

弦理論

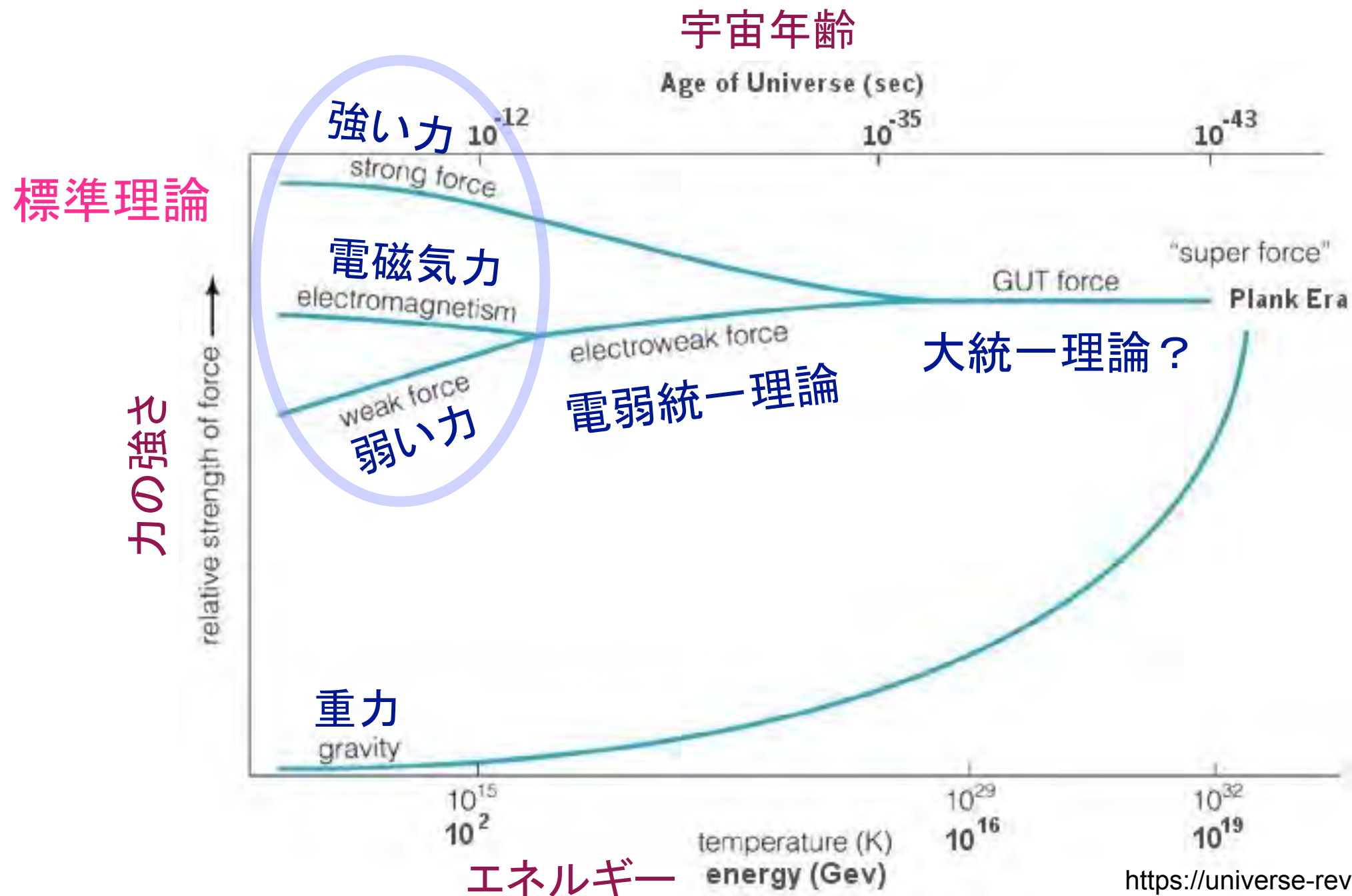
構成員

石橋延幸, 伊敷吾郎, 佐藤勇二

宇宙史センター構成員全体会議

2018年6月4日

標準理論を超えて



(量子) 重力を含む素粒子の統一理論？

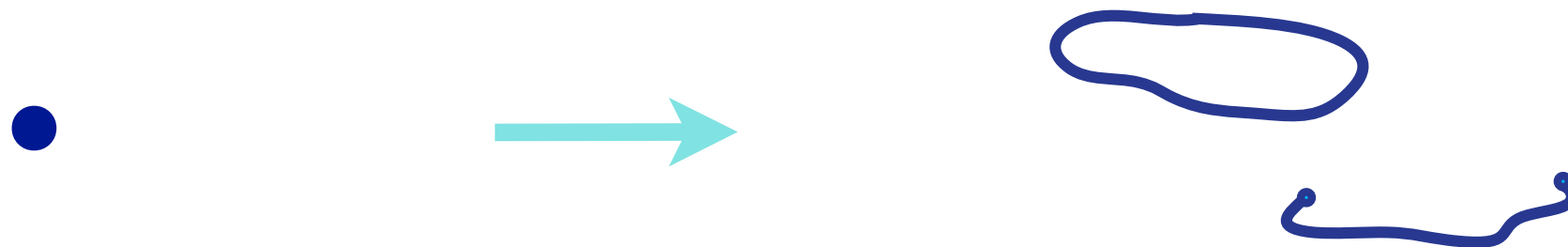
(超)弦理論

— 重力の量子論を含む素粒子の統一理論 —

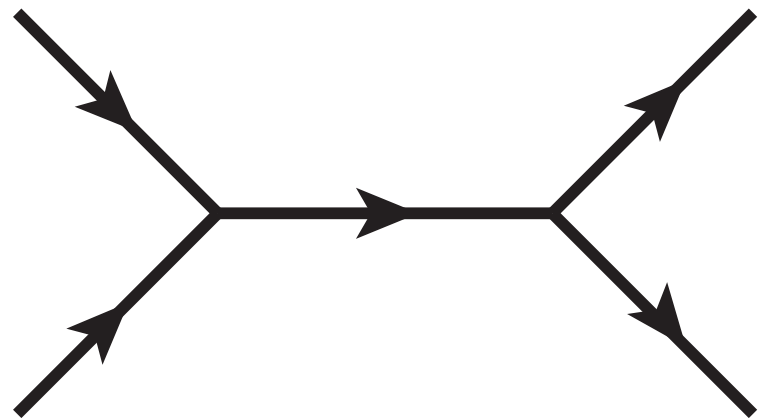
- 重力を量子化 (グラビトン)
⇒ 物理量が ∞ cf. ゲージ理論: “繰り込み”
[朝永, ...]
- 粒子から弦 (ひも) へ ⇒ **弦理論** [南部, ...]



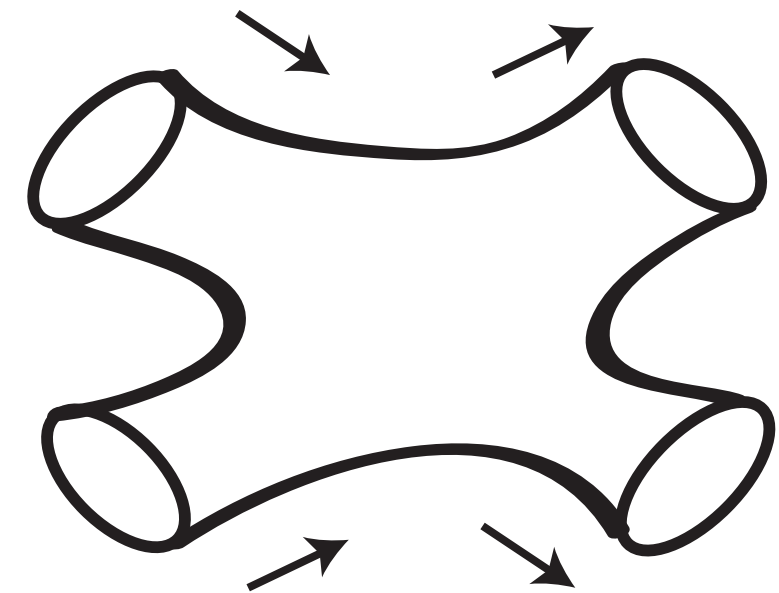
Wikipedia より



- 弦の大きさが十分小さいと
遠距離からは点粒子と区別できない



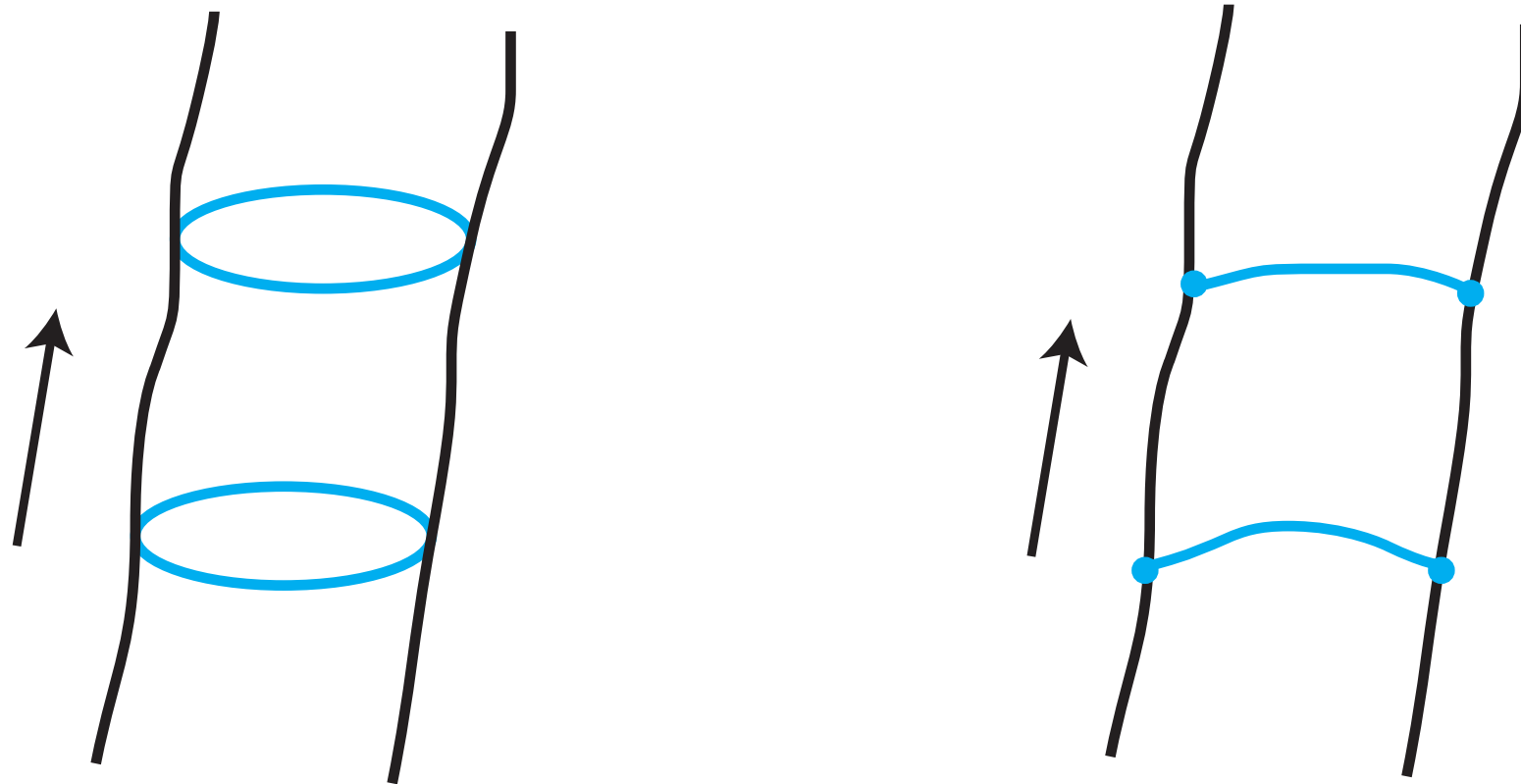
\approx



10^{-35} m

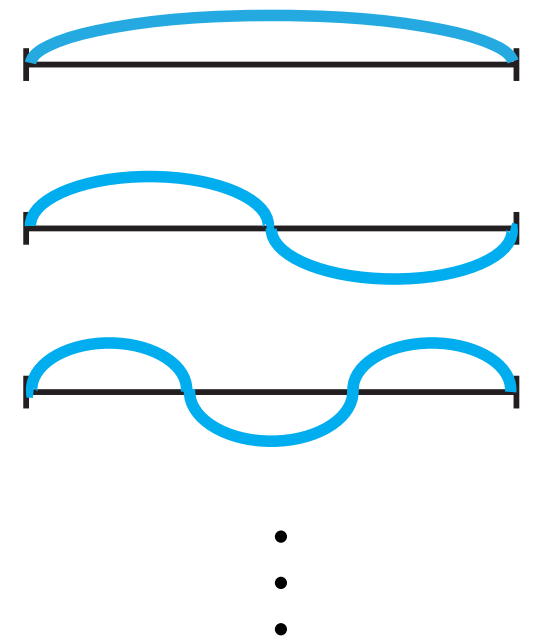
cf. 原子核 10^{-15} m





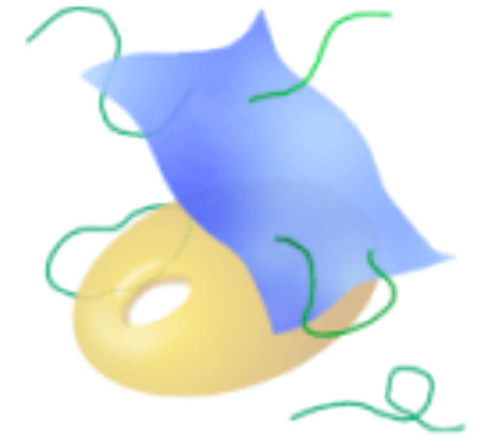
- 閉弦 : グラビトン (重力), ...
- 開弦 : ゲージ粒子, ...

- 無限個の振動モード \approx 無限個の種類の子



⇒ 重力を含む統一理論

弦理論の研究



- 弦理論は量子重力を含む
素粒子の統一理論の有望な候補
- 世界の主要研究機関で活発な研究が続いている
- 関連する分野に新鮮なアイデアを提供
[余剰次元を持つ素粒子模型、ブレーン宇宙論、数学 …]

超弦理論グループの研究

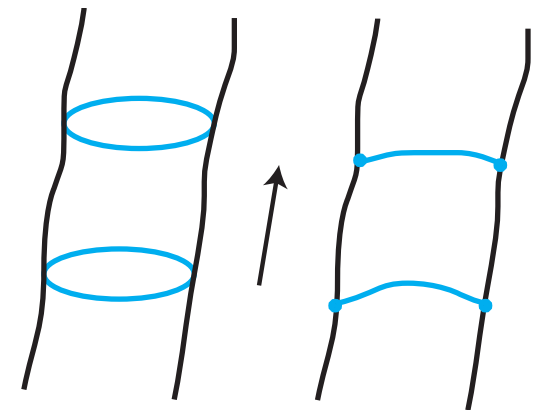
超弦理論グループの研究

現在、(1)弦の場の理論、(2)行列模型、(3)ゲージ/重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている

- 弦理論の非摂動論的定式化

弦理論でも摂動論を超える研究が大切

☆ 弦の場の理論、行列模型



- ゲージ/重力対応

弦理論の研究から、

ゲージ理論と重力理論の間に予期せぬ関係が見えてきた

昨年度の研究成果

論文

1. N. Ishibashi and K. Murakami, “Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Superstring Field Theory: Odd Spin Structure Contributions”, JHEP 1803 (2018) 063.
2. K. Ito, Y. Satoh and J. Suzuki, “MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations”, arXiv:1805.07556 [hep-th]
3. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, “Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry”, arXiv:1804.00900 [hep-th].
4. T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura and H. Muraki, “Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation”, arXiv:1804.00161 [hep-th] (to appear in PTEP).
5. N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda and T. Takahashi, “Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background”, arXiv:1804.01284 [hep-th] (to appear in JHEP).
6. Y. Satoh, Y. Sugawara and T. Uetoko, “Non-supersymmetric D-branes with vanishing cylinder amplitudes in asymmetric orbifolds”, JHEP 1708 (2017) 082.
7. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, “Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model”, JHEP 1802, 076 (2018).
8. Y. Asano, G. Ishiki, S. Shimasaki and S. Terashima, “Spherical transverse M5-branes in matrix theory”, Phys. Rev. D96 (2017) no.12, 126003.

国際会議発表

1. Nobuyuki Ishibashi, “Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory: Odd spin structure contributions” (招待講演),
SFT@HIT, (Holon Institute of Technology, Holon, Israel, June 23-25, 2017).
2. Yuji Satoh, “A world-sheet approach to T-folds” (招待講演),
New developments in AdS₃/CFT₂ holography,
(Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, Florence, Italy, March 20 - May 12, 2017).
3. Goro Ishiki, “Matrix geometry and string theory” (招待講演),
Noncommutative Geometry and K-theory at Rits - The Fourth China-Japan Conference -
(Ritsumeikan University, Mar. 26-28, 2018).
4. Goro Ishiki, “Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model” (招待講演),
International workshop ”Nonperturbative and Numerical Approaches to Quantum Gravity,
String Theory and Holography (ICTS, Tata institute, Bangalore, India, Jan. 29 - Feb. 2, 2018).
5. Goro Ishiki, “Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model” ,
APCTP workshop ”Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time,”
(APCTP, Pohang, Korea, Sep. 19-23, 2017).

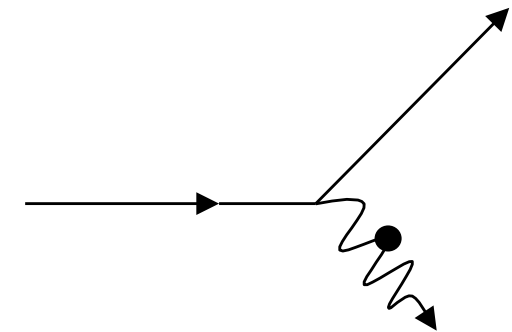
弦の場の理論

弦の場の理論

点粒子

作用 \longrightarrow ファインマングラフ

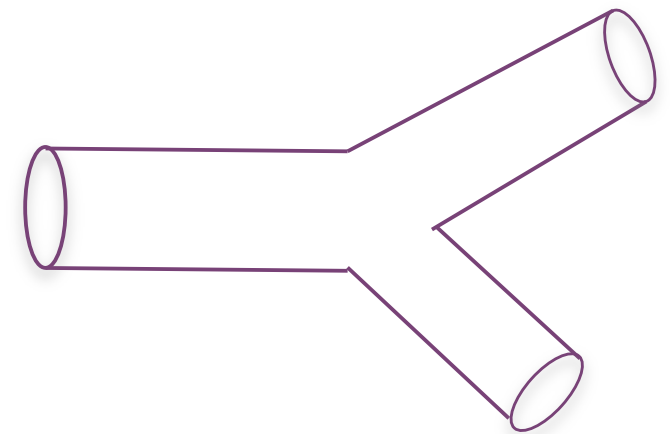
$$S = \int d^4x \left[-\frac{1}{4g^2} \text{Tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} i \gamma^\mu D_\mu \psi \right]$$



弦

作用 \longrightarrow ファインマングラフ

?



弦のファインマングラフを導き出す作用は何か？

弦の場の理論

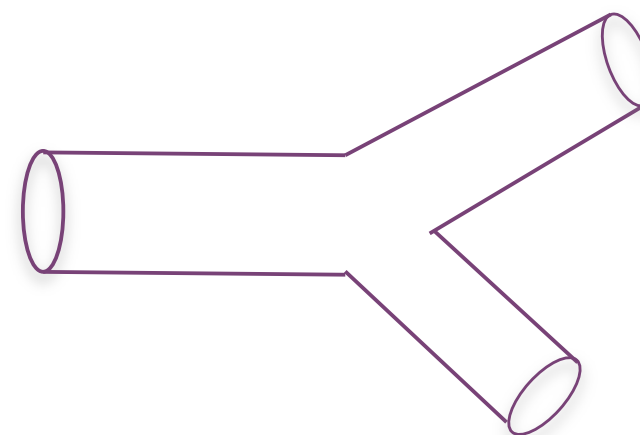
弦

作用



ファインマングラフ

?



○弦理論の基本方程式(Maxwell方程式、Einstein方程式にあたるもの)は何か？

○この作用がわかれば、これまでできなかった計算ができるようになるはず

- leading log
- 非摂動近似

○最近まで超弦理論を記述する作用は作られていなかった

弦の場の理論

Sen (2016)

$$S = \frac{1}{g^2} \left[-\frac{1}{2} \langle \tilde{\Psi} | c_0^- Q_B \mathcal{G} | \tilde{\Psi} \rangle + \langle \tilde{\Psi} | c_0^- Q_B | \Psi \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} \{ \{ \Psi^n \} \} \right]$$

- ゲージ不変、ローレンツ不変
- 無限個の相互作用のため実際に計算するのは困難

石橋-村上: light-cone gauge string field theory

$$S = \frac{1}{2} \Psi (i\partial_t - H) \Psi + \frac{g}{3} \Psi^3$$

- ゲージ固定され、ローレンツ不変性が明白でない理論
- 発散があるが、次元正則化の方法により、うまく定義することができる
(2009-)
 - odd spin structureの問題(2017)
 - Ramond sector, heterotic strings(2018)
 - この理論を用いた計算(2018-)

弦の場の理論

Bosonic open Stringの場の作用

$$S = -\frac{1}{g^2} \int \left(\frac{1}{2} \Psi Q \Psi + \frac{1}{3} \Psi * \Psi * \Psi \right)$$

Bosonic open Stringの場の運動方程式

$$Q\Psi + \Psi * \Psi = 0$$

- ・電磁場のMaxwellの方程式を含むその他無限個の場の複雑な方程式

石橋-岸本-増田-高橋

この方程式の解で、トポロジカルに非自明なもの(トーラス上で定数磁場がある解)を構成し、その性質を調べた

行列模型

行列模型と非可換幾何の研究（伊敷）

行列模型：超弦理論の非摂動的定式化を与えると期待されている理論
行列配位の足しあげによって定義される

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

X^μ : $N \times N$ エルミート行列

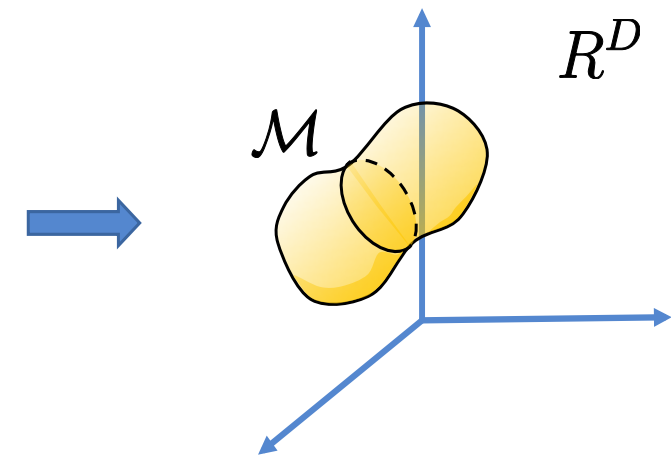
- 問題点①：行列の配位と超弦理論の幾何（弦の形等）の間関係が不明
問題点②：超弦理論の物体が本当に全て含まれているのかが不明

2017年度の研究成果（伊敷）

1. 行列配位を用いた幾何学の記述法を理解できた

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。[伊敷 2014]

$$X^\mu = \begin{pmatrix} \circ & \square & \dots \\ \pentagon & \triangle & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$



この方法について以下の理解を得た。

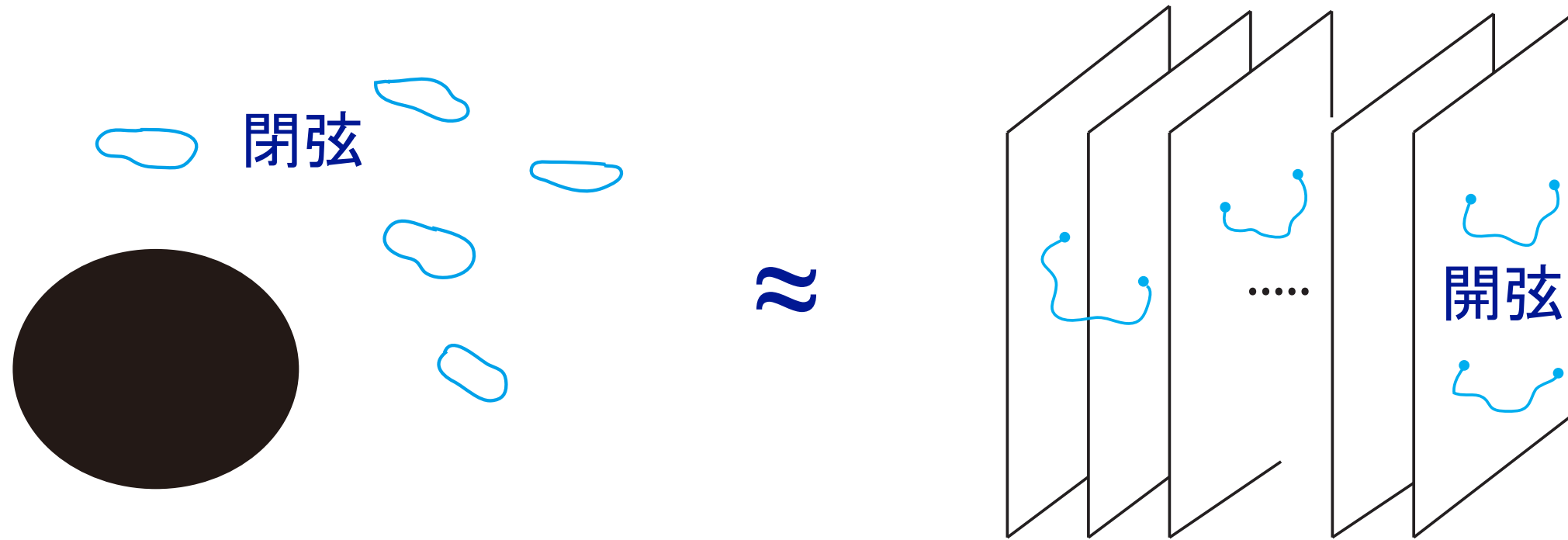
- ・ 超弦理論のタキオン凝縮と密接に関係
- ・ Berezin-Toeplitz量子化と密接に関係（⇒**数学分野**で招待講演）

2. 行列模型を用いたM5-braneの記述を理解できた

M理論（超弦理論の強結合極限）におけるM5-braneが行列模型に含まれていることを初めて証明した。また、関連するテーマについて書いた過去の論文により、2017年度の**素粒子メダル奨励賞**を受賞した。

ゲージ/重力対応

ゲージ／重力対応



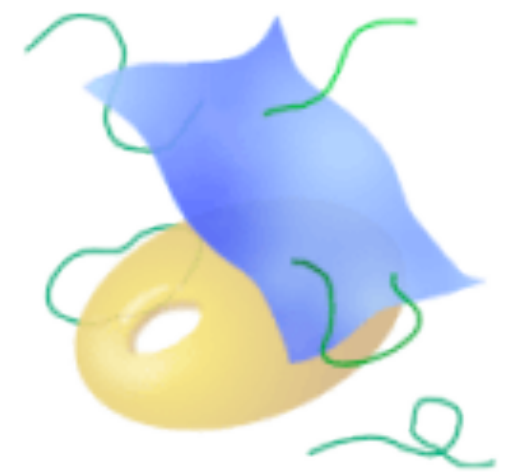
ブラックホール, 重力理論

ゲージ理論

弱結合 ←

→ 強結合

弦理論のソリトン
(膜のように広がりを持つ物体)



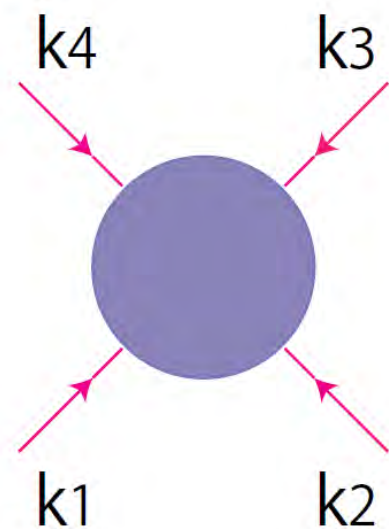
ゲージ／重力対応

- 様々な応用

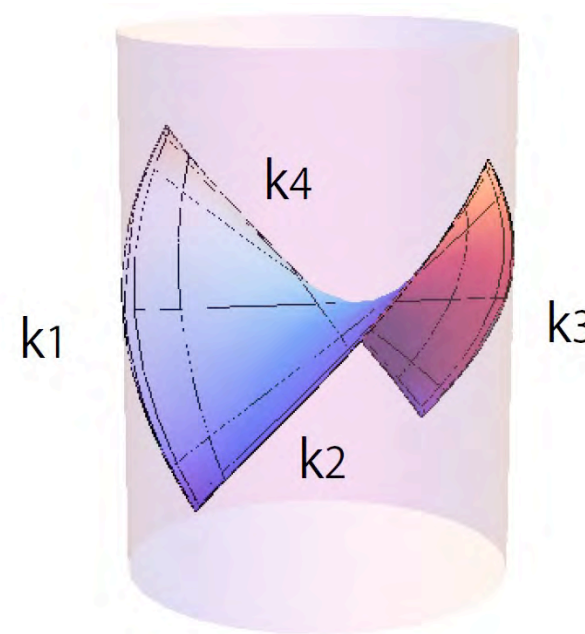
強結合ゲージ理論 \leftarrow 弱結合(古典)重力/弦理論

cf. QCD

e.g.)



=



極大超対称ゲージ理論
の強結合散乱振幅

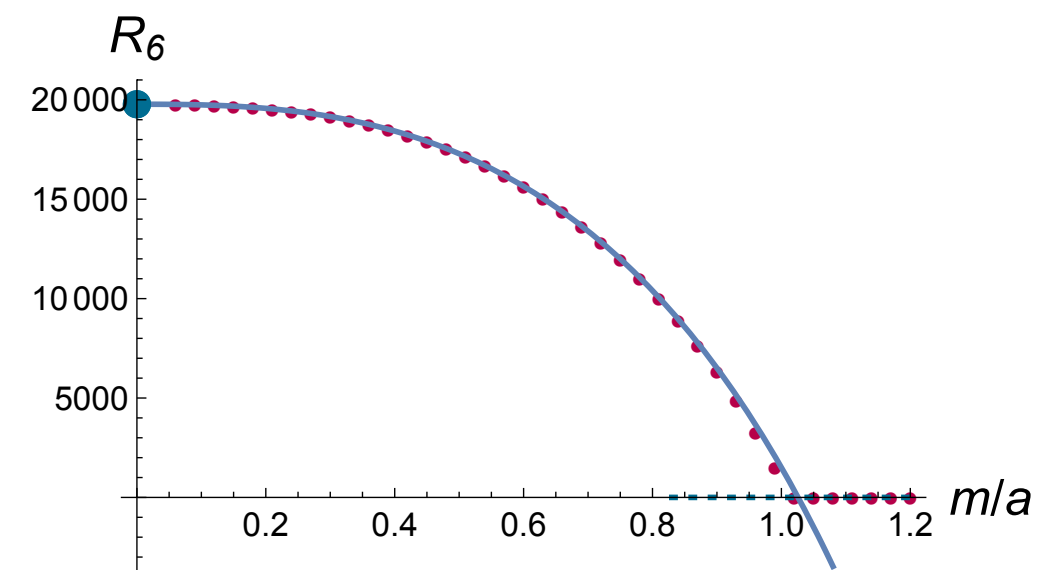
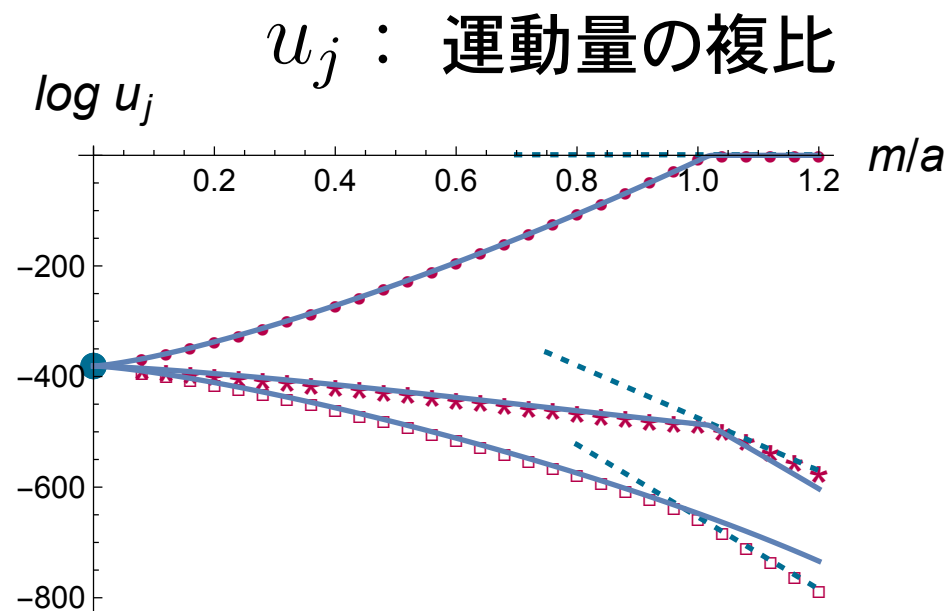
曲がった(反ドジッター)
時空中の極小曲面

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.)

$$R_6 = a^2 \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \left(\frac{m}{a}\right)^{\frac{4}{3}n} \quad [\alpha_n : \text{数係数}, a, m : \text{補助変数}]$$

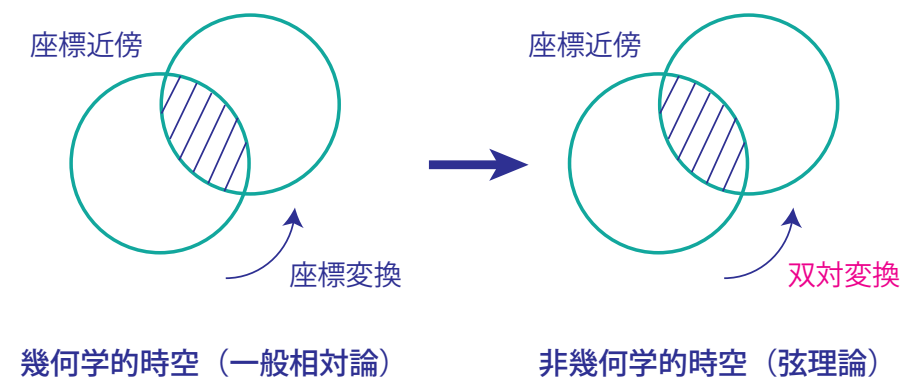


実線：解析的結果、 点：数値計算

非幾何学的背景時空と宇宙項問題

[YS, Y. Sugawara and T. Uetoko, JHEP 1708 (2017) 082]

- 弦理論では一般相対論の範疇を超える
“非幾何学的な”時空が可能



- このような時空中の弦理論により
超対称性を破るが小さな宇宙項を実現する可能性を研究