

## 弦理論と時空像の変革・Dブレーン

東京大学 橋本 幸士

川村: それでは「素粒子論の周辺」というタイトルのセッションを始めたいと思います。座長を務める川村といたします。よろしくお願いいたします。

最初のスピーカーは橋本幸士さんです。橋本さんは、超弦理論の最前線で、とてもアクティブに研究されている研究者の一人で、つい最近、『Dブレーン』という本も書かれています。別に東大出版社の回し者じゃないんですけども、専門外の人にも、超弦理論の魅力を充分伝えられる、よい本だと思っています。

さて、今日の話のタイトルは「弦理論と時空像の変革・Dブレーン」で、とても興味深いタイトルだと思います。よろしくお願いいたします。

ありがとうございます。おはようございます。この研究会で、こういうふうに話をさせていただけるのを、たいへん光栄に思っております。東大駒場の素粒子論研究室の橋本です。

<p>.....</p> <p><b>弦理論と時空像の変革: Dブレーン</b></p> <p>.....</p> <p>東大駒場 素粒子論研・橋本幸士</p> <p>2006年11月16日 @基研「学問の系譜」研究会</p>	<p>目次</p> <p>1. 弦理論の困難 非摂動的定義の現時点での候補</p> <p>2. 弦理論の意義とDブレーン Dブレーンの登場による新しい意義付け Dブレーンとは Dブレーンから導かれる新しい弦理論の物理</p> <p>3. 弦理論と現実世界をつなぐ Dブレーンと宇宙ひも</p>
---	--

[Slide 1]

[Slide 2]

[Slide 1] この「弦理論と時空像の変革」というタイトルは、坂東先生はじめ、オーガナイザーの方々にいただいたのですが、残念ながら私は、修士論文を書いてから、まだ10年も経っておりません。弦理論の歴史は30年、40年にのぼるといのがコンセンサスです。ですから、30年、40年前にどういうことが起こったのかということ伝えるのは、不可能だと判断しまして、僕個人として、この10年間、どういうふうに弦理論に取り組んで、Dブレーンというものをどういうふうに見てきたかというお話を、個人的見解なのですが、させていただきます。

ちょうど10年前に、Dブレーンという物体が、弦理論で非常に重要であるという認識がありまして、そのときに僕は、修士課程に入りまして、ちょうどDブレーンの論文を眼にしたときから、僕の研究人生が始まってしまったわけなのですが、今日のトークの内容としましては、このような順番で、話をさせていただきます。

[Slide 2] 初めに、さまざまな研究会で、すでに議論されていることかもしれませんが、それを振り返る意味も兼ねまして、弦理論の現在の困難、これをレビューします。弦理論は、非摂動的な定義、つまり場の理論で言うところの、作用がありません。非摂動的定義には、さまざまなプロポーザルはあるのですが、現時点での候補とその困難をレビューします。

そのような困難があるなかで、弦理論はどういう意義を持つのか、素粒子論、もしくは宇宙論、そのようなものとどう関係しているのかということが、もちろん問題になるわけですが、よく言わ

れるのは、弦理論は予言ができない。物理学に弦理論が入っていること自体がおかしいというご批判をよく聞きます。ここでは、私個人の見解なのですが、弦理論には、実はDブレーンの発展以来、新しい意義が登場しまして、それが実際にさまざまな、現象論とまでは言えないですけども、場の理論の物理であるとか、もしくは数学であるとかに、さまざまな予言をしています。そういうDブレーンの登場による、新しい意義づけの話をしてします。

そこではDブレーンとはどういうものかということ、簡単にレビューしないといけませんので、少しお話をしまして、そこから導かれる、新しい弦理論特有の物理、それと予言というものを、お話したいと思います。

この新しい意義づけにおいては、量子論と、実際に標準模型とつなげるというところが、弦理論の最終的な目標であることは、疑いないのですけれども、それとはちょっと違った意義づけをここで起こしますので、実際に弦理論と現実世界は、どういうふうにつながっているのだろうかということに関しては、残念ながら直接のフィードバックは、まだ少ないと思われまます。

ところが最近、さまざまな議論がされていまして、例えばDブレーンが宇宙空間に広がっている宇宙ひもであるという可能性が、非常に盛んに議論されています。これは素粒子がそもそも、弦でできているとすると、弦は非常に小さくて、われわれの目には見えないというふうと考えられてきたわけですが、実はそうではなくて、宇宙空間に膨大に広がっているような超弦、あるいはDブレーンがあってもよいという理論です。これは近年の重力波観測などと相まって、現在では、非常に盛んにされています。

それでは初めの、困難のレビューから、始めさせていただきます。

<p><b>&lt;1&gt;弦理論の困難</b></p> <p>弦理論は「theory of everything」と呼ばれている。</p> <p>理由:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 重力相互作用の量子補正を計算できる。</li> <li>2) ヘテロ型弦理論のコンパクト化で素粒子の標準模型を含むゲージ群や物質場を供給できる。</li> <li>3) 結合定数が弦理論に内包されている機構で決まると期待できる。 <math>e^{-\phi} \sim g_{\text{string}}</math></li> </ol> <p>標準模型とのつながり(標準的な期待):</p> <p>弦理論の臨界次元(超弦理論なら1+9)のうち空間6次元が特殊な多様体でまるまってしまう(コンパクト化)、残る1+3次元時空の低エネルギー有効作用が素粒子の標準模型となる。 "string phenomenology"</p>	<p>しかし、コンパクト化の機構がわかっておらず、そのため現時点では直接の原理的予言が難しい。</p> <p>.... 非摂動的定式化の欠如</p> <p>与えられた背景時空での弦の散乱振幅の計算ルールは分かっている(摂動論)。しかし、背景時空を非摂動的に与える「弦の場の理論」は完成していない。</p> <p>⇒ <b>弦理論の非摂動的定式化が望まれる</b></p> <p>注) string phenomenology・string cosmologyの立場:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・コンパクト化の機構は分かっていないが、とにかく、標準模型や標準的宇宙論を再現するような弦理論の摂動的真空が一つもないと困る。</li> <li>・弦理論から出すという要求から、標準模型や宇宙モデルへのconstraintを出し、それを弦理論の予言として、現実世界と弦理論との接点を探る。</li> </ul>
---	--

[Slide 3]

[Slide 4]

[Slide 3] 弦理論は「theory of everything」と呼ばれております。その主な理由を考えてみますと、この三つが代表的なものとして挙げられるだろうと思います。一つは重力相互作用の量子補正をも計算できる。これはEinstein重力理論が、繰り込みが難しいと言われていることに対して、ここでは弦理論は、flatなbackgroundですけども、そういうところでは、量子補正を実際に計算することができる。

二つ目の理由としましては、1980年代に盛んに研究されました、ヘテロ型超弦理論、それは時空次元が10次元でconsistentなんですけれども、それを6次元のところを丸めまして、4次元に落としたとき、それを「コンパクト化」といいますが、素粒子の標準模型を含むような、ゲージ群や、もしくは物質場を供給する可能性がある。

三つ目としましては、弦理論に現れている結合定数が、弦理論自身に内包されている機構で決定されると期待できる。これは通常の場合の理論ですとcoupling constantを初めから手で与えるものですが、そうではなくて、弦理論では、coupling constantが場の真空期待値と、このような関係

## 研究会報告

にあるということが知られていまして、この真空期待値が、通常の場合の理論の作用で決定されるように、何か決定される機構がちゃんとあれば、coupling constant 自身が決まってしまうと期待できる。

このような理由で「theory of everything」と呼ばれています。

ここで2番目に述べました、標準模型とのつながりの、標準的な期待は、以下のとおりです。弦理論の臨界次元、通常の超弦理論でしたら、10次元のうち、時間が1次元、空間が9次元なのですが、そのうち空間6次元が、特殊なある種類の多様体で丸まってしまい、それが非常に小さくなってしまって、そこは見えなくなってしまう。それを「コンパクト化」といいます。残る1+3次元の時空の低エネルギー、つまり非常にわれわれの住んでいるエネルギースケールに近いところでの有効作用が、素粒子の標準模型となる。弦は広がった物体ですので、それが振動することによって、さまざまな高いエネルギーの状態が出てきます。その高いエネルギーの状態を、全部積分してといいますか、低エネルギーだけに注目すると、そこが素粒子の標準模型になっていくであろう。これが標準的な期待です。

この多様体をさまざま変えますと、低エネルギーで出てくる場の理論が、さまざまな形を取ります。その形が標準模型と一致するように、この多様体を決めましょうという学問が、string phenomenology (弦の現象論) と呼ばれているものです。

[Slide 4] しかし、コンパクト化の機構というものは、実はわかっておりません。ですから先ほど、「コンパクト化する」と言いましたが、それはまさに、自分の手でこのような多様体を選ぶという操作をしているわけで、spontaneous にどのように時空が丸まるのかという機構は、まったくわかっておりません。そのため、現時点では直接の原理的な予言は不可能です。

これは初めに申しました、弦理論には非摂動的な定式化が欠如しているということに起因しています。もし、非摂動的な定式化があれば、それが自動的に、10次元で矛盾なく定義されている弦理論を4次元にしてしまうであろう。そういう期待を持っているわけです。

ですからわれわれの目標としましては、弦理論では、現在の状況としては、非摂動的定式化を求めるといものが、弦理論の研究者の最大の目標になっています。

現時点ではどうなっているかといいますと、与えられた背景時空、例えば何も無い、flat な時空であるとか、もしくは特殊な丸まった時空であるとか、そういう background 時空での弦の散乱振幅の計算ルールは、わかっております。ですからこれは、摂動論が完成しているという意味です。

残念ながら、任意の背景時空で、摂動論を展開することはできませんが、ある特殊な背景時空では、それができるといことです。しかし背景時空を非摂動的に与える弦の場の理論は、完成しておりません。

それでは、string phenomenology をやっている研究者たち、これは非常にたくさんの方がやっています、もしくは string cosmology と呼ばれる、弦のコンパクト化を仮定した、そこでの宇宙論を研究されている人たち、そういう人たちは、どういう立場で、このモデルを研究しているかということなのですけれども、コンパクト化の機構は、いま申しあげましたように、わかっておりません。ところが、とにかく標準模型、標準的な宇宙論を再現するような弦理論の、摂動的な真空が一つでもないと、もちろん困るわけです。そういうものがあつたということがわかれば、そこにコンパクト化されるようなメカニズムを、あとは探すわけで、そういう後づけの立場です。これは非常に重要だと思われています。

特に弦理論から出すという要求から、標準模型のパラメーターの間の関係、もしくは宇宙モデルへの constraint を出す、それを弦理論の予言として、現実世界と弦理論との接点を探るとい研究です。

しかし残念ながら、あとでも少し述べますが、コンパクト化する6次元の多様体には、非常にた

くさんのバラエティがありまして、そこから弦理論特有の constraint を出すということは、若干難しくなっています。

<p>弦理論の非摂動的定式化 …… 現時点での候補は？</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 弦の場の理論 [畑・伊藤・丸後・國友・小川(86)] [Witten(86)] 80年代後半に構成に努力が注がれた。現在も発展中。 弦場(string field) <math>\Phi[X(\tau, \sigma)]</math> の作用を書く。 粒子が無数個入り込み解析が困難</li> <li>2. 行列模型 弦の世界膜を行列正則化する。非臨界弦において開発され、90年代後半に臨界弦に応用したものが提唱された。 a) IIB型行列模型 [石橋・川合・北沢・土屋(96)] 行列の固有値分布が1+3次元時空を形成すると期待 b) M(matrix)理論 (IIA型) [Banks, Fischer, Shenker, Susskind(96)] 11次元に住む超膜の理論を行列正則化</li> <li>3. AdS/CFT対応 (gauge/string対応) [Maldacena(97)] Dブレーンの異なる二つの見方がホログラフィックな双対性を与えている。弦理論とYang-Mills理論の等価性</li> </ol>	<p>果たして、弦理論の真空はユニークに定まるのか？ コンパクト化の機構は解明できるのか？</p> <p>問題点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・弦の場の理論 → 閉じた超弦の場の理論の構成？ 出発点となる摂動的弦理論の選択の自由度は？ 背景非依存性？ 古典的真空の構造？</li> <li>・行列模型 → 計算可能性？ 現時点で唯一の非摂動的機構？</li> <li>・AdS/CFT → 真空は縮退し、ポテンシャルが持ち上がらない！</li> </ul> <p>その他の議論：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>「landscape」：超重力理論+適当な6次元コンパクト化、で非摂動的に生成されると期待されるポテンシャルを手で加えると、たくさんの真空解が得られる</li> <li>「brane gas cosmology」：コンパクト方向に巻きついたDブレーンが宇宙初期に熱的な対生成・消滅を起こして次元が決定される</li> </ul>
---	--

[Slide 5]

[Slide 6]

[Slide 5] それでは最終目標である、弦理論の非摂動的定式化に関して、現時点で、どのような候補があるかということをお話します。大きく分けて三つありますが、このほかにもさまざまなプロポーザルがありまして、主なものしか、ここには挙げておりません。

一つ目は弦の場の理論です。これは弦理論の第2量子化されたような理論を、きちんと場の理論的に定義しようという、非常に伝統的な立場です。1980年代後半に、このような人々によって、まず構成されました。しかしながら、あとで述べるような困難が若干あります。現在もこれは、非常にアクティブに、研究がなされております。

弦の場の理論の構成要素は、このような弦の場、string field と呼ばれるもので、この  $\tau, \sigma$  というのは、一体問題、弦が一つ、時空のなかを張っていると思ったときに、その世界膜は、 $\tau$  と  $\sigma$  といったパラメータで張られるわけですが、それが世界膜が実際にターゲットスペース、われわれの時空のどこにあるかを表す関数ができます。そのさらに汎関数、 $\phi$  というようなもので、場を定義する。この  $\phi$  に関する、この汎関数に関する作用を書くというものです。

これは  $X$  がそもそも弦であって、この弦は無数個の粒子と等価であるということ、つまり弦は振動していますから、その振動のそれぞれのものが粒子と対応するというので、無数個の粒子を含んでいるものですから、 $\phi$  は実際は、この  $X$  の  $\tau$  と  $\sigma$  の展開をしますと、無数個の通常場の理論の作用に等価です。そのため、解析が非常に困難になってきます。

二つ目の、行列模型と呼ばれるものは、弦の  $\tau$  と  $\sigma$  で張られる世界膜を、行列正則化するというわけです。これは10次元でない、非臨界弦と呼ばれるものにおいて、まず1990年代前半に開発されまして、90年代後半に、それを臨界弦、つまり矛盾のない10次元の弦理論に応用したものが提唱されました。

提唱されたものとして、主にこの二つがあります。一つ目は、IIB型行列模型と呼ばれるもので、これはタイプIIBの超弦理論を、非摂動的に定義すると思われている、行列模型です。

弦の世界膜を行列正則化していますので、行列の固有値の分布を、実際に非摂動的に決めることができれば、そしてその固有値の分布が、ちょうど10次元ではなくて、1+3次元時空のみに広がっているということがわかれば、われわれの時空は、1+3次元になっているだろう、つまり弦は、そこにしか存在できないということが、示されるわけですから、そういう期待があります。これは現在も研究が続いております。

もしくはタイプIIA型と呼ばれる超弦理論の強結合領域を記述する行列模型も提唱されています。3番目のAdS/CFT対応と呼ばれるものは、あとで詳細にレビューしますが、Dブレーンと呼ば

## 研究会報告

れるもの、これもあとで述べますが、その異なる二つの見方が、非常に面白い双対性を与えています。この双対性というのが、どういう双対性かといいますと、ある次元の Yang-Mills 理論と、弦理論自身が等価であるという主張です。

この Yang-Mills 理論は、特殊な Yang-Mills 理論で、超対称性が高いものなのですが、われわれはそれがうまく定義されていると信じているので、これが定義されていれば、弦理論もこれと等価なのであれば、うまく定義されてくると考えています。これは 1997 年に Maldacena が発表しましたコンジェクチャー、予想です。ですから AdS/CFT 対応は、実際は証明はされていません。

これが証明されたと仮定して、しかもこの対応が、きちんと弦理論のすべての configuration space を張っているということが、もし示されれば、これは弦理論の非摂動的定義になり得るものなわけです。その意味で、この AdS/CFT 対応は、gauge/string 対応とも呼ばれています。

それではこの三つに関して、どういう困難があるかということをお話します。

[Slide 6] はたして、弦理論の真空は、ユニークに定まるのであろうか。コンパクト化の機構は解明できるのであろうか。

問題点としましては、まず、初めの弦の場の理論ですが、一番重要な問題点は、最後に書いた、古典的真空の構造がよくわかっていないということです。それと、超弦の場の理論の構成がまだなされていないという、この 2 点につきると思います。

真空構造がわかっていないといいますのは、弦の場の理論の作用が、先ほど言いましたように、無限個の粒子の場の作用で書かれていますので、その potential 構造を見極めるのは、非常に困難です。何らかの物理的なアイデア、もしくはディレクションがない限り、こういう真空があるんじゃないかということ具体的に探すのは難しくなっています。

しかもこの弦の場の理論は、そもそもバックグラウンドの時空の metric に依存した書かれ方を、まず初めはします。背景に依存しないような、弦の場の理論も提唱されていますが、それとの関係は、いまのところ具体的な解析は難しいという段階になっています。

二つ目に挙げました行列模型ですが、この行列模型は、通常の行列模型と、ほとんど同じ形をしていますので、これは計算機に乗るような解析で、計算機のパワーが上がれば、本当に 1+3 次元に出てくるかということ、計算することはできると思われま。

そのため、これは現時点で唯一の非摂動的なコンパクト化の機構を与えていると言うことができます。これは期待ができますが、このように、コンパクト化が起こったとして、一番初めに述べました、string cosmology とか、そういうものとどういうふうにつながっているかということが、現在のところ、さっぱりわかっておりません。

最後に AdS/CFT, Maldacena が言い出した conjecture に関してですが、これがもし本当だとしますと、残念ながら、真空はおそらく縮退していて、potential 構造がないかもしれないという話がされています。つまり、あとでもう少し詳細を述べますが、この AdS/CFT 対応が正しければ、ある Yang-Mills 理論が一つの弦理論を与え、違う Yang-Mills 理論は、違う弦理論を与えるという状況になっていますので、Yang-Mills 理論と Yang-Mills 理論の違いをどう理解するかということを考えなければ、この弦理論同士の間で、どのような弦理論が prefer されて、どういう弦理論が捨てられるかということの議論が、できないという状況になります。

ところが、Yang-Mills 理論が弦理論を非摂動的に定義しているということにもしなければ、これは残念ながら、弦理論の非摂動的な potential を generate しない、つまり、真空は一つに決まらないということになってしまいます。

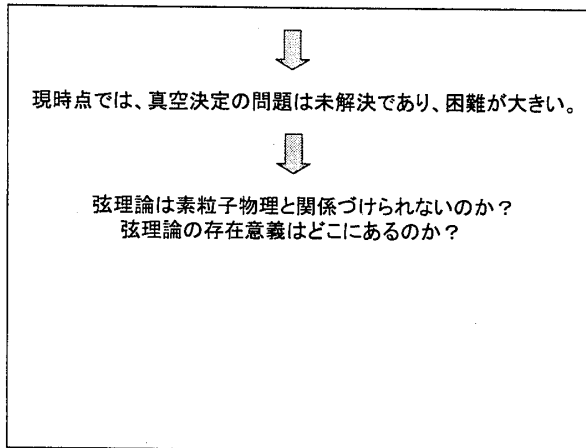
その他の議論としまして、たくさんの議論がありますが、この二つの議論を、特に挙げたいと思います。Landscape に関しては、昨年、江口先生が話されたと思いますが、これは弦理論は低エネルギー領域で超重力理論になっていますけれども、それプラス適当な 6 次元のコンパクト化で、

さらにそれに、非摂動的に生成されると期待される超重力理論の potential を勝手に手で加えます。そうすると、continuous な真空だったものが、discrete になります。それは無限個あるのだけれども、たくさんの真空解が得られます。たくさんの真空解があるということを、この landscape という言葉一つでまとめています。

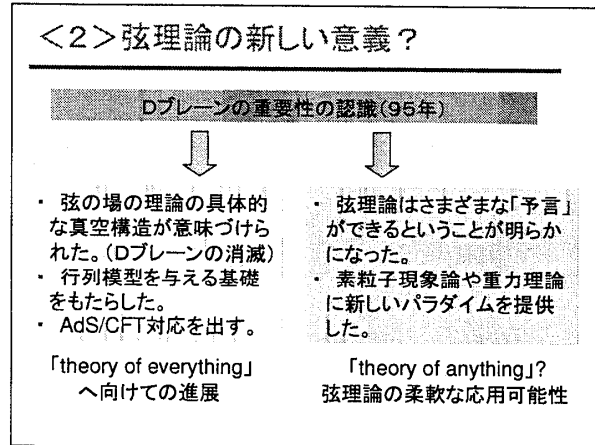
もしこれが本当で、このたくさんの真空解が、弦理論の非摂動的な真空であるならば、本当に無限個の真空があつて、そのなかから一つ決まる原理はないということになりまして、これはこのような初めの期待を、まったく打ち砕くものになっています。

もう一つ、brane gas cosmology という話もありまして、これは宇宙の時間発展をちゃんと考慮に入れば、3+1 次元の時空が選ばれるかもしれないという議論です。

このように、簡単にレビューしてきましたが、一言で言えることは、現時点では、真空決定の問題は未解決であり、困難が大きい。コンパクト化の機構がわからなければ、直接的に弦理論から標準模型を出す、もしくは標準的な宇宙モデルを出すということは不可能です。ということは、弦理論は素粒子物理と関係づけられないのか、したがって弦理論の存在意義はどこにあるのかという話になってしまいます。



[Slide 7]



[Slide 9]

[Slide 7] 本のカバーをここに並べましたが、これらはアメリカで、ベストセラーにはなっていませんが、よく売れている本の表紙です。ここに僕の本もつけておきました。例えばこれは、Lee Smolin の『TROUBLE WITH PHYSICS』という本ですが、よく見ればわかりますが、靴紐がここで絡まっていますね。これはひも理論のトラブルを表している。この本は『NOT EVEN WRONG』という本で、弦理論に反対している学者の方が書いている本ですが、「WRONG」という字が間違っているというのは、余興だと思いますけれども、これは間違っただけで、つまり弦理論は弦理論としてあるんだけど、それが間違っているかどうかすらわからないという主張です。これは Leonard Susskind という、「landscape」という言葉を開発した人で、例えば面白い話は、昨日まで西宮湯川シンポジウムというのをやっています、そこでイギリスの学者とも話をしていたのですが、その人はアメリカに友人がいて、その友人からメールがきた。その友人は、物理学者ではないのです。その人は、『New York Times』を読んでいて、弦理論はもう終わってしまっていると『New York Times』に載っていると、それはどういうことなんだと。イギリスで弦理論を研究している友人にメールがきたそうです。よくよく聞いてみると、その『New York Times』の記事の著者は、「この人」だったと。そのように、特にアメリカでは、landscape という考え方が非常に広範囲に、学会中を覆ってしまっていて、弦理論は真空を決めることはできないという考え方がポピュラーになっています。

[Slide 9] 一つ目のセクションを終わりにして、それでは弦理論はもうだめなのかと、アメリカの

## 研究会報告

そういう考え方を、われわれは受け入れるべきなのかということですが、もちろん僕の立場としては、そういうことはまやかashiであって、先ほど言いましたように、landscape という考え方は、単に超重力理論に非摂動的に生成されると考えられるポテンシャルを足して、そういうことを考えているだけです。ですから状況としましては、1980年代に、さまざまなヘテロティックストリングのコンパクト化が考えられまして、そのときも無限個の真空があってどうするんだという話がありましたが、それとまったく変わっていないわけです。

そこで、僕がレビューしたいのは、D ブレーンの重要性の認識から出てきた、新しい弦理論の意義づけに関してです。

1995年に、D ブレーンの重要性が認識されました。これに関しては、あとでお話しますが、そこで先ほどの弦理論の非摂動的定義に関して、さまざまなインプリケーションがありました。実際に行列模型、もしくはAdS/CFT対応というものは、D ブレーンが出てきたために、そういう発展があったと言えます。もしくは弦の場の理論の真空構造に関する困難は、D ブレーンの生成消滅ということが、具体的に真空構造に意味をつけました。

そのような意味で、D ブレーンが登場したことは、弦理論の非摂動的定義の進展において、非常に重要な役割を果たしたのです。これは「theory of everything」に向けての進展なのです。

一方、ここで紹介したいのは、もう一つの新しい意義づけです。弦理論はさまざまな予言ができるということが、実は明らかになりました。これはこの後お話します。

さらに素粒子現象論や重力理論に、新しいパラダイムを提供しました。このようなことは、D ブレーンがわかってきてから、弦理論に特有なことで、弦理論に特有な予言と、パラダイム提供ができたということです。

これは弦理論に非常に柔軟な応用可能性があるということの意味を意味して、*「theory of everything」*に対して「theory of anything」という言葉で言われます。この言葉は、先ほどのこの本（[Slide 7]『NOT EVEN WRONG』）の一つのチャプターになっています。この人は「theory of anything」と言って、批判しているわけですが、僕が思うのは、弦理論はさまざまな意味で、非常に面白い予言をしております、これは「theory of anything」の非常によい点だろうと考えています。

[Slide 10] どういう新しい意義があったかということ、これからどういう話をするかという紹介を兼ねてしますと、D ブレーンが契機となって、新しいパラダイムが登場したものとして、重要なものに、この「ブレーンワールド」があります。素粒子現象論や重力理論の裾野を、かなり大幅に拡大しまして、もちろんこのブレーンワールドでは、高次元に訴えますので、繰り込み可能性とか、そういうものを一切捨ててしまうという、かなりいままでの伝統的な立場を踏みつけてやっていることなのですけれども、それにしても、現在の物理学者、素粒子現象論の方々が、このブレーンワールドという考え方は、素粒子の現象論をやる上での、一つの確立したステップであると認識していると思いますので、これはそれを大幅に拡大したと言っても、問題ないと思います。

その理由は、ゲージ階層性問題への答えを提供していると。もしくはLHCでブラックホールが生成されるかもしれないという、これは僕は、『朝日新聞』でこういう記事を読みましたが、素粒子物理学に関して、こういう新聞記事になるようなexcitationがあるというのは、僕は非常に大事なことだと思っています。

それとD ブレーンのテクノロジーを利用した、さまざまな場の理論の新しい解析方法が誕生しました。それはAdS/CFT対応に源を持った、AdS/QCD対応というものになります。これはここ数年、非常に盛んに研究されているものなのですが、例えば来週から開催されるYKISでも、この話が盛んに議論される予定になっております。

弦理論の応用可能性と新しい意義

- Dブレーンが契機となり新しいパラダイムが登場
  - 例1) 「ブレーンワールド」  
素粒子現象論・重力理論の裾野を大幅に拡大した。  
階層性問題への答? LHCでブラックホール?
- Dブレーンの「テクノロジー」を利用した、様々な場の理論の新しい解析方法が誕生
  - 例2) 「AdS/QCD 対応」  
ホログラフィックな高次元重力理論で  
QCDの低エネルギーハドロン物理を記述。
  - 例3) ソリトン物理への応用  
新ソリトンの存在やその性質を予言。  
既存のソリトンの力学を解明。
  - 例4) ブラックホールエントロピー公式の導出  
.....

[Slide 10]

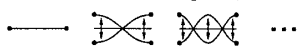
2-1. Dブレーンの導入

Step1: 弦理論の双対性とブラックホール

摂動的弦理論は、1+1次元世界膜の理論である。

$$S_{\text{worldsheet}} = \frac{1}{2\alpha'} \int d\tau d\sigma \partial_a X^\mu \partial^a X_\mu$$

開弦の場合  $X^\mu = x^\mu + p^\mu \tau + i\sqrt{2\alpha'} \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n} \alpha_n^\mu e^{-in\tau} \cos n\sigma$



$|0; p\rangle \quad \alpha_{-1}^\mu |0; p\rangle \quad \rightarrow$  タキオン, 電磁場, ...

閉弦理論は、低エネルギーでは10次元超重力理論である。

IIB型超重力理論に  $\left\{ \begin{array}{l} g_{\mu\nu}, B_{\mu\nu}, \phi \quad (\text{NSNSセクター}) \\ \chi, C_{\mu\nu}, C_{\mu\nu\rho\sigma}^{(+)} \quad (\text{RRセクター}) \end{array} \right.$

$$S = \int d^{10}x \left[ e^{-\phi} \left( \sqrt{-g} R + \partial\phi\partial\phi \right) + \partial C \partial C + \dots \right]$$

[Slide 11]

これはホログラフィックな重力理論を用いて、QCDのハドロン物理を記述するというものです。一言で言うと、重力理論を使って、mesonのmassを出すという話です。これは非常にとんちんかんなように聞こえますけれども、Dブレーンのある見方をしますと、それが重力理論になっていて、違う見方をすると、それはゲージ理論になっている。その二つの違いを、見方が違うだけで、等価なものだと考えると、このような結論が生み出されるわけです。

次の例としましては、ソリトン物理への応用が挙げられます。新しいソリトンが、こういうシステムには存在しているはずだと、その存在とか、もしくはその性質を予言する。もしくは既存のソリトンの力学を解明するというのが、Dブレーンのテクノロジーを使っておこなわれています。

[Slide 11] 以下では、主にこれらの話に関して、時間を使って説明したいと思います。その前に、Dブレーンとはどういうものかということ、トランスペアレンシーを4枚ほど用いて、お話させていただきたいと思います。

摂動的な弦理論は、一番初めに言いましたが、1+1次元の世界膜の理論です。これは $\tau$ と $\sigma$ で張られる世界膜があって、 $\tau$ はその世界膜の時間方向で、 $\sigma$ は空間方向ですが、 $\sigma$ は例えば0から $\pi$ までというふうに、弦の長さです。

その $\tau$ と $\sigma$ で張られる世界膜から、われわれの時空の座標 $X$ への写像を考えてみます。これはその世界膜の理論の作用で、これはNambu-Goto作用から、ゲージ固定をして得られるものです。

開いた弦の場合は、 $\sigma$ が0から $\pi$ まで、0と $\pi$ では、ノイマン型自由端境界条件を置きまして、このような $\tau$ と $\sigma$ に関する展開ができます。この $\alpha$ というのは、その展開の係数です。

物理的な描像としましては、振動していないもの、1回振動しているもの、2回振動しているものというふうに分類できまして、そのそれぞれが、遠くから見ると、massの違う、質量の違う粒子となって見えます。これを第1量子化しますと、このような真空のものはこれに対応していて、一つエキサイトしたものは、少し質量が大きくなったものに対応している。

具体的にmass shell conditionをこのconsistencyから導出しますと、bosonic stringの場合はタキオン場、これは電磁場、もう一つ上がっていくと、質量のあるゲージ場というふうになっていきます。タキオン場は、この作用を超対称化しますと、消すことができまして、物理的な自由度だとは思っていません。

閉じた弦理論を代わりに考えますと、低エネルギーでは、この電磁場の代わりに重力場が出てきます。特に、詳しくは言いませんが、タイプIIB型と呼ばれる超弦理論の、masslessのセクターを見ますと、これは超重力理論になっておりまして、そこに現れるボゾン場は、重力場、反対称tensor場、スカラー場。スカラー場、反対称tensor場、4階反対称で自己双対な場、このようなものが現れます。作用は、通常のEinstein Hilbert termに、dilatonと呼ばれるものがcoupleして、



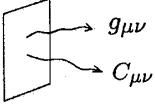
研究会報告

それにさまざまなこういう場が kinetic term を持つという構造になっています。ここで  $e^{-\phi}$  というものがここに現れているということから、弦の coupling constant は、この  $\phi$  の真空期待値で決まるだろうと期待されております。

**超重力理論の非摂動的性質？**

(1) 非摂動的物体:ソリトン ~ ブラックホール

BPS black p-ブレーン解  
(高次元荷電ブラックホール)  
が存在する。(p=1,3,5,7)



(2) 超重力理論の作用のS双対性  
(強弱結合双対性)

$$\begin{matrix} \phi & \leftrightarrow & -\phi \\ B_{\mu\nu} & \leftrightarrow & C_{\mu\nu} \end{matrix}$$

B場のsourceを持つものは基本弦であり、その双対のものとしてBlack 1-braneが位置する。つまり、弦理論の強結合領域では、Black 1-ブレーンが基本的物体として振舞う！

.... しかし、ブラックホール背景での  
摂動的弦理論は解析が難しい ....

[Slide 12]

**Step2:ブラックホール=世界膜の境界**

Dブレーン=弦が端を持つことの出来る超平面

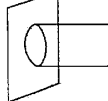
開弦世界膜作用の変分で、Neumann境界条件  $\partial_\sigma X^\mu = 0$  ( $\sigma = 0, \pi$ )  
に加えてDirichlet型境界条件を考える。

$$X^i = x^i \quad (\sigma = 0, \pi)$$

[Dai, Leigh, Polchinski(89)]

Dpブレーンの世界  $\begin{cases} \mu = 0, 1, \dots, p & : \text{Neumann} \\ i = p+1, \dots, 9 & : \text{Dirichlet} \end{cases}$   
体積の次元はp+1

Dブレーンは  
閉弦の源



1995年Polchinskiは、DブレーンがRR電荷を持ちBlack pブレーンと同一視できることを示した。

ソリトン(ブラックホール)まわりの摂動論を可能に。  
弦理論の第二の革命期への契機を与えた。

[Slide 13]

[Slide 12] 超重力理論の非摂動的な性質はどういうものがあるかということを考えてみます。それは弦理論自体の非摂動的な物体は何かということを考えるモチベーションになっていたわけですが、非摂動的な物体は、この超重力理論の運動方程式のソリトン解であるはずですが。これは重力理論ですから、広い意味のソリトン解として、ブラックホールが現れます。

実際、この理論には超対称性をいくらか保つような、ブラックホールの高次元への拡張板が存在します。これを「black p-ブレーン」といいます。「p-ブレーン」の「p」というのは、ブラックホールが空間にどのぐらい singularity が伸びているかというものを表す量で、例えばタイプ IIB 型弦理論では、1, 3, 5, 7の値をとります。

ここにその模式図を書きましたが、この平たく、板のように書いているところに、ブラックホールの singularity が乗っていて、この図では、例えば p が2の場合を書いています。つまり2次元の方向に伸びている。そこから重力場、もしくはさまざまな場が放出されているという考え方です。

一方、先ほどの超重力理論には、S 双対性と呼ばれるものがあります。これは超重力理論の単なる discrete の対称性ですが、 $\phi$  を  $-\phi$  にして、 $B_{\mu\nu}$  を  $C_{\mu\nu}$  にするという、この変換の対称性があります。

一方、B 場の source を持つのは、実は基本弦です。このことはちょっと話をしませんが、それを認めると、このS 双対性のもとで双対のものは、 $C_{\mu\nu}$  を放出するような物体です。 $C_{\mu\nu}$  を放出するような物体は、ここで言いましたように、ブラックホールです。つまり弦理論の強結合領域では、ブラックホールの次元を拡大したバージョンのものが、基本的な物体として振る舞うはずだ。なぜならば、このS 双対性は、 $\phi$  と  $-\phi$  を入れ替えますので、弦理論の coupling constant の部分を逆数にします。ですからこれは、弦理論の強弱結合の双対性になっているわけです。

ですから弦理論の非摂動的物体、強結合で fundamental になるような物体は、このブラックブレーンであるということがわかります。

ところが、こういうブラックホールの背景での摂動的弦理論は、そもそも解析が難しいので、こんなことがわかったところで、これは単に予想ですし、よくわからないということになってしまいます。

そこで登場したのが D ブレーンでした。

[Slide 13] D ブレーンはどのように定義されるかと言いますと、先ほど登場した弦が端を持つことのできるような平面として、単に定義します。ここにその模式図を書きました。このわれわれの

時空、もしくは10次元時空がこういうふうに広がっているとしまして、そのなかに勝手にこういう面を置きます。この面は平たく置いてもいいですし、曲がって置いてもいいです。そこに、開いた弦が端を持つことができると仮定します。こう仮定するという事は、先ほどの世界膜の理論では何をやっていることに対応するかといいますと、この $X$ の $\sigma$ が0と $\pi$ のところ、弦の端のところで、自由端境界条件を置くのではなくて、固定端境界条件を置くということに、単に対応しています。そういうことをやってもいいですよということを、Dai, Leigh, Polchinskiという人たちが、1989年に提唱しました。

特に自由端境界条件に関しては、 $\mu$ が0から $p$ までで、固定端境界条件に関しては、残りの9までのところというふうにして置いたものを、 $Dp$ ブレーンといいます。この平たい面のところを、 $Dp$ ブレーンと言います。その世界体積の次元は、そこからわかるとおり $p+1$ になっています。

ここにくっついている開弦をよく見てみますと、この開弦をぐるっと回すと、このような絵が描けるということがわかります。これからわかることは、 $D$ ブレーンは実は、閉弦を放出するような過程を出す、つまり $D$ ブレーンは閉弦の源であるという理解ができます。これは専門的にはOpen-Closedデュアリティと呼ばれているものですが、それを用いますと、 $D$ ブレーンは開弦がくっついているという考え方だけではなくて、閉弦をemitする、つまりこのところで、世界膜が端を持っているということから、emitすることができるということになるのですが、そういう理解をすることができます。

この考え方を応用しまして、1995年にPolchinskiは、 $D$ ブレーンが実際に、先ほどのBlack  $p$ ブレーンが持っていた電荷と、まったく同じ量の電荷を持つということを示しました。そのような考え方から、これは勝手に導入した板だったわけですが、その板は、ブラックホールと同一視することができるという、非常に論理の飛躍をしたのです。ブラックホールはもともと、もちろん背景時空が曲がっているものです。この $D$ ブレーンは、フラットな時空のところ、勝手に板を置いたわけです。ですからそれらが同一視できるということは、非常に論理を飛躍しているわけですが、そういうことを提唱しました。

これが正しいとしますと、ソリトン周りの摂動論が可能になります。これはフラットなバックグラウンドですので、散乱振幅等が全部計算できるわけです。これは弦理論の第2の革命期と呼ばれる、この1995年からの時期の契機を与えました。

中西：「同一視できると示した」というのは、「示した」わけじゃないでしょうか？ 単なるやつただけでしょうか？

橋本：これは言い過ぎです。はい。

中西：単なるお話。

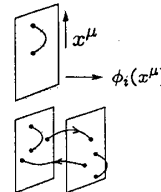
橋本：申しわけないです。「これが同一視できるという可能性を示した」。そのとおりです。

[Slide 14] それでは、 $D$ ブレーンの上でどういう自由度が住んでいるかということ、簡単におさらいします。もちろん $D$ ブレーンの上の自由度というのは、この開いた弦ですから、この開いた弦を量子化すれば、どのような自由度が乗っているかということがわかります。それは先ほど申しました、ゲージ場が住んでいるというのとまったく同じなのですが、特にこれが複数枚のときは、開いた弦の種類が、このようにたくさん出てきます。2枚ある場合は、このように4種類ありますけれども、この4種類を、こういう行列でラベルすることにします。そうしますと、 $D$ ブレーンが $N$ 枚平行にある場合の有効理論は、ちょうど $SU(N)$ のゲージ理論になります。

この $SU(N)$ のゲージ理論は、この平たい枠の上のみ住んでいますから、 $D$ ブレーンの $p+1$ 次元という世界体積が、このゲージ理論が定義されている、基本的な時空になっています。ですからこれは、 $p+1$ 次元時空の上の、 $SU(N)$ のYang-Mills理論になっているということです。そのラグランジアンは、このように書きます。

研究会報告

**Step3: Dブレーンの上に住んでいる自由度=Yang-Mills理論**  
 それぞれの場合は、超平面上にのみ存在する。  
 $|0; k\rangle$ : tachyon  $T(x^\mu)$ ,  
 $\alpha_{-1}^\mu|0; k\rangle$ : gauge field  $A_\mu(x^\mu)$   
 $\alpha_{-1}^i|0; k\rangle$ : scalar fields  $\phi_i(x^\mu)$



Dブレーンが複数枚ある時は弦を分類:  
 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

→ **N枚のDpブレーンの有効理論**  
 = p+1次元 SU(N) Yang-Mills理論 + matter

$$S_{Dp} = -\frac{T_p}{2} \text{tr} \int d^{p+1}x \left[ \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^2 + \frac{1}{2} (D_\mu \phi_i)^2 + \frac{1}{4} [\phi_i, \phi_j]^2 \right]$$

[Slide 14]

**Dブレーンから非摂動的弦理論へ: M(matrix) 理論**  
 10次元のtypeIIA型超重力理論は、11次元超重力理論の次元還元で得られることが知られている。  
 $R_{11} = l_{sgs} \Rightarrow$  typeIIA超弦理論の強結合領域は11次元理論で記述できる。(M理論)  
 特に、 $g_{\mu 11} = A_\mu^{RR}$  つまり KK mode = D0ブレーン

D0ブレーンの多体系を用いれば、11次元のmassless自由度が記述できるはずである。特に、内部エネルギーが小さければ、D0ブレーンの有効作用でそれが記述できるはず。

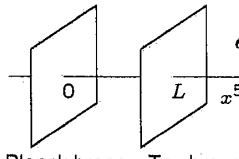
$$S = T_{D0} \int dt \text{tr} \left( \dot{X}^i \dot{X}^i + \frac{1}{2(2\pi\alpha')^2} [X^i, X^j]^2 \right)$$

行列模型のLarge N 極限 = M理論

[Slide 15]

[Slide 15] [Slide 16] 時間の関係から、ちょっとこれは飛ばします。

**Dブレーンの現象論へのインパクト: プレーンワールド**  
[Randall, Sundrum(99)]



$ds^2 = e^{-2kx^5} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dx_5^2$   
 5次元目をAdS空間にし、二枚の膜を置く。  $x^5 = L$  における自然な場  $H$  は

Planck brane    Tev brane

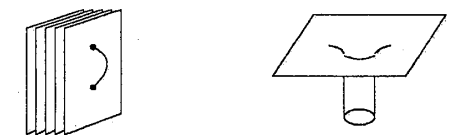
$$S = \int d^5x \sqrt{-g} \delta(x_5 - L) \left[ g^{\mu\nu} \partial_\mu H \partial_\nu H - \lambda (H^2 - v^2)^2 \right]$$

$$= \int d^4x \partial_\mu \tilde{H} \partial^\mu \tilde{H} - \lambda [\tilde{H}^2 - (ve^{-kL})^2]^2$$

warp factorによりゲージ階層性問題を解決。  
 重力場が局在化し、extra次元方向が大きくても問題ない。  
 LHCで5次元目 (KK graviton) を観測?

[Slide 16]

**2-2. Dブレーンの応用1: AdS/QCD**  
 AdS/CFT 対応 Dブレーンには二つの記述方法がある。  
[Maldacena(97)]  
 開弦による記述(ゲージ理論)    閉弦による記述(重力理論)



N枚のD3ブレーンの低エネルギー有効作用    N枚のD3ブレーンを表す重力理論の古典解

Yang-Mills理論    対応    曲がった時空上の重力理論

[Slide 17]

[Slide 17] いまから、Dブレーンの新しい意義づけに関するような応用例を、二つ述べさせていただきます。一つ目はAdS/QCD、二つ目はソリトン物理への応用です。

AdS/QCDを説明するためには、まずAdS/CFT対応、Maldacenaが提唱したものが、どのようなものだったかということ、述べなければなりません。これは、Dブレーンには二つの記述方法があるということに基づいています。

二つ絵を描きましたが、一つ目は、先ほど出てきた絵です。DブレーンがN枚、平行にあるとしまして、その上に開弦が張りついている。その開弦が、低エネルギーでどう理論を出すかということをお考えすると、Yang-Mills理論になるということをお述べました。

一方、Polchinskiのidentificationを使いますと、このDブレーンの系は、ブラックホールとidentifyできます。ここでちょっと、confusingでこういう板を書いてしまいましたが、これは時空が曲がっているというイメージを書いたものです。この中心にDブレーンがあって、ブラックホールがあって、それが周りの時空をゆがめているというイメージの図ですけれども、これはN枚のD3ブレーンを表すような、重力理論の解です。

これらが等価であるということをお認めますと、Yang-Mills理論と曲がった時空上の重力理論が対応しているということになります。それをAdS/CFT対応といいます。「AdS/CFT」という言葉は、右側が、次に説明するようにAdS、左側がcomformal field theoryになっているという、その言葉からきています。

開弦側では、massless modeだけ取り出す極限  $l_s \rightarrow 0$ ,  $g_s$ : fixed で

$$S_{D3} = -\frac{1}{2\pi g_s} \text{tr} \int d^4x \left[ \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^2 + \frac{1}{2} (D_\mu \phi_i)^2 + \frac{1}{4} [\phi_i, \phi_j]^2 \right]$$

**$N = 4$  Super Yang-Mills**

閉弦側では、masslessの重力理論から始めてみると

$$S_{gr} = \frac{1}{2\kappa^2} \int d^{10}x \sqrt{-g} R - N T_{D3} \int d^4x \sqrt{-h}$$

この古典解は、 $r_0 \equiv (2\kappa^2 N T_{D3})^{1/4} \sim (N g_s)^{1/4} l_s$  のスケールを持ち、重力理論が正しいためには、 $r_0 \gg l_p \equiv \kappa^{1/4}$ ,  $r_0 \gg l_s$  が必要である。

$$ds^2 = \left(1 + \frac{r_0^4}{r^4}\right)^{-1/2} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + \left(1 + \frac{r_0^4}{r^4}\right)^{1/2} (dr^2 + r^2 d\Omega_5^2)$$

$r_0 \gg r \Rightarrow$   **$AdS_5 \times S^5$**       ただし対応は Large  $N$ ,  $N g_s$

[Slide 18]

ゲージ理論の相関関数を、高次元重力理論で計算できる。  
[Gubser, Klebanov, Polyakov(98)] [Witten(98)]

$$\left\langle \exp \left( \int d^4x \phi_0(x) \mathcal{O}(x) \right) \right\rangle_{\text{CFT}} = \left[ \exp \left( -S_{\text{SUGRA}}^{\text{on-shell}}(\phi) \right) \right]_{\phi(r=\infty)=\phi_0}$$

CFTのoperator  $\mathcal{O}(x)$  と、bulkの場  $\phi$  が対応。

- 「ホログラフィー」の具体例となっている。
- 4dゲージ理論は強結合:  $\lambda = N g_{YM}^2 \sim N g_s \gg 1$
- 証明はされていない。(「マルダセナ予想」)

$\Rightarrow$  QCDに適用する。「AdS/QCD」 (主に03~)

- "top-down"的アプローチ: 弦理論の低エネルギーでQCDの物質場やゲージ対称性を出すDブレーン配位を求め、その重力解によって強結合のQCDを記述する。
- "bottom-up"的アプローチ: QCDのカイラル対称性などの性質を良く表すような、双対の高次元重力理論を探る。
- RHICの実験との比較: 有限温度・密度でのホログラフィー

[Slide 19]

[Slide 18] ここで詳しく式を書きましたが、これはそれぞれに興味のある方だけ、眺めていただければいいですが、開弦側、左側の立場では、Yang-Mills理論が出てきます。特にD3ブレーンを平行に並べたような場合には、3+1次元の超対称性が  $N = 4$  であるような超 Yang-Mills理論になっています。

一方閉弦側では、重力理論の古典解、Black 3ブレーン解になっていまして、そのかたちは、このようになっています。つまり10次元のなかで、3+1次元的にsingularityが広がっているようなブラックホールの解です。

ここで、これらが等しいという考え方をするためには、両方で弦理論の低エネルギー極限をとらないといけません。その低エネルギー極限を取りますと、詳しくは述べませんが、この重力解のうち、その曲がっているスケールを決めているcharacteristicな  $r_0$  という量よりも、充分ブラックホールに近いところを見なさいという極限が出てきます。

その極限のために、このMetricのこの部分とこの部分のみを取り出すようなことをしなきゃいけないくなりまして、結局、このD3ブレーンのブラックホール解の一部分である、 $AdS_5 \times S^5$  という時空のみが注目されることになります。

ですからクローストリング側、重力側では、このような背景時空の重力理論を考えるとということになります。

ここで  $r_0$  というパラメータを説明しませんでした。その  $r_0$  がどうかたちをしているかということの詳細を見ますと、このD3ブレーンの  $N$  というものが、充分大きくないといけないという条件が出てきます。ですからこれとこれは対応しているということを行うためには、 $N$  は大きくないといけない。

[Slide 19] こういう考え方をすると、何がどちら側で計算できるかということなのですが、Gubser, Klebanov, Polyakov と Witten はこのような関係式を提唱しました。Yang-Mills理論側で、こういう相関関数を計算します。 $\mathcal{O}(x)$  というのは gauge invariant operator で、 $\phi_0$  というのは、そのsource term です。そのpartition function を  $\phi_0$  で微分して、 $\mathcal{O}(x)$  というのを下ろしてきますと、相関関数が計算できるわけです。その相関関数と、重力側では [Slide 18] で  $r$  が大きいboundaryでの  $\phi_0$  の値を、このsourceと同一視したときのon-shellのactionをexponentiateしたものと一致するというのを、提案しました。

この心はどういう心かといいますと、それはこの絵 [Slide 17] で見れば、その心がわかるのですが、このDブレーンがこういうふうにあるところに、閉弦を打ち込んだとします。それがDブレーンのなかで開弦に化けて、ぐちゃぐちゃと伝搬して、跳ね返されて、また閉弦が出てくるというプロセスを、左側で考えます。このプロセスは、右側でも理解することができまして、こちらは時空

## 研究会報告

が曲がっていますから、例えば重力子をこう打ち込みますと、その時空に重力子が曲げられて、また出てきます。そのプロセスとこのプロセスを同一することで、左側の開弦がぐちゃぐちゃと伝搬しているという相関関数と、右側の重力子がこういうふうに古典的に曲げられて運動しているという値が一致するということが考えられます。そういう考え方に基づいて提案されたのが、このイコールです。

これはもちろん、証明はされていません。特に  $N$  という D3 ブレーンの枚数が大きくないといけないと言いましたので、4次元ゲージ理論はこの 't Hooft coupling を考えますと、large  $N$  expansion になっていて、その意味で強結合です。

こちらの CFT, Yang-Mills 場では、これは 1+3 次元の Yang-Mills を計算しているのに対して、こちらの supergravity は、10 次元の計算をしています。ですから 10 次元のものと 4 次元のものが関係しているということで、これはホログラフィーの具体例となっています。

この対応は、非常にさまざまな視点から検証されていまして、現在のところ、非常にわずかなずれを除いて、すべてのものが consistent であるということがわかっています。その非常にわずかなずれに関しては、最終的にはそれは解消されるだろうと期待されているものです。それに関しては説明しませんが、これは膨大な数のチェックがあると思ってください。

これを一旦認めますと、QCD にそれを応用するということが考えられます。特に 4次元ゲージ理論側では、large- $N$  ですが、強結合でありますので、QCD の強結合の性質と、うまくマッチするのではないかという期待が持てます。

以下では、三つのことを話します。一つ目は top-down 的なアプローチと呼ばれるもので、弦理論は低エネルギーで QCD の物質場やゲージ対称性を出すような D ブレーン配位をまず書いて、その重力解を求めることで、強結合の QCD を記述するというものです。これは、この絵 [Slide 17] で言うと、左側は実は、いまは Yang-Mills 理論だと言いましたが、D ブレーンの配位を少しひねりますと、うまく QCD 理論を出すことができると考えられています。

次にこの対応を使って、これを右側にいきまして、重力理論を使って、左側の強結合領域を、右側で記述します。これで記述することで、具体的に meson や baryon のスペクトルを出すという話です。

これは弦理論の研究者が、主に使うアプローチですが、原子核の研究者が使うアプローチが、その対極にあります。それは bottom-up 的なアプローチと呼ばれていまして、QCD のさまざまな対称性をよく表すような高次元重力理論を、effective 理論としてプロポーズするという立場です。

最後に AdS/QCD を使った、面白い、最近の発展としまして、ブルックヘブンの RHIC で、重イオンの衝突の実験がおこなわれていますが、そこで jet quenching という現象が確認されています。それは quark の jet が、quark gluon plasma であるところで、そこから出てしまわずに、中に quark が残ってしまっていて、jet が quench されているという現象ですが、その現象に使われるような quark の摩擦係数が、この AdS/CFT で計算できる。結果として、それらが矛盾なく、うまく性質を記述できるということが知られています。

[Slide 20] top-down 的なアプローチの例は、酒井杉本模型と呼ばれる、2004 年に提唱された模型です。これは、このような特殊な D ブレーンの配位を使いまして、その D ブレーンの配位から、うまく QCD を低エネルギーで実現するようになっていきます。先ほどは D3 ブレーンを使いでしたが、今回は D4 ブレーンを使って、それを 5 次元目の円周にまず巻きつけて、これはごちゃごちゃしていますが、このような手続きで、gluon+massless quark の系をつくることができます。この D4 ブレーンを重力解に置き換えることで、この強結合領域を記述することができます。

quark はどのように出てくるかといいますと、D4 ブレーンに対して、もう少し高い次元の D ブレーンを、このように交差させておきます。そうすると、この D ブレーンとこの D ブレーンをつ

なが String, この D ブレーンとこの D ブレーンをつなぐ String というのがありますが, このそれぞれから left handed と right handed の quark が出てきます.

**top-down的アプローチの例 酒井杉本模型 (04)**

- (1) D4ブレーンを5次元目の円周にまき付け、円周の境界条件を工夫し超対称性を破る。
- (2) D8と反D8をそれぞれD4に交差させ、L-quarkとR-quarkを交点で実現する。
- (3) D4を重力古典解で置き換え、AdS/CFT対応を応用する。

gluon + massless quarks の系の強結合領域を記述

カイラル対称性が強結合の効果で破れることが幾何学的に見える。

様々なカイラルダイナミクスを導出できる。  
例)メソン・バリオン質量、Skyrm項、...

Observable	Measured	Model
$m_p$	776 MeV	776*
$m_{a_1}$	1230 MeV	1190
$m_{a(1450)}$	1465 MeV	1607

[Slide 20]

**bottom-up的アプローチの例**  
[Erflich, Katz, Son, Stephanov(05)] [DaRold, Pomarol(05)]

QCDの  $\bar{q}q, \bar{q}\gamma\mu q, \bar{q}\gamma_5\gamma\mu q$  に対応する5次元の場をAdS背景時空に導入し、その古典的なスペクトルと相互作用を読みとる。

Observable	Measured (MeV)	Model A (MeV)
$m_\pi$	139.6±0.0004	139.6*
$m_\rho$	775.8±0.5	775.8*
$m_{a_1}$	1230±40	1363
$f_\pi$	92.4±0.35	92.4*
$F_\rho^{1/2} m_\rho^{1/2}$	345±8	329
$F_{a_1}^{1/2} m_{a_1}^{1/2}$	433±13	486
$g_{\rho\pi\pi}$	6.03±0.07	4.48

$$\begin{cases} D_M X \equiv \partial_M X - i A_{LM} X + i X A_{RM} \\ A_{L,R} = A_{L,R}^a t_a \\ F_{MN} = \partial_M A_N - \partial_N A_M - i[A_M, A_N] \end{cases}$$

$$S = \int d^5x \sqrt{g} \text{Tr} \left[ |DX|^2 + 3|X|^2 - \frac{1}{g_5^2} (F_L^2 + F_R^2) \right]$$

5dゲージ対称性=QCDのカイラル対称性  $SU(N)_L \times SU(N)_R$

$$X \rightarrow U_L X U_R^\dagger, \quad F_L \rightarrow U_L F_L U_L^\dagger, \quad F_R \rightarrow U_R F_R U_R^\dagger$$

[Slide 21]

重力解に, この D4 ブレーンを置き換えると, ということになるかと言いますと, この部分の時空が実は消えてしまって, この D8 と, D8 バーと書いたものが, こういうふうにつながってしまいます. このつながってしまうということで, この massless の quark が confine されているということを, 幾何学的に記述しています.

これを用いまして, さまざまな chiral dynamics を導出することができまして, 例えば meson, baryon 質量だとか, Skyrms term が出てくるとか, 非常にさまざまな chiral dynamics が, consistent に, 高次元の立場から導出できます. ここで書いたのは非常にわずかですけれども, 例えば meson mass は, こういうふうの実験で観測されているのに関して, これとこれをマッチさせますと, こういうふうな予言が出てくるということになっております.

[Slide 21] bottom-up 的アプローチの例として, これは時間の関係で, もう説明しませんが, これも面白い高次元モデルが提唱されていて, 例えば本来の measure された値に対して, こういう星つきでこれをマッチさせますと, ほかのものがこういうふうに計算されます. これは驚くべき一致を見せていると言っても, 過言ではないと思います.

このほかにも, さまざまな物理量が計算されまして, 非常によく, 低エネルギー領域でのハドロンを物理を表しているということが確認されています.

[Slide 22] 次にもう一つの応用, 新しい意義づけに関しまして, D ブレーンの応用の話をしたいと思えます. これはさまざまな場の理論のソリトン, それを D ブレーンの組み合わせで表現するというものです. ソリトンを, 高次元内の D ブレーンの組み合わせで表現しますと, それはソリトンの幾何学的な理解を与えまして, そこからそれを簡単に応用することによって, 新しいソリトンの存在を予言したりすることができます. もしくは高次元的な新しい見方をしますと, それがソリトンの新しい性質を導出, もしくは知られていても, その性質が解析的には確認できないような性質を, 解析的に導出することができるという発展がありました.

その一番基礎になりました, ソリトンと D ブレーンの対応として, このような図があります. ここで D3 ブレーンがありますのは, 先ほどの AdS/CFT 対応のときと同じで, これはちょっと, 高次元内で離しておきます.

ここに違う次元の D1 ブレーンというものを張らせます. そうしますとそれは,  $SU(2)$  SYM 理論の 't Hooft-Polyakov モノポールであると. こんな簡単な絵で, モノポールが解析できてしまうということです.

研究会報告

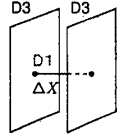
**!-3. Dブレーンの応用2:ソリトン物理の解明**

場の理論のソリトンをDブレーンの組み合わせで表現する。

⇒

- ・ソリトンの幾何学的な理解 → 新ソリトンの存在予言
- ・ソリトンの新しい見方 → ソリトンの性質を導出

例) SU(2) SYM理論の'tHooft-Polyakov  
モノポールをDブレーンで実現する方法

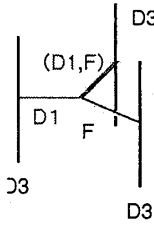


(1)荷電: D1の端点はD3から見ると磁荷。  
 (2)超対称性: 半分の超対称性を保つ。  
 (3)質量:  $\mathcal{T}_{D3}(2\pi\alpha')^2 = 1/g_{YM}^2$   
 $\Delta X = 2\pi\alpha'\phi_4|_{r\rightarrow\infty}$  }  $m_{\text{monopole}} = \mathcal{T}_{D1}\Delta X$   
 (4)Nahm方程式=D1上の有効作用のBPS方程式 (Moduli空間が同一)  
 (5)Nahm構成法=多数のD3と反D3の対消滅(タキオン凝縮)  
[Douglas(95)]など [Diaconescu(96)] [寺嶋,KH(05)]

[Slide 22]

**応用 その1 : 新しいダイオンの発見**

Dブレーン配位から、一般化されたダイオンの存在が予言された:  
[Bergman(97)]



三叉弦が3つの平行なD3-braneに端を持つ、超対称なブレーン配位が存在

↓

対応するソリトンが存在し、予言される性質は:

- (1) SU(3)以上のゲージ群でのみ存在する。
- (2) 超対称性を1/4まで破る。
- (3) adjointスカラー場が2つ必要で、非平行な磁荷と電荷を持つ。

その後、この性質を持つソリトン解がYang-Mills-Higgs理論で発見され、SU(N)で厳密に構成された。  
[畑,筆者,KH(97)]

[Slide 23]

その理由は、例えば荷電とか超対称性とか質量が、このD1ブレーンの性質から、まったく consistent に出てくるといふことに加えて、さらに驚くべきことは、このモノポールの構成法、Nahm 構成法と言っていますが、その Nahm 構成法がこのD1ブレーン上の有効 Yang-Mills 理論を考えることで、consistent に derive できるということです。

Nahm 構成法は、'tHooft-Polyakov モノポールのすべての配位空間を実現するような構成法ですので、結局、D1 ブレーンを考えれば、そのモノポールの Moduli 空間を、全部導出することができるということに等しいのです。

[Slide 23] このような新しい見方をしますと、例えばこの応用としまして、簡単なものは、次のようなもの考えることができます。このD3ブレーンを三つ、高次元空間に配置しまして、D1ブレーンと、それに加えて普通の超弦を、このように配置したとします。この(D1, F)と書いているのは、D1ブレーンと基本弦の bound state です。こういうものを考えますと、これは安定に存在するということが簡単にわかります。これは高次元空間で、うまく力がバランスするように張っているということです。

これから予言されることは、SU(3)以上のゲージ群で、このようなソリトン解が存在するということです。実際に1997年にBergmanは、その一般化されたダイオンの存在を予言しました。

この絵からわかることは、このダイオンはSU(3)以上のゲージ群でのみ存在して、この三叉弦の保っている超対称性のみ保って、さらにこれが高次元空間で2次元内にこういうふうに張ってなければいけないということから、スカラー場を二つ持ってこなきゃいけないということが予言されます。

その後、この性質を厳密に持つようなソリトン解が、Yang-Mills-Higgs 理論で構成されました。

[Slide 24] このような例は、非常に多岐にわたってございまして、これは代表的な例ですけれども、例えば昨日までやっていた西宮湯川シンポジウムのテーマである非可換空間、そこでモノポールがどういうふうに表現されるかということ、先ほどの絵をちょっと modify することで、簡単にその存在を予言されます。その質量がどうであるとか、超対称性はどうか、Moduli 空間はどうか、そういうものが完全にDブレーンから予言されます。その予想も、非常に難しいところではあります、解析解が厳密に構成されて、証明されました。

[Slide 25] さらに最近の面白い例としましては、Abelian-Higgs Model という、Vortex のソリトンを導出するような簡単なモデルがありますけれども、その性質の予言です。若干込み入った、このようなDブレーンの配位を使いますと、ソリトンを表すようなDブレーン上の有効理論を書けば、Moduli 空間が決定できます。これは、場の理論では実はほとんど不可能な問題でした。なぜかといいますと、Abelian-Higgs 模型のVortex ソリトンは、解析解が存在しないからです。解析

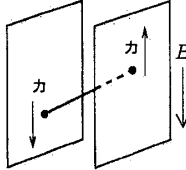
解が存在しないと、その Moduli 空間がどうなっているかということは、まったくわからないわけです。

**応用 そのⅡ : 非可換空間内のモノポールの発見**

弦理論の散乱振幅の計算から、定数B場内のDブレーンの上の場の理論は非可換空間となることが知られている。

$$[x^1, x^2] = i\theta$$

一方、定数B場は、Dブレーン上では磁場のように振舞う。

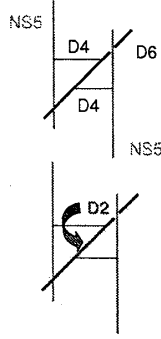


弦理論からの予言:  
非可換空間内のU(2)モノポールは、超対称性を保ち安定に存在し、その質量は可換な場合と同じである。  
[A. 橋本, KH(97)]

この予想も厳密解の構成で証明された。  
[Gross, Nekrasov(97)]

[Slide 24]

**応用 そのⅢ : Abelian-Higgs模型の渦ソリトンの性質の導出**



Abelian-Higgs模型は、左図のブレーン配位によってD4上で実現される。

Vortex-stringは、その上にくっついていいるD2-braneであらわされる。

[Hanany, Tong(03)]

D2ブレーン上の理論を書けば、vortex上の有効作用が求まる。(Moduli空間の決定)

これを用いると、二つのvortex stringが衝突する時、必ず組み変わることが証明できる。(宇宙ひもの性質の導出) [Hanany, KH(05)] [Tong, KH(05)]

[Slide 25]

ところが解析解なしで、Dブレーンのやり方を使えば、Moduli空間を決定することができます。これを用いると、多数のVortexがどのように散乱されるかとか、そういうことを全部、証明することができます。

Abelian-Higgs模型のVortexソリトンは、このあとと言います宇宙ひもというものの代表例と考えられていまして、これがどういふ力学を持っているかということは、重要な問題でした。その問題に関して、Dブレーンのテクノロジーは答えたわけです。

これで2番目のセクションを終わらして、Dブレーンを用いることによって、どのような新しい物理が現れてきたかということレビューさせていただきました。

こういう話をしますと、じゃあ初めの目標であったtheory of everythingのところ、結局、発展はないのですかと、Dブレーンとか弦理論とか言っていますけど、それは本当にわれわれの世界を記述しているんですか、そういうことがどうしても問題になると思います。もちろん、この新しい弦理論の物理のところ、初めの困難との関係というのは、非常に密接で、われわれはこちらから、新しい考え方を導入して、それがこちらに反映されるだろう、フィードバックがあるだろうと思って、ずっとやっているわけです。実際、AdS/CFTに関しては、非摂動的な定義に関して、新しい定義を与えたという意味で、フィードバックがありました。

ここではもう少し直接的な、弦理論と現実世界をつなぐような例の一つ説明して、終わりにしたいと思います。


[Slide 27] 近年では、新しい、以下に述べるような関係が議論されて、注目されています。重要な例は、これは新聞記事に載ったと先ほど言いましたが、LHCでブラックホールができるかもしれない、Giddings, Thomasが初めに唱えまして、これは本当だったらたいへんセンセーショナルなことなのですが、高次元空間のあるModelを仮定しますと、LHCでブラックホールが生成される可能性が、理論的に示されています。「示されています」というのは、ちょっと微妙ですけども、そのような議論がなされています。

高次元空間があれば、それは弦理論と間接的につながっているという期待をすることができまして、それはほとんどあり得ないかもしれませんが、面白い可能性があると思います。

それよりも現実的な話としまして、近年、宇宙の観測が非常に進んできて、宇宙全体に広がるようなソリトンを、実際に観測できるかもしれないという話があります。それは宇宙ひもと呼ばれるものですが、この宇宙ひもが、先ほど述べましたDブレーン、もしくはsuper stringそのものであるという可能性が、近年、盛んに議論されています。



## 研究会報告

<p style="text-align: center;"><b>&lt;3&gt;弦理論と現実世界をつなぐには？</b></p> <p>では結局、「theory of everything」に向けての困難（真空の決定→現象論との関係）があるため、弦理論が現実世界を記述しているかどうかは分からないのか？</p> <p style="background-color: #e0e0e0; padding: 2px;">近年では、弦理論と現実世界の間新しい関係が議論され、注目されている</p> <p>例1) LHCでブラックホールの生成？ → 高次元空間の証拠 → 弦理論の間接的証拠(?) <small>[Giddings, Thomas(01)] [Dimopoulos, Landsberg(01)]</small></p> <p>例2) 宇宙ひも=Dブレーン・超弦? [Copeland, Myers, Polchinski(03)]</p> <p>例3) 銀河中心のブラックホールの角運動量? [Gimon, Horava(04)]</p>	<p>宇宙ひも(cosmic string) = 宇宙空間の巨視的なひも状の物体。 観測の期待が高まっている。</p> <p>(a) 直接的観測法: 宇宙ひもによる重力レンズ効果。  • WMAP • CSL-1 ×</p> <p>(b) 重力波の観測: 宇宙ひもの尖点が光速で運動し強力な重力波を放出する。 観測からの制限 <math>\Rightarrow G_N \cdot \mu &lt; 10^{-6}</math></p> <p>① 従来考えられてきた宇宙ひも: 場の理論の渦(vortex)ソリトン</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 二次元空間に局所化した渦 → ひも状の物体(vortex string)</li> <li>• 理論のU(1)対称性が自発的に破れると形成する。(Abelian-Higgs模型などが宇宙論でよく用いられる)</li> <li>• 高温の宇宙が冷えていく際に、GUT等の対称性の破れの形に応じて大量に生成される(モノポールと同じキップル機構)。</li> </ul>
--	--

[Slide 27]

[Slide 28]

これは2003年にCopeland, Myers, Polchinskiという人たちが、この可能性を詳しく議論したのをきっかけに、宇宙ひもの業界と、弦理論をやっている人たちが密接につながって、研究会が催されたりしています。

例3としましては、議論の段階を超えないのですが、銀河中心に、巨大なブラックホールがあると言われていて、それは回転しているのです。その回転の仕方が、いわゆるカー bound というのを例えば超えているとしますと、それは一般相対論で記述するのは無理ですので、それをなんとかDブレーンの物理で解消できないかという議論があったりします。これは観測にかかわることですので、面白い可能性ではないかと思います。

以下では、この例に関して、若干説明しまして、終わりにしたいと思います。

[Slide 28] 宇宙ひもは何だったかということ定義しますと、それは定義としましては、宇宙空間の巨視的なひも状の物体だと。その正体は、ここに書きましたが、従来考えられていた宇宙ひもは、ある場の理論を仮定して、そのVortexソリトン、二次元空間に局所化したような渦を考えますと、三次元空間には、それはひも状の物体になります。それをvortex stringといいます。これはAbelian-Higgs模型、もしくはAbrikosovの模型などで、理論のU(1)対称性が自発的に破れると形成します。これはtopologicalなものです。

こういうセクターがGUTなどに埋め込まれていますが、高温の宇宙が冷えていくときに、モノポールの場合と同じKibble機構で、大量に生成されると期待されます。

この観測の期待が高まっているのは、まずWMAPなどの宇宙背景放射の観測が非常に進んできて、宇宙にどういうdefectがあるかということが具体的に調べられる段階になってきています。ここで大仏の絵を描きましたけれども、本来はここに宇宙の銀河とかの絵があって、これが宇宙ひもだと思ってください。宇宙ひもがここにあると、ここに質量のある物体がありますので、その背景が曲がって見えます。特にこれがまっすぐ伸びていると、後ろのものがだぶって見えるわけです。その重力レンズ効果を、WMAPなどのデータから、直接的に見ることができる可能性があると思われています。

もしくは、この数年のあいだに、重力波の天文台が非常にセンシティブティが上がりまして、例えばNASAが宇宙空間に衛星を打ち上げて、地球の外で重力波を観測してやろうという計画もありますが、そういうものから、宇宙ひもの上の尖った点から出てくる重力波を検出できるかもしれないという期待があります。

観測からの制限としましては、Newton定数×宇宙ひものtensionがこの不等式を満たしていれば、現在まで見つかっていないということとconsistentだといわれています。

ここでCSL-1と書きましたのは、非常にそっくりな二つ見えている銀河が、つい数カ月前まで

ありました。それはその真ん中に宇宙ひもが実際に通っているのではないかという期待があったのです。そのあと、そういう議論がさんざんなされて、その方向にハッブル宇宙天文台が向いて、その詳細な画像を撮りました。そうしますと、左と右は、実は全然違うものだったと。ですから、そのようなペアは非常にたくさんありまして、そのそれぞれを詳細に調べていく必要があるのですが、現在の観測技術で、きちんとそれがチェックできる段階にあるというわけです。

② 超弦・Dブレーン=宇宙ひも? (cosmic super/D-string)

弦やDブレーンは、宇宙に巨視的に伸びているかもしれない!

- 1985年にWittenは、次のような議論から否定した。  
ヘテロ型超弦理論の6次元コンパクト化では  
 $4\kappa_{10}^2 = l_s^2 g_{10}^2$ ,  $\kappa_4^2 = \kappa_{10}^2 / V_{\text{cpt}}$ ,  $g_4^2 = g_{10}^2 / V_{\text{cpt}}$ ,  
 $G = \kappa_4^2 / 8\pi$ ,  $\mu = 1/2\pi l_s^2$   
 $\Rightarrow G\mu = g_4^2 / 64\pi^2$  これは大きすぎる。
- しかし現在は、「warpedコンパクト化」を考えることもある:  
 $ds^2 = e^{-A(x_5)} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + \dots \Rightarrow \mu = \frac{e^{-A(x_5)}}{2\pi l_s^2}$

warpedコンパクト化を考えれば、  
cosmic superstringのtensionは小さくでき、可能

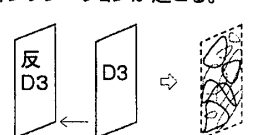
[Copeland, Myers, Polchinski(03)]

[Slide 29]

- Cosmic superstring / D1ブレーン の生成

典型的な「ブレーンインフレーション」では、Warpされた「のど」の中でD3が運動することによりインフレーションが起こる。

最終的には、のどの端にある反D3と運動したD3が衝突、対消滅し、インフレーションが終了する。



- Senの予想によると、タキオン凝縮のtopological defectとしてD1ブレーン(ひも状のDブレーン)が大量に発生  
→ cosmic D1ブレーンの生成
- Dブレーンと反Dブレーンが対消滅すると、残りのエネルギーは閉じた弦に行くしかない。  
→ cosmic superstringsの生成

[Slide 30]

[Slide 29] それでは超弦・Dブレーンが宇宙ひもであるというのは、どういう可能性かというのを説明します。

これは非常に魅力的なシナリオで、弦、もしくはDブレーンは、高次元空間に丸まっていたりして、まったく見えないと思っていたのですが、それが宇宙に巨視的に、実は伸びているかもしれないという、壮大なシナリオです。

1985年にWittenは、次のような議論から、この存在を否定しました。この当時は、ヘテロ型超弦理論を、6次元コンパクト化するという立場だったわけですが、そのときに出てくる coupling constant の関係式をごちゃごちゃ書きましたけれども、このようなものになります。これは非常に簡単な関係式で、10次元の重力定数は、10次元の gauge coupling constant と、このように、 $l_s$  は string の長さですが、書かれました。4次元の重力定数は、10次元の重力定数とコンパクト化の体積で関係する、4次元の gauge coupling constant は、10次元の gauge coupling constant と同じように関係している。4次元の重力定数は、このように定義される。

一方、string の tension は、string の長さを使って、こう定義される。この式を全部混ぜますと、こういう式が出ます。重力定数× tension は、4次元の gauge coupling constant とこう関係している。

この値は、GUT の unification のところでの coupling constant だと考えますから、だいたいこれは  $10^{-3}$  とか、そういう程度の量になります。それは先ほど述べました、この bound [Slide 28] を大幅にオーバーしています。その意味で、これは大きすぎる。

しかしながら現在は、このようなコンパクト化ではなくて、AdSのようなwarpedコンパクト化と呼ばれるものを考えることもあります。そのコンパクト化では、この $\mu\nu$ というのは0から3までを走る、われわれの時空方向ですが、その前に高次元方向に対して、exponentialで依存するような、こういうファクターをつける場合があります。

こういうwarpedコンパクト化を考えますと、この $x_5$ のあるところに存在するようなstringは、このmetricの前の係数を拾ってきて、このようにtensionがre-scaleされます。ですからwarpedコンパクト化を考えれば、このcosmic superstringのtensionは小さくできて、可能であるという理論を、2003年にこのような人たちが唱えました。

## 研究会報告

## 生成とその後の宇宙の発展

宇宙ひもは、モノポール問題と同様の問題は引き起こさない。

理由: 宇宙ひもは互いに衝突して  
組み替えを起こし、閉じたループ  
をなしそれが収縮消滅する、という  
自己消滅機構があるからである。



実際の時間発展は、組み替え確率  $P$  に依存する。

- (1) ソリトンの宇宙ひもでは、組み替え確率  $P=1$  である。(古典的)  
(注: この性質はDブレーンの手法により導出された。)
- (2) 超弦・Dブレーンの宇宙ひもでは、 $P < 1$  (確率的)

組み替え確率が違うと、宇宙ひもループの生成率が変わり、現在の宇宙に見えるはずの宇宙ひもの個数密度が異なってくる。  
→ 宇宙ひもの見分け方(観測に対する制限の違い)

[Slide 31]

## &lt;4&gt; 結語

- ・ 弦理論の困難は依然として未解決であるが、新しくその重要性が認識された「Dブレーン」によって、活路が見出されつつある。
- ・ Dブレーンは、予想をはるかに超えた応用性を見せている。ホログラフィーやソリトンの例を見ても、Dブレーンは我々の時空像を「変革」した。弦理論は意外な形で「予言能力」を持っている。
- ・ 弦理論やDブレーンと現実世界をつなぐ様々な試みが研究されている。

[Slide 32]

[Slide 30] [Slide 31] この宇宙ひもが生成されると、モノポールの場合は「モノポール問題」というものがありまして、それは宇宙を閉じさせて問題だったのですが、宇宙ひもは、それが生成されても、あるメカニズムでその数を減らすことができ、その問題を起こしません。そのメカニズムは、この組み替えの機構です。こういう組み替えが起こりますと、衝突した宇宙ひもがどんどんループをつくって、ループが切れて、自分自身の数を減らすことがあります。その自己消滅機構のおかげで、「モノポール問題」が起こりません。

実際の時間発展は、ここでどういう確率で組み替えが起こるかという確率に依存します。ソリトンの Vortex string の宇宙ひもでは、この確率は1であるということが、数値計算によって知られていました。この数値計算の結果は、Dブレーンの手法によって、解析的に導出されました。これは先ほどのセクションで若干述べたことです。

一方、超弦の宇宙ひもでは、この確率は確率的になります。どうしてかということこれは単に弦の散乱振幅だからです。組み替え確率が違いますと、ループの生成率が変わって、現在の宇宙に見えるはずの宇宙ひもの個数密度が異なってくるので、観測に対する制限が変わってきます。これによって、宇宙ひもが、実際に観測されたときに、それがどういうものであるかということを見分けるといことが、考えられています。

[Slide 32] 最後に結語としましてまとめますと、弦理論の困難は、依然として未解決ですけども、新しくその重要性が認識されたDブレーンによって、活路がフィードバックによって見出されつつある。Dブレーンは、予想をはるかに超えた応用性を見せています。theory of anything と言いましたが、その例として、ホログラフィーやソリトンがあります。これは初めのタイトルと、若干関係するかもしれないのですが、ソリトンもしくはQCDに関する考え方を、特に時空の観点から変革しています。こういう意味で、意外なかたちで弦理論は予言能力を持っているということです。現在、現実世界と弦理論をつなぐ、さまざまな試みが研究されております。以上です。ありがとうございました。

川村: どうもありがとうございました。Dブレーンに関するさまざまな興味深いお話だったと思います。質疑応答の時間に移りたいと思いますけれども、何か。

中西: それで結局、Dブレーンって何なんですか。勝手に手で入れたものでしょ、要するに。

橋本: はい、そうです。

中西: 全然根拠がない、勝手に手で入れたもの。

橋本: はい、そうです。

中西: それがなんで、そんなふうに役に立つんですか。偶然ですか?

橋本 : 1989年に当時、それが導入された経緯は、2次元の弦理論のワールドシートの作用を書くときに、boundary conditionはDirichletにしてもよいという、単なる可能性の話でした。そのあとに、途中でお話しましたPolchinskiの提案、すなわちDブレーンを使うとそれがブラックホールと同一視できるかもしれない、ということが契機となって、さまざまな、それは単に提案だったわけですが、その提案を検証するようなかたちで、物理が進んできたという感じになっています。

中西 : 何も本質的には関係がないんですね。勝手に、空想的なものなんですね。要するに。

橋本 : もしPolchinskiの提案が正しいとしますと。

中西 : そうじゃなくて、全然、理論的な根拠はまったくないわけですね。単なるお話として考えているという。

橋本 : 根拠はまったくないということに、私はあまり同意しません。

中西 : ちゃんと理論的に、つまり数学的にきちっと、何か根拠はあるんですか？ 単なるお話じゃなくて。

橋本 : 弦のboundary conditionの。

中西 : ちゃんと論理的に出してこることができるんですか？

橋本 : それは弦のboundary conditionとして。

中西 : いやいや、それはいいんです。それは手で入れているんでしょう？ そんなものが出てくるという、Dブレーンというものが出てくる必然性があるんですか？ 弦理論のなかに。

橋本 : 弦理論のなかで、boundary conditionを考えない必然性がないので。

中西 : それを考える必然性があるんですか。

橋本 : はい。あらゆるboundary conditionを。

中西 : そういうもの考えること自身は、根拠はあるんですか？ って聞いているんですよ。

橋本 : はい。

中西 : そういう超平面を考えること自身に、根拠があるのかっていうことです。

橋本 : あると考えています。

中西 : あると考えているけど、もっとハイレベルな見解はないんですか。ちゃんとした計算をしたことでなったということは、言えないんですか。最初はこんなものがあると思えと。思えと言うだけで、そここのところの話は、全然根拠がない。どこにも理由が書いていないんです。

橋本 : Polchinskiの提案に関しては、それを証明するという向きで、議論の発展はありますが、それは完全に証明されたわけではないので、ブラックホールがDブレーンであるということに関しては、必然性はないですが、ワールドシートの立場では、boundary conditionを分類するという意味で、可能性として、それは存在しないといけないものです。

中西 : いや、その考えること自身の根拠はないんですかって聞いているんです。boundary conditionを考えることは、いろいろな可能性としてあるかもしれないのですが、それがなぜ弦理論と必然的に結びつかないかという、そここのところの根拠はありますかということ。

橋本 : それは答えになっているかどうかわかりませんが、先ほどのことを、僕は繰り返すしかないんですけれども、摂動的な弦理論の分類をするためには、そういうboundary conditionを必然的に考えなきゃいけないと思います。

川村 : 時間が限られているので、あと一つ。

中野 : AdS/QCDのところでは質問なのですが、この方法を使って、ハドロン質量を出せるというのは、エビラントな解を与えただけなのか、それともわれわれがハドロンに対する認識を

## 研究会報告

変えなくちゃいけないものなのかということが知りたいです。弦理論に theory of everything, theory of anything という両面があるとおっしゃいましたが、theory of anything という面があるのは、それは theory of everything だからなのか、それともまったく関係がないのか。

橋本 : 初めの質問に関しましては、まだ議論の域を出ないと思います。すなわち、原子核に関する考え方を、この提案で変えなければいけないのかということが、まだ議論のあるところがたくさんあると思います。といいますのは、ある原子核の側面に関しては、まったく違うところから derive された公式が、非常にうまく、統一的に理解できるという意味で、役に立つ記述を与えていることは確かです。ところがそれをもって、この考え方に固執しなければいけないかということになりますと、現時点ではそうではないと。いうことです。

二つ目の質問に関して、theory of everything があるから theory of anything なのかということなのですが、それは theory of everything に関して答えが出ていない段階で、そのことを議論するのは、非常に哲学的になると思います。theory of anything で、いま、いろいろな D ブレーンのかたちを見せましたけれども、非摂動的にそれが選ばれなかったら、これは全部死んでしまうということになるかと思いますが、実はそうではなくて、場の理論でもさまざまな真空があって、そのさまざまなローカルな真空のところでは、こういうところではこういうことが起こっている、こういうところではこういうことが起こっているということは、もちろんあるわけです。そういう考え方で、両者が consistent に存在すると考えております。

坂東 : いまの質問はすごく重要だと思うのですが、例えば弦理論、AdS/CFT 対応で QCD を導出できるということでハドロンの説明できたという、理論的根拠というか、エッセンスはやっぱり、chiral dynamics, chiral symmetry というのが、まず表現できたということ、そのことが効いているわけですね。だからそういう意味では、そういうものを出す一つの手段として使ったということは言えると思うのですが、もし弦理論が本当なんだったら、そこから次に、もうちょっと何が出てくるかというその先の描像を出さないと、ただ説明しただけということになりかねないと思うんです。そこが詰められていないというか。

よく佐藤さんが 40 年間弦理論をやっている、何も出てきていないんだから、あれは嘘だとかということと言われるんですけど、やっぱりそのときに、じゃあ何が出てきたのかというのが、まだもう一つ、宇宙のひもというのが、なぜ D ブレーンだったのかも、私はあんまり、よくわからなかったんですけど、まだ検証されているわけではないんですね？

橋本 : もちろんないです。

坂東 : そういう意味で、何か、もうちょっと物理として何が明らかになったかということを決める必要があるんじゃないですかね。

橋本 : AdS/QCD に関しましては、例えば酒井杉本モデルで chiral dynamics がどのように出ているかと。重大な問題は、quark に mass が入らないという問題があります。quark に mass が入らなければ、chiral perturbation ができないわけです。そういうのは、現在も研究が発展中で、原子核のそういう chiral dynamics, まだ 1970 年代, 80 年代, その前から充分培われたものを、いかに再現できるかという時点になっています。そこから先の話は、これから先の話だと、まさに思います。それは来週から YKIS がありますけれども、そういうところで、面白く議論されるのではないかと思います。

それと、もう一つはソリトンダイナミクスに関しては、実際に新しいことが弦理論から予言されていますので、それは弦理論から出てきたことだと、僕は自信を持って言うことができます。

「基礎物理学の現状と未来 -学問の系譜・湯川・朝永をうけて-」

川村 :いろいろとまだ、疑問、質問が尽きないと思いますけれども、弦理論と、それからDブレーンの発展を期待して、終わりたいと思います。

坂東 :本当はコーヒーの用意をしたかったんですが、今朝だけは、この辺り YKIS の準備をやっているので出せません。お茶は飲めます。明日からはお菓子も出します。



ph03 坂東/橋本/川村//橋本/中野/田中-, 坂東, 南部// 九後/亀淵//大貫, 南部, 田中-, 坂東/亀淵