



ひもの量子力学と素粒子の統一理論

研究ノート

吉川圭二*

1. はじめに

「生産と技術」誌の読者諸氏には素粒子論などになじみ深い方は少ないと思われるので、具体的な研究内容よりは、どのような問題意識で研究に取り組んでいるかを述べる。

すべての物質の構成要素はもちろん、物質間に働く相互作用も、すべて素粒子と呼ばれる粒子によって作り出されていることは良く知られている。では、それらの素粒子にはどのようなものがあるかという、強い相互作用をする物質を作っているクォーク、電磁相互作用や弱い相互作用にだけ関与するレプトン（電子、ミュー中間子、ニュートリノ、等）などである。相互作用の性質に関しては、電磁相互作用を光子 γ が、弱い相互作用を W^\pm および Z 粒子が、強い相互作用をグルーオン粒子がそれぞれ支配している。そして、最も古くから知られている重力相互作用はグラビトン（重力子）と呼ばれる“粒子”が支配をしている。重力を粒子と呼ぶのは、相対論的な量子力学によると、“力”は波動であり波動は粒子の性質をもっているからである。

これら多数の粒子の存在様式は、互いに異なる性質のものが雑然と存在しているのではなく、或る統一的な法則によって支配されていると考えられる。実際1970年代には、それまで何の関連もないと思われていた電磁相互作用と弱い相互作用の統一性が実験的に確認され、 γ 、 W^\pm 、 Z の存在には関連があることが証明された。

ひもの理論は、このような統一性に着目して、一気に重力相互作用も含む終局的な統一理論を

ねらう候補として登場してきた。

2. なぜ“ひも”か

素粒子の統一理論を作るのに、なぜひもの理論を考えるかというのは誰でも問いたくなる疑問だ。歴史的な理由はともかくとして、ここでは一本のひもの量子力学を考えてそこから答えを引き出してみよう。理想的な完全弾性体でできているひもは、手を離すと一点に縮まってしまう。このようなひもの運動方程式、またはラグランジアンを書くことは容易で、実際よく知られている。それを量子化して、どのような固有振動状態が存在するかを調べることは、大学4年生ならば可能である。ただし、特殊相対性理論の要求は満すように取り扱わなければならないので、少し手続きがやっかいなだけである。その量子化は1970年に初めて行われたが、驚いたことに、時空の次元が26でなければうまく相対論の要求を満足させられないことがわかった。後に発見された超紐模型は時空が10次元のときにだけ相対論と矛盾しない。このような特別な次元を臨界次元と呼ぶ。臨界次元の問題を別にとすると、ひもの量子状態の中には、光子のようなゲージ粒子の性質をもつて質量がゼロの状態重力子のようにスピンの2の質量ゼロの状態が必ず含まれることが容易に確められる。また、超紐模型では光子や重力子だけでなく、クォークやレプトンに対応する量子状態がすべて、一本のひもの量子スペクトルの中に含まれているのである。実際には我々が知っている素粒子以外の状態も沢山あらわれるが、とにかくすべての素粒子は一本のひも（超紐）のいろいろな量子論的固有状態として現われる可能性は否定できない。

臨界次元の問題はどうするか。我々の時空は

*吉川圭二(Keiji KIKKAWA), 大阪大学理学部, 物理学科, 教授, 理学博士, 素粒子論

4次元であるから、10や26では多すぎる。しかし、ひもの量子状態の中に重力子まで含まれていると云うことはこの問題を解決する糸口を与えてくれる。重力場と云うのは、時空の構造を決める役割をアインシュタインの理論でもはたしている。重力場、または重力子があると、それは物質と相互作用をして時空の構造を決めるのである。上に述べたのは一本のひもの量子力学であって、それがどのような相互作用をするかを検討していない。相互作用の効果を取り入れるとはじめて、どのような時空構造が実現するかがわかるはずである。その中に、全体の次元は26または10でも、そのうち幾つかの次元が縮んで4次元時空だけが平坦に広がっている解があるかもしれない。この予想はただちに調べられ、実際に存在することが確かめられている。

相互作用を含めたひもの理論は、いろいろな近似法を用いて解くことができる。この理論では、ひもの相互作用（切れたり結合したりする過程）が、素粒子間の相互作用だけでなく、時空の構造、またその発展過程をすべて支配することになる。また、その解答を得るためには高度な非線型方程式を解く必要が起る。このため、いろいろな特殊解は数多く見付かっているが、実在する宇宙と素粒子の相互作用を同時に正しく説明する解はまだ発見されていない。

ひも理論を用いて統一理論を完成するためには本質的な問題が数多く残っているが、その前に何故ひも以外の量子論を採用しないのかという疑問に答えておく。我々はひもの量子論のかわりに、相対論的な膜の量子論を検討してみたことがある。その量子固有状態を調べた所、時空の次元が整数である限り、重力子やゲージ粒子の性質をもつ質量ゼロの状態はあらわれないことが判明した¹⁾。膜の模型を変えて検討した人もいるが、同様な結論に達するか、または連続的な質量スペクトルを得るなど、現在の所ひも以外に有力な候補は発見されていない。

3. 時空が先か、物質が先か

ひも理論にもとづく統一理論には、一つの本質的な未解決問題が残っている。このノートでひもの量子状態の話をしたときには、時空間は

先に存在するものとして、その中でひもの量子力学を考えた。その結果、そのスペクトルの中に時空の構造を決定するはずの重力場の存在を見付けた。この重力場が、もともとあったひもの固有状態と相互作用をして時空を決めるとすれば、ひもの理論は本来時空構造に無関係に定義されていなければならない。

時空構造に無関係に定義されなければならないことは、どの重力理論でもそうである。アインシュタインの重力理論では、時空構造を決める計量 $g_{\mu\nu}(x)$ が力学変数としてもとのラグランジアンに入っていて、その変分原理は $g_{\mu\nu}$ を決定する運動方程式を与える。それを解いて初めて我々の宇宙構造が判明するが、この場合のラグランジアンの中には、いろいろな物質やそれらの相互作用を表す項が多くのパラメーターを含んで組み込まれていて、それらは自由に調整できる。この意味で統一理論ではない。またアインシュタイン理論と量子論は、現在の所、両立させる方法が見付かっている。

ひも理論（超ひも理論も含めて）は、事情が逆である。ひもの量子力学を実行すると、その結果として重力場 $g_{\mu\nu}(x)$ が誘導されるので、初めから量子論と両立していて、古典的な極限でアインシュタイン理論が導出される。上にもちょっと述べたが、ひも理論の出発点となるべき理論は、一本のひもだけに注目してはだめで、ひもの多体問題が取り扱えるようにしておかななければならない。その一つの方法が「ひもの場の理論²⁾」と呼ばれる方法である。この場の理論のラグランジアンには時空計量 $g_{\mu\nu}(x)$ を含める余地はなく、上記のように後で誘導されて出て来る。すると、出発点のラグランジアン、または基本方程式の中には、時空の概念を含む量はどこにも見当たらない。ここから、どのようにして時空概念を引き出すかが基本的な問題である。この問題に対しては、いくつかの試みはあるが³⁾、明確な解答はまだない。しかし、この問題は、統計力学からどのようにして熱力学的概念（温度、圧力、エントロピー等）を導出するかに似ていて興味深い課題である。

参 考 文 献

- 1) K. Kikkawa and M. Yamasaki, Prog. Theor. Phys. 76 (1986) 1379.
- 2) M. Kaku and K. Kikkawa, Phys. Rev. D10 (1974) 1110 and 1823.
- 3) H. Hata, K. Itoh, T. Kugo, H. Kunitomo and K. Ogawa, Phys. Lett. B175 (1986) 138.
G.T. Horowitz, J. Lykken, R. Rohm and A. Strominger, Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 238.
K. Kikkawa, M. Maeno and S. Sawada, Phys. Lett., B197 (1987) 524.

