

重力場及び弦模型を数値的に量子化する研究

課題番号 08640358

平成8年度~平成10年度

科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））

研究成果報告書

平成11年4月

研究代表者 湯川哲之

総合研究大学院大学教育研究交流センター教授

はしがき

重力場の量子化は、言うまでもなく素粒子論における根元的な問題である。とりわけ近年はこの問題に対して超弦理論による解決への期待が高まり、様々な角度からの理論的研究が飛躍的に進んだ。かつては超弦理論の最大の困難点であった摂動的理論における古典的真空の不定性、すなわち理論的に矛盾のない模型として Type I、Type IIA、Type IIB、Heterotic E_8 、Heterotic $SO(32)$ の 5 つが挙げられていたが、これらも理論が持つ双対関係の発見により、互いが 1 つの理論(M-theory と呼ばれている)の様々な極限として理解されるに至り、その期待はより現実的なものとなった。さらに、弦理論の強結合領域における古典ソリトン解(D-ブレーン)の発見により、理論の非摂動的な様相が格段に具体性をもって理解されるようになった。しかしながら、我々が目指すゴールは、双対性により導かれる弦理論のある一つの局面でもなければ、先験的に定めた古典解近傍の摂動論ではない。求めるのは量子論的な非摂動解としての時空である。そのためには古典解近傍での摂動論から何歩も踏み出して、中間結合領域に研究を進める必要がある。現在考える方法としては、QCD など今までの経験からして数値的方法が唯一の可能性である。

一方、4 次元アインシュタイン重力を直接量子化するという試みでは、重力の相互作用定数(ニュートン定数)が次元を持つために摂動論的には繰り込みが不可能であると考えられている。そこで、先見的な平坦空間を摂動の出発点とはせず、空間をランダムに 3 角分割しその統計的性質から古典的真空を定めようとする試みも注目を浴びてきた。特に、最近の進歩としては、4 次元重力とゲージ場を結合させることにより、重力場の不安定性を取り除ける可能性があることが分かったことである。

いまや、時空と物質の基本理論である超弦理論や、低エネルギー有効理論であるアインシュタイン理論が、構成的に定義された場の理論により数値的に研究することができるという展望が開かれた。私たちにとって、この 3 年間の科研費による研究がいかに重要であったかは強調してもしすぎることはない。研究の内容を詳細に報告するにあたって、多くの研究協力者の方々にお礼を述べたい。また、高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所の理論部の方々には、日ごろ多くの啓示を受けたことに感謝したい。

研究組織

研究代表者 湯川哲之 総合研究大学院大学・教育研究交流センター 教授

(研究協力者 津田憲次 高エネルギー加速器研究機構 学振特別研究員)

(研究協力者 羽倉洋行 高エネルギー加速器研究機構 協力研究員)

(研究協力者 小田五月 奈良女子大学大学院理学研究科 学生)

(研究協力者 江川浩 東海大学理学部 講師)

(研究協力者 洞田慎一 東海大学大学院理学研究科 学生)

注.身分は平成10年当時

研究経費

1996年度 900千円

1997年度 500千円

1998年度 500千円

計 1,900千円

目次

はしがき	1
研究組織 研究経費	2
目次	3
研究発表	4
研究成果	7
発表論文	9

研究発表

学会誌等

1. B. E. Hanlon, N. D. HariDass, T. Yukawa : Finite size effects for the Ising Model coupled to 2-D random surfaces; Phys. Lett. B368(1996)55-63.
2. N. Tsuda, T. Yukawa : Universal scaling of 2D surfaces; 素粒子論研究 94(1996)C49-54.
3. H. Kawai, N. Tsuda, T. Yukawa: The Complex Structures of 2D Surfaces; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 47 (1996) 653 -656.
4. S. Ichinose, N. Tsuda, T. Yukawa : Minbu Distribution of Two-Dimensional Quantum Gravity: Simulation Result and Semiclassical Analysis; Int. Jour. Mod. Phys. A12(1997)757-780.
5. N. Tsuda, T. Yukawa : 数値的量子重力; 素粒子論研究 94(1997)D79-89.
6. H. Kawai, N. Tsuda, T. Yukawa : Complex structure of a DT surface with T^2 topology; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 53 (1997) 777.
7. H. Egawa, T. Hotta, T. Izubuchi, N. Tsuda, T. Yukawa : Scaling structures in 4D simplicial gravity; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 53 (1997) 760.
8. H. Hagura, N. Tsuda, T. Yukawa : Fractal structures of three-dimensional simplicial gravity; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 53 (1997) 766.
9. H. Egawa, T. Hotta, T. Izubuchi, N. Tsuda, T. Yukawa : Scaling Behavior in 4D Simplicial Quantum Gravity; Prog. Theor. Phys. 97 (1997) 539-551.
10. H. S. Egawa, N. Tsuda, T. Yukawa : Common Structures in 2, 3 and 4D Simplicial Quantum Gravity; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 736-738.

11. S. Oda, N. Tsuda, T. Yukawa : Two-Dimensional Dynamical Triangulation using the Grand-canonical Ensemble; Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 63 (1998) 733.
12. A. Fujitsu, N. Tsuda, T. Yukawa : 2D Quantum Gravity -Three States of Surfaces-; Int. Jour. Mod. Phys. A13 (1998) 583-605.
13. H. Hagura, N. Tsuda, T. Yukawa : Phases and Fractal Structures of Three-dimensional Simplicial Gravity; Phys. Lett. B418 (1998) 273-283.
14. S. Oda, N. Tsuda, T. Yukawa : Grand-canonical simulation of two-dimensional simplicial gravity; Prog. Theor. Phys. 99 (1998) 875-884.

口頭発表

1. 羽倉洋行、津田憲次、湯川哲之 : Fractal structure in three-dimensional simplicial gravity. 日本物理学会第 51 回年会、1996/4/1.
2. 小田五月、津田憲次、湯川哲之 : 2次元量子重力に対する数値的アプローチ. 日本物理学会第 51 回年会、1996/4/1.
3. 川合光、津田憲次、湯川哲之 : 力学的単体分割により構成されたストリング世界面の複素構造. 日本物理学会第 51 回年会、1996/4/1.
4. 江川浩、出淵卓、堀田智洋、津田憲次、湯川哲之 : 4次元量子重力の数値シミュレーション. 日本物理学会秋の分科会、1996/10/6.
5. 出淵卓、江川浩、堀田智洋、湯川哲之、津田憲次 : 力学的単体分割により構成された時空の普遍的なスケーリング. 日本物理学会秋の分科会、1996/10/6.
6. 湯川哲之、津田憲次、小田五月 : 臨界弦のシミュレーション. 日本物理学会秋の分科会、1996/10/7.

7. 江川浩、津田憲次、湯川哲之：量子重力における力学的単体分割による次元の効果. 日本物理学会第 52 回年会、1997/3/29.
8. 川合光、津田憲次、湯川哲之：力学的単体分割法によるストリング世界面の数値解析. 日本物理学会第 52 回年会、1997/3/29.
9. 江川浩、津田憲次、湯川哲之：数値計算による 2, 3, 4 次元量子重力の共通構造. 日本物理学会秋の分科会、1997/9/1.
10. 江川浩、藤津明、洞田慎一、津田憲次、湯川哲之：ゲージ場と結合した 4 次元格子量子重力. 日本物理学会第 53 回年会、1998/3/30.
11. 江川浩、藤津明、洞田慎一、津田憲次、湯川哲之：4 次元格子量子重力における連続理論の可能性. 日本物理学会秋の分科会、1998/10/3.
12. 小田五月、湯川哲之：Schild action からなる弦理論の力学的単体分割を用いた数値シミュレーション. 日本物理学会秋の分科会、1998/3/28.

研究成果

1995年から1998年にかけて科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))「重力場及び弦模型を数値的に量子化する研究」を受けた。この間、高エネルギー加速器研究機構を中心に日本では唯一の格子重力研究グループを組織した。我々のグループの主な学問的成果は、数値シミュレーションを通し量子重力及び弦模型に関して次のようなことを明らかにしたことである。

1. 2次元面の量子統計的及び準量子統計的性質を調べ、面の取りうる状態がクランプル・フラクタル・ブランチポリマーの3つのクラスに分類されることを示した。(論文4,12)
2. 高次元(3および4次元)空間のフラクタル的性質を2次元と同様の手法で測定し高次元重力の連続極限の可能性を探った。空間のスケーリング則には次元に寄らない共通性のあることを見出した。(論文9,13)
3. 可解模型を用いて、2次元重力場に物質が結合している場合の有限サイズ効果を求め、それが一般に予想されているよりも大きい事を見出した。したがって、これまでの *susceptibility* の計算はセントラル・チャージが0(純重力)の場合を除いて再計算すべきことを示した。(論文1)
4. 有限サイズ効果の影響が少ないグランド・カノニカル法で *susceptibility* を再測定し、セントラル・チャージが1以下では理論値と一致することを示した。(論文14)

以上の論文を国際誌に出版するとともに、2編の日本語による解説(論文2,5)を国内誌に出版した。また、6編の論文を国際会議等で発表するとともにそれらをプロシーディングに出版した(論文3,6,7,8,10,11)。

これらの成果をふまえた最近の研究から以下のような新しい発見があり、これらが「はしがき」で述べた2つの最近の成果となっている。

1. Schildt ゲージでの Type IIB 型超弦作用を三角分割で格子化した時、その作用が局所超対称性を保つことを示した。また、この作用には弦の世界面の不安定性がないことを世界面が正四面体での分配関数の解析的計算で示し

た。(1999年3月物理学会年会,広島にて発表)

2. 4次元アインシュタイン重力で単体分割した空間のリンク上に $U(1)$ ゲージ場をのせた系では新しい相が現れ、そこでは2次相転移の可能性があることを示した。(Lattice98 国際会議 (Colorado,1998) で発表)

以下に英文論文のみを収録した。