超弦理論

構成員

石橋延幸，佐藤勇二，伊敷吾郎

2018年11月22日　宇宙史センター構成員全体会議

２０１８年度前期の研究成果

論文４件

- N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda, T. Takahashi,
  “Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background,” JHEP 1805, 144 (2018)

- K. Ito, Y. Satoh, J. Suzuki,
  “MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations,”
  JHEP 1808, 002 (2018)

- G. Ishiki, T. Matsumoto, H. Muraki,
  “Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry,”
  Phys. Rev. D 98, no. 2, 026002 (2018)

- T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura, H. Muraki,
  “Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation,”
  PTEP 2018, no. 6, 063B04 (2018)

研究会発表６件（国際会議４件・国内２件）

- N. Ishibashi “Light-cone gauge string field theory and dimensional regularization - Computation of FI D terms”
 "New Frontiers in String Theory 2018“ July 2- August 3 2019,
 Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan （招待講演）

- Goro Ishiki, "The gauge/gravity correspondence for the BFSS matrix model,"
 "Quantum Gravity meets Lattice QFT," Sep 3-7 2018,
 The European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*) , Trento, Italy.（招待講演）

- Goro Ishiki, "Diffeomorphisms for fuzzy spaces,"
 "Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory," Jul 9-13 2018,
 The Erwin Schrödinger International Institute for Mathematics and Physics (ESI) , Vienna, Austria. （招待講演）

- Goro Ishiki, "Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model,"
 IPMU Focus Week on Quantum Gravity and Holography, Apr 2-6 2018.
 Kavli IPMU, Chiba, Japan. (招待講演)

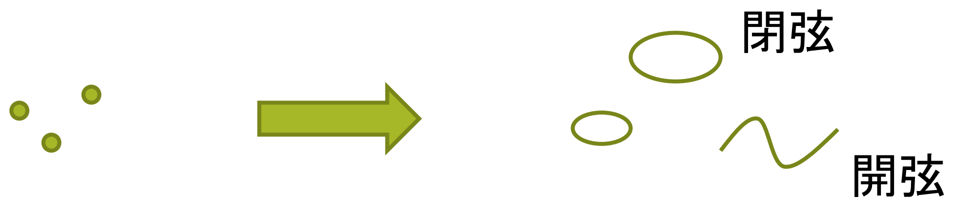
- 伊藤克司, 佐藤勇二, 鈴木淳史, 「MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations」,
 日本物理学会2018年秋季大会, 信州大学松本キャンパス, 松本, 2018年9月14-17日

- 伊敷吾郎, 松本高興, 「Diffeomorphism for fuzzy sphere」,
 日本物理学会2018年秋季大会, 信州大学松本キャンパス, 松本, 2018年9月14-17日

研究内容の紹介

超弦理論

・素粒子を１次元的な広がりを持つ「弦（ひも）」と考えて構成した理論

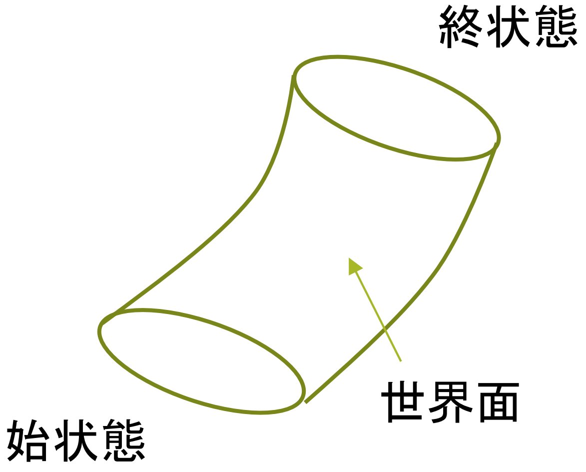


・弦の第一量子化（量子力学）

$$\langle \mathcal{O} \rangle = \frac{\int DX^\mu \mathcal{O} e^{iS}}{\int DX^\mu e^{iS}}$$

可能な世界面の足しあげ
（経路積分）

$$X^\mu(\tau, \sigma) : \mathrm{worldsheet} \to R^{1,d}$$



- 超弦理論のよいところ

  重力を量子論的に記述できる（紫外発散が生じない）
  多くの素粒子を弦の異なる振動モードとして統一的に記述できる

- 超弦理論のよくないところ（現状で）

  現状では10次元の平坦な（またはpp-wave）背景でしか量子化ができていない
  摂動論的定式化しか完成していない

  ⇒ 宇宙創成の謎には迫れない！

- 超弦理論の非摂動的定式化が必要

超弦理論のより完全な定式化に向けて

本研究グループでは以下のテーマについて研究している（2018年度）

- 弦の場の理論（石橋）

  弦の第二量子化された理論。
  弦の場の理論の古典解の解析により、非摂動的な物理の理解が得られる。

- ゲージ/重力対応（佐藤）

  超弦理論がゲージ場の理論により記述できるという予想。
  証明できればゲージ理論によって超弦理論を非摂動的に記述できる。

- 行列模型（伊敷）

  超弦理論の非摂動的定式化を与えていると予想される模型。

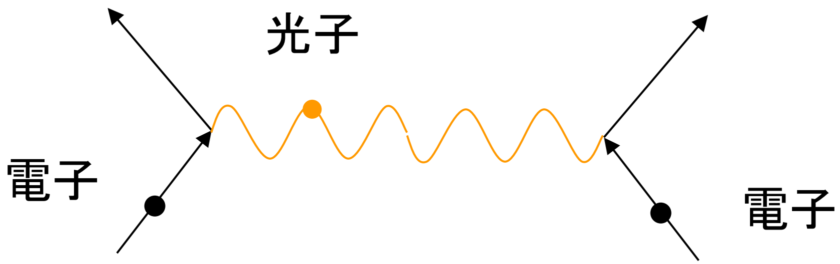
弦の場の理論

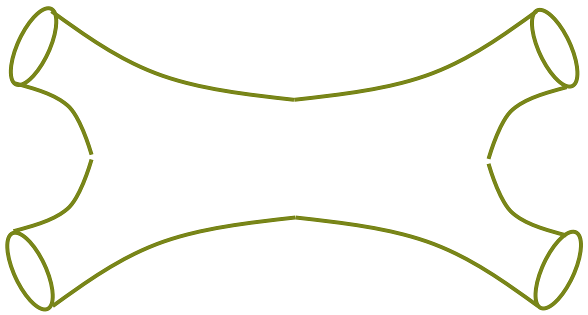
弦の場の理論

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

？

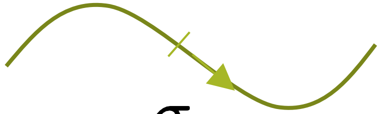




超弦理論の基本方程式は何か？

弦の場の理論の運動方程式

$$Q\Psi + \Psi^2 = 0$$



σ $X^\mu(\sigma)$

$\Psi[X^\mu(\sigma), c(\sigma), b(\sigma)]$

$$Q = \int d\sigma c(\sigma)[\frac{\delta^2}{\delta X^\mu(\sigma)\delta X_\mu(\sigma)} + X^{\mu\prime}(\sigma)X'_\mu(\sigma)] + \cdots$$

この複雑な運動方程式を解くことができる

$$Q\Psi + \Psi^2 = 0$$

KBc 代数

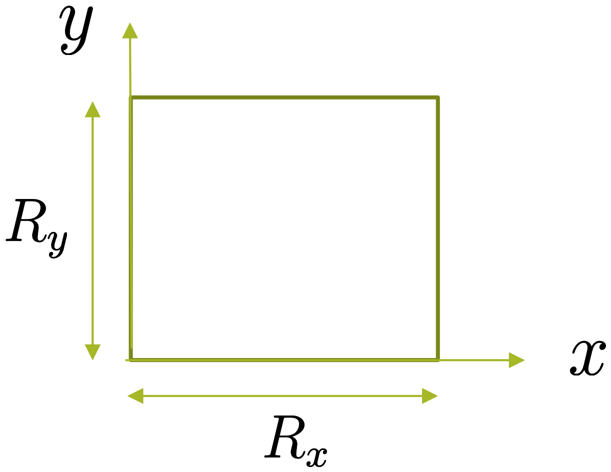
$$B^2 = c^2 = 0 \quad [K, B] = 0 \quad Bc + cB = 0$$

$$QK = 0 \quad QB = K \quad Qc = cKc$$

タキオン真空解

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{1+K}} c(1+K)Bc \frac{1}{\sqrt{1+K}}$$

非自明なトポロジーを持つ解



$$B_z = F_{xy} = \frac{2\pi N}{R_x R_y} \qquad N \in \mathbb{Z}$$

- Ψ 中に含まれる電磁場がこのような配位を持つ解を作ることができる（岸本、高橋、N.I.)

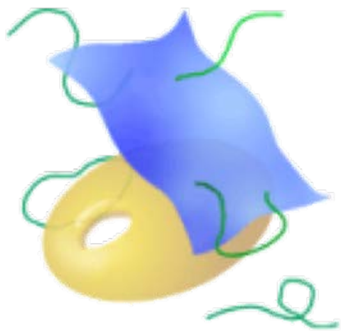
$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{1+K}} c(1+K)Bc \frac{1}{\sqrt{1+K}} - \Sigma \frac{1}{\sqrt{1+K}} c(1+K)Bc \frac{1}{\sqrt{1+K}} \bar{\Sigma}$$

- 非自明なトポロジーを持っていることを特徴づける方法について議論した

ゲージ/重力対応

ゲージ／重力対応

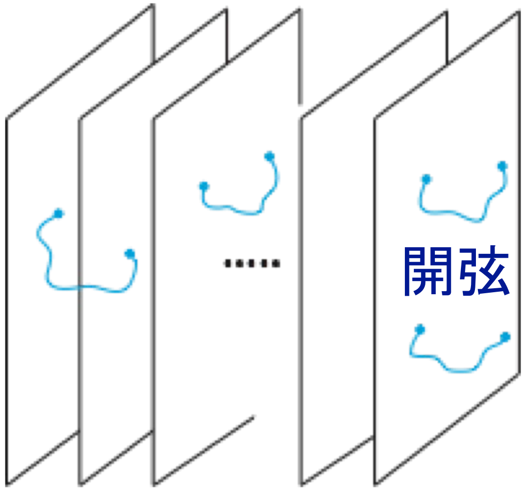
弦理論のソリトン：Dブレーン
（膜のように広がりを持つ物体）



ブラックホール, 重力理論

弱結合

≈



ゲージ理論

強結合

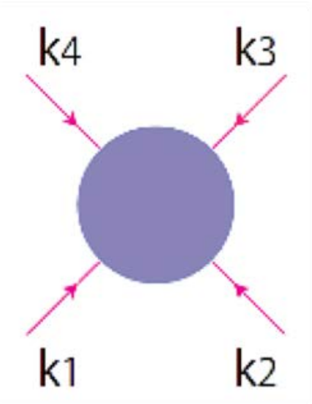
ゲージ／重力対応

- 様々な応用

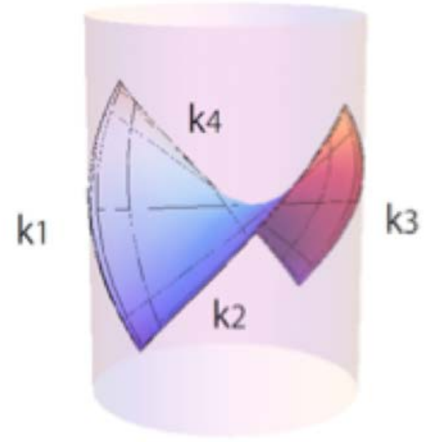
強結合ゲージ理論　⇐　弱結合(古典)重力/弦理論

cf. QCD

e.g.)



=



極大超対称ゲージ理論
の強結合散乱振幅

曲がった(反ドジッター)
時空中の極小曲面

強結合散乱振幅の解析的評価

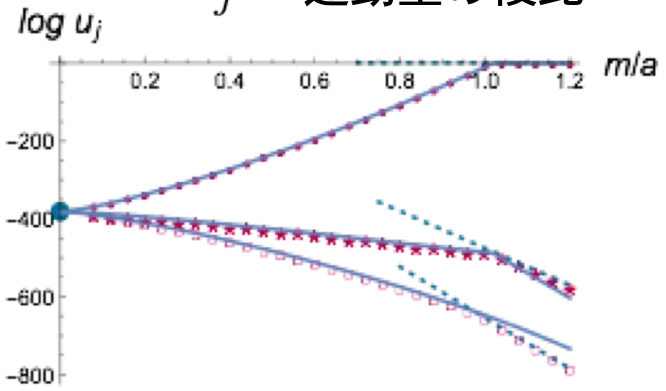
[K. Ito, YS and J. Suzuki, arXiv:1805.07556]

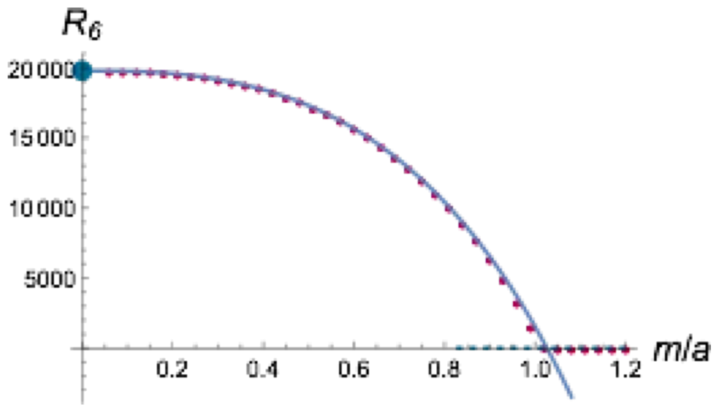
- 強結合6粒子散乱振幅 (remainder fn.)

$$R_6 = a^2 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \left(\frac{m}{a}\right)^{\frac{4}{3}n}$$

[α_n : 数係数、 a, m : 補助変数]

u_j : 運動量の複比





実線： 解析的結果、 点： 数値計算

行列模型

行列模型

超弦理論の非摂動的定式化を与えるとよそうされている理論
行列配位の足しあげによって定義される

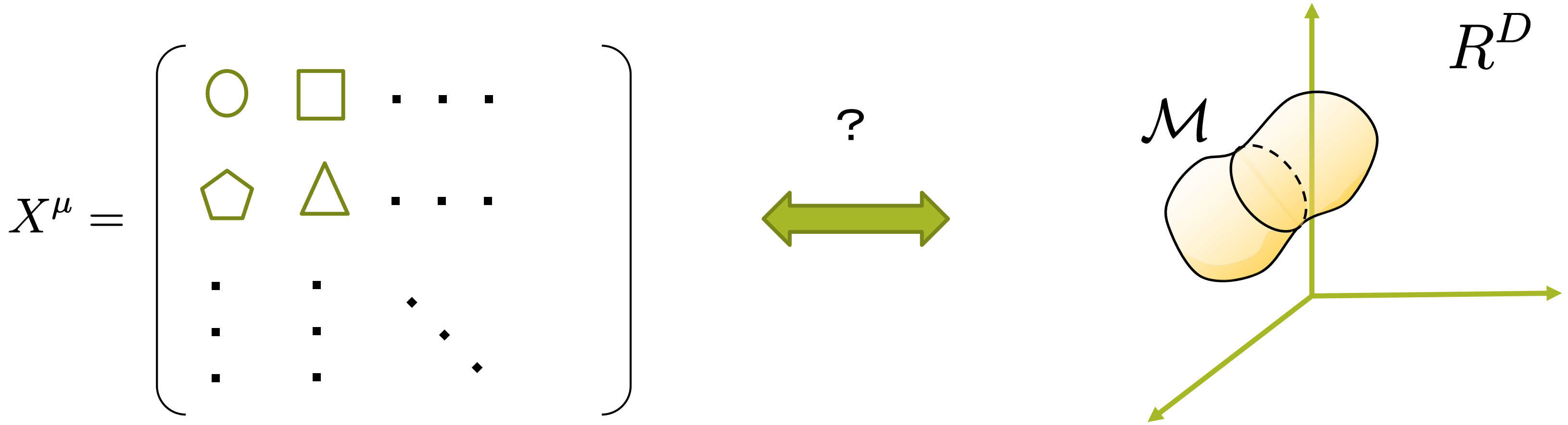
$$Z = \int DX^{\mu}\, e^{-S(X^{\mu})}$$ ：分配関数

X^{μ} ：N×Nエルミート行列　　$\mu = 1, 2, \cdots, 9$

超弦理論の物理量がこのシンプルな模型から正しく導かれることが、
多くの具体例から示されている

しかし、予想を完全に示すには、単に物理量の一致を確認する、
ということを超えた、より深い対応を理解することが必要だろう

問題点：行列の配位と超弦理論の幾何（弦の形等）の間の関係が不明

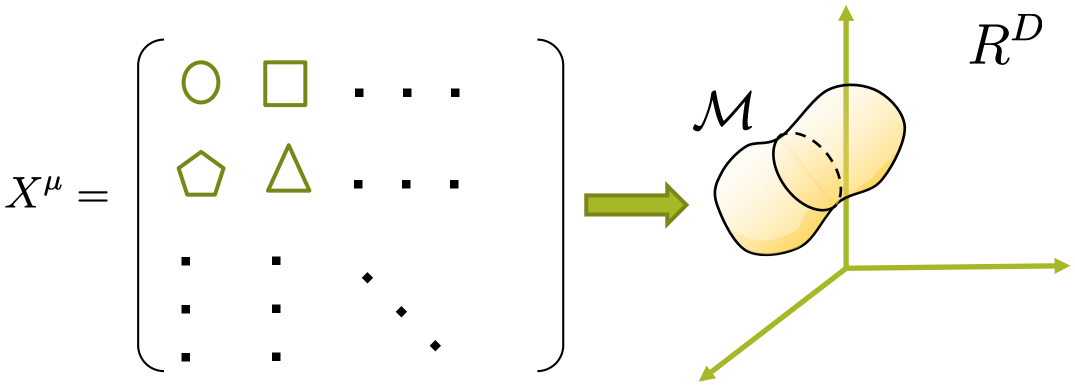


問１：与えられた行列から、弦やDブレーンの配位を構成できるか？
問２：与えられた弦やDブレーンの配位から、行列の配位を構成できるか？

問１：与えられた行列から、弦やDブレーンの配位を構成できるか？

量子力学におけるコヒーレント状態を応用することで、行列の配位から弦や膜の幾何学を再現することができる。[G. I. 2014]

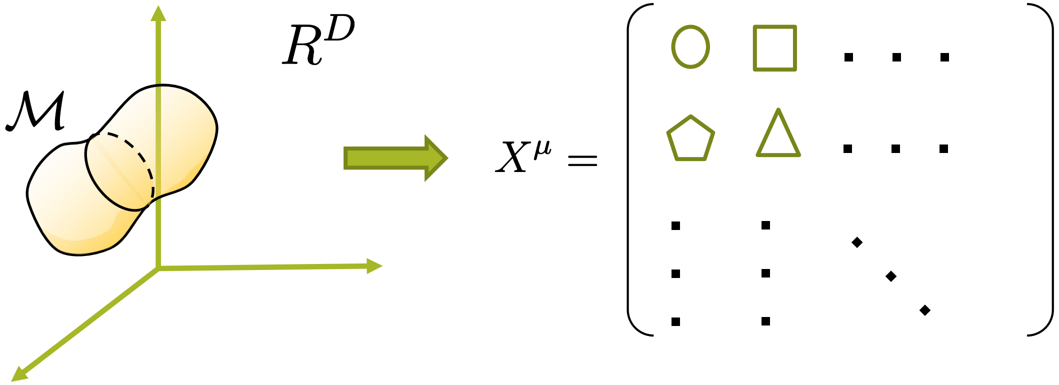
この構成において、超弦理論の計量やゲージ接続が行列模型において情報計量やBerry接続としてあたえられることを示した。[G. I.-松本-村木]



さらにこの記述は超弦理論のタキオン凝縮と密接に関係することを指摘した。 [浅川-G. I.-松本-松浦-村木]

問２：与えられた弦やDブレーンの配位から、行列の配位を構成できるか？

Berezin-Toeplitz量子化により行列を構成できる。この構成を球面等の具体例において実行し、この構成が問１の逆を与えていることを示した。[G. I.-松本-村木]



展望

超弦理論は大きな可能性を持った理論であるが、現在の定式化では不十分

引き続き、非摂動的定式化の完成に向けての研究が必要となる

- 弦の場の理論の古典解、次元正則化
- ゲージ/重力対応におけるグルーオン散乱振幅
- 行列模型における幾何学や物質の記述の理解
- 共形場理論におけるTT変形
- ゲージ/重力対応の数値的検証
- 時空の漸近対称性と低エネルギー定理
- 弦理論の非幾何学的背景時空