

超弦理論の新時代

風間洋一

いまからおよそ 30 年前、強い相互作用の低エネルギーでの有効理論として誕生した弦理論は、その後量子重力を含む自然界の統一理論としての大胆華麗な再解釈を賦与され、さらに超対称性と呼ばれる強力な対称性の構造を取り込むことによって、高い整合性をもった“超弦理論”に高められて発展してきた。そしていま、それは、われわれの時間や空間に対する認識を根底から揺さぶる可能性を秘めたより根源的な新しい形に再度生まれ変わろうとしている。この最近の、革命的ともいえる進展の内容とその興奮をスケッチする。

幕開け

1995年3月14日、南カリフォルニア大学のオーディトリウムは異様な興奮につつまれた。ここでは前日から弦理論の国際ワークショップ“String 95”が開催されていたが、この日の朝のセッションで、プリンストン高等研究所のE. WITTENは、それまでまったく異なるものと思われていたさまざまな種類の超弦理論が後述する“双対性”(duality)と呼ばれる性質によって互いに結びついており、とくにそのうちのタイプIIAと呼ばれる10次元の基本的な超弦理論の背後に11次元の超重力理論と関係する(現在では“M理論”と呼ばれる)未知の理論が存在するであろう、という驚くべき講演をおこなったのである⁽¹⁾。

WITTENの述べた“双対性”の一部はすでに前年末にイギリスのC. HULLとP. TOWNSENDによって指摘されていたことではあったが⁽²⁾、WITTENの講演はこれを超弦理論全体の中で位置づけるとともに、すべての超弦モデルはたった一つの、おそらくは11次元に起源をもつ、“基本理論”の異なる現われかたにすぎない、という壮大

な見取り図を描いてみせたという点で画期的なものであった。筆者もこの会議の参加者の一員であったが、何か途方もないものの始まりを感じたのを鮮明に思い出す。

それから今日までの3年余の進展は、それまでの10年間の超弦理論の停滞期の鬱憤をはらすような、すさまじいものであった。新しく提起された問題を調べ尽くす間もなく予期せぬ構造が新たに顔をのぞかせ、世界中の研究者が息せき切って、このますます驚くべき様相をみせる理論の深遠な謎を解明しようと躍起になっているという状況が現在も続いているのである。その興奮を少しでも伝えること、それがこの小稿のささやかな目的である。

超弦理論とは何か

統一理論としての弦理論

冒頭で述べたわれわれ研究者の興奮を理解してもらうためには、まずそもそも超弦理論とは何かを手短かに説明しておかなければならない。歴史的な経緯は省略するが⁽³⁾、現在の超弦理論は、自然界のすべての力、物質、そしてそれらが発現する舞台である時空、を統一的に記述する最も有望な理論と考えられている。“超”の意味は後で述べ

Yoichi KAZAMA 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻相関基礎科学系

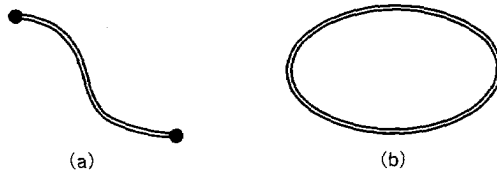


図1 両端にある種の電荷(ゲージ電荷)がついた開弦(a)と輪のように閉じた閉弦(b).

るとして、“弦”は文字通り“ひも”を意味する。そして、そのひもは大別して、両端にある種の電荷が付いた“開弦”(図1a)と輪のように閉じた端のない“閉弦”(図1b)の2種類に分けられるのだが、プランクスケール($\sim 10^{-34}$ cm)と呼ばれる超ミクロな世界ではすべてがこうしたひもから成り立っている、というのが弦理論の基本的な描像なのである。この一見荒唐無稽なアイデアは、しかし、みごとに上に述べた“統一”を実現するのである。ここでいう“統一”とは、すべてが本質的に同一の実体からなり、しかもそれが共通の根本原理に従うことを指す。その意味を少し詳しくみてみよう。

まず、弦は、それ自身振動をもつため、さまざまな種類の回転や振動といった(無限個の)異なる状態(モードと呼ぶ)をとることができる。こうした状態はマクロな視点から見るとその詳細はみえず、あたかも異なる質量(すなわちエネルギー)や電荷などの属性をもった点状の粒子のようにみえるはずである。このようにして、弦理論はこれまでに知られているすべての粒子を統一的に記述するだけでなく、その背後に無限個の(ほとんどは非常に重い)いまだ観測されていない粒子の存在を予言する。

つぎに、弦理論はこれらの“粒子”の間に働く力を、図2のような、弦の“結合”(joining)と“分裂”(splitting)というたった2種類の基本的なプロセスとして理解することを可能にする。われわれは今のところ、自然界のすべての現象は“重力”、“電磁気力”、原子核の崩壊を引き起こす“弱い力”、そして原子核の中に陽子や中性子を繋ぎ止めている“強い力”、という4種類の力によって引き起こされると考えており、それらはすべて“ゲージ理論”と呼ばれる美しい理論によって

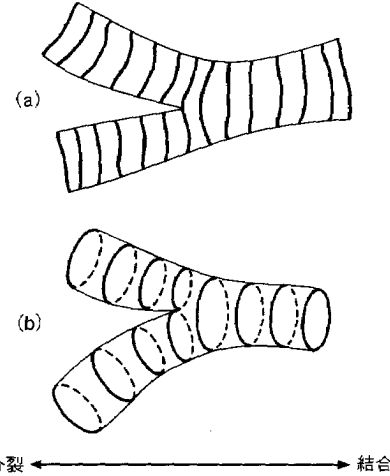


図2 開弦(a)や閉弦(b)の結合と分裂の基本プロセス。

(一部は統一された形で)記述されることを知っているが、重力をも含めた真の統一を成し遂げるには、弦理論のような幾何学的プロセスとしての統一が不可欠であるように思われる。

これに関連して、最後に“時空”との関係性を述べよう。アインシュタインは物体間に働く重力を、おのおのの物体がそのまわりの時間や空間を歪め、その歪みが波のように伝わることによって互いに影響を及ぼす、という形で理解できることを示したが、量子力学を考慮すると、その波は粒子的な属性もあわせもち、“重力子”と呼ばれる粒子の伝播と同定されることになる。特殊相対論によれば、すべての粒子は質量と“スピン”と呼ばれる粒子固有の角運動量によって特徴づけられるが、この分類でいうと重力子は質量がゼロ、スピンの2の粒子である*。逆に、この属性をもった粒子が交換されて生ずる力を記述する理論は、低いエネルギーでは必ずアインシュタインの一般相対論に一致することが証明できる。そしてうまいことに、超弦理論では閉弦のとりうる状態の中に必ずそのようなモードが現われるのである。こうして弦理論は自身の中に自動的に曲がった時空を記述する要素を内包しているのである。

このように弦理論は統一理論の最有力候補とし

* スピンの値は量子力学の基本定数である“プランク定数” $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s を単位として記述する。

てふさわしい素晴らしい性質を内包した理論であるが、それが現実の世界を記述する理論となるにはまだいくつかの改良が必要である。

超対称性

まずそのうちで近年ますますその重要性が認識されてきている“超対称性”と呼ばれる対称性の要請について述べよう⁽⁴⁾。すでに自然界のすべての粒子は固有のスピンをもつことを述べたが、この量は必ず整数または半整数*の値をとることが知られており、整数スピンをもつ粒子は“ボゾン”、半整数スピンをもつものは“フェルミオン”と呼ばれる。これらの二つのグループの粒子は、さまざまな意味で非常に異なる性質を示す。ボゾンの例としては、スピン1をもつ“光子”やスピン2をもつ“重力子”、フェルミオンの例としては、スピン1/2をもつ電子やクォークが代表的である。素粒子の世界における“対称性”の大きな働きの一つは、同一の質量をもついくつかの粒子を同じ実体の異なる状態としての組(多重項)として理解することを可能にすることにあるが、ボゾンとフェルミオンはあまりにもその性質が異なるため、ゲージ対称性のような通常の対称性では一つの多重項に共存させることができない。

これに対して“超対称性”はボゾンとフェルミオンの間の変換を許し、その意味で通常の対称性を“超えた”対称性である。超対称性を備えた理論では、同一の多重項に入るボゾンとフェルミオンの寄与が互いに相殺する傾向をもつため、古典力学からのずれを表わす量子力学的効果が抑制される現象がみられる。このため、場の理論に現われる無限大の困難が軽減されるなど、さまざまな意味で理論がコントロールしやすくなる。

弦理論の場合の超対称性の働きはより決定的である。とくに、それは、理論の不安定性を表わすタキオンと呼ばれる虚数質量をもった粒子を除去し整合性のある理論に導く。さらに、こうして得られた超弦理論は超対称性が強く効いて完全に有限な理論になっていると考えられている。

しかし、それほど重要な超対称性の確たる証拠は今のところみつかっていない。したがって現在

* 奇数を2で割ったもの、すなわち 1/2, 3/2 など。

期待されているのは、超対称性は超高エネルギーでは明白な形で存在するのだが、低エネルギー領域では巧妙に隠された形でしか実現されていないとする考えで、“超対称性の自発的破れ”と呼ばれている。しかし、それがどのようにして起こるのかのメカニズムはいまだ説明されていないのが現状である。

時空のコンパクト化

もう一つの超弦理論の困難は、相対性理論と量子力学の要請から、理論が正当に定義されるいわゆる“臨界次元”が超対称性のない“ボゾン弦”の場合には26次元、超弦理論の場合でも10次元という現実の4次元よりはるかに高い次元になってしまうことである。これを解決する現在のシナリオは、残りの10-4=6次元分は小さく丸まわっていて、低エネルギーの実験では見えなくなっているという“時空のコンパクト化”の考えである。そしてこの6次元コンパクト空間の性質が低エネルギーでの相互作用や粒子のパターンを決める重要な役割を担うものと考えられている。これは非常に有望なアイデアだが、現時点では、どのようにしてコンパクト化が起こるのか、なぜ6次元分しかコンパクト化されないのか、いかなる多様体を選ばれるのか、その原理は何か、という諸々の重要な課題に答えるまでには至っていない。

超弦理論のタイプ

この、まだまだ未発達ではあるが素晴らしい可能性を秘めた超弦理論は、つぎに述べる5種類のタイプに分類される。この分類はかなり専門的であるが、超弦理論の統一の意味を理解するためには不可欠なので簡単に解説しよう。

まず、これらの理論は大きく“タイプI”、“タイプII”、および“ヘテロ弦”(hetero=異種混合の意)の三つのタイプに分類される。このうち、タイプIIは他の二つのタイプに比べてより高い超対称性をもっており、閉弦だけが許される。これはさらに“IIA”と“IIB”の2種類に分けられる。両者の違いはそこに現われる質量がゼロの(以下 massless と呼ぶ)粒子の内容の違いにあるのだが、詳細は省略する。

これに対してタイプI理論は閉弦とともに開弦

も許す理論で、開弦の両端に通常の電荷の拡張である“ゲージ電荷”を付与することによって、量子色力学などのゲージ理論がもっている“ゲージ対称性”を組み込むことができる。ゲージ対称性は対象となる粒子(場)に働くゲージ群によって特徴づけられるが、タイプI理論の場合には量子力学との整合性からこの群が $SO(32)$ という直交群に限られてしまう。ちなみに開弦を許さないタイプII理論ではそのようなゲージ対称性を簡単に組み込むことはできない。

残るヘテロ弦は閉弦だけを含む理論であり、弦を伝わる右向きの波(Rセクター)と左向きの波(Lセクター)の内容が異なっているのでヘテロと呼ばれる。片方(Rセクターとしよう)はタイプIと同程度の超対称性をもった超弦理論であり、10次元時空に存在する。これに対してもう片方のLセクターは超対称性をもたないボゾン弦をなしている。その臨界次元は26であるから困るよう思えるが、そのうちの16次元分はコンパクト化されており、残りの10次元部分がRセクターと同じ次元に存在していると考えるのである。すなわち、10次元の閉弦上の各点に小さな16次元空間が付いていて弦のLセクター部分はその空間の内部にも入り込んで運動することができると思えばよい。そしてうまくいって、この余分な自由度のおかげで、ヘテロ弦は、閉弦の理論であるにもかかわらず、ゲージ対称性をもちうる構造になっている。しかし、タイプI理論のときと同様、量子力学的整合性から許されるゲージ群は $SO(32)$ および例外群の直積である $E_8 \times E_8$ という2種類に限られる。

以上ごく簡単に5種類の超弦理論について述べたが、以後これらをIIA, IIB, $SO(32)_I$, $SO(32)_{\text{HET}}$, $(E_8 \times E_8)_{\text{HET}}$ と記すことにする。

超弦理論の基本課題と非摂動的理解の必要性

以上の5種類のうちとくに $(E_8 \times E_8)_{\text{HET}}$ をカラビ・ヤウ多様体と呼ばれる6次元多様体にコンパクト化してできる4次元理論は、現実の自然界を記述するのに適した数々の性質を備えており、盛んに研究されてきた。しかしカラビ・ヤウ多様体は知られているものだけでも何万種類もあり、

そのうちのどれがいかなる原理で選ばれるのかというコンパクト化の問題は超弦理論自体の基本課題として手つかずの状態に残されてきたのである。

それには明白な理由がある。1995年以前のほとんどの研究は、弦が繋がったり切れたりする基本プロセスの強さを表わす“弦の結合定数” g_s が小さい場合に、それについてべき展開をおこなう“摂動論”の方法でおこなわれてきた。そしてそのような摂動的な弱い相互作用では、弦理論のタイプやコンパクト多様体の種類は一度選んだら最後、決して変わらない。どれがダイナミックに選ばれるかを理解することは異なる理論間の遷移を理解することであり、それにはコンパクト多様体の選択も含めてすべての理論を一つの基本理論の異なる発現形態とみなす統一的な枠組と、 g_s が大きい場合を取り扱える“非摂動的な手法”が必要となる*。こう考えてくると、上に述べた弦理論の基本課題がいかにむずかしい課題であるかがわかるであろう。

しかし、長い停滞の期間の末に、1995年この難問を解く突破口が開かれたのである。そしてその後はまるで魔法の小箱が開かれたように、つぎつぎと新しい発見とアイデアが溢れ出してきた。それでは、いよいよそのエキサイティングな進展のようすをスケッチすることにしよう。

双対性と超弦理論の統一

前章で述べた5種類の超弦理論を関係づける鍵となるのは、弦理論のもついくつかの“双対性”(duality)と呼ばれる性質である。一般に、理論が同一の現象または構造を二つの相異なる見方から記述することを許すとき、その理論には双対性があるという。実は弦理論は、元来“強い力”の関与する現象におけるある種の双対性を理解しようとする試みの中から1960年代後半に生まれ、

* そもそも弦理論を絵に描ける弦の結合と分裂の理論として説明することは、暗黙の裡に結合定数が小さいことを仮定していることになっている。実際、結合定数が非常に大きい場合には、 g_s のべき展開、すなわち弦の相互作用の基本プロセスの回数による分類は、意味をなさなくなり、まったく新しい、弦とは似ても似つかぬ描像を余儀なくされる可能性さえ多分にあるのである。

その後自然界の統一理論というまったく別の解釈を与えられて発展してきたものなのである。最近の発展で重要な役割を果たしている双対性は、それとは(関係はあるが)異なるものであり、以下に述べる2種類およびその組合せから成る。

T-双対性

まず、いわゆる“T-duality*”と呼ばれている、弦理論に特有な双対性について述べよう。この双対性は、もともと閉弦の運動する空間を1次元分だけコンパクト化して半径 R の円(以下 S^1_R と記す)にした理論を考える状況で発見された弦理論の対称性である⁽⁵⁾。このとき、弦理論は二つの新しい性質を獲得する。

まず、円に1回巻きついた閉弦上を伝わる波の波長は、1周したときちょうどうまく位相が元に戻るものだけに制限されるが、これを量子力学的に解釈すると、運動量のこの方向の成分が(\hbar を単位として) m/R (m は整数)という飛び飛びの値をとることを意味する。このようなモードはKK(KALUZA-KLEIN)モードと呼ばれる。もう一つの新現象は、閉弦が円に多数回巻きついた配位が可能になることである。これを巻きつき(winding)モードと呼ぶが、弦には張力があるので、これに伴い、巻きつき数を n として nR に比例するエネルギーが蓄えられる。

この二つの現象を相対論にしたがって解析すると、結局弦のモードとしてその質量の2乗が $M^2 \propto (m/R)^2 + (nR)^2$ で表わされる粒子が現われることになる。式は簡単であるが、ここには非常に重要な対称性が潜んでいる。すなわち、同時に $R \leftrightarrow \tilde{R} \equiv 1/R$, $n \leftrightarrow m$ なる置き換えをしても、 M^2 の形は変わらない。すなわち、コンパクト化の半径が逆数になっている“双対空間”での弦は、運動量と巻きつき数を入れ替えて解釈すれば、元の空間での弦とまったく同じ性質を示す、という驚くべき事実を示しているのである。この性質は相互作用を考慮にいれても成り立つことが、摂動論の各次数で厳密にいえる。

上の簡単な例ではT-変換は同じ理論の異なる見方を提供しているが、より一般にはT-変換は

* Tはtarget space(=弦の運動する時空)の頭文字。

異なる弦理論を結ぶ働きをもつ。そしてこれを利用すると、容易に $\text{IIA}/S^1_R \xrightarrow{T} \text{IIB}/S^1_R$ という関係を導くことができる。この意味は、タイプIIA理論を S^1_R にコンパクト化した9次元理論は同様にタイプIIB理論を逆数の半径の S^1_R にコンパクト化した理論とT-変換で互いに移りあうということである。さらに、この考えをヘテロ弦に適用すると、込み入った議論の末に、 $(E_8 \times E_8)_{\text{HET}}/S^1_R \xrightarrow{T} SO(32)_{\text{HET}}/S^1_R$ という関係が得られる。すなわち二つのタイプのヘテロ弦理論はやはり9次元で繋がっているのである。

S-双対性

さまざまな超弦理論の統一を可能にするもう一つの重要な要素は“S-duality*”と呼ばれる双対性であり、これは弦の結合定数 g_s をその逆数 $1/g_s$ にした理論との関係をつけるものである。これは強結合相での非摂動的性質を弱結合相での摂動論で調べることを可能にする強力な武器である。しかし、そもそも非摂動的な定義さえもない弦理論で、いかにしてこのような双対性があることをチェックできるのだろうか。この難問を解く一つの重要な鍵は、高い超対称性をもつ理論に現われる“BPS状態**”と呼ばれる、質量と電荷の間に特別な関係のついた配位の存在である。超弦理論には、ソリトンやブラックホールといった拡がりをもった物体が存在するが、そのうちでBPS状態にあるものの性質は、超対称性のおかげで量子補正をまったく受けないことがいえるのである。つまり、これらの状態に関しては g_s が小さいところでの知識がそのまま g_s が大きくなって通用するのである。

S-dualityの一つの例は、ヘテロ弦を6次元トールラス T^{6***} にコンパクト化した4次元理論にみられる。この理論に現われるmassless場の運動方程式がS-変換をしても変わらないことは以前から知られていたが、さらに、許されるBPS状態の質量分布を調べてみると、これもまた予想通りS-変換に対して不変なパターンを構成してい

* Sはstrong-weakの頭文字。

** BPSはBOGOMOLNYI-PRASAD-SOMMERFIELDの略。

*** 各次元が円のような周期性をもった空間。例えば2次元トールラス T^2 は“ドーナツ”として視覚化できる。

ることが確かめられる。つまり、この例では S-duality は系の対称性になっていることが強く示唆されるのである。

超弦理論の統一と M 理論

必要な概念が出そろったので、いよいよ超弦理論の統一の見取り図について述べよう。

この小稿の冒頭でも述べたように、WITTEN の提唱したシナリオの中で最もショッキングであったのは、低エネルギーでは 11 次元超重力理論に一致し、現在では M 理論*と呼ばれるようになった基本理論の存在の示唆である。

WITTEN の議論のポイントは二つある。一つは 11 次元超重力理論の 10 次元コンパクト化に際して現われる KK モード**の新解釈である。コンパクト化の半径を R とすると、これらのモードは $M \sim n/R$ (n は正の整数) という形の質量エネルギーをもつのであったが、この量は同時に、やはりコンパクト化によって現われるある種のゲージ場と結合する“RR 電荷***”と呼ばれる特殊な電荷の意味もあわせもっており、実は、BPS 状態になっている。しかるに弦理論の見地からいうと、この RR 電荷をもつものはブラックホールなどの非摂動的物体の一部に限られることが知られており、そのうちで BPS 状態にあるものは、 $M \sim n/g_s$ という結合定数に逆比例した形の質量をもつ。この 2 種類の概念を同定すべしというのが WITTEN の主張である。

これを受け入れるには、 R と g_s が比例関係にあることをいわねばならない。それが第二のポイントである。そして実際 11 次元超弦理論を 10 次元にコンパクト化した理論と、タイプ IIA 超弦理論の低エネルギー極限として得られる IIA 超重力理論をつきあわせることによって、 l_s を弦理論を

定義する基本的な長さの単位として $R = g_s l_s$ という関係があることを WITTEN は示したのである。

議論が少し込み入ったが、結局、IIA 超弦理論で強結合極限 $g_s \rightarrow \infty$ をとると、 $R \rightarrow \infty$ 、すなわちコンパクト化の半径を大きくした 11 次元理論に移行する、という驚くべき描像に達するのである。

WITTEN の論文にはいま述べた M 理論の端緒となる主張をはじめとして、さまざまな次元にコンパクト化された 5 種類の超弦理論が T-duality と S-duality の組合せによってどのように結びついているかが述べられており、以後この基本的描像を基にして多くの新たな理解が得られてきた。紙面の都合上この流れを解説することはとてもできないが、基本的な項目だけ挙げておこう。(1) $SO(32)_T \xrightarrow{S} SO(32)_{\text{HET}}$ が成り立つこと。(2) タイプ IIB 理論は S-duality 変換に対して不変であり (HULL と TOWNSEND の予想)、それが M 理論の立場から幾何学的に理解されること。(3) M 理論を 1 次元の有限区間にコンパクト化した 10 次元理論は S-duality によって $(E_8 \times E_8)_{\text{HET}}$ と結びつくこと。

こうして、以前から知られていた関係もあわせて考えると、5 種類の超弦理論は新たに登場した M 理論も含めてさまざまな双対性変換を介して互いに結びついていることが明確になってきたのである。よく使われる図 3 はこのようすをスケッチしたものである。もはやここまでくると、どの理論がより基本的であるかは定かではない。一つの、仮に M 理論と呼ぶ、基本理論があって、それがさまざまな形を取って現われたものが超弦理論であるというのが正しいいい方であろう。その意味を込めて、全体に M の字を冠しているのである。

ディリクレ・ブレーン(D-brane)

WITTEN の画期的な論文が出てから約半年後、1995 年 10 月にその後の超弦理論の発展を大きく加速する重要な仕事が発見された。カリフォルニア大学サンタバーバラ理論物理学研究所の J.

* M 理論という名称は、超弦理論の生みの親の一人である J. SCHWARZ によって導入されたもので、“M” は、membrane(膜), magic, mystery, miracle, mother, ... など、さまざまな語の頭文字に解されよう、わざと限定されていない。このうち、最も正統的な(super) membrane 理論(超膜理論)との関係については後で触れる。

** 先に弦理論における KK モードの説明をしたが、実はこうしたモードは 11 次元超重力のような場の理論のコンパクト化に際しても現われる。

*** RAMOND-RAMOND 電荷の略。

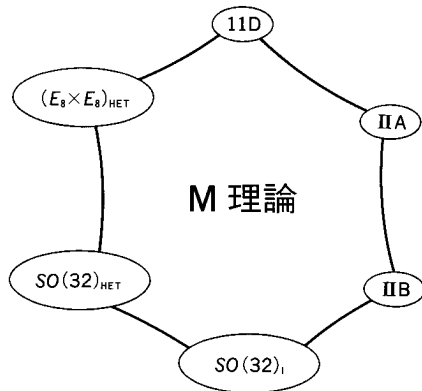


図3 5種類の超弦模型とM理論の統一の模式図. ここではM理論を全体を統括するものと捉え, 11次元の性質があらわになった状態を“11D”と記してある.

POLCHINSKIによるディリクレ・プレーン(通称D-brane)と呼ばれる物体の重要性の認識である⁽⁶⁾. D-braneの概念自体はすでに1989年にPOLCHINSKIらによって導入されていたものであるが, それが前章で述べたRR電荷をもったBPS状態という弦理論の双対性と深く関わる重要な物体の驚くほど簡明かつ厳密な記述になっているということにPOLCHINSKIは気づいたのである.

D-brane とは何か

D-braneを正当に導入するには開弦に対するT-dualityの考察が必要なのだが, 紙面の都合上それは省略して天下り的に述べる. 空間的に p 次元の拡がりをもった“ Dp -brane”とは, 一言でいえば開弦の端点が付く面状の物体である. 開弦の端は面に垂直な方向には動けず, いわゆるディリクレ境界条件を満たしているのだから, ディリクレ・プレーン, 略称D-brane, と称される. 例として, 図4は, 二つのD1-brane(D-string)が開弦を通じて相互作用している状況を, 時間方向への運動も含めて表わしたものである. 図のようにD-braneを結ぶ開弦の軌跡は円筒面をなすが, これを輪切りしてみると, この図は二つのD-braneの間に閉弦が交換されているプロセスを表わしているものとも解釈できる. すなわち, D-braneは開弦を生み出したり吸収したりする能力をもった面であるともいえる.

このようにして導入されるD-braneの最大の

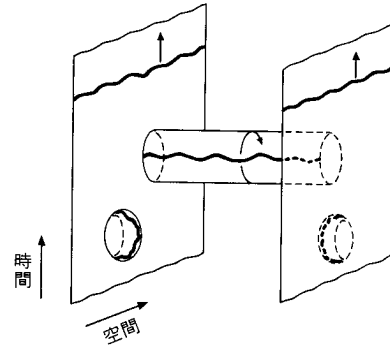


図4 二つのD-stringの相互作用.

特徴は, それがRR電荷をもったBPS状態を記述する超弦理論の厳密解であることである. すなわち, これまで超重力理論という超弦理論の低エネルギー近似理論の解としてしか扱うことができなかったソリトンやブラックホールといった非摂動的配位が, 明快な量子力学的オブジェクトとして姿を現わしたのである. このことは, 超弦理論の双対性の検証を確実なものにすると同時に, 質的に新しいいくつかの発展を促した.

D-brane とブラックホール

そのうちの一つは, ここ四半世紀の間懸案であったブラックホールのエントロピーの謎の解明である. ブラックホールは不思議にもすでに古典解としての段階でその地平線の面積に比例する熱力学的エントロピーをもっていることが, J. BECKENSTEINおよびS. HAWKINGによって70年代前半に指摘されていたのだが, 1996年1月A. STROMINGERとC. VAFAはD-braneとしての解釈を許すある種の5次元ブラックホールの場合に, そのエントロピーがD-braneの内部状態に起因するミクロな統計力学的エントロピーとして理解できることを示したのである⁽⁷⁾.

D-brane の多体系の力学

もう一つ忘れてはならないのは, D-braneの多体系の低エネルギーでの振る舞いが, 近似的にはあるが, 最近弦理論とは独立に精力的に研究されている超対称ヤン-ミルズ場の理論で記述されるといういちじるしい事実の発見である. D-braneが N 枚ほとんど重なった図5のような状態には N^2 個の短い開弦が存在するが, 開弦のモードのもつ最低エネルギーは弦の長さに比例する

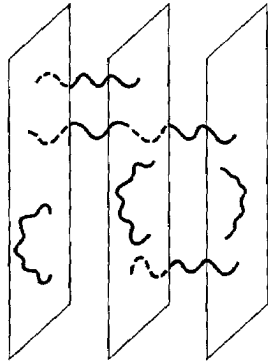


図5 ほとんど重なった N 枚の D-brane 間の相互作用。

ことから、これらは、実は質量がほとんどゼロの、 $U(N)$ ($=N \times N$ のユニタリー行列の作る群) をゲージ群とする、D-brane 面上で定義された超対称ヤン-ミルズ・ゲージ場で記述されるのである。

とくに、拡がりをもたない D0-brane (D0 粒子ともいう) の場合には、この理論は $N \times N$ 行列に組まれた時間だけに依存する力学変数に関する量子力学の形に単純化され、行列の N 個の対角成分が D0 粒子の位置を、残りの $N^2 - N$ 個の非対角成分が互いを繋ぐ開弦による相互作用を表わすことになる。この、物体の位置と相互作用を一体として行列の形で組み込む理論形式自体、斬新で興味深いのが、実はこの理論にははるかに深遠な意味が隠されていたのであった。それについては節を改めて述べよう。

M 理論の行列模型

D-brane とその力学は、超弦理論の非摂動的構造の理解を大きく進展させたが、M 理論そのものの形は、依然として深い霧のかなたに霞んでいるままであった。しかし、それはまもなく突如として、いわばコロブスの卵のような形でその姿を現わした。1996年10月、T. BANKS, W. FISCHLER, S. SHENKER, および L. SUSSKIND (通称 BFSS)⁽⁸⁾ による M 理論の“行列模型”^{*} の提唱である。この模型は見かけは前節の末尾で述べた

* 通常“Matrix Theory”と呼ばれるが、筆者にはまだ“Theory”と呼ばれるにふさわしい段階には到達していないと思われるので、この小稿では“行列模型”と呼ぶことにする。

D0 粒子の多体系の低エネルギー有効理論と同一なのであるが、それを、後述する卓抜な視点から M 理論の基本理論として再解釈したものである。こうして新しい命を吹き込まれた行列模型は、11 次元超重力の基本的な性質を再現するだけでなく、弦理論のさまざまな非摂動的性質をうまく記述する画期的なモデルであることが BFSS の論文およびそれ以後のあまたの研究によって明らかにされてきたのである。まずはその内容と性質を簡単に述べることにしよう。

行列模型とは何か

BFSS による再解釈のマジックの種は、半径 R の円にコンパクト化された 11 次元目の方向 (以下 x_{11} と記す) に関して、(ほとんど) 光速で運動する観測者の立場から理論を記述する“無限運動量系” (IMF=infinite momentum frame) と呼ばれる極限的な視点の導入である。観測者の運動方向を $-x_{11}$ とすると、相対的にすべての物体は光速で $+x_{11}$ 方向に運動するから、超弦のあらゆるモードは (後述するごく一部を除いて) この方向に関して無限に大きな運動量を持ち、それに付随する量子力学的波は無限に速く振動するため、その平均を感じる物理量に寄与しない。ただし、前節で説明した BPS 粒子である D0 粒子 (とその他の D-brane) およびそれらを結ぶ開弦のゲージ場のモードだけは例外で、(コンパクト化されているため) $1/R$ を基本単位とする離散化された有限の運動量 $p_{11} = n/R$ をもつ。しかも、相対論でよく知られているように、“動いている時計は遅れる”から、これらの物体の運動は非常にゆっくりと、したがってあたかも低エネルギー状態にあるかのようにみえるのである。

これは M 理論の構築にとって一石三鳥とでもいうべき状況である。まず D0 粒子は 11 次元から 10 次元へのコンパクト化に伴って超重力理論の基本場である重力場の一部が姿を変えて現われたもので、直接的に 11 次元理論と関係している非摂動的オブジェクトであるから、これを基本要素と考えるのは魅力的である。しかもそれは BPS 粒子であるため摂動論の枠を超えることができる。そして最後に、前章で述べたように、低

エネルギーにおいてはすでに D0 粒子の多体系をエレガントに記述する理論が存在するのである。

こうして IMF という特別な視点をとることによって、それまでは近似理論と考えられていた D0 粒子の多体系の行列模型は、一気にすべてのエネルギー領域を記述する基本理論の有力候補として生まれ変わる可能性を得たのである。ここでそれが(見かけ上)いかに簡潔な形を持っているかを味わってもらうために、その“作用”の形を書いておこう。

$$S = \int dt \operatorname{Tr} \left\{ (\partial_t X^i)^2 + \frac{g^2}{2} [X^i, X^j]^2 - i\theta_a \partial_t \theta_a + g\theta_a (\gamma_i)_{ab} [X^i, \theta_a] \right\}$$

たったこれだけで書ける作用が自然界すべてを支配しているというのであるから、これは驚異以外のなにものでもない。この式の詳しい意味を解説することはここではとてもできないが、 X^i および θ_a が、前章で触れた D0 粒子とその超対称パートナーであるフェルミオンの多体系の情報をコードした、時間だけに依存する $N \times N$ の行列であることと、基本的な D0 粒子は $\mu_1 = 1/R$ をもっており、より高い $\mu_1 = n/R$ なる運動量をもつ状態は n 個の基本 D0 粒子の束縛状態として表わされると仮定されることだけをいっておこう。あとは、原理的には、この理論を量子力学的に解いて、その後 IMF 極限、すなわち $\mu_1 = N/R \rightarrow \infty$ をとり、さらにコンパクト化の半径を大きくする $R \rightarrow \infty$ 極限をとれば、復活した 11 次元における M 理論での計算が実行できるのである。実際は、このいずれのステップも実行するのは非常にむずかしいのだが、それでも現在までにいくつかの重要な結果が得られており、それらは基本的にこのモデルが正しいことを示唆している。以下、これらの結果と問題点について簡単に解説しよう。

行列模型の性質と問題点

まず、行列模型が 11 次元超重力理論の基本的な性質をいかに再現するかを述べよう。

第一に、D0 粒子は、もともと 11 次元から 10 次元へのコンパクト化の際に現われる、重力場の

KK モードと同定されるものであるから、その種類は重力場の属する超対称多重項の成分数に一致しなければならないが、これが成り立っていることは行列模型のもっている超対称性の解析からただちに確かめられる。

つぎに D0 粒子に働く長距離力が 11 次元超重力によるものと一致するかどうかであるが、これも超対称性のおかげで危険な項がうまく相殺するというメカニズムで実現されている。

第三のチェックは 11 次元超重力理論に現われる超膜 (supermembrane) と呼ばれる膜状の物体を正しく記述できるか否かだが、それは無数の D0 粒子が凝縮した解として $N \rightarrow \infty$ 極限で実現されている。このことは実は BFSS が行列模型を提唱する際の大きなヒントのひとつであった。というのは、1988 年に、B. de WIT, J. HOPPE, および H. NICOLAI によって開発された超膜理論の行列による定式化⁽⁹⁾ が数学的に M 理論の行列模型とまったく同じ形をしているという事実があるからである*。

もう一つ行列模型がクリアしなければならない重要な性質は、D0 粒子の束縛状態に関するものである。すでに述べたように、行列模型では基本単位 $\sim 1/R$ の n 倍の μ_1 をもつ重力子の状態は、 n 個の基本 D0 粒子の“束縛エネルギーがゼロの束縛状態”という非常に奇妙な状態で表わされるものとされるが、実際そのような束縛状態が各 n に対してただ一つ存在するということが(現在のところ n が素数の場合に)いえるのである。束縛状態についてはまだ謎が多いのであるが、少なくともこの事実は行列模型がいかに巧妙にできているかを象徴するものであるといえる。

このように、行列模型は M 理論で期待される数々の性質を具現する驚嘆すべき理論であるが、問題点も山積している。

第一は、11 次元世界で成り立たねばならない相対論的構造が、IMF という特別な視点をとっているため検証が非常にむずかしいという問題である。この構造は $N, R \rightarrow \infty$ 極限で実現されると

* ただし、物理的解釈および $N \rightarrow \infty$ 極限の取りかたは異なる。

思われているが、この極限を扱う方法はまだ開発されていない。最近有限な N での行列模型の解釈が提唱され精力的に調べられているが、11次元超重力の結果から少しずれがあるという報告もいくつかなされており、現在係争中である。

つぎに時空のコンパクト化の記述の問題がある。6次元時空まで落とすことは可能なのだが、4次元へ行くには卓抜なアイデアが必要な状況である。また、すでに触れた束縛状態の理解の問題、IMFをとることによって見えなくなった弦の回転・振動モードの記述の問題なども重要な未解決の課題である。

これらのうち、とくに第一の問題はM理論の根幹に関わる大問題であり、その根本的な解決は、現在の枠組みを大幅に変える可能性を秘めている。

真の革命に向けて

超弦理論の非摂動的定式化への希求を原動力とした精力的な研究は、数年前には予想だにできなかった地点にわれわれを導いた。すべての弦理論を11次元という高い視点から統一するM理論の具体的な姿がみえ始めてきたのである。それは現在、場の理論でも従来の弦理論でもない、無限次元行列の量子力学という形でわれわれの前にある。それは粒子の配位とその間の相互作用を一体不可分として組み込む新しい記述の様式であり、物質、力、時空という基本概念に対するわれわれのこれまで

の認識の根本的改変を迫っているように思える。

しかし、われわれはまだ、より深遠な、真に革命的なものへの入り口に立っているにすぎない。筆者を含めて多くの研究者は現在の状況を、量子力学発見前夜のようなものを感じている。今世紀ももう残り少なくなったが、世紀初頭から中葉にかけてうち立てられた相対論と量子力学という現代物理学の二つの巨大な柱を統合するより基本的な原理が、M理論の追究を通じて近い将来発見される可能性は十分にあると思われる。そしてそれは、これまでの進展の結果を取り込みながらも、おそらくまた予期せぬ形で現われ、われわれを驚嘆させることであろう。

文 献

- (1) E. WITTEN: Nucl. Phys. B, **443**, 85(1995)
- (2) C. HULL & P. K. TOWNSEND: Nucl. Phys. B, **438**, 109(1995)
- (3) 超弦理論の簡単な歴史的解説については、たとえば拙稿“超ひも理論のゆくえ”，風間洋一：科学朝日，10月号(1989)p. 103をみられたい。
- (4) 超対称性についてのもう少し詳しい解説は，“超対称性”，風間洋一：数学セミナー，3月号(1993)p. 22にある。
- (5) K. KIKKAWA & M. YAMASAKI: Phys. Lett. B, **149**, 357(1984)
- (6) J. POLCHINSKI: Phys. Rev. Lett., **75**, 4724(1995)
- (7) A. STROMINGER & C. VAFA: Phys. Lett. B, **379**, 99(1996)
- (8) T. BANKS et al.: Phys. Rev. D, **55**, 112(1997)
- (9) B. de WIT et al.: Nucl. Phys. B, **305**[FS 23], 545(1988)

50年前には

学者の表彰

昭和22年度恩賜賞及び学士院賞の受賞者は次の通り決定した。恩賜賞(賞金1000円)“上代倭絵年表”，“上代倭絵全史”東京高師教授家永三郎氏。日本学士院賞(賞金各1000円ずつ)“圧電気振動子の性質解明並に水晶発振器及時計に応用したる研究”東大教授工学博士古賀逸策氏，“磁電管の発振機構と立体回路の理論的研究”東大教授理学博士小谷正雄氏，東京文理大教授理学博士朝永振一郎氏，“任意の方位を有するアルミニウム及び鉄単結晶の製法とその物理的性質の

X線の研究”広島文理大教授理学博士藤原武夫氏。

古賀博士の研究は先に本欄において紹介したように、わが国の保時技術上重要な役割を演ずるものであり、その詳細については古賀博士自ら本誌上に筆をとられることになっている。また小谷博士と朝永博士との業績はすでにその一部分については昨年の本誌に紹介したことは読者の記憶されるところと思うが、理論物理学の技術方面に対する積極的協力がかくのごとき見事な結果となってあらわれたものとしてまことに注目に値するものである。

[科学]第18巻第5号(1948)〈科学時事〉欄から