

弦理論とは何か 回顧と展望

米谷民明 東京大学大学院総合文化研究科 日本物理学会第65回年会 (岡山大学、2010年3月20日



2010年3月20日土曜日

回顧:

私のこれまでの物理学会特別講演

・Dual Model と場の理論	1975.3
・モノポールの凝縮とクオークの閉じ込め	1979.3
• Hamiltonian Quantum Gravity	1985.4
・Stringと重力	1986.10
・低次元量子重力模型と弦理論	1993.9
・弦理論の非摂動的定式化へ向けて	1997.3
 一般相対性理論と素粒子論 (アインシュタイン年 素粒子宇宙合同シンポジ 	2005.9 ウム講演)
・ 弦理論とは何か:回顧と展望	2010.3



私のこれまでの物理学会特別講演

・ 弦理論とは何か:回顧と展望

・Dual Model と場の理論	1975.3
・モノポールの凝縮とクオークの閉じ込め	1979.3
•Hamiltonian Quantum Gravity	1985.4
・Stringと重力	1986.10
・低次元量子重力模型と弦理論	1993.9
・弦理論の非摂動的定式化へ向けて	1997.3
 一般相対性理論と素粒子論 (アインシュタイン年 素粒子宇宙合同シンポジ 	2005.9 ウム講演)



Guggenheim museum (New York) の螺旋回廊

2010.3

1970年代の素粒子論

現在の素粒子理論を支える方法論的・概念的基礎の 多くのものは、70年代に築かれた。

- クオーク模型がパートン描像と結びつき、ハドロンの複合模型として確立
- クオークの新しい世代が発見され、WS理論と結びつき、3世代標準模型に結実
- 繰り込み理論、格子ゲージ理論、非摂動的古典解に関する発展により、 ゲージ場理論の性格についての理解が飛躍的に高まった
- 一方、50年代から始まった強い相互作用のS行列理論の発展からは、現
 在の弦理論につながる新しい展開が起こった

こうした状況のもとで、「相互作用の統一」への動機づけも高まり、70年代中盤には、 「大統一」理論の最初の提案 (Georgi-Glashow,1974)も成された

しかし、素粒子論側からの重力理論(一般相対性理論)との結びつきに関する関心は、 全体としては、極めて希薄であった 4a-J-1 Dual Model × 場の理論

北大理米谷民明

1. 場の理論とdual model との 関係に対する アプローテレは,

(1) local field theory on 新LII解 ZIZ dual model 充填 <,

(2) field theory から dual model か導かれるかをかにはかかりりなく,

まず理論的模型としての dual model が通常の field theory と

いかちるとしているるかを追求する。

という 2のの方回かあるが、以下では主に20の方向で、今までに得られている結果を議論する。 いのか何については、その数学的困難さにもかかわらず、 多くの興味深い suggestion がある。これについては 3. でふれることにする。

2. (2)の方向について、主に以下の2つの問題を議論了る。

(1) counting on 时题

(2) gauge 構造の阅係

(a) Yang Mills fields (← open string)
(b) Gravity (← closed string)

3. dual model 2 場の理論 o "相互作用".

最後に dual wodel と場の理論の決係の研究を通して,双方に特たらされた 収穫, or 今後期待される事等を簡単に述べる。

以上のようち内容で,話を了る予定で。

1975年 春の物理学会 特別講演予稿 (CiNii 論文情報) dual 模型=弦理論をゲージ理論と一般相対性理論の拡張と 看做すべきであることを指摘した初期の仕事

- T. Y., "Note on the local gauge principle in conformal dual models", Prog. Theor. Phys. 48, 616-624 (1972)
- T. Y., "Quantum gravity and the zero-slope limit of the generalized Virasoro model", Lett. Nuovo. Cim. 8, 951-956 (1973)
- T. Y., "Connection of dual models to electrodynamics and gravidynamics", Prog. Theor. Phys. 51, 1907-1920(1974)
- T.Y., "Interacting Fermionic and Pomeronic strings : Gravitational interaction of the Ramond fermion",

Nuovo Cim. A27, 440-457 (1975)

T. Y., "Geometry, gravity and dual strings", Prog. Theor. Phys. 56, 1310-1317 (1976)

- A. Neveu and J. Scherk, "Connection between Yang-Mills fields and dual models", Nucl. Phys. B36, 155-161(1972)
- J. Scherk and J. H. Schwarz, "Dual models for non-hadrons", Nucl. Phys. B81, 118-144 (1974)
- J. Scherk and J. H. Schwarz, "Dual models and the geometry of space-time", Phys. Lett. 52B, 347-350 (1974)
- J. Scherk and J. H. Schwarz, "Dual field theory of quarks and gluons", Phys. Lett. 57B, 463-466 (1975)

1970年代前半の段階では、(generalized) Veneziano, Virasoro-Shapiro 振幅は、 ハドロン散乱のS行列理論の単なる「公式」として提案されたものであり、 そもそも、場の理論と consistent なのかどうかさえ、明らかではなかった。 関連する問題の追求から、後の発展につながる多くのアイデアがその頃に芽生えた。

1

Gravity from strings: personal reminiscences of early developments

Tamiaki Yoneya Institute of Physics, University of Tokyo Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan (arXiv:0911.1624,) to appear in The Birth of String Theory, Cambridge Univ. Press.

Abstract

I discuss the early developments of string theory with respect to its connection with gauge theory and general relativity from my own perspective. The period covered is mainly from 1969 to 1974, during which I became involved in research on dual string models as a graduate student. My thinking towards the recognition of string theory as an extended quantum theory of gravity is described. Some retrospective remarks on my later works related to this subject are also given. 1970年代前半の段階では、(generalized) Veneziano, Virasoro-Shapiro 振幅は、 ハドロン散乱のS行列理論の単なる「公式」として提案されたものであり、 そもそも、場の理論と consistent なのかどうかさえ、明らかではなかった。 関連する問題の追求から、後の発展につながる多くのアイデアがその頃に芽生えた。

1

Gravity from strings: personal reminiscences of early developments

Tamiaki Yoneya Institute of Physics, University of Tokyo Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan (arXiv:0911.1624,) to appear in The Birth of String Theory, Cambridge Univ. Press.

Abstract

I discuss the early developments of string theory with respect to its connection with gauge theory and general relativity from my own perspective. The period covered is mainly from 1969 to 1974, during which I became involved in research on dual string models as a graduate student. My thinking towards the recognition of string theory as an extended quantum theory of gravity is described. Some retrospective remarks on my later works related to this subject are also given.

Dear Tamiaki,

Thanks very much for posting to the web your very illuminating article of reminiscences, which I just read. It is very interesting to read about your thoughts in the early period when you were grappling with questions that are still puzzling us today.

- Edward Witten

1973年、春から秋にかけて、重力との関係に関する最初の論文を書いていた頃、 悩んでいた3つの問題

⇒局所場に基づく一般相対論と、stringの間を結ぶ「対応原理」はあるか。

一般相対論の非線形性が、stringの広がりの効果(非局所性)で置き換わっているが、 それを明確な数学的構造で特徴づけられないか

closed string に対する Feynman-like rule を中西分解の拡張により 定式化できないか。

→ もし、closed string が局所場理論から一種の集団運動として導けるなら、一般相対論は、実はゲージ理論から導かれるものなのか?

これが最も悩ました謎、弦理論における重力の "emergence" は、Sakharov のアイデア (1967, "induced gravity" につながる)に近いことに、少し後になって気がついた。

実際、弦理論では、open-closed duality のため、graviton を gauge field の複合状態と看做せる。

1973年、春から秋にかけて、重力との関係に関する最初の論文を書いていた頃、 悩んでいた3つの問題

⇒ 局所場に基づく一般相対論と、stringの間を結ぶ「対応原理」はあるか。

一般相対論の非線形性が、stringの広がりの効果(非局所性)で置き換わっているが、 それを明確な数学的構造で特徴づけられないか

[♀] Feynman rule の段階で、一般相対論と closed string の関係をつけられるか

closed string に対する Feynman-like rule を中西分解の拡張により 定式化できないか。

♀もし、closed string が局所場理論から一種の集団運動として導けるなら、一般相対論は、実はゲージ理論から導かれるものなのか?

これが最も悩ました謎、弦理論における重力の "emergence" は、Sakharov のアイデア (1967, "induced gravity" につながる) に近いことに、少し後になって気がついた。

実際、弦理論では、open-closed duality のため、graviton を gauge field の複合状態と看做せる。

「場の理論から弦」 へのアプローチ: (1970-73) Fishnet diagram, Nielson-Olesen vortex NO nonlinear theory 1973年、春から秋にかけて、重力との関係に関する最初の論文を書いていた頃、 悩んでいた3つの問題

◎局所場に基づく一般相対論と、stringの間を結ぶ「対応原理」はあるか。

一般相対論の非線形性が、stringの広がりの効果(非局所性)で置き換わっているが、 それを明確な数学的構造で特徴づけられないか

closed string に対する Feynman-like rule を中西分解の拡張により 定式化できないか。

→ もし、closed string が局所場理論から一種の集団運動として導ける なら、一般相対論は、実はゲージ理論から導かれるものなのか?

これが最も悩ました謎、弦理論における重力の "emergence" は、Sakharov のアイデア (1967, "induced gravity" につながる) に近いことに、少し後になって気がついた。

実際、弦理論では、open-closed duality のため、graviton を gauge field の複合状態と看做せる。

"String theory is, at a new level, the realization of old ideas concerning induced gravitation! I cannot refrain from feeling proud on this point!" A. D. Sakharov (1921-89), 1985





Nobel peace prize 1975

Progress of Theoretical Physics, Vol. 45, No. 2, February 1971

Crossing-Symmetric Decomposition of the Five-Point and Six-Point Veneziano Formulas into Tree-Graph Integrals^{*)}

Noboru NAKANISHI**)

Applied Mathematics Department Brookhaven National Laboratory Upton, Long Island, New York 11973

(Received August 24, 1970)

It is shown that the five-point Veneziano formula can be written as a sum of five integrals, each of which has only the singularities which can be existent in the Feynman amplitudes corresponding to a particular tree Feynman graph, in such a way that those integrals are transmuted into each other by cyclic permutations of external particles. Likewise, the six-point Veneziano formula is decomposed into fourteen tree-graph integrals in a crossingsymmetric way.

On the basis of the above results, a natural extension of the generalized Veneziano formula to the general-spin case is proposed.



 $F = \int_{0}^{1} dX \int_{0}^{1} dY \, X^{-\alpha(s_{12})-1} Y^{-\alpha(s_{45})-1}$ $\times (1-X)^{-\alpha(s_{23})-1} (1-Y)^{-\alpha(s_{34})-1} (1-XY)^{-\alpha(s_{15})+\alpha(s_{23})+\alpha(s_{34})}$ $F = \sum_{k=1}^{5} F_{k}$ $F_{k} \equiv \iint_{D} dx dy \, x^{-\alpha(s_{1j})-1} y^{-\alpha(s_{1m})-1}$

 $imes (1+x)^{-lpha(s_{jm})+eta}(1+y)^{-lpha(s_{il})+eta}(1+x+y)^{-lpha(s_{jl})+eta},$

Feynman-like Rules for the Dual-Resonance Model on the Basis of the Nakanishi Decomposition

Tamiaki YONEYA

Department of Physics, Hokkaido University, Sapporo

(Received May 15, 1972)

We present Feynman-like rules for the dual-resonance model, whose counting rule is the same as in the conventional field theory. Our approach is based on the Nakanishi decomposition of the n-point Veneziano formula. This decomposition is extended to general loop amplitudes. One advantage of this scheme is that the periodicity problem for the loop amplitudes is automatically removed, at least at the one-loop level.



現代の言葉では、Riemann 面の moduli 空間の、Feynman rule と consistent な triangulation にあたる。

時空不確定性原理(1987)や、purely cubic action の予想(1985) などが、この方向から生まれた着想。

♀ 2番目の問題は、技術的な問題だが、これも解決できれば、弦理論の理解に多いに役立つ。弦の場の理論で、higher excited state を先に積分するという、繰り込み群的な方法で原理的には導けるべき。open string では、できている。

 ● 3番目の問題は、「ゲージ重力対応」という形で、一つのパラ ダイムとしての理解には到達したと言える。しかし、まだまだ課 題は多い。

Brief history of strings and gauge/gravity correspondence

1968 Veneziano model



- Channel (s-t) duality
- Regge behavior
- narrow-resonance approximation

$$V(s,t) = \int_0^1 dx \, x^{-\alpha' s - \alpha_0 - 1} (1-x)^{-\alpha' t - \alpha_0 - 1}$$
$$= \sum_{n=0}^\infty \frac{r_n(s)}{t - m_n^2} = \sum_{n=0}^\infty \frac{r_n(t)}{s - m_n^2} \quad \longrightarrow \text{ poles at } s \text{ or } t = m_n^2 = (n-1)/\alpha'$$

spectrum of relativistic open strings

Similar formula (Virasoro, Shapiro), corresponding to closed strings

- String interpretation in terms of factorization (南部、Susskind), and through electric circuit analogy (Nielsen)

1970 ~ 1978 Initial developments of string theory (models for hadronic interactions)

- Nambu-Goto action
- Light-cone quantization, no-ghost theorem, critical dimensions (26 or 10)
- Ultraviolet finiteness (modular invariance)
- Solution Neveu-Schwarz-Ramond model (inclusion of "G"-partiry and fermionic degrees of freedom)
- Space-time supersymmetry

Developments related to field-theory /string connection ('70s)

- Fishnet' diagram interpretation, Nielsen-Olesen vortex
- Solution of various supersymmetric gauge and gravity theories
- String picture from strong-coupling lattice gauge theory
- t Hooft's large N limit

1984~1989 First revolution in string theory

Green-Schwarz anomaly cancelation

- Five consistent perturbative string vacua (I, IIA, IIB, 2xHetro) in 10D
- Compactifications(T-duality, Calabi-Yau,), new connections to mathematics
- Sector CFT technique, renormalization group interpretation

1990~1994 Development of "old" matrix models and related models

- Double scaling limit
- c=1 strings, 2D gravity, 'non-critical' strings
- topological field theories and strings

1995~1999 Second revolution in string theory

- discovery of D-branes
- statistical interpretation of black-hole entropy in the BPS or near-BPS limits
- Seconjecture of M-theory
- Wew matrix models (BFSS, IKKT), supermembranes, M(atrix) theory conjecture,
- AdS/CFT correspondence, GKPW relation,

1990~1994 Development of "old" matrix models and related models

- Double scaling limit
- c=1 strings, 2D gravity, 'non-critical' strings
- topological field theories and strings

1995~1999 Second revolution in string theory

- discovery of D-branes
- statistical interpretation of black-hole entropy in the BPS or near-BPS limits
- conjecture of M-theory
- Wew matrix models (BFSS, IKKT), supermembranes, M(atrix) theory conjecture,
- AdS/CFT correspondence, GKPW relation,



弦理論とは何か

弦理論は何を成しとげる可能性があるか

● 相互作用の統一:

重力を含めたすべての基本的相互作用と物質の基本構造の統一的理解

♀ 力学法則の統一:

一般相対性理論と量子論の枠組みを統一

重力を含む統一理論の候補としての弦の発見は ある意味で偶然!

また、現状では、弦理論は統一のための「材料」が用意されているだけで、 まだ、どういう原理に支配されているのか,および、実験との直接的結びつきが わからない "rules of the game" にすぎない。

しかし, 弦理論の内容が解明されるにつれ, 量子場理論の自然な拡張として極めて自然であり, これまで場の量子論の枠内で考えられてきた様々な統一へのアイデアのほとんどすべて

が,弦-Dブレーンを通じてつながり,それらが渾然一体になった,

ある必然性を持った新たな枠組みの存在を強く示唆

unification of "ideas" or "methodologies" !



しかし、現状では未完成でかつ発展途上の「理論」

 ● 高次元(10=9+1)時空における特定の背景上での摂動論的定義
 (generalized Feynman rule)しかなされていない.

かつ、平坦な低次元時空を与える摂動的解(コンパクト化)は実は無限にある。

- 非摂動的定義が準拠すべき「原理」が知られていない.
- ♀ S行列以外に有意味な物理量が定義できるかどうか不明.

弦理論の性格は、量子力学に対する前期量子論の段階に似ている

弦理論の最も顕著な性質

これにより、従来の場の理論の枠内からは予想できなかった、 全く新たな展望が開かれている(**ゲージ/重力対応**)

重力のミクロレベル理論としての資格をそなえている

! ラフ スケッチとして現実の相互作用の大枠を予言している!

- 局所場の量子論では不可避な<u>紫外破綻</u>が解消されている.

現代物理学の枠組みの基本的欠陥

摂動的な定式化しか知られていないが、紫外破綻を解決した非局 所的な相互作用の定式化に関して、

相対論の対称性と量子力学の unitary 性とを矛盾せずに両立

させ、非摂動的定式化を得る方向

を強く示唆している。

もともと、局所量子場には概念的困難がある(Landau-Peierls, ……, 湯川, ……) 重力以外の相互作用については、繰り込み理論によって実用的な摂動的定式化が 存在する. しかし、重力相互作用を考慮すると繰り込み理論は破綻する (ultraviolet catastrophe & unitarity violation)

note: N=8 4D sugra の finiteness conjecture ? (もし正しいとしても、SUSY だけでは説明できないし、その正則化は、弦理論に 埋め込む以外にないと思われる)

しかし、非局所性の性格に関しては、ここ20年ほど本質的な理解の進展が なされたかどうかは疑問 ● 非局所性を非摂動的にどう特徴づけるか?

・時空の不確定性関係(T.Y., 1987,)

D-braneの力学における特徴的スケールの定性的理解に有効であることが 90年代後半に判明、しかし、その厳密な数学的定式化については未だ明確ではない。

 minimal length (D. Gross, G. Veneziano, 1987,) 摂動振幅の超高エネルギーの振る舞いにもとづき提案、しかし。 Dブレーンにも有効であるかどうか、および摂動の高次効果を 取り入れても有効かどうか、疑問

purely cubic action シナリオ

T. Y., ICOBAN'86 International conference on grand unification (富山)

の review talkで提唱(および、85年12月基研研究会) Friedan, Witten 等も独立に同様なアイデアを提唱している

realization の試みとして

Hata-Ito-Kugo-Kunitomo-Ogawa, PL 175B, 138(1986) Horowitz-Lykken-Rohm-Strominger, PRL 57, 283(1986)

この2つは、「弦理論の原理は何か」と絡む、弦理論のもっとも深い未解決問題

しかし、特に後者に関しては、

「string field が弦理論/M理論の真の基本的自由度なのかどうか」明確ではない

purely cubic action conjecture

弦理論においては、運動と相互作用が完全に統一
 されていることの反映として、作用原理は、
 background independent な相互作用項だけで
 表されるべき。

$$S = \frac{1}{6} \langle \psi^3 \rangle \to S_{\text{Witten}} = \langle \frac{1}{2} \tilde{\psi} \psi_c \tilde{\psi} + \frac{1}{6} \tilde{\psi}^3 \rangle$$
$$\psi_c^2 = 0, \quad \psi = \psi_c + \tilde{\psi}$$

Discussions T. Yoneya (Univ. of Tokyo) Q: P. Frampton (Univ. of North Carolina)

When such a string field theory has been successfully and completely formulated, will it answer the question of how many different string theories exist?

A: If the concept of field is fundamental to string theory, the final complete string field theory might answer all such questions. Different string models might be different solutions to a single fundamental field equation in a way as I suggested at the end of my talk.

Q: K. Kikkawa (Osaka Univ.)

I have a question about Ψ^3 action, which is supposed to be made background metric independent. In ordinary field theory we can make it if the metric tensor $g_{\mu\nu}$ is incorporated. Is there any geometrical possibility that Ψ^3 is made background independent without using the metric field which is now almost Ψ itself?

A: My guess is that Ψ^3 might be itself something analogous to $\int \sqrt{\det g}$ when Ψ is properly interpreted as a basic geometrical entity.

string field, almost nothing is known. For instance, if the openstring field is a gauge field generalizing the Yang-Mills field, what is the geometry behind it? In particular, in the case of closed string, the string field must be a concept which encompasses the metric tensor, connection and so on of the ordinary Riemannian geometry. This implies that the spacetime geometry may be reformulated entirely in terms of the string concepts. In this connection, it might be worthwhile to pursue the following possibility.*) As emphasized in item (i), from the gnobal spacetime picture, the division into free propagator and interaction vertex may not be a natural procedure. I wish to emphasize that the "interaction" of closed strings may be regarded as dictating the property of strings with respect to propagation in the following sense. Consider a generic 3-closed string interaction as depicted below

(46)

527

(46) can be read as describing a deformation of a string state 1 into a state 3 through the action of a string state 2. Namely, the string field is interpreted as a deformation operator, as for the operator $T(\Lambda)$ in (20). If the string field 2 has a background condensation ψ_{CL} in the form of infinitesimally small loop, the mapping from 2 to 3 can be expressed by using the Virasoro operators (and its ghost generalizations). The cubic term (46) then can contain the usual free kinetic term. If the cubic term is the whole action, then the resultant classical field equation takes the form of a nilpotency equation

$$\psi_{C,\ell}\psi_{C,\ell} = 0. \tag{47}$$

531

Thus, essentially the classical string field is the BRST charge. It is indeed easy to see that the string field, if it is reinterpreted as a deformation operator, has ghost number +1. The action for the

^{*)} This conjecture motivated the work of ref.29) and was reported at "Workshop on Unified Theories", RIFP Kyoto University, (December, 1985). Related ideas have also been discussed by Friedan.³⁰)

時空不確定性関係:通常の量子力学における時間・エネルギー不確 定性関係からの再解釈

$$\Delta E \Delta t \gtrsim h \longrightarrow \Delta X \Delta T \gtrsim \ell_s^2$$
$$\Delta E \sim \Delta X \frac{h}{\ell_s^2} \quad \Delta t = \Delta T$$

In "Wandering in the fields", Vol. in honor of the 60th birthday of Prof. Nishijima, World Scientific, 1987

419

DUALITY AND INDETERMINACY PRINCIPLE IN STRING THEORY Tamiaki Yoneya Institute of Physics, University of Tokyo Komaba, Meguro-ku, Tokyo, Japan

ALLIN AS AN LINE PERMANACINERING STATIS

ABSTRACT

We give an elementary explanation about how string theories overcome the ultraviolet difficulty of the local field theories. The indeterminacy principle is reinterpreted as a limitation on the smallness of the domain of observations.

1. INTRODUCTION

One of the most attractive properties of the string theory¹ as a candidate for the fundamental unified theory of nature including gravity is that it resolves the renowned ultraviolet difficulty which is inherent in local quantum field theories. How the ultraviolet

Then the following question comes to mind: If the center-of-mass momenta are cut off owing to the non-locality as explained above, how should the relation (1) be interpreted? Roughly, the answer is the following. In string theory, there is an infinite tower of states with arbitrarily large masses. Hence, energy can become arbitrarily large without acquiring large spatial momenta. Now the intrinsic spatial extension of the string states becomes larger as the mass increases. Thus, in the string theory, the large energy fluctuation actually means large fluctuation with respect to the intrinsic spatial extension of string. Led by this observation, we propose to reinterpret the relation (1) as an indeterminacy relation between the interval of observations and the fluctuations with respect to the intrinsic extension of the 'observations':

[interval] \cdot [fluctuation of extension] $\geq \lambda^2$

(2)

where λ is the universal length parameter given by $(4\pi\alpha'\hbar)^{1/2}$ where α' being the slope parameter. (One unit is such that c=1.) Here an 'observation' is a synonym of a string interaction.

(2) implies that there is a limitation about the smallness of the spacetime domain where arbitrary possible observation in string theory is performed. In this sense there is no room for ultraviolet

* 弦定数の特徴づけは何か - 「時空」自身の不確定性原理

弦が基本的自由度であるから,時空の構造自身も弦の相互作用を通じてのみプローブしなければならない. test particle を外部から探針として導入できない.

→ 弦の相互作用=散乱振幅は <u>Riemann 面の共形不変性によって支配されている</u>.

弦の広がりは、リーマン面の広がりを特徴づける共形不変量の性質により決まる.

リーマン面上の任意の開領域 Ω の「長さ」を表す共形不変量 = extremal length

$$\lambda_{\Omega}(\Gamma) = \sup_{\rho} \frac{L(\Gamma, \rho)^2}{A(\Omega, \rho)}$$

 $ds = \rho(z, \overline{z})|dz|$ 任意に選んだ2次元面計量 $L(\Gamma, \rho) = \inf_{\gamma \in \Gamma} L(\gamma, \rho) \qquad L(\gamma, \rho) = \int_{\gamma} \rho |dz|$ 領域上の開曲線の集合

$$A(\varOmega,\rho) = \int_{\varOmega} \rho^2 dz d\overline{z}$$

粒子理論の場合の proper time に当たる

composition theorem : $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2, \quad \Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$

1. If every
$$\gamma \in \Gamma$$
 contains a $\gamma_1 \in \Gamma_1$ and $\gamma_2 \in \Gamma_2$, then
 $\lambda_{\Omega}(\Gamma) \geq \lambda_{\Omega_1}(\Gamma_1) + \lambda_{\Omega_2}(\Gamma_2).$

2. If every $\gamma_1 \in \Gamma_1$ and $\gamma_2 \in \Gamma_2$ contains a $\gamma \in \Gamma$, then

$$1/\lambda_{\Omega}(\Gamma) \ge 1/\lambda_{\Omega_1}(\Gamma_1) + 1/\lambda_{\Omega_2}(\Gamma_2).$$

reciprocity theorem :

Let the two pairs of opposite sides of Ω be α, α' and β, β' .

 Γ : the set of arcs joining α and α'

 Γ^* : the set of arcs joining β and β'

$$\lambda_{\Omega}(\Gamma)\lambda_{\Omega}(\Gamma^*) = 1$$

弦理論における時空の距離概念はこれらの性質を反映する

リーマン面では短距離と長距離が互いに共役の関係にあり、かつ それらが常に共存している. Minkowski計量では、一方が空間的でもう 一方は時間的方向に対応する.

この考察から, 弦理論においては時空の距離概念に関して、次の不確定性関係が普遍的に成り立つと予想される.

$\Delta X \Delta T \gtrsim \ell_s^2$

※ Borel 和を取った後 (large-angle scattering, Mende-Ooguri, 1988)の振幅では、ぼぼ下限が成り立つ

 ● Dブレーンの力学における典型的スケールを定性的に導ける (D0の場合)

$$\begin{array}{cccc} \Delta T \sim \Delta X/v & \Delta T \Delta X \sim \frac{(\Delta X)^2}{v} \gtrsim \ell_s^2, & \Delta X \gtrsim \sqrt{v}\ell_s & & & & & \\ \Delta X_w \sim \Delta T \Delta_w v \sim \frac{g_s}{v}\ell_s, & & \Delta_w v \sim g_s v^{-1/2} & & & & & \\ \Delta X \gtrsim \Delta X_w & \longrightarrow & \Delta X \sim g_s^{1/3}\ell_s. & & & & \\ \end{array}$$

 ΔT

$$S_{b2} = -\int d^2\xi \left\{ \frac{1}{2\lambda^2} \epsilon^{ab} \partial_a X^{\mu} \partial_b X^{\nu} b_{\mu\nu} + \frac{1}{2} e \left(\frac{1}{2\lambda^2} b_{\mu\nu}^2 + 1 \right) \right\}$$
 lagrange multiplier

古典的には、Nambu-Goto, Polyakov 作用と同等

$$\frac{1}{2\lambda^2}b_{\mu\nu}^2 = -1, \qquad b_{0i}^2 = \lambda^2 + \frac{1}{2}b_{ij}^2 \ge \lambda^2.$$

相対論的粒子の作用原理の自然な拡張

$$S_{partilee} = \int d\xi \left(p_{\mu} \frac{dx^{\mu}}{d\xi} + e(p^2 + m^2) \right)$$

* M理論スケールとの関係

エネルギーの揺らぎ $\delta E \sim 1/\delta T$ による、ミクロな重力スケール (mini black hole の大きさ)

$$\int \delta X \gtrsim (G_{10}/\delta T)^{1/7} \\
\Delta T \Delta X \gtrsim \ell_s^2$$

10D Schwarzschild radius

stringy uncertainty relation

cross over point

$$\Delta X_c \sim g_s^{1/3} \ell_s, \quad \Delta T_c \sim g_s^{-1/3} \ell_s$$

弦理論における、 最も典型的な、 量子重**カスケール**

$$(\Delta X_c)^6 \sim \frac{G_{10}}{\ell_s^2} = g_s^2 \ell_s^6$$

M理論で予想される、 11D Planck scale と一致

課題

- world-sheet 描像によらない非摂動的定式化
 BFSS, IKKT 行列模型などと consistent
- ・「不確定性」の正確な定義

通常の energy-time uncertainty relation と似たような意味で曖昧さがある

• Holographic principle との関係

UV-IR 対応の自然な説明を与え、open-closed string duality の定性的性質を捉えている いるという意味で、Holography の実現をミクロレベルで支えている

以上全体に関する包括的な議論について、

T. Y., "String theory and the space-time uncertainty principle", Prog. Theor. Phys. 103, 1081 (2000) hep-th/0004074

・ 検出可能性(たとえば、初期宇宙の揺らぎ)

"non-commutative" inflation の模型で議論されている

e.g., R. H. Brandenberger and P. M. Ho, Phys. Rev. D66(2002)023517 and many others

Dブレーン力学が示唆する統一と新たな量子的構造

Dブレーンとは何か

 ♀ open string の端点の自由度
 ♀ 単なる境界条件ではなく力学的自由度
 ♀ bulkゲージ場(RR 場)の源で安定 (ゲージ電磁荷を持たない不安定ブレーンも考えることができる)
 ♀ 一般に広がりを持つ: 空間的広がりの次元が p のとき Dp ブレーンと呼ぶ. 安定ブレーン の可能な次元は摂動的真空による.
 ♀ 低速度(非相対論)・低励起エネルギー近似で は supersymmetric Yang-Mills theory に と b

は、supersymmetric Yang-Mills theory により 記述できる

● bulk supergravity 近似 (low-energy effective theory) で
 は、古典解(ブラックホール解) として記述できる

● 運動と相互作用は open string の量子的揺らぎにより支配される. 言い換える

と, open string fieldは, Dブレーンの collective coordinate とみなせる.

mass desnsity
$$\sim \frac{1}{g_s \ell_s}$$
 accelation $\propto g_s^2 \times \frac{1}{g_s \ell_s} = \frac{g_s}{\ell_s}$

velocity expansion は、ゲージ理論の摂動論 (vacuum diagrams, 一種の entropy effect) で扱える。それにより、DO粒子の一般相対論的3体力と運動方程式が正しく導ける

Y. Okawa-T. Y., NPB538, 67(1999) hep-th/9806108,

NPB541, 163(1999) hep-th/9808188

open-closed string duality in string perturbation theory (simplest one-loop case)

effective theory=gauge theory

effective theory=gravity

もし、この性質が任意のオーダーまで成り立ち、

さらに non-perturbative にも有効なら

両者がまったく同等の既述を与える領域の存在も予想される

しかし、bulk theory の立場だけから Dブレーンの 正確な量子論的力学を展開するのは、極めて困難 もし、この性質が任意のオーダーまで成り立ち、

さらに non-perturbative にも有効なら 両者がまったく同等の既述を与える領域の存在も予想される しかし、 bulk theory の立場だけから Dブレーンの 正確な量子論的力学を展開するのは、極めて困難

gauge/gravity (or string) 対応の課題

● どういう場合に、どこまで有効か、両者を関係づける内在的論理はあるのか、

・大域的対称性(supersymmetry, conformal symmetry, ...)の役割:

perturbative な open-closed string duality は、bosonic string でも成立

・局所的対称性の役割:

bulk: general coordinate invariance ←→ boundary: local gauge symmetry ・大N極限の役割:

もし、1/N 展開の高次まで成り立つなら、有限の N でも有効か

・「境界側理論=局所場理論」は、どこまで成り立つのか:

ゲージ理論は、弦理論の立場では、lowest mode だけを残した近似にすぎない

・弦理論に埋め込めないような理論で、どこまで正当化されるか:

3D O(N) vector model の場合: Vasiliev's higher spin gauge theory (AdS_4) (tensionless limit of some string theory?)

ゲージ理論に本質的なスケール依存(running coupling constant)のダイナミクス
 を捉えられるか:

QCD の場合、 asymptotic freedom と confinement を同時に記述できるか

コメント

● conformal 変換に関して:

boundary 側のゲージ変換とbulk側の座標変換が関係し得ること (D3 case)

 $\delta_{K} x^{a} = -2\epsilon \cdot x \, x^{a} + \epsilon^{a} x^{2}$ $\downarrow \qquad \text{through field-dependent}$ gauge transformation after quantization $\delta_{K} x^{a} = -2\epsilon \cdot x \, x^{a} + \epsilon^{a} x^{2} + \epsilon^{a} \frac{qN}{r^{2}}$

♀ non-conformal な場合:

・ "generalized conformal symmetry" が、かなり有効

Jevicki-T.Y., NPB535,335,1998 Jevicki-Kazama-T.Y., PRD59,066001,1999 Knitscheider-Skenderis-Taylor, JHEP 0809:094,2008 Azeyanagi-Hanada-Kawai-Matsuo, NPB816,278,2009

Kazama-Jevicki-T.Y. PRL81,5072,1998

"Quantum Metamorphosis"

・D0-case (0+1次元super Yang-Mills theory): bulk 側からの2点関数の予言

Sekino-T.Y. NPB570, 174, 1998

ゲージ理論側で、Monte Carlo simulation によるチェックができつつある

Hanada-Nishimura-Sekino-T.Y., arXiv:0911.1623, and in preparation

最近試みられている様々な「現象論的応用」を正当化し基礎づけ、 また、それにより、**本当の意味で新しい知見**を得るためには、

これらの点について理解を深めることが不可欠

可能性を広げることも大事だが、

根拠が薄弱なまま拡大を続けるだけでは、新しい物理を見いだすのは困難

最近試みられている様々な「現象論的応用」を正当化し基礎づけ、 また、それにより、本当の意味で新しい知見を得るためには、

これらの点について理解を深めることが不可欠

可能性を広げることも大事だが、

根拠が薄弱なまま拡大を続けるだけでは、新しい物理を見いだすのは困難

1970年代の疑問

ー 弦理論についての二つの見方(or 役割)とその相互関係 ー

は、まだ解明されたとは言えない。

gauge/gravity(string) 対応の深化に向けて

一つの未完成な試み:D粒子(D0-brane)の「場の理論」

2つの動機:

- ♀ open-closed string duality の world-sheet 描像によらない (非摂動的) 定式化
- M理論: M-theory conjecture によれば、11次元時空が弦理論の非摂動的背景にある

一般の11D graviton = coherent bound state of (infinitely) many D0-branes

$$P_{10} = N/R$$
 $N \to \infty$ as $R = g_s \ell_s \to \infty$

- ・D0-braneの個数を力学変数として扱えるような、新しい枠組みが必要
- ・行列模型(BFSS)は、特別なlight-cone frame における「配位空間」量子力学
- ・D0 field (or M field) theory への第1歩は、 Yang-Mills matrix quantum mechanics の「第2量子化」

Open closed string duality の非摂動的定式化に向けた予想

残念ながら、2000年以降、「弦理論とは何か」に 関して本質的な進展はない

今一度、原点に立ち返ることが重要ではないだろうか

残念ながら、2000年以降、「弦理論とは何か」に 関して本質的な進展はない

今一度、原点に立ち返ることが重要ではないだろうか

最大の課題

非摂動的・背景独立な定式化のための 原理 (と自由度) を探ること

そのような定式化ができれば、 相対論的量子論の基礎およびその解釈についても大きな 影響を及ぼすだろう

アインシュタインの夢=量子と幾何学の統一

の実現!

いずれにしても、最終的な定式化には何らかの概念的飛躍が必要だろう

The real goal of my research has always been the **simplification and unification of the system of theoretical physics**. I attained this goal satisfactorily for macroscopic phenomena, **but not for the phenomena of quanta and atomic structure**. ...

A. Einstein (1879-1955), 1939

アインシュタインとディラックの遺産

The lines would then be the elementary concept in terms of which the whole theory of electrons and the electromagnetic field would have to be built up. **Closed lines would be interpreted as photons and open lines would have their ends interpreted as electrons or positrons**. ...

P. A. M. Dirac (1902-1984), 1955

