

特集：超対称ゲージ理論の構造

量子力学では同種粒子が区別できませんが、二つの粒子について状態が対称的なボース粒子と、反対称的なフェルミ粒子があります。このボース粒子とフェルミ粒子の間の対称性が超対称性です。現在のエネルギーでの実験結果からは超対称性を示す実験事実は得られていませんが、超弦理論や標準模型を超える統一理論で重要な役割を果たすと予想されています。

場の量子論は量子電磁力学や電弱統一理論の成功に見られるように、結合定数が小さい場合には、結合定数のべき級数展開を用いた摂動論によって、実験事実との見事な一致が得られています。しかし、結合定数が大きくなった場合にどのように非摂動的な効果を取り入れるかという問題は場の量子論の現段階での最重要課題のひとつです。超対称性を持つ理論を考えることで、この非摂動効果に関して今まで他の方法では得られなかった重要な成果が得られました。本特集は、超対称ゲージ理論での非摂動的取り扱いの最近の進展、特に我が国の研究者による重要な貢献を取り上げています。

この10年間程で超対称性ゲージ理論の研究には大きな進展がありました。場の量子論を経路積分で表すと、しばしばその積分に連続的な対称性が働いています。その時、積分の値を対称変換の固定点からの寄与の和で表すことができる場合があり、これを局所化(localization)の方法と呼んでいます。特に、超対称理論では、超対称性の一部を保ちながら理論を変形しても超対称性に守られている物理量の値は変形パラメーターに依りません。この事実を用いて計算しやすいパラメーター領域で評価することにより、経路積分の値が固定点からの寄与だけで厳密に表せ、局所化の方法で厳密な答えが得られます。こうした固定点からの寄与の和は一般に組み合わせ論的な表式で記述することができます。

1982年にWittenはモース理論を超対称理論に応用して、積分の寄与が変換の固定点だけで厳密に得られることを示しました。曲がった時空でもこの方法を適用できるように、曲がった時空での超対称性の定式化が近年工夫されました。Wittenのモース理論の応用を曲がった時空上の超対称理論へ一般化したのが局所化の方法と考えられます。また、この局所化の方法を共形不変な理論に適用すると、理論のindexを求める計算にも応用することができます。超対称性を部分的に保存する状態をBPS状態と呼びます。このBPS状態を数え上げる際に、超共形理論のindexは重要な情報を与えます。局所化の方法を用いてNekrasov、Pestun、Kapustinなどは様々な次元の超対称ゲージ理論で理論を厳密に解き、その非摂動的な振る舞いを明らかにしました。

数年前にはAGT(Alday-Gaiotto-Tachikawa)予想と呼ばれる、2次元リュービル理論と4次元超対称ゲージ理論の新しい双対関係が発見されました。2次元理論と4次元理論の間に理論の繰り込みまで含む正確な対応関係が見つかったのは初めてで、この発見は大きな反響を呼びました。4次元のSeiberg-Witten理論を超弦理論のブレーン構成で解釈す

る手法では6次元の基礎理論が2次元のリーマン面に巻き付いて、2次元リュービル理論と4次元Seiberg-Witten理論に分離します。このとき、ゲージ理論のS双対性がリーマン面の写像類群に対応するため、4次元理論と2次元理論の双対関係が現れるものと考えられます。また、リュービル理論の相関関数が行列模型を用いて記述される事は良く知られていますので、これを通じて行列理論の有効ポテンシャルとSeiberg-Witten理論の有効ポテンシャルが一致する事が推測されます。

この特集企画ではこうした一連のゲージ理論の新しい発展に重要な寄与を行った細道、今村、立川、糸山、吉岡氏の招待論文を掲載しました。また、M理論との関係で特に重要なABJM理論(物質場と結合した3次元Chern-Simons理論)について、最近そのインスタントン振幅を無限次にわたって足し上げるという重要な結果を得た初田、森山、奥山氏のレビューも掲載しました。

原論文

(2015年11月16日公開済み)

- “The localization principle in SUSY gauge theories”
Kazuo Hosomichi, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 11B101 (2015).
doi:10.1093/ptep/ptv033
- “A review of the T_N theory and its cousins”
Yuji Tachikawa, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 11B102 (2015).
doi:10.1093/ptep/ptv098
- “Developments of theory of effective prepotential from extended Seiberg-Witten system and matrix models”
Hiroshi Itoyama and Reiji Yoshioka: Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 11B103 (2015). doi:10.1093/ptep/ptv124
- “Exact instanton expansion of the ABJM partition function”
Yasuyuki Hatsuda, Sanefumi Moriyama, and Kazumi Okuyama, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 11B104 (2015). doi:10.1093/ptep/ptv145
- “Index calculation by means of harmonic expansion”
Yosuke Imamura, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 11B105 (2015).
doi:10.1093/ptep/ptv167

<情報提供：江口 徹（立教大学 数理物理学研究センター 特任教授）>