

# 局所場から超ひも理論へ

(現代物理思想の一潮流)

佐藤 均

“Super Symmetric String” Das heisst kleinst Fädchen, die Suche nach  
der Theorie, die alles verklärt

(Comment on the Super symmetric string)

von Hitoshi Satoh

とりわけ現代物理の思想史を眺める際、いかなる漸新なアイディアもその誕生にあたっては冷たい批判にさらされるのが常であり、新アイディアはその誕生をすら歓迎されなかったといつてよいだろう。新しい考えとは正統派から眺めると殆ど常に奇抜なアイディアであることばかりでなく「異端そのもの」だからである。

このことに限れば科学にも宗教やそのほかの人文科学に対しても相当するに違いない。後期量子論が完成していらいこの約半世紀の最も本質的な基礎理論とか原理は言う迄もなく場の量子論すなわち局所場に基づくものでありこれがいわば正統と見なされているのであるがこれにも昔から無限大の困難つまり発散の困難とか異常項アノマリの存在から本質的に逃れることが出来ずいわば泣き所でありつづけた。発散の困難の理由は時空のゆらぎや重力の効果を全く無視したからだとの主張がなされたがこの見解は相互作用の統一を考える際に大変興味深い示唆を与える様に思われる。又、アノマリ(三角形アノマリ、Adlerのアノマリ)は当然発散問題の処理が不完全な為に生じると思われる。つまり量子化するとたちまち保存則又はゲージ対称性がこわれるといった厄介な問題である。カイラルな異常項ではDirac方程式の $\not{\partial}$ と $\gamma_5$ が同时对角化できない為とされる。 $[\not{\partial}, \gamma_5] = 0$ なる非可換関係である。 $\not{\partial} = \gamma_\mu (\partial/\partial x_\mu + ie A \gamma_\mu)$

場の量子論では特殊相対論と量子力学との整合性はかなり容易であったが一般相対論と量子力学とのそれはきわめて至難でありその為完全な量子重力理論はすべての可能性を確かめたのではないとしても、存在しないといえよう。対象がマクロとマイクロであり前者はリーマンの曲率とか測地線といった幾何学的性格が強い為で、計量テンソルを演算子として量子化するといっても仲々一義的に行かないからであろう。

場の中で重力は最も根元的なものに拘わらず統一の面で最後まで待たされているのも量子重力理論が未完の為であり特に局所場の基礎理論に基づく限りうまく行かない様である。それ所かゲージ理論に基づくいわゆる標準モデルを超える様々な試みは例えばGUTの点場の理論には色々なモデルがあっても従来考えていた程には進んでいない様である。その他にも色々行き止まった状態や、自己矛盾を打解するべく登場したのが1985年からはやり出したSUSYつまり超対称粒子の考えと不可分の考えである超ひも理論といういわば異端の理論であるが多くの人々を説得し協力させる力のあるものの様に思われる。「超対称の超ひも」と呼ぶのが正確である。これは明らかに非局所場の考えで全ての粒子を一次元のひも又はリング(閉弦)の複雑な運動を根底に考えるもので当初から紫外発散を排除する等のねらいがあると見られる。そこでは例えば重力子グラヴィトンリングとみだてている。このループは運動によりトーラスを形成するがその

際、局所場の理論ではきわめてたちの悪い紫外発散が自然にカットされる為に大いに有望視されている。モジュール不変性のためループは発散を除去するメカニズムがある。 $(\Delta t \geq \Delta E/\hbar)$  時間の切断) 発散は時空のゆらぎに由来する。(大域的共形不変性)

### 素粒子のイメージとモデル

ここ半世紀の間我々が素粒子に対して抱いてきたイメージは相当めまぐるしく変貌をとげた。電子の様なレプトンをとり上げてみよう。ごく初期は Born の古典電子半径  $e^2/mc^2$  の為に極微な小球とみなされ又 deBroglie の物質波の考えから何かぼーっとひろがったものとも考えられたが Dirac が相対論的量子力学を完成して以来大きさのない点粒子でなくてはならなかったがその強固な立場は長い間、場の量子論で維持されてきた。しかし、有限なスピンを有するために何か円筒や丸棒状のモデルも出現し、ついに Lee, Yang, Salam 等は空間の左右対称性の破れを根拠としてらせん又はねじくぎ粒子のモデルを提唱した。このねじラセンはいわばひも粒子の原型とも見られる。が何人もこのラセンのサイズを云々できなかった。同様に湯川片山の素領域のサイズに対してもそうであった。サイズを指定すれば因果律と低触するからであった。

### 超弦理論に課せられた無数の課題

同理論は theory of everything (TOE) の別名もあるくらいだからその果たすべき任務は殆ど数えきれない。これは明らかに数学先行型のサイエンスでありその実験的証明は今のところ全くないといってよい。だからといって形面上学なんかでもない。先ず考えられるのは点場による GUT の点場理論では出せなかった全部とまでは行かなくても大半の重要な素粒子の質量スペクトルを与えなくてはならないし、又全ての力、相互作用 (勿論重力も含めて) を統一しなくてはならない。そればかりでなく殆ど全ての基本的な物理常数をも算出可能でなくてはならない等々実に大変な事である。こんな事が今世紀中に出来る等と誰も信じ難いのである。その数学はとりわけモダンな GUT の点場理論以上にスマートな群論や、トポロジーなどでないといけない。今何故超弦でなくてはならないのか。その答えは今それに代わるものがないからだろう。それにしてもそんなに早く自然の最後の門戸が開くとは信じ難いのである。それを実験的に証明するには超大型加速器のエネルギーから考えて200年も待たなくてはならないだろう。米国の SSC 加速器 (超電導超大型衝突器) の稼働が期待され、予言された SUSY 超対称性粒子パートナーの一つ\*でも二つでも見つければ同理論を支える根拠が得られるであろうがこれもむづかしい。( \*たとえばフォティノー)

少しでも成功すれば一般相対性理論以上に時間空間に対する革命的な地見が得られるかも知れない。従って宇宙論殊にそのきわめて初期への解明へ貢献するだろう。超対称性がごく初期に破れているなら SUSY のパートナーは見付けることは不可能であろう。超ひもと SUSY は同義語と考えられ又宇宙のごく初期の Planck 時期は超対称性の時期と同じである。一層のこと

超高エネルギーでの検証はあきらめてずっと低いエネルギーでの理論のそれに従すべきとの意見が多い。例えば低いエネルギーで充分良く一般相対性理論を再現するかどうか、又同じく成功していると思われる現在の標準モデルと一致するかどうか、更にいくつかのモデルのある大統一理論 GUT のうまくいってる部分と一致するかどうかを調べるべきだとの見解には賛同できよう。

超ひもの長さが0の極限で超重力（点場）理論を再現できるとも考えられている。又電弱理論（W, S 理論）のカイラル性も再現しなくてはならないだろう。更にその理論が一般相対論と同じかそれ以上に予言能力に富むか否かも重要になる。

### 理論のリサイクル的活用

70年代の初めにハドロンの（強粒子）をクォークとグルオンで再現する際にハドロンのひもモデルが考案された。すべての中間子はグルオンの両端にクォークがくっついたものと見られるし核子の様な白色のハドロンの恐らく Y 字状にグルオンで縛られたものと考えられる。グルオンのひもは超電導での渦ひもに対比され、クォーク  $q$  は従って磁気モノポールに対比されつまりハドロンにとじこめられて出ることができない。ハドロン内部は相転移後以前の偽真空の状態だと想定される。イタリアのヴェネチアーノ等によるハドロンのひもモデルが粒子反応の共鳴双対性を根拠に提案されたが間もなくこのモデルはスピンの整数の粒子に対しては無効なので放棄されてしまった。従って超弦理論は、当初はうまく行かなかった為に棄てられた資源ならぬ理論のリサイクルだと見ることも可能である。超弦の時空は26でなく10次元であることを主張しておりそれが4次元とコンパクト化された6次元の内部空間から成るとされるがこのコンパクト化の詳しいメカニズムは未知である。26次元空間だと虚数の質量をもつタキオンが出て来て困るのである。それを救うのにも超対称性 SUSY が不可欠である。一方統計熱力学の第四主則というべき（R. Hagedorn）見地からも点場の理論より超弦の考えの方が有利に思われる。超弦理論のいくらかのモデルの内とりわけボゾンとフェルミオン間のスピノル的変換をもたらす対称性の考えから、 $E_8 \times E_8$  なる例外群を有するヘテロ的超弦は魅力的である、というのはそのリングには時計まわりと反時計まわりにそれぞれ励起されるソリトンが考えられるからである。そればかりではなく宇宙論でのかげの世界、shadow matter の存在を予言するからでもある。この世界のかげの世界は重力相互作用によってのみ結ばれると考えられる。GUT の点場の理論で予言される  $10^{15} \text{GeV}$  のエネルギーと、超ひもでの Planck のエネルギー  $10^{19} \text{GeV}$  では四桁の違いしかないので GUT がどうしてもいき詰ってしまえばはじめから後者の道を取ったほうが思惟経済的かも知れない。その代わり数学的困難さははかり知れないものになるだろう。

### 弦理論へのモデル作成の試み

素早い素過程を再現するモデルは作れないものだろうか？

かつて Kaku と Kikkawa は米国で超弦理論の初歩的な相互作用の知見を得る為にストリングには五つの異なる型があることを論じた。それはあたかも染色体のひもが切れたりつながったり交叉したりする様子と似ている様であり興味深いものがある。五つのタイプのひもの相互作用の全部でなくとも、そのいくらかを視覚的に再現すべく筆者は「磁石ひも」とも呼ぶべきものを作成し、二つのひもが落下等によりつながったりリングを形成したりするのを観察した。

この磁石ひもは色々面白い性質を有し、リングは形成し易いが、開弦ではねじれ抵抗が無い為にいわゆるメビウスの環は作ることは出来ない。これは1000ガウス以上の一つが錠剤形のフェライトマグネットを数十個連結しさえすれば、良く誰でも作成できる便利なしろものである。落下を利用した衝突により思わぬ多様な挙動が見られるであろう。

そして確かに Kaku-Kikkawa のひもの interaction を思わせるものが手に取る様に観察できるのであった。二つのリングを作用させて一つのリングを形成することは容易だがその逆の過程は少し難しかった。この磁石ひもは従って力学的電気力学的なモデルと呼べるだろう。自由落下を利用して垂直にひもをくっつける際に時に切断が生じることを認めた。これは素粒子の消滅と生成に対応するのではなかろうか。ひもの五種の相互作用（吉川氏）も容易に再現できるであろう。

#### その他の力学的モデル

ここ数年位から新体操（芸術体操）というもののがはやっておりその優美さには誰でも関心があるが、特にリボンやループの新体操ほど自由で軽快なものもないであろう。ともかくリボン一本であれほど変化の豊かな多様な運動が再現できるのはちょっと信じられない程である。振動、回転、蛇行、らせん、ループ…等あらゆる運動が目まぐるしく見られるこれこそ立派な力学的モデルだといえるだろう。旗の様な二次元の布の運動にも確かに多くの振動が励起されようがしかし一次元のリボンの運動の多様性と優美性の右に出るものを連想するのは不可能であろう。一本のひもで不足という感じは全くない。現に超ひもはそのふるまいとそのひもに滑らかに分布する様々な荷量（電荷、弱い荷、色荷…）によって全ての本質的素粒子を再現することを狙っている筈である。従来の局所場ではこういう自由度はとても考えられないことである。とりわけ六人一組でおりなすリボンの新体操のシーンは科学者にすら一つのインスピレーションを与えない筈はないだろう。ともかくストリングの優れている所はその性質を決めるパラメーターの数がきわめて少ない点で弦の張力  $T$  と線密度  $\mu$  以外には存在しない。つまり従来の GUT にしても W. S. 理論にしても例えば17ヶ以上といった調整用のパラメーターがあまりにも多すぎる所が難点である。そのかわりに生成子の数は逆にふえそれに伴って次元の数も大きくならざるを得ないことは当然である。

#### 何が第一原理にあたるか？

疑いもなく新たな考えつまり超ひも理論とそのモデルの究局的な目標は第一原理を見出し又正しいラクランジアン密度\*\*とその作用関数の形を将来にわたり決めることに違いない。

ここでは第一原理にかわってもっと初歩的な超弦に課せられた不変性対称性の原理を少し考えることにする。先ず相対論的不変性との関連でのポアンカレ変換（ローレンツ変換と座標の回転，平行移動）に対する不変性がなくてはならない。更に弦同志の相互作用を可能ならしめる為 Weyl の共形変換に対する不変性（ $\rho(\tau, \sigma)$  を任意関数として世界面の計量テンソル  $g_{ab}(\tau, \sigma)$  が  $g_{ab} \rightarrow \rho g_{ab}$  に対し不変）及び、ひもの運動によって生じうる ghost つまり負のノルムを消す為の世界面上の座標付けの変更に対する不変性及び超対称性つまり不都合なタキオンを消去したりボゾンとフェルミオン間の対称性を保障したり有害な発散を押える為のもの、等が要求される。一般相対論における一般共変性とか場の量子論でのゲージ不変性はそれぞれ第一原理に該当する。ゲージ理論での重要な点は力（相互作用）を媒介する場が局所対称性の要請から演繹され又力の背後により根元的な原理が存在しそれは属性（アイソスピンやカラー荷といった）の内部空間の存在とその座標系の任意な変換によっても不変性が維持されるべきというのが第一原理であった。これに対応するのが超弦理論にもあるべきであろう。超弦理論ではひもの長さも内部空間のサイズも共にプランクのスケール\*に設定すべきことを仮定している。（普遍定数  $\lambda_0 = \sqrt{\frac{16\pi G\hbar}{c^3}} = 10^{-32}\text{cm}$ ）

#### パラダイム，流行としての超弦

しばしば異端視されてきた超弦理論も一つのパラダイムに過ぎないのかも知れない。又これがどの程度成功するかを予言するのは一層困難であろう。現時点では机上の理論に近い為何時どこでいき詰ったり又とんでもない方向へ走ってしまうかも知れないがそんな事のない様に祈る気持で一杯である。時空と力（相互作用）と物質（素粒子）を統一的に理解する為のチャンピオンとして期待される所大であろう。さて最近十数年の理論世界で発表されたペーパーの重要な key words を，コンピューターで統計処理した資料に従うと74年頃の最多論文のテーマの key words はクオーク，ゲージ理論，超伝導真空等であったが75年にはハドロンの Regge の理論が一番多くハドロンのひもモデルも登場する。76年はハドロン物理学の論文数がピークになり，80年には QCD 量子色力学が最盛期をむかえる。81年には力の統一理論（その中に電弱理論がある）が論文の主流を占め，83年の流行は格子ゲージ理論（ここでは非摂動論による発散を除去する等の努力が含まれているが）そして84年の流行は SUSY 超対称粒子の論文でありそして遂に86年以降は問題の super string 理論と相成った次第である。一部には既に弦理論の困難性の局いき詰まっているとの報告すら出ている。この様にパラダイム流行は数年位で次第に変化して行くのである。

現時点では確かに super string 理論は極度に数学先行型なスペキュレーションであるとの印象は否定できないとしても同理論が又新しい数学の領域を開拓するだろうと期待される。Witten, Green, Gross, Schwarz 等の80年代中ばでのセンセショナルな寄与はしかしながら大いに従来の局所場のいき詰まりを脱却させようとし且現代物理学の潮流を変えようとしていること

は明白であろう。超対称粒子のパートナーの少なくとも一つは宇宙線中にでも見出せないものだろうか。(最も軽い粒子でも)

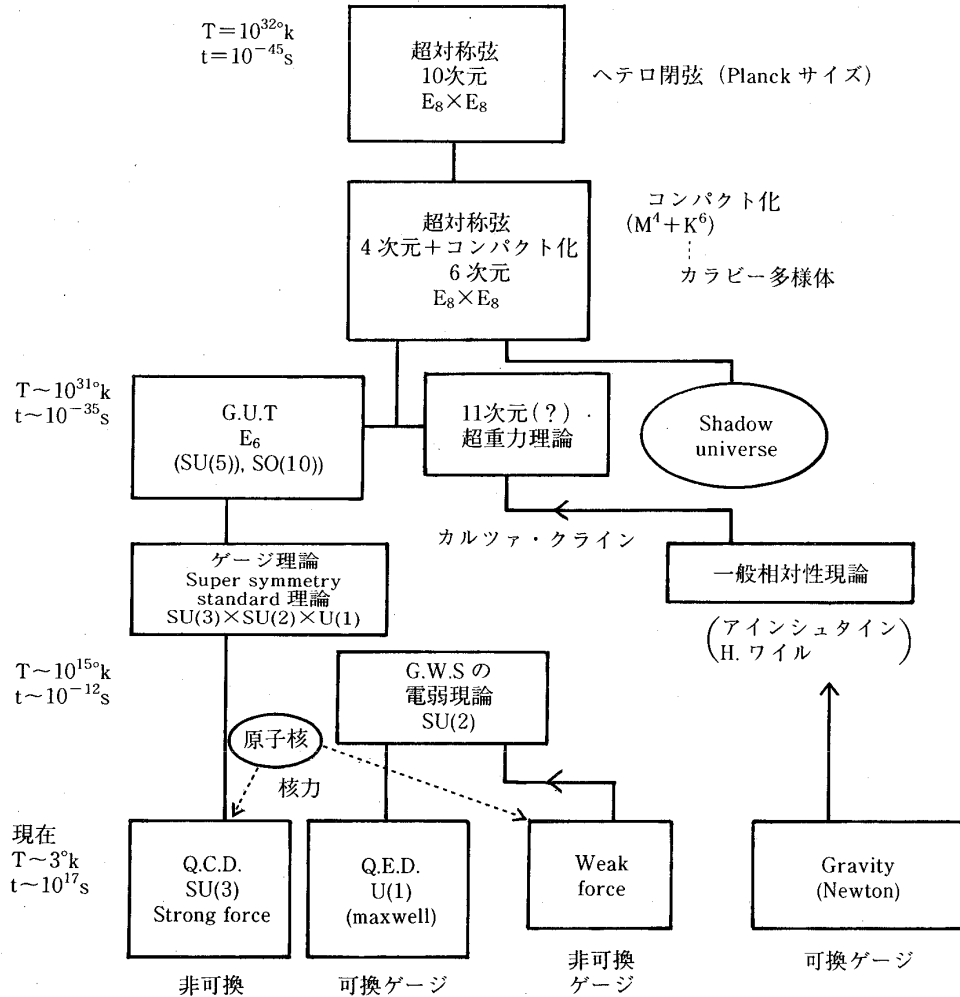


図 超対称弦への道程

超弦の全体としての深い意義は我々には分かりにくいですが疑いもなくスピン等の荷量の分布した数珠状のリングで又無数の振動子の集合であることは確かであろう。今の所数学先行型の科学との批判はさけられそうにもないがそれを断念する理由もない。Pauli, Feynman, L. Landau といった方々が生きておられたとしても、とうてい裁可は得られなかった筈であるし又我が国の場の量子論の大オーソリティ中西襄氏もランダウ流に「デッサンもろくに習得しない画学生がピカソの絵を真似る様なもので地についてない理論だ…」と酷評されていると伺う。超弦の考えは1920年代の Kaluza Klein, 及び Einstein の電磁場, 重力場, 時空の統一を夢みた線の延長上にあると思われる。そして度々ひん死の状態から生きかえった、きわどい理論でもある

のだ。もし予想外にうまく行かなければその原因はやはり経験不足という事になる。 (超弦症候群という言葉すらある位である)

その異常な流行は奇病に見えるだろうし Kalauza Klein 的シンドロームと思われるに違いない。アノマリフリー (量子力学的異常項のキャンセル) とのうたい文句にも少なからず首をかしげるであろう。一般相対論自身又ゲージ理論それ自身は勿論アノマリフリーではない。量子力学にも顔を立てるとすると超弦は臨界次元を10以外は排除する点も天下り的な印象を与えるだろう。コンパクト化の試みはなおさらである。それはファイマンダイアグラムを包含し且延長上にあるものでなくてはならない。同様に一般相対論での宇宙項が何故ゼロでなければならないかも説明されねばならない。

#### 文 献

- 1) 最新素粒子論, 第2章「究極の理論」を求めて 最新科学論シリーズ7 (学研)
- 2) 物理学大辞典 (丸善)
- 3) 目で見える素粒子論のうつつりかわり 青木健一 パリテイ 1988, 07
- 4) 時空物を統一するか「超ひも理論」吉川圭二 科学朝日 1985, 11月
- 5) 次半世紀の物理理論登場

原文献 (physics today Vol.38, No.7)

(Anomaly cancellation launches superstring bandwagon) Parity 1986,01

B・M・シュワルツシルド著

- 6) 超弦理論 J・H・シュワルツ著 大栗博司訳 Parity
- 7) 科学朝日 1989, 9 超弦理論
- 8) 素粒子の統一理論と弦仮説 米谷民明 科学, Vol.60, No.4

\*\*例えば  $K_1$  をひものバネ定数,  $g, \chi$  を力学変数とすれば

$$L_c = -\frac{K_1}{4\pi} \sqrt{-g} g^{ab} \partial_a \chi^\mu(\sigma, \tau) \partial_b \chi_\mu(\sigma, \tau) G_{\mu\nu} \{\chi(\sigma, \tau)\} + \dots$$

更に別の観点から線密度を  $\mu$ , 張力を  $T$ , 光速を  $C$  とすれば閉弦のラグランジアン密度は

$$L = \frac{1}{2} [\mu \dot{x}^2 - T x''^2], \quad \dot{x} = C^2 x', \quad C^2 = T/\mu \text{ と簡潔に表わすこともできる。}$$