

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	亀山 尚史
論文題目	Integrable deformations of the $\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$ superstring		
(論文内容の要旨)			
本論文は、AdS/CFT対応を実現させる本質的な機構を理解することを目指し、この対応関係の弦理論側($\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空上の超弦理論)の可積分変形を研究したものである。AdS/CFT対応とは$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空上のIIB型超弦理論と4次元$\mathcal{N}=4$超対称ゲージ理論(SYM)がラージ$N$極限で等価であるという予想である。この対応は弱/強結合の間の関係であるため、その直接検証は一般には困難であったが、弦理論及びゲージ理論の可積分性を用いることで、non-BPS領域でも対応関係の検証が可能になり、この双対性を支持する状況証拠がこれまで数多く得られてきた。 本論文では、AdS/CFT対応の弦理論側を可積分変形することにより、ゲージ理論側の可積分変形に対する理解を得ることを視野に入れている。可積分変形とは、弦理論側(あるいはゲージ理論側)の背景時空(対称性)を、理論の持つ可積分性を保ったまま変形する手法である。このような可積分変形の例として、XXX型スピン鎖(有理型の可積分模型)の量子変形(q変形)であるXXZ型スピン鎖(三角型の可積分模型)がある。この可積分変形により、XXZ型スピン鎖のもつ対称性は量子アフィン代数という、より大きな対称性に拡大している。このように理論が持つより深い可積分構造を理解できることは可積分変形を考える利点の1つである。 本論文で議論されたのは、Yang-Baxter変形という、$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空上の超弦理論の可積分性を保ちつつ、その背景時空を古典r行列に基づいて変形する方法である。古典r行列とは、量子論的なYang-Baxter方程式の古典類似に対応する古典Yang-Baxter方程式(CYBE)の解であり、このような古典r行列を1つ決めると$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空の可積分変形に対応する背景時空を一つ定められる。このYang-Baxter変形に基づき、本論文では特に、$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$上の超弦理論の$q$変形について議論した。 本論文では、$q$変形された弦の作用の非相対論的極限を考え、それがLandau-Lifshitz模型(LL模型)という連続非等方磁性体を記述する可解模型に帰着されることを示した。またこのLL模型は、q変形されたスピン鎖のHamiltonianのコヒーレントな固有状態に対する期待値の連続極限と一致している。特に、このLL模型の$U(1)$に破れた対称性が、non-localな保存チャージを構成できるため、$sl(2)$量子アフィン代数へと拡大することを厳密に示した。 また本論文では、未だ分かっていない、q変形された$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空上の超弦理論に双対なゲージ理論を同定するのに指標となる物理量を、q変形された$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空からホログラフィックに導出するための枠組みを提唱した。このq変形されたAdS_5には曲率発散をもつ特異平面が存在している。本論文では、この特異平面付近の時空の因果構造の振る舞いが、通常のglobal座標におけるAdS_5時空の境界付近のものと同一であることを明らかにし、この特異平面を境界として取り扱えることを示した。これに基づいて、q変形されたAdS_5時空中の極小曲面を議論し、双対なゲージ理論のWilsonループの真空期待値を導出した。 さらに本論文では、カuspをもつWilsonループに対応する極小曲面を構成し、そのカuspをなす2本の半直線が反平行になる極限を取り、q変形された場合のquark-antiquarkポテンシャルを導出した。さらに、このポテンシャルがスケール極限の下で、非可換空間上のゲージ理論に双対なMaldacena-Russo時空から得られるquark-antiquarkポテンシャルに一致することを示した。この結果から、q変形された$\text{AdS}_5 \times \text{S}^5$時空上の超弦理論に双対なゲージ理論が、非可換空間上のゲージ理論のある極限に対応すると予想される。本論文で得られた結果から、これを再現する様なゲージ理論を特定することで、ゲージ理論側のq変形に対する知見が得られると期待される。			

(論文審査の結果の要旨)

AdS/CFT 対応は、現在最も精力的に研究が行われている素粒子論の課題の一つであり、本論文では、この対応関係の可積分変形について議論している。特に、AdS/CFT 対応の弦理論側を可積分変形するアプローチから、ゲージ理論側の可積分変形に対する知見を得ることで、この双対性を成立させる本質的なメカニズムの解明に繋げることを目標に考察を行っている。

本論文で考察されたのは、 $AdS_5 \times S^5$ 時空上の IIB 型超弦理論を記述するシグマ模型の Yang-Baxter 変形、すなわち、古典 Yang-Baxter 方程式を満たす古典 r 行列を決めることでそれに対応する背景時空の変形が得られる手法である。この Yang-Baxter 変形に関して本論文で詳しく調べられているのが、 $AdS_5 \times S^5$ 時空上の超弦理論の q 変形であり、この理論の可積分構造および変形された背景時空上の弦の古典解に関して深く考察を行っている。

本論文ではまず、この q 変形された $AdS_5 \times S^5$ 時空上の超弦理論の可積分構造に関して、弦の作用が非相対論的極限の下で、非等方性をもつ Landau-Lifshitz 模型 (LL 模型) という連続磁性体を記述する可解模型に帰着されることを明らかにした。この LL 模型は、 $\mathcal{N}=4$ 超対称ゲージ理論から得られるスピン鎖の Hamiltonian を q 変形したものの連続極限と一致している。特にこの LL 模型の可積分構造に関して、変形により $U(1)$ に破れた対称性が、non-local な保存チャージを構成できるため、 $sl(2)$ 量子アフィン代数へと拡大されることを厳密に示している。

また本論文では、未だ明らかにされていない、 q 変形された弦理論側に双対なゲージ理論を同定することを視野に入れて、双対なゲージ理論の物理量を q 変形された $AdS_5 \times S^5$ 上の超弦理論からホログラフィックに導出する方法を議論している。この弦理論側から得られた結果を再現する様なゲージ理論を探し出すことによって、双対なゲージ理論を同定することができると期待される。この q 変形された AdS_5 には、変形パラメータに反比例する距離のところに曲率特異性をもつ平面が存在するという特徴がある。そこで本論文では、この特異平面の物理的性質を解明するため、変形された AdS_5 部分で回転する弦の古典解をプローブとして考え、弦が角運動量の値に関係なく特異平面をこえて伸びないことを示した。この結果は、特異平面の内側の領域に自由度が閉じ込められていることを示唆している。また、特異平面付近の時空の因果構造の振る舞いは、通常の global 座標での AdS_5 時空における境界付近のものと同じである。これらの結果から、ホログラフィックなセットアップとして特異平面を境界として取り扱う方法を提唱し、 q 変形された AdS_5 時空中の極小曲面を考え、双対なゲージ理論の Wilson ループの真空期待値を予想している。この結果は、この弦理論に双対なゲージ理論の正体を掴むのに重要な役割を果たすと期待される。

さらに本論文では、カスプをもつ Wilson ループに対応する極小曲面を構成し、 q 変形された場合の quark-antiquark ポテンシャルを導出した。また、このポテンシャルがスケール極限の下で、非可換空間上のゲージ理論に双対な Maldacena-Russo 時空から得られる quark-antiquark ポテンシャルに一致することを示している。これは、 q 変形された $AdS_5 \times S^5$ 時空上の超弦理論に双対なゲージ理論が、非可換空間上のゲージ理論の変形として得られることを示唆している。今後本論文の結果に基づいて、ゲージ理論側の q 変形に対して進展が得られると期待される。

以上で述べたように、本論文は AdS/CFT 対応の可積分変形、特に弦理論側の変形について、重要な結果を与え、さらに今後の方向性を示唆した優れたものである。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 1 月 15 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降