素粒子論の流れと研究状況

発表・本稿の文責: 東 武大 (素粒子論)、記録者: 加藤弘隆・入江広隆、座長: 溝内健太郎

2004 年 3 月 4 日 10:30-11:15

1 Introduction

1.1 素粒子論の目標

素粒子論の究極の目標は、一言で言えば『自然界の構成要素・相互作用を理論的に解明すること』である。現在、自然界の相互作用は「弱い相互作用」、「強い相互作用」、「電磁相互作用」そして「重力相互作用」の 4 つに大別される。最終的には、これらの自然界の相互作用を全て統一的に記述することを目指している。そのような『究極の理論』のことを、素粒子論では"Theory of Everything" (TOE) と呼ぶことがある。

重力相互作用以外は 1970 年代に「標準模型」によって記述されている。これは $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ をゲージ群とするものであり、実験結果と非常に高い精度で一致するものである。しかしながら、標準模型は以下の点で問題があると考えられており、標準模型は『究極の理論』とは考えられていない。

- 標準模型にはパラメーターが 18 個存在する。これは、実験データのインプットによって決定されるものであり、理論的にこれらのパラメーターを決定する指導原理が存在しない。
- ニュートリノの質量が 0 になってしまう。スーパーカミオカンデの実験でニュートリノに質量があることが判明したが、標準模型はこの実験結果と矛盾する。
- 標準模型は、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用を統一するが、重力相互作用を含んだ枠組みになっていない。

特にスーパーカミオカンデの実験結果は、標準模型を超えた物理が『存在しなくてはいけない』ということを、実験的に示したものである。現在では、多くの素粒子論の研究者が標準模型を超えた物理に向けて研究を重ねている。

標準模型を超えた物理に向けての方向性は、次の二つに大別される。

超弦理論によるアプローチ
超弦理論は、重力をも統一する理論の最も有力な候補と考えられている。標準模型と違って、超弦理論はパラメーターを一つも含まない理論である。超弦理論は 10 次元時空で理論的整合性をもった理論であるが、標準模型の 4 次元時空・ゲージ群・世代数など全てが超弦理論から理論的に導出できる可能性を持っている。超弦理論は多くの研究者を魅了し、現在盛んに研究されている。

超弦理論のエネルギースケールは 10^{19} GeV と非常に高いものであり、そのようなエネルギースケールに到達することは不可能である。従って、超弦理論の研究は主に数学的な理論の整合性を拠り所にして遂行されている。このような formal な側面の研究は、hep-th に主に投稿されている。超弦理論の発展には、主に次の 3 つの時期に大別される。

- 第 1 期ストリングブーム (1980 年代後半):
  この時期には、超弦理論の摂動論的な側面が明らかになった。特に、重力のエネルギーに無限大の発散がないこと、10 次元時空を 4 次元にコンパクト化することで、標準模型を再現する見通しが立った

ことは衝撃的な発見であった。しかしながら、4 次元にコンパクト化する方法は無限個存在し、故でどれが本当の真空であるのかを理論的に決める指導原理に欠けるという問題点に直面した。

- 第 2 期ストリングブーム (1990 年代後半):
  この時期の大きな成果は、超弦理論の非摂動論的な側面が明らかになったことである。特に、D-brane と T/S 双対性の発見によって、10 次元時空で無矛盾に定義できる 5 つの超弦理論 (IIA 型、IIB 型、I 型、$SO(32)$ 混成弦、$E_8 \times E_8$ 混成弦) が互いに繋がっていることが分かった。また、超弦理論の摂動論に依らない構成的定義が提唱されたのもこの時期である。

- 第 3 期ストリングブーム (????):
  現在では、第 2 期ストリングブームは終わったようである。ゲージ理論の発展になぞらえれば、次の第 3 期ストリングブームは超弦理論の構成的定義が完成する時期であると予測される。

現象論的アプローチ
超弦理論のような formal な研究テーマと対比して、実験データを拠り所にして標準模型を超えた物理を構築する方向性を「現象論」と呼ぶ。現象論の分野もこれまでに多くの論文が出され、大きな発展があった。現象論のテーマとして主なものに次が挙げられる。

- 大統一理論 (GUT = Grand Unified Theory):
  標準模型では、$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ をゲージ群と見做していたが、これを部分群に含むようなより大きい単純リー群 G をゲージ対称性と見做す方向性である。最も典型的な候補は $G = SU(5)$ であるが、その他にも $SO(10)$、E_6 などの大統一理論も考えられている。

- 階層性問題 (hierarchy problem):
  階層性問題という言葉は、次の二つの意味で用いられる。

  * 世代間のクォークの質量の階層性問題。$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$、$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$、$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ の質量の間には大きな違いがあり、これをどう説明するかという問題である。
  * 重力相互作用と、標準模型のエネルギースケールの階層性問題。重力相互作用のエネルギースケールは 10^{19} GeV なのに対して、標準模型のエネルギースケールは 200 GeV 程度であり、これがどう自然に解釈されるかという問題である。

1.2 素粒子論研究室の構成

2003 年 4 月より、総合人間学部、人間・環境学研究科の素粒子論研究室[1]が理学部の素粒子論研究室と統合することとなった。それ以降、研究室会議、セミナーをはじめとする諸々の活動を合同で行なっている。本稿で紹介する素粒子論研究室の研究成果も、北白川と吉田南の両方を含めて報告するものとする。吉田南の統合によって素粒子論研究室のメンバーは大幅に増え、現在では 45 人 (北白川 32 人、吉田南 13 人) である。

2 素粒子論研究室の今年 1 年の研究

自然界の相互作用の理解に向けて、多くの研究者が様々な角度から研究を遂行している。研究内容は超弦理論や場の理論などの formal な研究 (hep-th) と、現象論 (hep-ph) の二つに大別されることが多い。しかしながら、後でみるように両者の分野に跨る方向性も多く存在しており、本稿では hep-th と hep-ph と

[1] 以下、吉田南。これと対比して、理学部の素粒子論研究室を、北白川と書く。

いう分類は行なわないものとする。その代わり、最近素粒子論の分野で耳目を集めてきた個々のキーワードについて簡単に説明を加え、素粒子論研究室が行なってきた研究内容を紹介する体裁をとることにする。但し、それぞれの研究テーマが互いに関連していることも多くあるので、下記のように細分化をしたとしてもうまく研究内容を分類しきれていない点をご容赦頂きたい。

2.1 Dijkgraaf-Vafa 対応

まずは、2002 年後半に世界的に爆発的ブームを起こした Dijkgraaf-Vafa 対応について解説を加える。これは、one-matrix model と 4 次元 $\mathcal{N} = 1$ 超対称性ゲージ理論の間の「双対性」である。この「双対性」は、超対称性ゲージ理論で幾つかの仮定の下で求めた F-term の低エネルギー有効理論が行列模型と等価であり、特にゲージ理論の prepotential が行列模型の自由エネルギーと一致するというものである。この双対性は、hep-th/0206255,0207106,0208048 の論文で Dijkgraaf と Vafa によって提唱されたものであった。彼らの議論では、topological string theory を介してこの双対性が理解されていた。両者の対応を、topological string theory を介さず直接場の理論の議論だけで説明したのが hep-th/0211170 の Cachazo, Douglas, Seiberg, Witten の論文である。この論文では、Dijkgraaf-Vafa 対応を、両者の理論が同一の Schwinger-Dyson 方程式を満足することを示すことで説明した。Dijkgraaf-Vafa 対応に関しては非常に多くの論文が投稿されたが、私たちの素粒子論研究室でもこれに関連した仕事が出された。

- 川合・黒木・森田: (hep-th/0303210)
  Dijkgraaf-Vafa 対応の起源を解明。非可換 superspace 上での場の理論と行列理論が完全に等価に記述できることを証明した。そして、その非可換 Superspace の可換極限を取ることで上述の等価性が導かれることを示した。

- 川合・黒木・森田: (hep-th/0312026)
  hep-th/0303210 での等価性を更に、ゲージ場が複数存在し、fundamental matter や bi-fundamental matter の結合した系について証明した。更に、hep-th/0303210 では F-term 中の一部の operator にだけ成り立っていた等価性が実は F-term に現れる operator すべてに成り立つことを示した。

2.2 pp-wave 背景上の弦理論

次に、2002 年前半に爆発的なブームを引き起こした pp-wave 背景上の超弦理論について解説をする。pp-wave とは、"plane-fronted gravitational waves with parallel rays"の略である。pp-wave のブームの引金となったのは、以下の二つの論文である。hep-th/0202021 では、Berenstein, Maldacena, Nastase は IIB 型超重力理論には最大の超対称性 (32 個) を持つ重力波解が存在して、それが $AdS_5 \times S^5$ の Penrose limit として得られることを示した。また、hep-th/0112044 では、Metsaev が IIB pp-wave の背景では RR-flux が存在するにも拘らず、light-cone gauge で超弦理論として厳密に解けるということを示した。このような、pp-wave 解に基づく AdS/CFT 対応のことを、特に BMN 双対性と呼ぶ。BMN 双対性の長所としては、次の二点を挙げることができる。一つは、超弦理論側が厳密に解けることである。もう一つは、ゲージ理論側の計算が、almost BPS operator に関しては BPS でなくても比較的容易である点である。こうして、pp-wave について爆発的に多くの論文が生産されるに到った。

Dijkgraaf-Vafa 対応や pp-wave のように、2002 年の素粒子論の研究の世界的な傾向として、半年以下の短い期間で爆発的なブームを引き起こす現象がみられた。両者のテーマは、かつてほどの爆発的な盛り上がりは見られないものの、現在でも研究が進められている。

私たちの素粒子論研究室から生まれた、pp-wave に関連する仕事は以下のとおりである。

- 浅野・[関野・米谷]: (hep-th/0308024)
  Dp-brane 背景時空 ($p < 5$) の中の超弦理論に対してある種の Wick 回転を行い、(horizon 近傍領域

の) 境界上の 2 点を結ぶ光的測地線の周りで理論を展開し、2 点間の散乱振幅を求める一般的方法を与えた。そして、その振幅が境界上の $(p+1)$ 次元ゲージ理論のある種の演算子の 2 点関数を与えるという予想を提唱し、それに基づきゲージ理論の性質を議論した。

- 村松:
  Maldacena, Sheikh-Jabbari, van Raamsdonk らが予想した pp-wave と呼ばれる特殊な背景時空上の transverse five-brane 解を，改良された平均場近似 (ガウス近似) を用いることで，具体的に構成すること目指した。本年度の解析では，空間的に 5 次元的に広がった励起が非摂動効果として現れるということを，leading order の計算から定性的なレベルで確認した。

- 杉山・[吉田・Shin]: (hep-th/0306087)
  maximally supersymmetric pp-wave 背景場での supermembrane の解析の一つとして、11 次元 supermembrane を dimensional reduction して得られる、$N = (4, 4)$ IIA 型超弦理論の性質を調べた。light-cone gauge での作用は massive theory の構造をしている。そこで理論の整合性となるモジュラー不変性を調べ、開弦セクターとしての境界状態および D-brane の分類を行った。その際に massive theta function が現れるが、その構造をより詳細に調べることにより、一般的な pp-wave 背景場での超弦の分類を行った。

2.3 行列模型

行列模型は、1990 年代後半に超弦理論の摂動論に依存しない定式化の有力な候補として提唱されたものであり、第 2 期ストリングブームにおける最も大きな成果の一つである。超弦理論は、10 次元で無矛盾な理論は 5 種類であるが、これを 4 次元にコンパクト化する方法が無限個存在するので、どれが真の真空であるのかが分からない。従って、摂動論に関しては現実世界に対する予言能力を持ち合わせていないことになる。こうした問題を解消するために、現在超弦理論は摂動論に依らない構成的な定義が必要な段階に来ている。

1990 年代後半には、様々な行列模型による超弦理論の構成的定義が提唱された。そうした試みの中に IIB 行列模型 (hep-th/9612115) がある。これは石橋、川合、北沢、土屋によって提唱された行列模型であり、次の作用で定義されるものである。

$$S_{IIB} = -\frac{1}{g^2}\mathrm{tr}\left(\frac{1}{4}[A_\mu, A_\nu]^2 + \frac{1}{2}\bar{\psi}\Gamma^\mu[A_\mu, \psi]\right). \tag{1}$$

IIB 行列模型は、10 次元 $\mathcal{N} = 1$ の super Yang-Mills 理論を 0 次元に落としたものである。上記の作用自体は場の理論としては 0 次元であるが、10 次元時空の座標はボゾンの行列 A_μ の固有値として解釈される。IIB 行列模型では、行列 A_μ は時空の座標のみならず物質場の多体系をも表わすものである。その意味で、IIB 行列模型は D-instanton の作用とは全く違うものであり、超弦理論の第二量子化の概念である。IIB 行列模型に関しては、重力相互作用の解釈、4 次元時空の再現など様々な興味深い事実が明らかになっている。例えば、一般座標変換不変性は、ボゾンの行列 A_μ の固有値の巡回についての不変性として解釈される。また、4 次元時空を再現する方法として、branched polymer とのアナロジーや平均場近似などについて調べられてきた。

ここで、素粒子物理学の発展について重要な役割を果たしてきた 3 つの概念である、行列模型、超弦理論、ゲージ理論の関係について述べておこう。特に第 2 期ストリングブームにおいては、これらの概念の関係について興味深い事実が得られた。先に述べた Dijkgraaf-Vafa 対応は one-matrix model と 4 次元 $\mathcal{N} = 1$ super Yang-Mills 理論を関係付けるものである。また、AdS/CFT 対応は、$AdS_5 \times S^5$ 上の IIB 型超弦理論と 4 次元 $\mathcal{N} = 4$ super Yang-Mills 理論の間の対応である。IIB 行列模型もまた、三者の関係について重要な帰結を与えるものである。IIB 行列模型は、もとを正せば 10 次元 $\mathcal{N} = 1$ super Yang-Mills 理論を 0 次元に落とすことで定義された。そして同時にこの作用は IIB 型の超弦理論の Schild form の行列正則化

(Poisson bracket を行列の交換子で置き換えること) でも得られる。これまで述べた関係を以下の図に纏めておく。今後の素粒子論の研究においても、これらの 3 つの分野は互いに相乗効果をもたらしあいながら進展を続けるであろう。

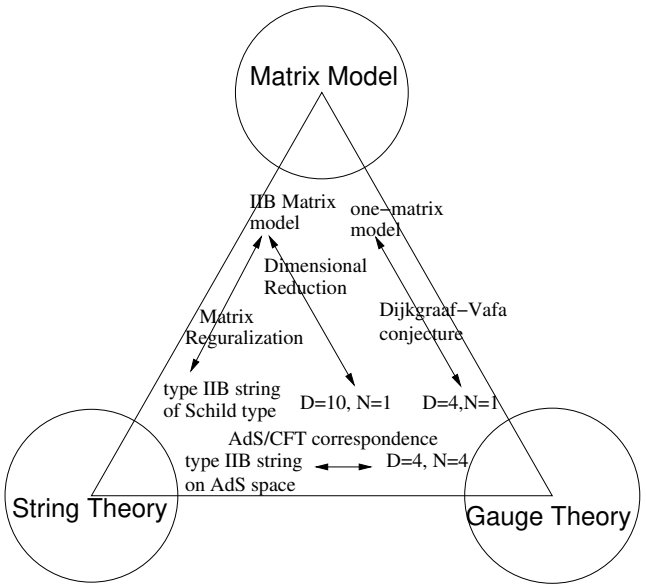

図 1: 行列模型、超弦理論、ゲージ理論の間の関係図

私たちの研究室では、行列模型に関して以下の方向で研究を行なっている。

- 東・Bal・[永尾・西村]: (hep-th/0401038)
  曲がった空間を古典解に持つ行列模型の toy model として、3 次元の Chern-Simons 項を含んだ行列模型について Monte Carlo シミュレーションを遂行した。その結果、古典解の fuzzy sphere の半径の変化が 1 次相転移を伴うこと、及び large-N の極限では one-loop の寄与が支配的であることがわかった。

- 花田・川合・黒木:
  IIB 行列模型に large-N くりこみ群の考え方を適用し、その effective potential を求めることによって、large-N 極限でどのような配位が支配的であるかを議論した。技術的な理由により、行列の交換子が単位行列に比例する場合に限定せざるを得ないが、4 次元的な配位が最も支配的であるという示唆を得た。

- 花田・川合・黒木・松尾 (善):
  この研究では、non-critical string における D-brane の効果が matrix model にどのように現れるかについて調べた。one matrix model について、D-brane に対応すると考えられる instanton の効果を、直交多項式の方法を用いて求めた。また、この instanton の効果が model の詳細によらない universal な量であることを示した。

2.4 弦の場の理論

弦の場の理論とは、弦理論に現われる無限個の粒子を第二量子化した理論である。弦の場の理論は、古くは 1974 年に加来・吉川によって提唱されたものである。1986 年には弦の場の理論に関して以下の二つの大きな発展があった。一つは Witten による CSFT(=Cubic String Field Theory) の提唱である。これは、共変的な開弦の場の理論であり、その名が示すように場の 3 次で定義されるものである。もう一つは

畑、伊藤、九後、國友、小川による HIKKO 型弦の場の理論であり、昔この研究から生まれた成果である。これは場の 3 次で定義されるものであり、開弦だけでなく純閉弦をも表わすものである。また、2001 年には hep-th/0106010 で Rastelli, Sen, Zwiebach によって VSFT(=Vacuum String Field Theory) が提唱された。これは物理的な開弦の真空が存在しない弦の場の理論である。そして、開弦の真空は理論の古典解として現われると期待されている。

弦の場の理論を用いた研究として、特に以下の二つが世界的に精力的に研究された。一つは tachyon 凝縮である。昔は、tachyon がある理論は理論として不完全であることから、GSO 射影によって取り除かれてきた。しかし、tachyon 凝縮のメカニズムが明らかになってから、tachyon のある理論は単に不安定であるだけで、やがては安定な真空に到達するものと考えられるようになった。その意味で、tachyon 凝縮は多くの研究者の関心を集めるに到った。これに関する Ashoke Sen の予想は次のようなものである。

- tachyon 凝縮の後、時空を埋め尽くす D25-brane は完全に消滅し、開弦の励起が起こらない。
- D25-brane の消滅した非摂動的な真空の上での tachyon potential は D25-brane tension とちょうどつりあい、相殺する。

もう一つ、世界的に注目されたのは、Rolling Tachyon と呼ばれる現象である。これは、弦の場の理論の時間依存する古典解を構成するものである。つまり、tachyon が運動方程式に従って、ポテンシャルを転がり落ちるものである。

弦の場の理論に関して、以下の研究がなされてきた。

- 畑・藤田 (麻): (hep-th/0304163)
  D-brane の崩壊過程を表す古典解を弦の場の理論の中で構成する試みを行った。弦の場の理論の力学変数である string field を小さな自由度に制限する”近似”を用いたが、得られた近似解は時間と共に振動しながら発散するという、期待とは異なるものであった。

- 畑・藤田 (麻): (hep-th/0403031)
  この研究は、上記と同じ『不安定 D-brane の崩壊過程を表す古典解の構成』の問題を、VSFT を用いて行ったものである。VSFT においては D-brane の崩壊過程を表すと期待される古典解を近似を用いずに構成することが出来た。しかも、この古典解の各成分は円周上に無限個の電荷が置かれた統計力学系の分配関数と見なす事ができ、Monte Carlo simulation 等の統計力学の解析手法を応用することが出来る。その結果、解の持つ一つのパラメータを適当な値に取ることにより、望ましい時間依存性を持つことが可能であることがわかった。

- 畑・古結・寺口: (hep-th/0305010)
  VSFT のマスレスベクトル状態が通常のゲージ構造、つまり、正しいゲージ変換性と横波条件を備えているかどうかについて研究した。結果として期待されるゲージ変換性が導かれるが、一方で横波条件に関しては同様の有限項が残るにも関わらず、条件は現れない。これについては、より一層の理解が望まれる。

- 古結・寺口:
  BSFT は BV-formalism を用いて形式的に定義された弦の場の理論である。その作用はいくつかの例外を除いて計算されていない。この研究では厳密に解ける二次元場の理論を用いて、異なる弦の場の配位に対する弦の場の作用を調べている。この研究は、弦理論の時間に依存した古典解である Rolling Tachyon 解への応用や BSFT 自体の深い理解へ繋がることが期待される。

- 久保:
  超弦の場の理論の検証のため、ブレインや Calabi-Yau 多様体上における作用の摂動的計算を行った。また、超弦理論での超重力作用を導くのに必要な、超弦の場の理論での閉弦やループ計算の取り扱いについて考察した。修士論文では、Berkovitz の超弦の場の理論のモデルに基づいて D ブレイン上の有効作用の計算を行い、摂動の高次の項や非可換ゲージ場の場合の計算結果を出した。

2.5 弦理論的宇宙模型

2003 年 4 月、宇宙論の発展の上で大きな成果があった。WMAP(=Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) は、COBE(=cosmic background explorer) を超える精密測定を行なったものであり、その成果を要約すると以下のとおりである。

- 宇宙背景輻射についての精密な全天マップを得た。
- 宇宙の年齢を精密に測定した (現在、137 億年 $\pm 1\%$)。
- 宇宙の物質の構成比を明らかにした (dark energy 73%、cold dark matter 23%、原子 4%)。
- 星が最初に輝いたのは、ビッグバンから 2 億年後である。
- インフレーション宇宙の有力な証拠を得た。
- 温度揺らぎの精密な測定を行なった。

私たちの研究室でも WMAP に関連した研究がなされたが、私たちの研究室に特有なのは超弦理論の効果を含めて議論を行なった点である。以下、(WMAP に直接関係しないテーマも含めて) 弦理論的宇宙模型に関する成果を列挙する。

- 福間・三輪・[高橋 (一)]: (hep-th/0304012)
  2 次元重力は場の理論の範囲内で量子化が可能であり、この系におけるエントロピーバウンドの解析は 4 次元量子重力を扱う際に重要な示唆を与えることが期待される。これまで Bousso のバウンドの導出方法は 2 次元には適用できないものとなっていたが、この研究では 2 次元系におけるワイル・アノマリーの効果を正しく取り入れることで、Bousso のバウンドが 2 次元重力においても実際に導出できることを示した。

- 福間・三輪・河野: (hep-th/0307029,0312298)
  ストリングの効果が宇宙背景輻射 (CMB=Cosmic Microwave Background) の大スケール側のゆらぎに影響を与えうるかどうかの検討を行った。とくに我々は、ストリング理論が時空の最小長さの存在を示唆することを動機として、大スケール側で小さなゆらぎを与えるために短距離のカットオフが満たすべき条件を詳細に解析した。その結果、インフラトンのモードに対するカットオフの効果が消える時刻と、モードが Hubble ホライズンを抜け出す時刻の関係に応じて、ゆらぎのパターンが大きく変わる事を示した。また、空間の角度方向に非可換性を導入するモデルが、大スケール側で実際にゆらぎを大きく抑えることを見出した。

- 福間・川合・[二宮]: (hep-th/0307061)
  温度のみならず時空の曲率にも string scale の上限があると仮定した時、宇宙がビッグバンとビッグクランチを繰り返す cyclic universe の描像が自然に導かれる事を示した。この描像では、一つの周期のビッグクランチと次の周期のビッグバンは、string scale の温度と曲率を持つ Hagedorn 宇宙で滑らかにつながっている。我々はさらに、Hagedorn 宇宙の時期に入る時とそこから出る時に生成されるエントロピーと現在の宇宙のエントロピーを考慮する事により、「Planck スケールで誕生した宇宙は、これまでに約 40 回の膨張・収縮を繰り返し、現在では、今後ビッグクランチを起こさない最後の周期にいる」という描像を得た。また、この模型が曲率の摂動に対してスケール不変なスペクトラムを与える事を示した。

2.6 理論の対称性の性質

素粒子物理学において、理論の対称性は本質的な概念である。ここでは、理論の基本的な対称性に関して、場の理論・超弦理論の観点からなされた仕事に関して紹介することにする。

- 青山 (秀)・小紫:
  quant-ph/0106037 において、1 次元量子力学系における、N 重超対称性が提唱された。N 重超対称性とは、supercharge Q が運動量の N 次の多項式である超対称性のことをさす。これを多次元系および他粒子系に拡張することを目指している。また、従来の Type-A を超える Type-B と呼ばれる拡張模型を詳細に調べている。

- Bagnoud, [Carlevaro]:
  超弦理論の無限次元代数について調べている。IIB 型超弦理論についてはいくつかの結果が知られているが、これを混成超弦理論に拡張することを試みている。これによって、混成弦のゲージ群 $SO(32)$ や $E_8 \times E_8$ がどのような役割を果たすのか、M 理論のオービフォルドとの関係でどのように理解できるのかを考察している。

2.7 超弦理論の現象論的側面

超弦理論が最終的に標準模型を再現して全ての自然界の相互作用を統一する究極の理論であるためには、標準模型の様々なパラメーター (例えば、gauge coupling、湯川 coupling、FI(=Fayet Iliopoulos) term など) がどのように再現されるかを理解することは非常に重要な問題である。現在、これらの物理量は超弦理論の dilaton 及び moduli 場の真空期待値で決定されると考えられている。こうした研究は、縮退している超弦理論の真空 (低エネルギーにおける物質場や gauge 群) の決定に繋がるもので、非常に興味深いものである。このように、私たちの素粒子論研究室では超弦理論と現象論の両方の領域に跨る研究が産み出されている。

- 桧垣・小林: (hep-th/0304200)
  (Type IIB orientifold construction を通した)4D Type I string models の枠内で、twisted moduli の真空期待値の決定の機構を議論した。他の moduli の真空期待値にくらべて、twisted moduli は、安定化されることが容易であることを示した。

- 小林・[Lebedev]: (hep-th/0304212)
  Heterotic orbifold models において、湯川結合の強さをほぼフルな moduli を含む形で計算した。特に、湯川結合の CP phase の起源について注目し、その起源としては、2 階反対称テンソルに対する moduli 場の真空期待値のみが湯川結合の物理的な CP phase に効くことを示した。

- 小林・[Choi, Kim, Kim]: (hep-ph/0305024)
  現実的な quark/lepton 質量行列を導きつつ、縮退した squark/slepton masses を導くような模型を考え、flavor changing neutral currents の実験からの制限を議論した。

- 小林・[瀬戸]: (hep-ph/0307032)
  4 次元 type I string models の枠組みで dilaton/twisted moduli の振る舞いを議論し、D-term inflation が実現可能であることを示した。

- 小林・[Nibbelink, Hillenbach, Walter]: (hep-th/0308076)
  超弦理論における 10 次元の current anomaly が、orbifold のようにさまざまな singular point があるような場合について、local に相殺されていることを示した。

- 桧垣・小林・[川村・中野]: (hep-ph/0308110)
  超対称性の破れに伴い、D-term を通して、新たな効果が現れる。この研究では、twisted moduli から induce される pseudo-anomalous U(1) D-term を通した SUSY breaking terms を計算した。

- 桧垣・小林・[川村・中野]: (hep-ph/0311315)
  Kahler potential への nonperturbative correction により、dilaton の真空期待値が決定される可能性を調べた。

- 桧垣・小林・[瀬戸] : (hep-ph/0402200)
  string から導かれる 4 次元有効理論において、D-term inflation scenario を議論した。ここでは、dilaton field の Kahler potential への nonperturbative correction の形を仮定し、D-term inflation の現実的な形で実現するような可能性を調べた。

2.8 余剰次元

余剰次元もまた、超弦理論・現象論の双方の観点から興味深いテーマの一つである。超弦理論では、4 次元を超えた余剰次元は自然に導入されるべきもので、理論が整合性を持つためには 10 次元時空で定義されなければいけなかった。一方、現象論の観点でも余剰次元は非常に興味深い問題である。brane world scenario とは、我々の世界が高次元の中に埋め込まれた D3-brane であると考えるものである。もとを正せば、brane world scenario は重力相互作用と標準模型のエネルギースケールの間の階層性問題、及びクォークの世代間の質量の階層性問題を解決するための手法として提唱されたものである。

余剰次元を導入する考え方の歴史は非常に古いものである。1921 年に、Kaluza-Klein 理論が提唱されたが、これは電磁相互作用と重力相互作用の統一のために、5 次元時空を導入して、電磁相互作用のベクトルポテンシャルが、5 次元時空の計量の 5 次元目に埋め込まれていると考えるものである。

また、超弦理論の観点からも brane world scenario は興味深い問題である。超弦理論あるいは M 理論から brane world を実現する方法として、G_2 多様体を経由する方法、heterotic M 理論を経由する方法、intersecting brane を導入する方法の 3 とおりがある。

私たちの研究室でも、余剰次元・brane world scenario に関して現象論・超弦理論双方の観点から研究が進められた。

- 松田 (哲)・[関]: (hep-ph/0307361)
  本研究は、宇宙定数と余剰次元空間の真空エネルギーの関係を詳しく追求し、特に正則化によって得られる有限真空エネルギー値の正負の分析、余剰次元空間のモジュライ依存性の分析 (すなわち、その空間はどのような大きさか、またどのように歪んでいるか、そしてその物理的効果は、等を含む分析) を遂行し、宇宙定数の定量的解答を目指して研究を進めている。

- 村上 (豊):
  一般に intersecting brane では anomalous な U(1) gauge 理論が現れることがわかっているが、場の理論の知識から 1-loop で FI D-term が生成されることが知られているので、摂動論的な仕組みがわかっている超弦理論での計算を試みている。低エネルギー作用からすでに多くのことがわかっているので、GS 形式や、NSR の covariant 形式、boundary state の観点等、いろいろな手法による計算をし、またその結果の Heterotic string 理論 ($\langle D \rangle \neq 0$) や、type I 弦理論 ($\langle D \rangle = 0$) で知られている例との比較、ブレーンの交差角の依存性と non-SUSY などの理論への拡張等、進行中。

- 村上 (豊):
  ヘテロティック弦理論に flux が入ったものの M 理論への拡張がどのようになるのか、そして計量や flux がどのような対応をしていて moduli がどのように固定されるかを明らかにしようとした。

- 山下・[波場・細谷・川村]: (hep-ph/0401183,0401185,0402157)
  5 次元方向を S_1/Z_2 にコンパクト化したようなモデルでは、境界条件により対称 性を破ることができる、ということが知られている。一方、ゲージ場の 5 次元方向の成分は、4 次元有効理論ではスカラーとして現れ、それが VEV を持つとさらに対称性を落とすことができ、場合によってはゲージ群

の rank も落ちることがある。これを使って、electroweak symmetry breaking を (dynamical に) 実現するモデルや、このスカラーの有効ポテンシャルの簡単な計算法を提唱した。

2.9 大統一理論

次に、大統一理論に関して説明を行なう。大統一理論では、ゲージ群 G を標準模型の $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ を部分群として含むような、より大きい群であるとして考える。最も典型的な大統一群の候補は $G = SU(5)$ であるが、さらに大きな大統一群の候補として、$G = SO(10), E_6$ などが挙げられる。特に、超弦理論の $E_8 \times E_8$ 混成弦との関連でいえば、E_8 群は E_6 を部分群として含んでいる。また、E_6 例外群の Dynkin diagram は対称性の高い形をしているので、その意味でも E_6 GUT は非常に興味深い試みであると考えられる。

また、GUT の候補として、異常 $U(1)$ によるものを挙げることができる。このモデルは、一般的な相互作用、つまり対称性で許される相互作用は繰り込み不可能な項まで全てを含み、不要な項を人為的に落としていない。そのために、整数あるいは半整数の $U(1)_A$ チャージを決めるだけでモデルの定義は終わり、あとは、超対称性の破れの全てのスケール、つまり大統一ゲージ群の破れのスケールや大統一群を破るヒッグスの質量スケールなどが自動的に決まってしまうのである。これに関して、以下の研究成果が挙げられた。

- 前川・山下: (hep-ph/0303207)
  以前提案した E_6 ゲージ群を持つヒッグズセクターより少ない場で doublet-triplet splitting が実現することができることを示した論文。場の数が少ないため、ゲージ結合定数が摂動が信用できないほど大きくなったりしないことがわかる。

- 前川・山下: (hep-ph/0304293)
  標準模型のゲージ群を $SO(10)\times U(1)$ という群で統一すると、doublet-triplet splitting が missing partner mechanism で実現できることを示した論文。ここでの $SO(10)$ は普通の意味での $SO(10)$ 大統一群とは違うので、flipped $SO(10)$ と呼んだ。

- 前川・山下: (hep-ph/0305116)
  Witten が提唱した sliding singlet mechanism はそのままでは超対称性の破れを考えるとうまくいかないが、標準模型のヒッグズを大統一群を破るヒッグズに統一することにより、うまくいく機構になることを指摘し、それが、一般化できることを示した論文。特に E_6 大統一理論にその一般論を応用した。

- 前川・山下:
  non Abelian horizontal symmetry を E_6 大統一理論に導入すると、SUSY flavor problem が自然に解決できることを以前の論文の中で指摘したが、E_6 のヒッグズセクターにもその non Abelian horizontal symmetry を導入することができるかどうか、という可能性を吟味した。

- 前川: (hep-ph/0402224)
  なぜ、クォークの混合より、レプトンの混合の方が大きいか、ということが E_6 大統一理論ではかなり一般的な仮定の下で自然に理解されることを示した論文。更に、non Abelian Horizontal symmetry を導入すると、SUSY Flavor problem も解ける (特に大きなレプトン混合に起因する問題も大きなレプトン混合を実現する E_6 の特徴的な構造で解決する) ことを指摘した。

2.10 QCD とスピン物理

摂動 QCD は、素粒子論と核理論の両方の領域に跨る分野であり、強い相互作用について深い理解を得る上で重要な課題である。摂動 QCD に関する最近のトピックとして、スピン物理や LHC(=Large Hadron

Collider) 領域における Higgs 生成の QCD 効果などを挙げることができる。

スピン物理に関しては、核子のスピンの構成要素がいかに担われているかを理解する上で興味深い問題である。また、LHC 実験は 2007 年に立ち上げられる予定であり、14TeV の非常に高いエネルギー領域についての知見を得ることが可能となる。LHC 実験では、Higgs 粒子や超対称性粒子などの観測が期待されており、これらは質量の起源 (標準模型における自発的対称性の破れ) や統一理論の構築のうえで重要である。

摂動 QCD に関係した研究は以下のとおりである。

- 植松・馬場: (hep-ph/0202142, 0307136)
  スピンの自由度を考慮した、強い相互作用のダイナミックスを摂動論的 QCD の枠組みで調べている。特に、光子の偏極構造関数に注目し、非偏極の場合には non-leading であったツイスト 3 の効果を、仮想光子の g_2 構造関数の場合に明らかにした。また同時に、仮想光子の構造関数に対する標的質量効果を求めた。

- 植松・馬場:
  AdS/CFT 対応を用いて、弦理論における構造関数をスピンの自由度まで含めて追求している。

- 植松・馬場:
  ハドロン・コライダーでの物理に関係して、LHC 領域での QCD の諸問題を KEK の数値物理のグループと考察。

2.11 物理学と他分野の融合

最後に、物理学と他分野の融合について触れておくことにする。物理学で用いられる手法は、他の学術分野にも応用されることがある[2]。そのような学際的な研究を行なっているのが、青山秀明氏である。青山氏が行なってきた学際的な研究分野として、経済物理学、言語物理学の二つを挙げることができる。

経済物理学とは、物理学で用いられる手法を経済のメカニズムに応用するものである。個人所得や、企業の大きさを示す量である資本、従業員数などの量の分布や変動法則を現象論的に調べ、それらの基本法則を明らかにするために研究を行っている。これまでに、Pareto 則 (企業のサイズ分布) および Gibrat 則 (企業の成長率の揺らぎ) と呼ばれる法則が高精度で成立していることが判明していて、またそれらの相互関係などが明らかになっている。また、青山氏は 2003 年 7 月 15-16 日にかけて、基研研究会 (YITP-W-03-03) 『経済物理学-社会・経済への物理学的アプローチ』の運営を務めた。

言語物理学とは、言語学の専門知識と、物理学における自然に対するアプローチを融合させたものである。特に英語の散文・韻文における音節について数学的な構造を見つけるべく、John Constable 氏と共同研究を遂行している[3]。

3 Conclusion

以上、素粒子論研究室で今年 1 年間行なわれてきた研究について纏めたが、素粒子論の研究分野は非常に多岐にわたり、多くの人がいろいろな角度から研究を遂行している。また、素粒子論の分野は超弦理論や場の理論の formal な研究 (hep-th) と、現象論 (hep-ph) に二分して分類することが多いが、両者の間に跨る分野も多く見ることができる。全ての自然界の相互作用を統一する『究極の理論』とはどのようなものであるのかは、まだ知られていない。私たちの研究室では、この『究極の理論』を見つけるために努力を重ねている段階にある。

[2] 例えば、元京大理学部の素粒子論研究室所属であった坂東昌子氏は、物理学の手法を用いて交通渋滞のメカニズムを解明しようと試みている。

[3] 詳細は、パリティ vol.18 No. 12 (2003 年 12 月号) p58-61 『"言語物理学"の夜明け』を参照。

素粒子論研究室発表に関する質疑応答

座長 質問があればお願いします。

舟橋 途中で出てきた三角形の図 (本文中の図 1) を見せて頂けませんか？その絵の中に、この世ってのはどのへんにあるんですか？

（会場笑）

舟橋 これ、ちょっと皮肉な表現になってすみませんが、gauge theory 辺りが近いわけなんですか？少なくとも、少々破れていると言っても、我々は例えば standard model である程度この世が書けるなという事については、割と広く認識できるので、(この世に) 近い所はそのへんなのか。(1)(本文中の 2.1 節) の所で、なにか 4 次元の話と matrix model とをつなぐと言われたのは (聞き手が) 期待していた (この世とつなぐ) 話なのかと... (どうもそうではない？)。我々の所 (この世) とつなぐ話を、この絵に盛り込んで、ちょっと説明を加えてくれませんか。」

東 1 つの可能性としては、自分自身も IIB matrix model をやっているという事もあるんですけど、IIB 型行列模型でも 4 次元が自然に出せるという事についていろいろと興味深い事が分かっていて、例えば平均場近似であるとか branched polymer などの手法で 4 次元がダイナミカルに出せるという状況証拠はいくつか得られています。gauge 群とかの理解はまだですが、そうしたことから弦理論から、その本当の ⋯ (「この世の理論」が導出できると思います)。

舟橋 でも、たとえば、4 次元が出ればいいのか。というか、4 次元が出たということは、その理論のこの世を書く理論としての妥当性として、なんか検証できることなんですか？

東 検証というのはどういう事ですか？

舟橋 いろいろなオルタナティブがあるときに、どれが妥当かというのを実験的に検証するというような作業を我々はやってきたことがあるわけです。その、4 次元が出ました、この理論も 4 次元が出ましたということは、どれかよい理論をチョイスするときの、検証可能な有効なシグナルなのですか？

東 少なくとも実験的にというのは、もう無理な話だろうと思います。

舟橋 だとすると、最初の質問は... (一体全体どうなるのか？)。この世から (観て)、一番よく書けている世界像はどれだというのの (判別の) 会話をするコンタクトはその絵の中にどこに線が引けるのか、どこに我々はいるのか。あと、重力という困った問題というのもその曼荼羅の中のどこにいるのか。

東 重力という問題に関しては、弦理論に、あとはその構成的定義としての行列模型、この領域で重力という観点は含まれると考えます。重力を含むとなると少なくとも弦理論になって、私の考えでは、弦理論が一番有力的な枠組みだろうと思っています。

舟橋 (改めて)standard model はどこにいるんですか？

東 そうですね。standard model、これはどういったらいいでしょうね。

(会場笑)

谷森 特にないじゃないですか。gauge 理論の話しかしてないんで。

福間 ちゃんと説明します。string theory の低エネルギーの現象として、全ての重力を含む、重力 + 標準模型が全部入っていると思っています。ただし、その下に書いてある AdS/CFT 対応というのは、重力の議論すら、実は普通の Yang-Mills 的な gauge 理論から何か構成できるようなものではないかというものです。ですので、重力というようなそれまでの gauge 理論とは全然違うものだと思っていたものも gauge 理論を用いて構成できるかもしれないという対応が、その下のほうのそのひとつの頂点 (本

文中の図 1 内) です。その対応自身が行列模型を用いると、非常にうまく行くのではないかという風に、多分、上のほうの頂点に matrix model を書いていると思います。

東　もちろん、三角形の位置関係は別に何も意識していませんが。

(会場笑)

舟橋 matrix model では見通しがあるかもしれないですけど、素人としてわかりやすい質問の、standard model はどこにいるという (のはどうなりますか？)。

福間 standard model は、string theory の完全に安定な真空というものがあったときに、もしくは、向ってきてその周りで見て、しかもその低エネルギーの極限を見たときに standard model が実現されるのだと思っています。

舟橋 だと、この世の検証可能なストーリーを作るためには、この string theory を低エネルギー極限で持っていくことと、string theory を支えるためにそれを形而上的にいろいろ整える話と、2 段構えの戦略になるという話ですね。

福間 まあ、そうですね。実際、弦理論というと、普通よく基本的なものは弦だとかもしくは最近は膜だとかいう言い方をしますが、実際その弦を何か記述して弦理論として一番よい力学的変数は何なのかというのが再考察されています。たとえば行列模型のようなアプローチもありますし、gauge 理論で済ましてしまうというようなアプローチもあります。2 段構えです。

舟橋 後半に説明していただいた (9)(本文中の 2.9 節) とか (10)(本文中の 2.10 節) とか言うのは、string theory の低エネルギー極限を見るためのものですか？

福間 まさにそのとおりです。

東　弦理論との関係でいえば、特に E_8 の部分群として E_6 が含まれているので、そういう観点からも E_6 の GUT というのは非常に興味深い課題だと思います。

舟橋 この辺が string theory からこの世に降りてくる (ということのようですね)。

東　そうです。それは 1980 年代に知られた非常に大きな成果の一つだと思います。

舟橋 どうもありがとうございました。

座長 もう時間過ぎましたので質問、特にという質問がなければこれで終わりたいのですけど。

犬塚 ちょっと手短にいいですか？限定的な場合にダイナミカルに 4 次元が選ばれるという話をされたのですけれど、何で選ばれたのかって言うことを物理的な言葉で手短にお願いします。何らかの意味で他の系より安定ですというような言い方をされるとよくわかるんですけど。

東　例えばここに挙げた仕事ではないですけど、平均場近似を用いた仕事だったら、これは 2 年前の教室発表会でも確か話題になったと思いますが、$E = -\log Z$(Z は分配関数 $Z = \int dAd\psi e^{-S_{IIB}}$、$S_{IIB}$ は本文中式 (1) の IIB 行列模型の作用) という意味で自由エネルギーをとって、その一番低いところにいるというのが 4 次元であると見做します。

犬塚 それは何でなのですか。何で 4 次元のところが低いんですか。

東　定性的には、調べたらそうなったというんです。

犬塚 偶然というんですか？

東　少なくとも 4 次元を出すという兆候は、私が知っている限り 3 つあるわけです。ひとつは平均場近似で、もうひとつは branched polymer、つまり (行列模型のボゾンの行列 A_μ の) 固有値分布を潰したら、Hausdorff 次元という概念があって、これが 4 次元になるということです。あと、3 つ目は、さっきここに挙げた方向性で、私の知っている限りでも 4 次元を出すというメカニズムは 3 つあるんですけど、調べたらそうなったということです。

谷森 たまたま 4 次元になったと。

東　たまたまというか。

谷森 必然的ではなく？

犬塚 5 でもよかったわけですか？たまたま、計算した結果 5 になっても計算した人にとって何の不思議もないのですか？

東　まあ、そうですね。もしそうなら、そのモデル自体が悲観的な見方になるのではないだろうかと (考えられます)。逆に、4 次元が出たから、4 次元が出る証拠がいくつも得られたから有力な候補として考えられているのではないだろうかと思います。

座長 はい、ではこれで、素粒子論の発表は終わりたいと思います。