンドラムのワープ空間（RS空間）を導入する。ごく初歩的な一般相対性理論の知識でRS空間上のゲージ理論やフェルミオンが理解できる。

第7章ではRS空間上で現実的な $SO(5) \times U(1)$ ゲージヒッグス統合理論が構築される。ベクトルボゾン、クォーク、レプトン、ヒッグスボゾンの質量が再現される。さらに第8章では、これらの粒子の5次元目の空間での波動関数が決められ、4次元でのゲージ結合、ヒッグス結合が評価される。低エネルギーでは標準理論とほぼ同じ結果を与えることが判明する。ゲージヒッグス統合理論は新粒子（5次元目への励起モード）を予言する。新粒子をLHCでいかに直接生成できるか、また将来の電子陽電子衝突実験でいかに新粒子の存在を干渉実験を通して確認できるかを考察する。第9章では、未解決の課題を垣間見る。

細谷機構の物理はまだよく理解されていないし、ゲージヒッグス統合理論はまだ精密化する必要がある。本書が今後の発展に役立つことを願っている。

2018年7月

細谷 裕

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	ゲージ理論と力	1
1.2	力の統一と対称性の自発的破れ	2
1.3	対称性の自発的破れの機構	3
第 2 章	ヒッグス機構	5
2.1	対称性の自発的破れ	5
2.2	ゲージ不変性	6
2.3	ヒッグス機構	7
2.4	非可換ゲージ理論でのヒッグス機構	8
2.5	標準理論	12
2.6	W ボゾン, Z ボゾン, ヒッグスボゾン	14
第 3 章	アハロノフ・ボーム効果と細谷機構	18
3.1	量子力学におけるアハロノフ・ボーム効果	18
3.2	$M^n \times S^1$ 上のゲージ理論	20
3.3	非可換ゲージ理論におけるアハロノフ・ボーム位相	21
3.4	細谷機構 1—ゲージ対称性の破れ	23
第 4 章	量子効果と細谷機構	27
4.1	有効ポテンシャル	27
4.2	場の理論における有効ポテンシャル	28
4.3	AB 位相に対する有効ポテンシャル $V_{\text{eff}}(\theta_H)$	30
4.4	細谷機構 2—量子効果によるゲージ対称性の力学的破れ	32
4.5	ヒッグス (A_y 励起) モードの質量	34
4.6	境界条件の同値類と AB 位相	36
4.7	$V_{\text{eff}}(\theta_H)$ の有限性	37
4.8	有限温度の QED, QCD	39
第 5 章	ゲージヒッグス統合 1	41
5.1	$M^4 \times S^1$ 上の $SU(5)$ 大統一理論	41
5.2	高次元理論でのフェルミオン	43

5.3	オービフォルド $M^4 \times (S^1/Z_2)$	45
5.4	カイラルフェルミオン	46
5.5	ゲージ場	47
5.6	ゲージ理論とオービフォルド境界条件	48
5.7	AB 位相と境界条件の同値類	50
5.8	普遍余剰次元 (UED) モデル	53
5.9	大統一— $SU(5)$ 川村モデル	55
5.10	電弱統一— $SU(3)$ ゲージヒッグス統合モデル	58
5.11	ひねりゲージ 1	64
第 6 章	ランドール・サンドラムのワープ空間	67
6.1	アインシュタイン方程式	67
6.2	ランドール・サンドラムの解	69
6.3	RS 空間上のスカラー場	71
6.4	RS 空間上のゲージ場	74
6.5	曲がった時空上のフェルミオン場	80
6.6	RS 空間上のディラック場	81
第 7 章	ゲージヒッグス統合 2—電弱理論	88
7.1	ゲージヒッグス統合の目的	88
7.2	$SO(5) \times U(1)$ 理論	90
7.3	ヒッグスボゾンと AB 位相 θ_H	93
7.4	クォークとレプトン	95
7.5	ブレーンスカラーとブレーンフェルミオン	98
7.6	ダークフェルミオン	101
7.7	ひねりゲージ 2	102
7.8	質量スペクトル：ゲージボゾン	103
7.8.1	ゲージ場： A_μ, B_μ	103
7.8.2	ゲージ場： A_z, B_z	107
7.9	質量スペクトル：フェルミオン	109
7.9.1	クォーク	111
7.9.2	レプトン	117
7.9.3	ダークフェルミオン	119
7.10	有効ポテンシャル $V_{\text{eff}}(\theta_H)$ と電弱対称性の破れ	120
第 8 章	新粒子	126
8.1	θ_H 普遍性	126

8.2	ヒッグス場の有効相互作用	130
8.3	波動関数	131
8.3.1	ゲージ場	131
8.3.2	クォーク	134
8.3.3	レプトン	136
8.3.4	ダークフェルミオン	138
8.4	ゲージ結合	138
8.5	ヒッグス結合	146
8.6	新粒子：KK 励起モード	148
8.7	ヒッグスボゾンの崩壊	150
8.8	新粒子の生成	153
8.9	電子陽電子衝突で見る干渉効果	155
8.10	暗黒物質	160
第 9 章	これからの課題	162
9.1	大統一	162
9.2	高次量子補正	167
9.3	ゲージ不変なゲージ対称性の自発的破れ	168
付録 A	自然単位, ディラック行列, $SO(N)$	175
A.1	計量, 自然単位, ディラック行列	175
A.2	$SO(N)$, クリフォード代数	176
A.3	$SU(N)$	182
付録 B	有効ポテンシャルの計算	183
B.1	正則化	183
B.2	無限和 1: 平坦時空の場合	184
B.3	無限和 2: $V_{\text{eff}}(\theta_H)$ の積分表示	186
B.4	$V_{\text{eff}}^{1\text{loop}}(\theta_H)$ の有限性	188
付録 C	ベッセル関数	189
C.1	ベッセル関数とその性質	189
C.2	RS 空間上での波動関数	191
C.3	変形ベッセル関数	194
	参考文献	195
	索引	198