

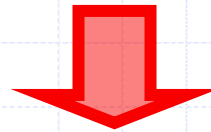
超弦理論とは何か？

-Pure Spinor Formalism of Superstrings-

小田 一郎 (琉球大学理学部)

究極理論への夢

- ◆ 時空から物質までの統一的な理解
- ◆ 量子重力理論の構築
- ◆ 宇宙の創生や終末の理解 etc.



超弦理論 (Green & Schwarz '84)

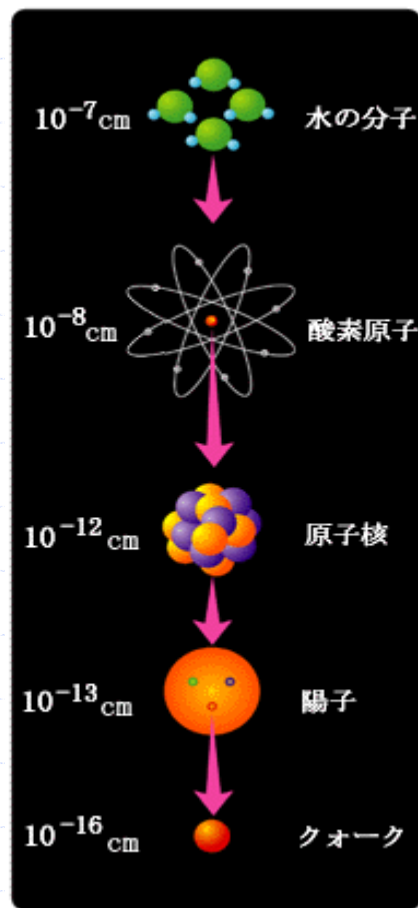
“First Revolution of Superstrings”

摂動論的な発展 '84—'89

“Second Revolution of Superstrings”

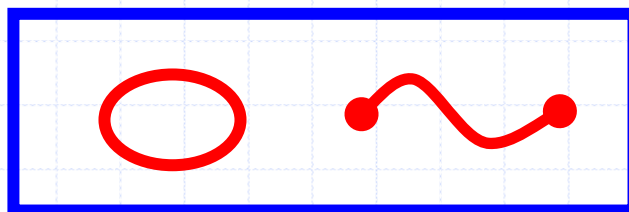
非摂動論的な発展 '95—'00

素粒子とは？



1980年まで、“標準模型”
問題点: 多くの素粒子(30個以上)、
多くの任意パラメータ、重力が
扱えない etc.

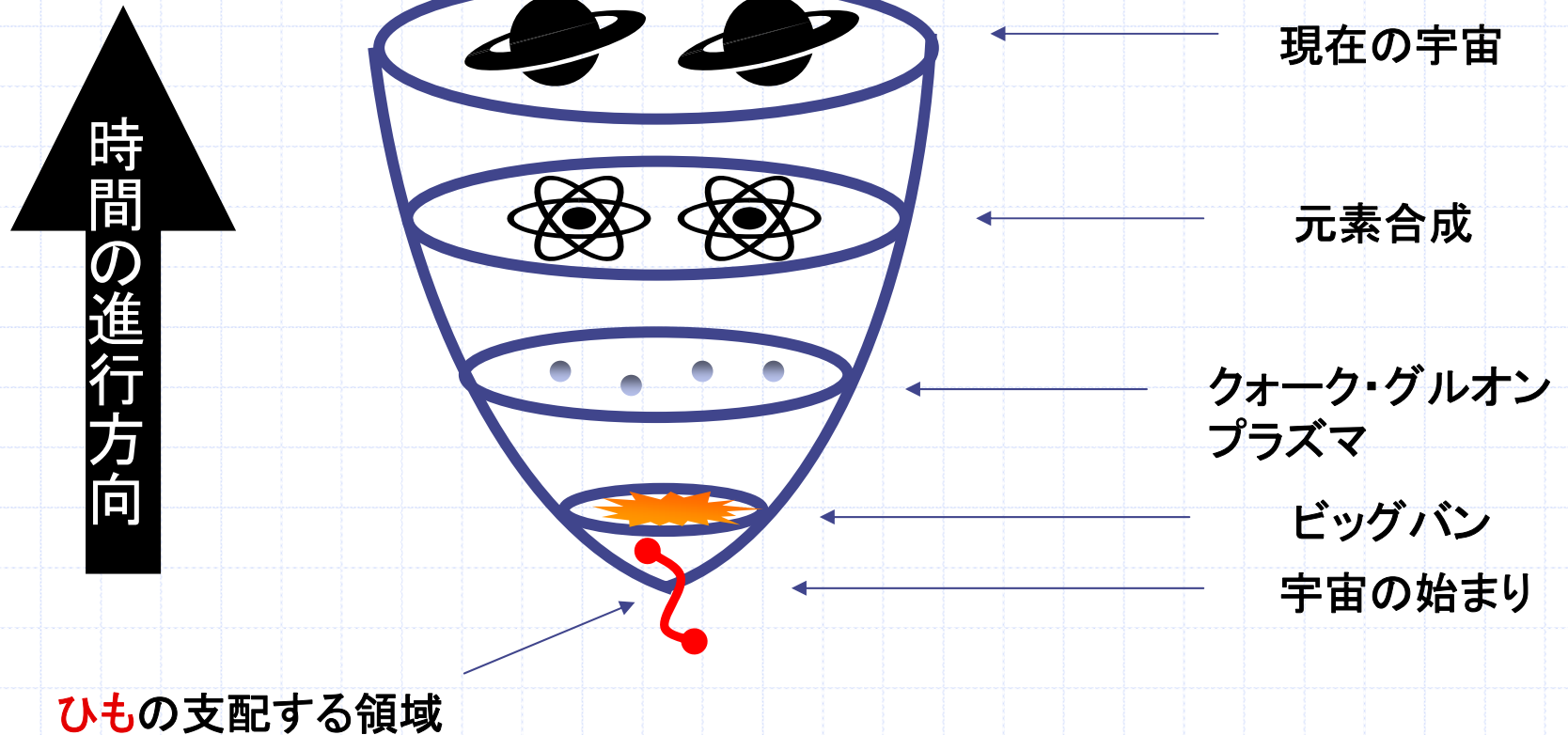
10^{-33} cm



現在、“Superstring”

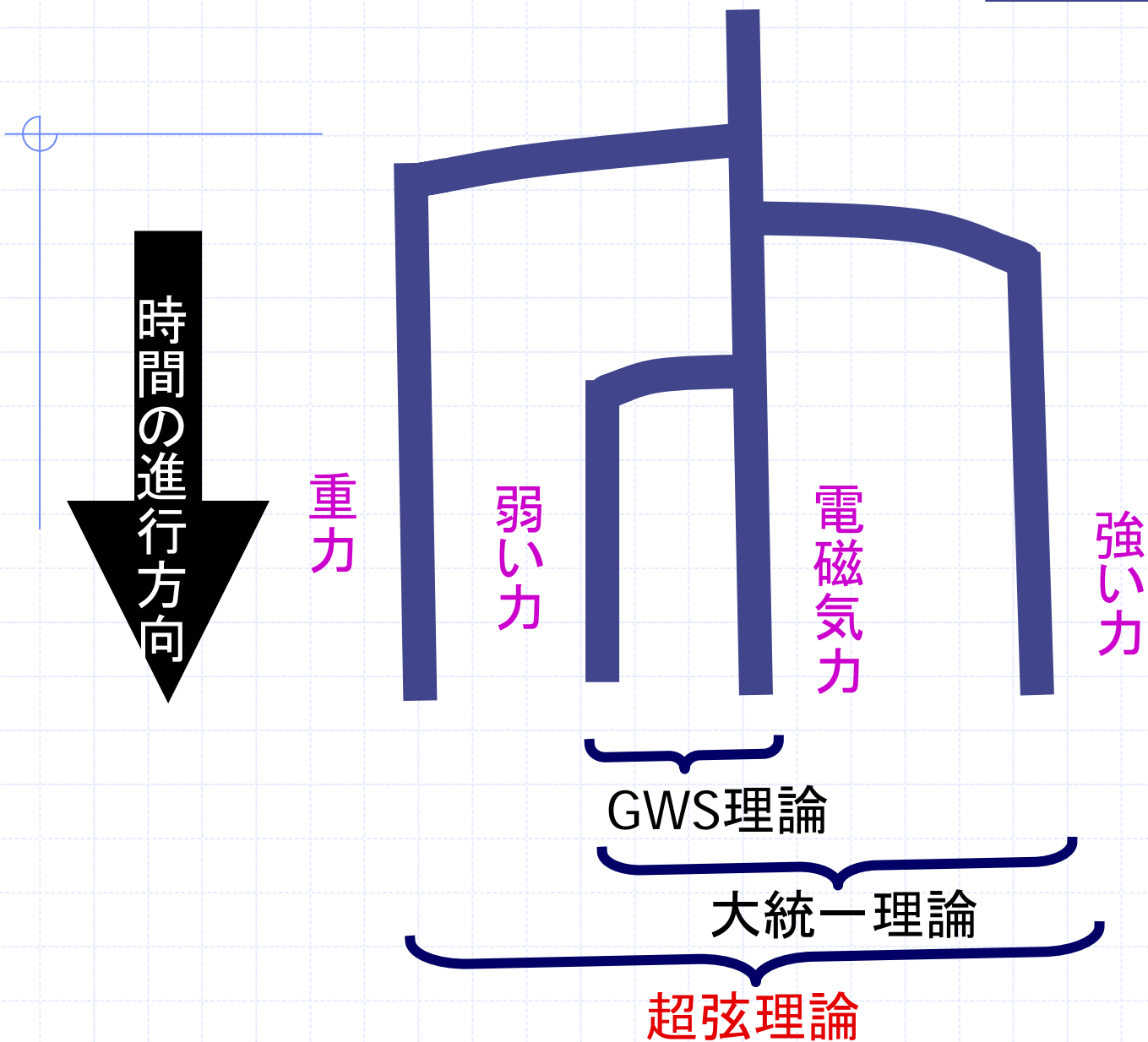
どうして素粒子から宇宙がわかるのか？

→ (答) 宇宙はビッグバン(大爆発)から始まったから！



力(相互作用)の統一とは？

Introduction



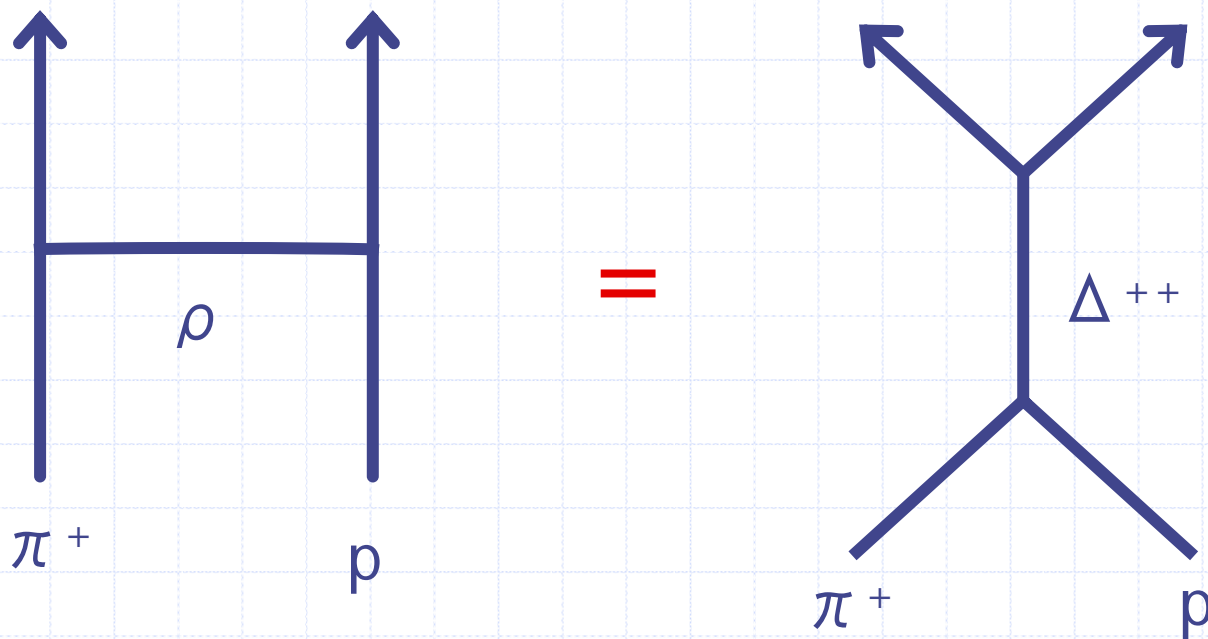
“統一場理論”を
作りたいなー
.....



©1991 Tom Hara

ハドロンのひもモデルーひも理論の誕生ー

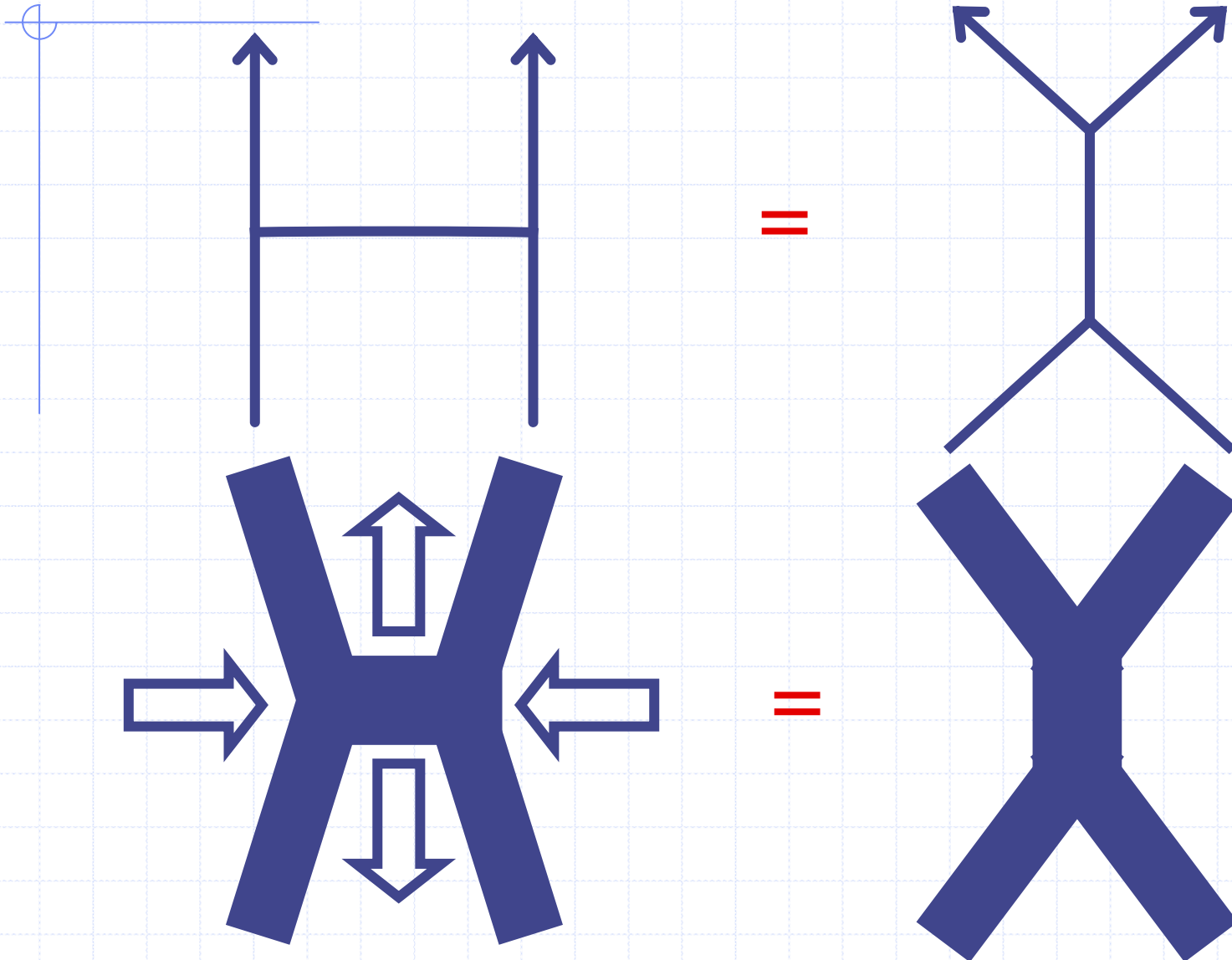
‘60代後半： ハドロンの奇妙な双対性が見つかる



ハドロンとは？

陽子、中間子などの強い相互作用をする粒子の総称。

南部流解釈



ハドロンのひもモデルの困難

- ◆ 多くの未観測のハドロンの出現
- ◆ スピン2で質量0の謎の粒子の存在
- ◆ 質量が負の**タキオン**の存在
- ◆ 時空の次元は**26次元** etc.



ハドロンの正しい理論は、
量子色力学(QCD)

超弦理論の登場

First Revolution of Superstrings '84-'89

'84 M. Green & J. Schwarz

- ① 超対称性を持ったひもの導入(タキオンの消去)
- ② $E=1\text{ GeV}$ から $E=10^{19}\text{ GeV}$ へスケールアップ
(ハドロンの物理ではなく、量子重力理論を含む究極理論と解釈)

超対称性(Supersymmetry)とは？

ある素粒子に統計性が反対で、スピンの1/2だけ異なる粒子を関係させる対称性こと。超対称性があると、**真空のエネルギーは0以上になる**という性質がある。

例. クォーク \longleftrightarrow スクォーク

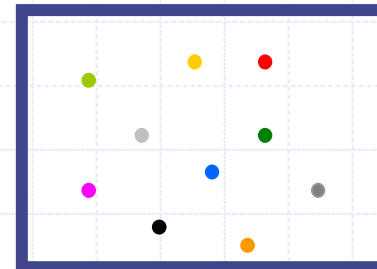
究極理論としてのひも理論

- ◆ 多くの未観測のハドロン(→素粒子)の出現
 - 統一理論に現れるたくさんの素粒子
- ◆ スピン2で質量0の謎の粒子の存在
 - 重力を媒介する重力子(グラビトン)
- ◆ 質量が負の**タキオン**の存在
 - 超対称性により出現しない
- ◆ 時空の次元は**26次元**
 - **10次元**に減少。Kaluza-Kleinのコンパクト化

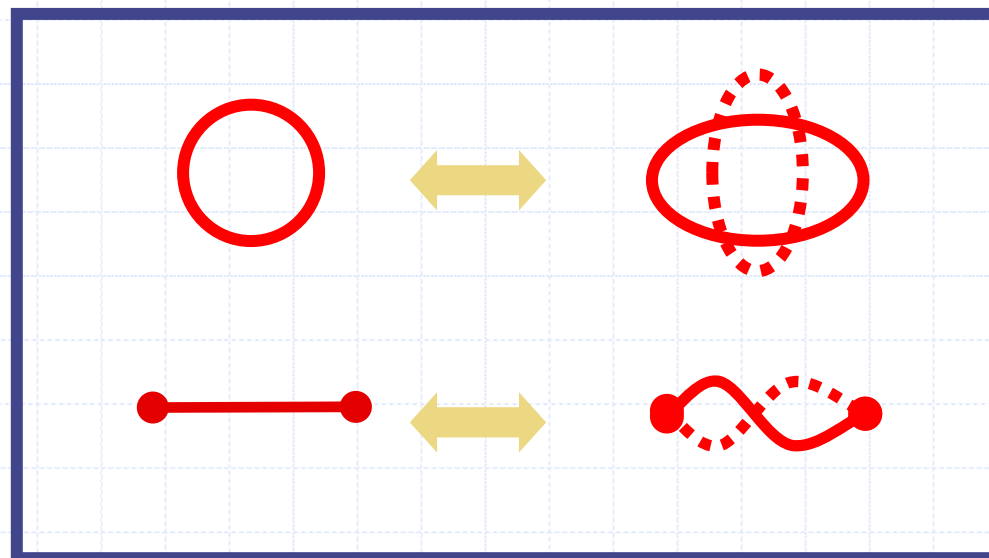
超弦理論とは？

First Revolution of Superstrings '84-'89

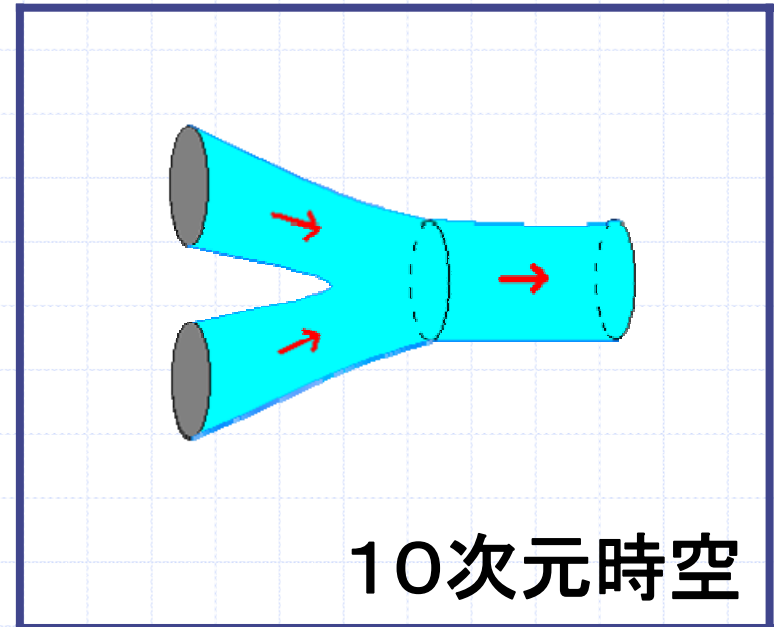
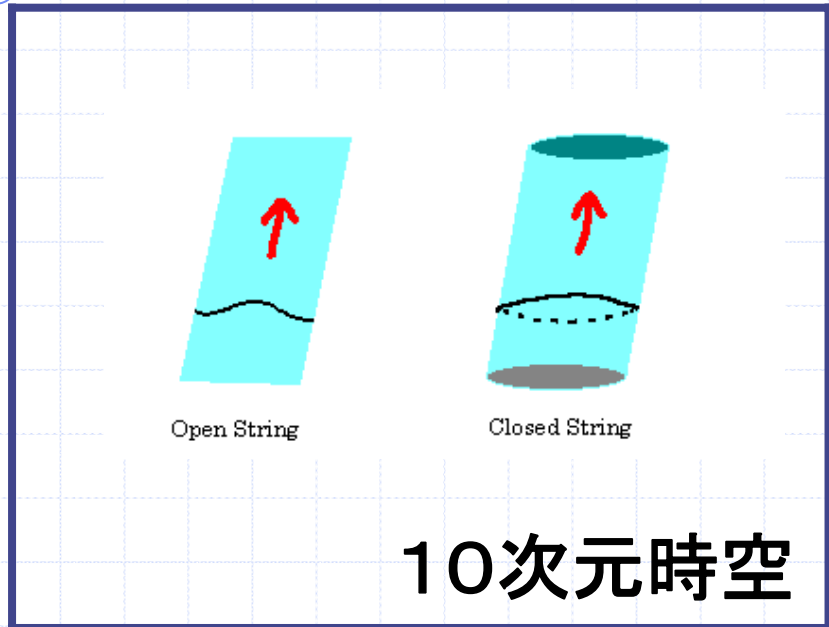
素粒子 = 点粒子



素粒子 = ひも



ひもの力学

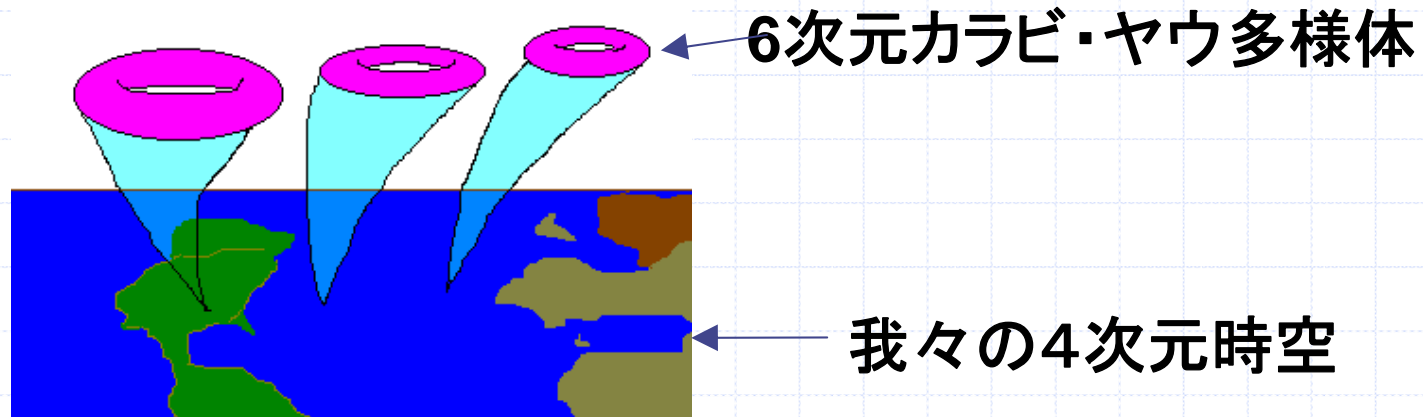
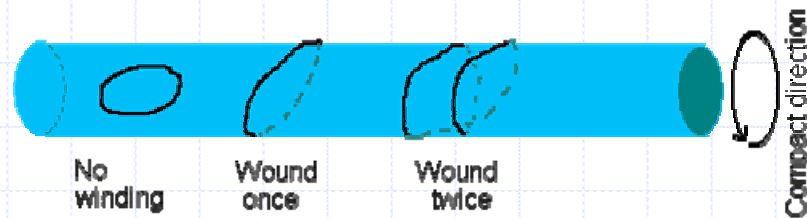


散乱振幅 = + ...

= 2次元の種数 g のリーマン面の和

我々の宇宙は4次元なのでは？

コンパクト化



超弦理論('84-'89)から得られた知見

- ◆ 神(?)は、最初に**10次元**の時空を作った
- ◆ 6次元部分がコンパクト化し、残った4次元部分が現在の宇宙となった
- ◆ **量子重力理論**が構成できる
- ◆ 重力を含むすべての力(相互作用)や物質が自然に統一できる
- ◆ ゲージ群として、 **$SO(32)$** や **$E_8 \times E_8$** が予言される
- ◆ 量子異常や発散が全くない etc.

Second Revolution of Superstrings '95—'00

First Revolution of Superstrings '84—'89

➡ 摂動論的なアプローチに基づく発展

摂動論とは？

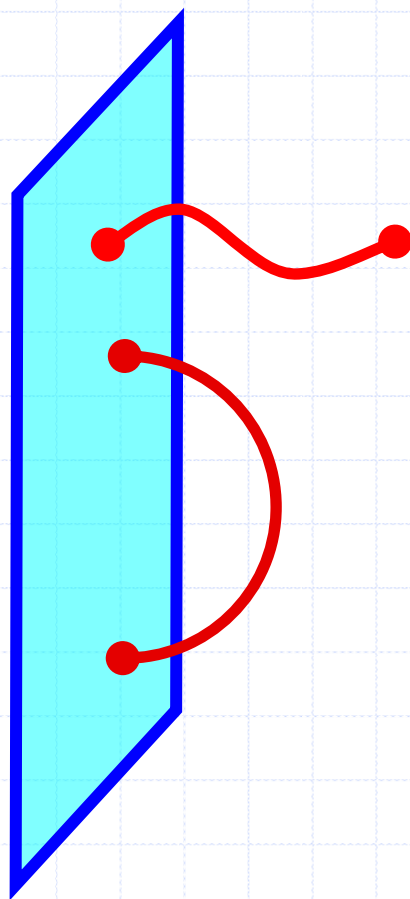
- ◆ 古典論からの量子効果のずれを、少しずつ補正して行く近似的な計算方法。
- ◆ 中間状態に“有限個”の仮想粒子が出現する場合には有効。 cf. 量子力学
- ◆ 中間状態に“無限個”の粒子が関与する“真空”の転移などの現象には無力！

➡ 無数にある超弦理論の“真空”から、我々の4次元宇宙を選ぶことが出来ない

超弦理論の新たな発展

Second Revolution of Superstrings '95-'00

非摂動論的なアプローチに基づく発展



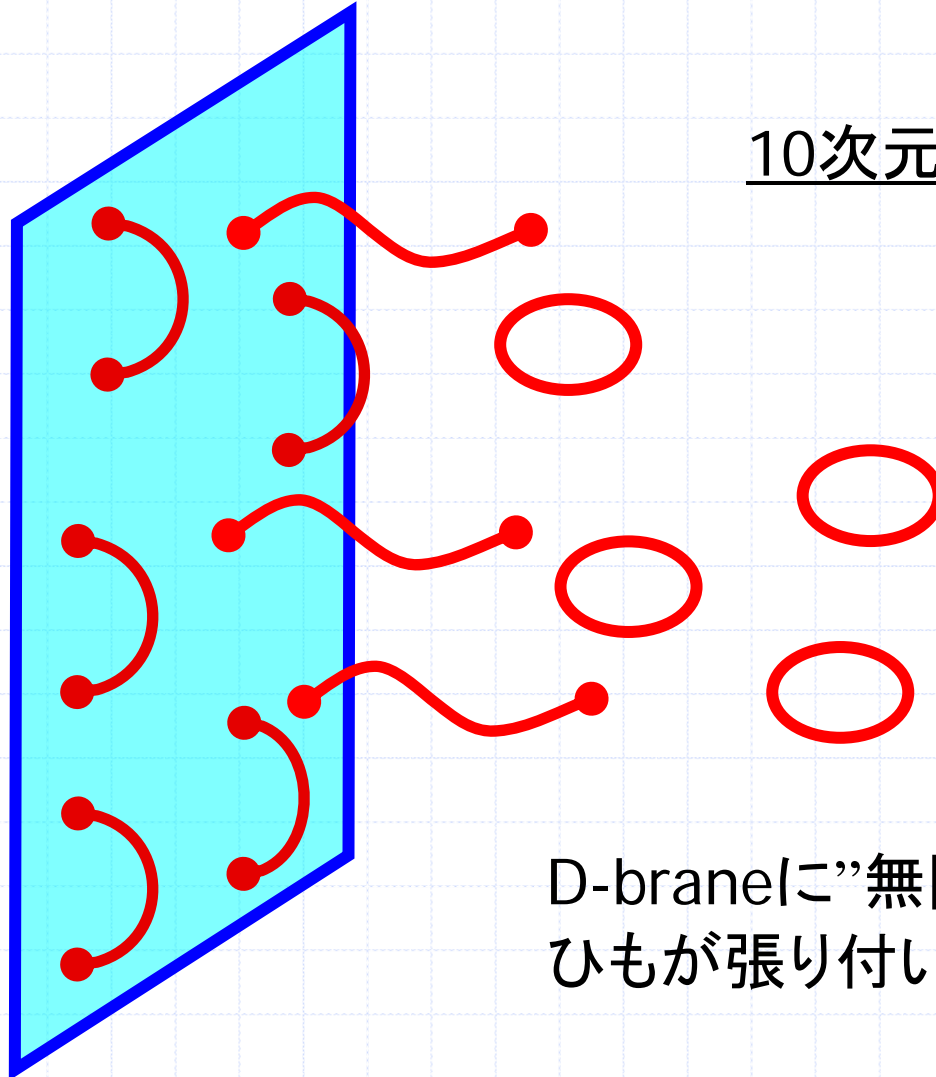
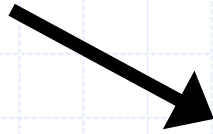
D-brane

超弦理論の安定な
古典解

D-braneと非摂動論

Dp-brane

空間p次元の面



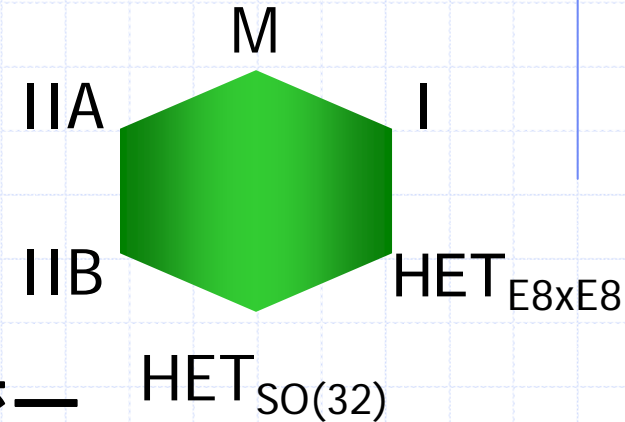
10次元の時空

D-braneに”無限個”の
ひもが張り付いている

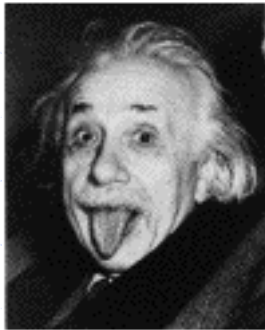
超弦理論('95-'00)から得られた知見

- ◆ D-brane
- ◆ T, S, U 双対性
- ◆ M理論
- ◆ 10次元でのすべてのモデルの統一
- ◆ 行列模型と非可換微分幾何
- ◆ ゲージ理論と重力理論の新しい関係
- ◆ ミラー対称性
- ◆ **ブラックホールのエントロピー公式の理解**

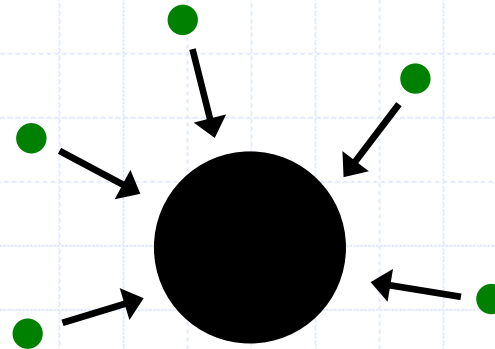
etc.



ブラックホール



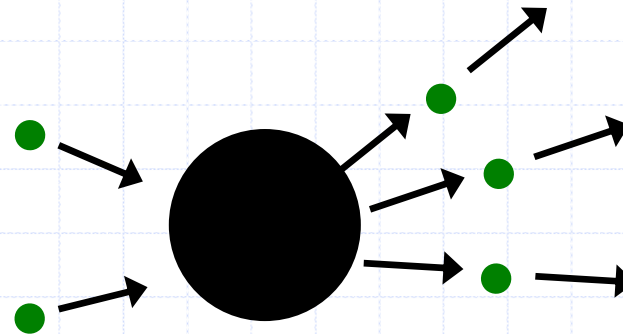
1915



ブラックホール

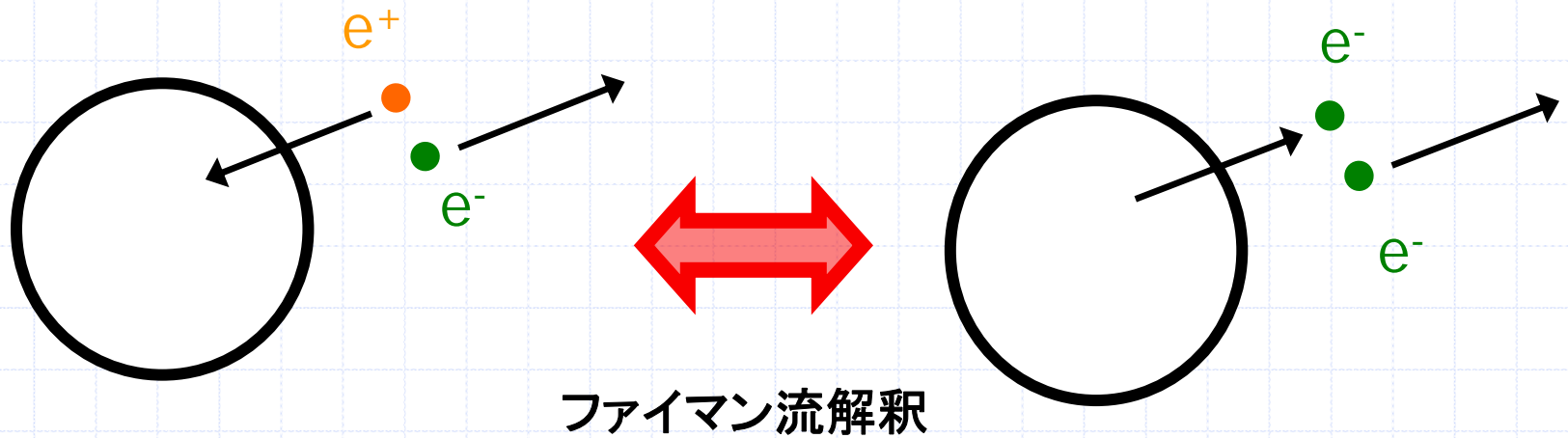


1964

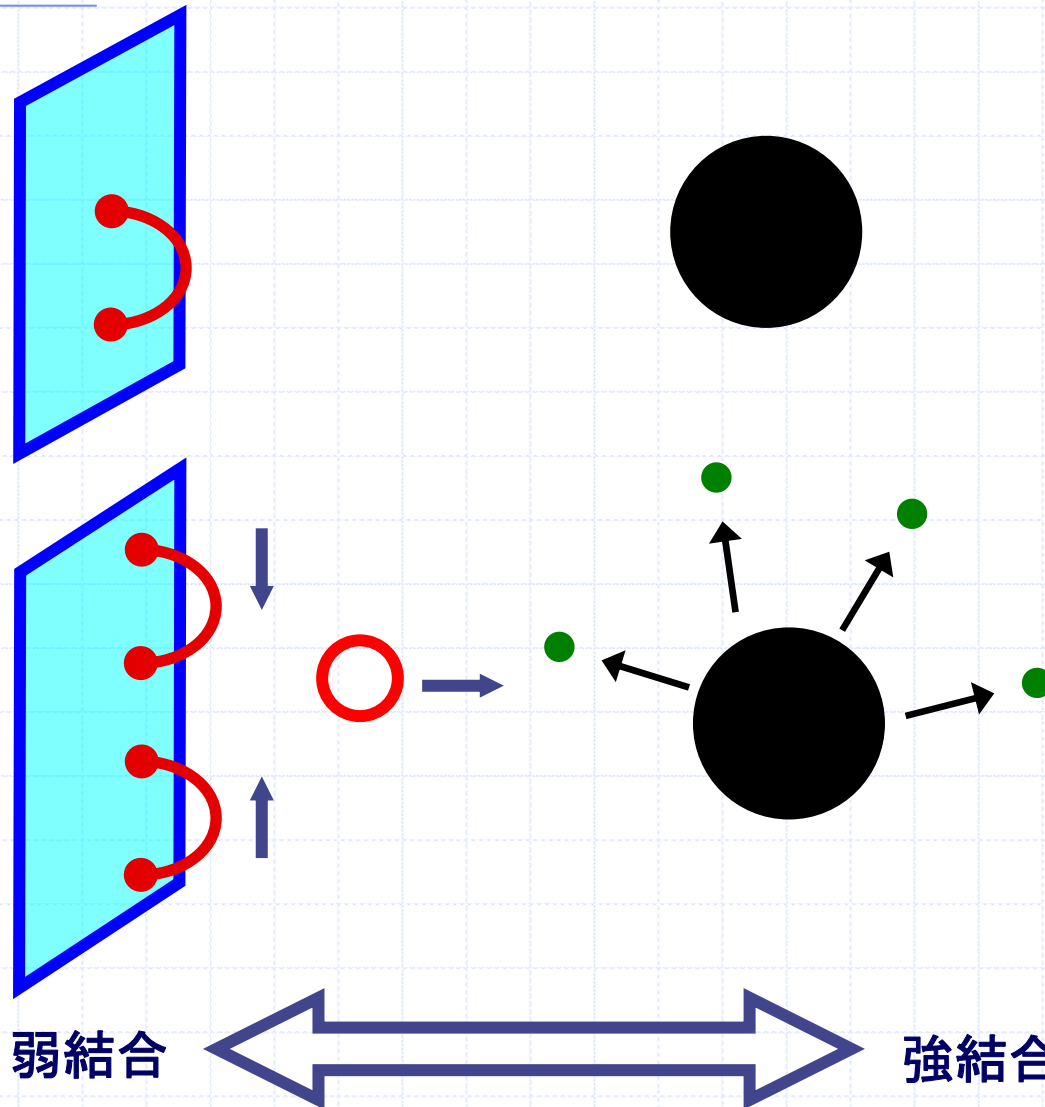


量子化されたブラックホール

ブラックホール輻射(ホーキング輻射)



ブラックホールのエントロピーとD-brane



$$S = \frac{1}{4} \frac{kc^3}{G_N \hbar} A_H$$

情報量の
喪失はなし

弱結合

強結合

未解決の問題

- ◆ 完全な理論ができていない。まだ、モデルの段階である
- ◆ 指導原理や対称性がわからない
- ◆ 幾何学や代数構造もわからない
- ◆ 10次元では1つの“理論”しかないにも拘らず、4次元にコンパクト化すると数万個の現象論が出現する etc.

第1量子化された超弦理論

1. **RNS理論** (ラモン・ヌブー・シュワルツ理論)

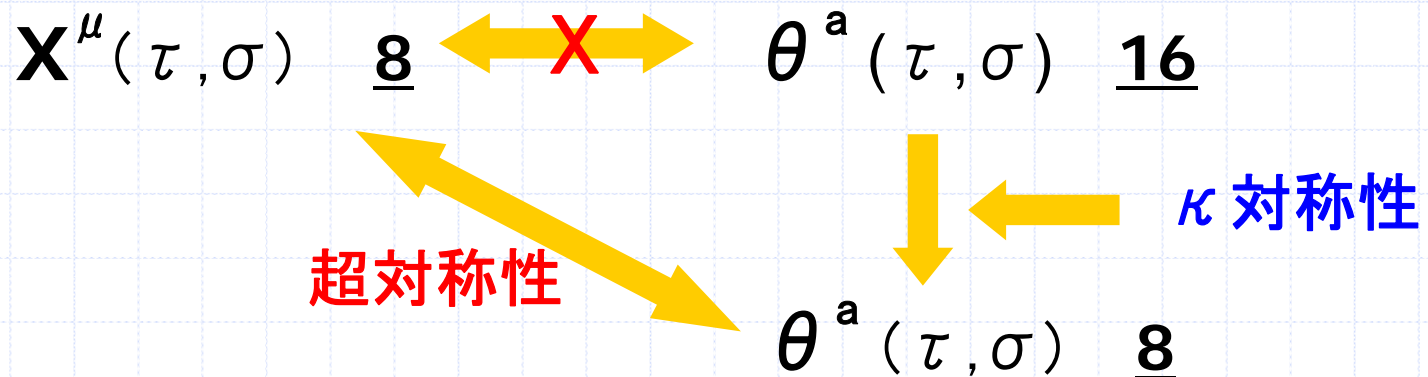
- 2次元の超対称性
- 10次元の超対称性はある射影後、出現
- D-braneの関与する現象を**扱えない!**
- ローレンツ共変な量子化が可能

2. **GS理論** (グリーン・シュワルツ理論)

- 10次元の超対称性が明白
- D-braneの関与する現象が**扱える!**
- **ローレンツ共変な量子化が難しい**

GS理論の量子化の問題

10次元の超対称性が明白



しかし、10次元で、ローレンツ共変なスピノールの最小の成分数は、16！

\rightarrow ローレンツ共変な量子化が難しい

'84-'00まで約15年間の謎： 1000以上の論文

GS理論の新しい量子化の方法

$$S = \int d^2 z \left(\frac{1}{2} \partial X^\mu \bar{\partial} X_\mu + p_a \bar{\partial} \theta^a + \omega_a \bar{\partial} \lambda^a \right)$$

$$\lambda^a (\Gamma^\mu)_{ab} \lambda^b = 0$$

λ^a は複素数で、交換する(非交換ではない!) 10次元のスピンール
 11個の独立成分 “**Pure spinor**”: E. Cartan('30)

$$\left\{ \begin{array}{l} X^\mu \\ \omega_a \\ \lambda^a \end{array} \right. \begin{array}{l} \underline{10} \\ \underline{11} \\ \underline{11} \end{array}$$

32

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta^a \\ p_a \end{array} \right. \begin{array}{l} \underline{16} \\ \underline{16} \end{array}$$

32

自由度の数が一致

Pure Spinor Formalismの現状と将来

- ◆すべてのノン・トリビアルな思考テストには合格！
- ◆約15年間にも及ぶ難問が解かれた！

将来の課題:

1. 高次のループ計算
 2. D-braneの関係する散乱振幅の計算
 3. 弦の場の理論への応用
 4. 行列模型への応用
 5. 4次元の超弦理論への応用
 6. M理論の構成
- etc.