

超弦理論のコンパクト化 After Thirty Years



渡利 泰山

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
taizan.watari@ipmu.jp

超弦理論は重力子を含む量子論になっている（つまり重力の量子化をする理論である。その理論を我らが自然が択んでいるかどうかはまた独立な問題だが）。そして、超弦理論では、時空が1+9次元になっていないといけならしい。でも、9次元のうち6次元分が十分に小さければ、既存の実験事実とは矛盾しないからOK。さらに、超弦理論の低エネルギーでは、重力子のほかに、素粒子の標準模型っぽい代物も（おおざっぱに言えば）ついに出てこないでもなさそう。だいたいうまくいっている感じ…。

一般向け科学啓蒙書によく書かれているこのお話は、ほぼ1980年代の半ばまでに専門家の間で成立してきた理解を基にしている（文献2）。それから30年ほど経った。その間、このお話はどのように深化してきたのだろう。超弦理論と現実世界との関わりという文脈でのお話の続きを紹介するのが、本稿の目標である。その他の文脈での弦理論の発展には立ち入らない。

本稿ではお話の続きを三本立てという形で切り出して紹介する。1点目は、コンパクト化って何？という点で、80年代後半から90年代後半の進展にあたる。主なメッセージを抽出しておく、空間の次元という概念自体が量子重力の理論たる超弦理論では自明なものでなくなる。そして、超弦理論の双対性の発見は、弦理論と現実世界との接点という問題を考えるうえで（も）、革命的变化をもたらした、ということである。

2点目は、弦理論の解の全体像の理解の深化。別の表現では、冒頭の「だいたいうまくいっている感じ」を精密化しようとい

う話でもある。現時点での超弦理論の理解に従うなら超弦理論には解がきわめてたくさんある、ということが知られている。それらの解の低エネルギーでのゲージ群や物質場の世代数は、個別の解ごとに種々様々であり、粒子の相互作用の結合定数の値も、様々である。ゆえに、冒頭に「素粒子の標準模型…出てこないでもなさそう」と記したのは、この種々雑多な解の中の一つとして、我々の宇宙を記述する解も多分存在するんじゃない…？という意味で理解することになる。学問分野としては、“多分”ではなしに“ちゃんと”存在を示せ、という話になる。これを示せば、超弦理論という仮説を棄却する必要がなくなるからだ。

そのためには、どうするか。コンパクト化という手法で得られる超弦理論の解の範囲内に話を限れば、まず、コンパクト化に用いる幾何と低エネルギーで実現される場の理論模型との間の翻訳関係を調べ、次に、幾何の選択肢の範囲内で素粒子の標準模型が実現できるかを調べることになる。超弦理論の双対性の発見から十数年が経った現在、ゲージ群、世代数、それにクォークやレプトンの質量、混合角のおおまかな特徴をどのように翻訳すべきか、理解が整理されてほぼ落ち着きつつある。

3点目は、超弦理論が現実と矛盾しないという消極的達成だけでなく、何か素粒子物理に新たな知見をもたらす積極的達成はないの？という話。全くないわけでもないですよ、…というのが現状である。紙幅の都合上、陽子崩壊の分岐比、右巻きニュートリノの質量、ゲージ結合定数の統一、の3つのテーマについて得られた弦理論ならではの知見を取り上げて、紹介する。

—Keywords—

コンパクト化：

高次元の時空で定義された物理理論から一部の次元が非常に小さい（コンパクト）と仮定して低次元時空の物理法則を導く手続き。古くはアインシュタインの一般相対論の発表直後にワイルらにより提案された5次元重力理論から4次元時空の重力と電磁気学の統一理論が有名。

超弦理論は通常10次元時空で定義されるため4次元時空の物理法則を導くためには6次元の空間自由度を非常に小さくする必要があり、小さな空間からその大きさに逆比例する質量（カルツァ＝クライン質量と呼ばれる）の粒子が無数に現れるので、その大きさは十分小さくしておかないと実験と矛盾する。

双対性：

記事内でも説明されるが、同じ物理現象を説明する2つの記述法があるとき、それらの記述法は互いに双対であるという。例えば電荷がない場合のマクスウェル方程式は電場と磁場を入れかえても方程式の形が変わらないので自己双対であると呼ばれる。最近良く議論されているAdS/CFT対応も双対性の一例であり、アンチ・ド・ジッター空間における重力とその境界における共形場理論が互いに双対であると考えられている。

（素粒子の）標準模型：

現在知られている素粒子は、強い相互作用と電弱統一理論を組み合わせたゲージ理論の枠組みで記述されることが実験的に確立されていて、それを標準模型と呼ぶ。最近発見されたヒッグス粒子は標準模型のなかで予言されていて見つかっていなかった最後の粒子であった。超弦理論を含む全ての素粒子理論は何らかの意味で標準模型を包含する必要がある。