

金茶会

スパコンで探る超弦理論

平成20年 4月 18日 (金)

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所、理論研究系

西村 淳

重力 ー素粒子理論における最大の問題

■ 自然界の4つの基本的な相互作用

電磁相互作用
強い相互作用
弱い相互作用
重力相互作用

標準模型

くりこみ可能なゲージ理論

結合定数が無次元量

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$E = mc^2$$

重力はエネルギーが高くなるほど強くなる ➡ くりこみ不可能

重力は「時空の力学」

■ アインシュタインの一般相対論

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = T_{\mu\nu}$$



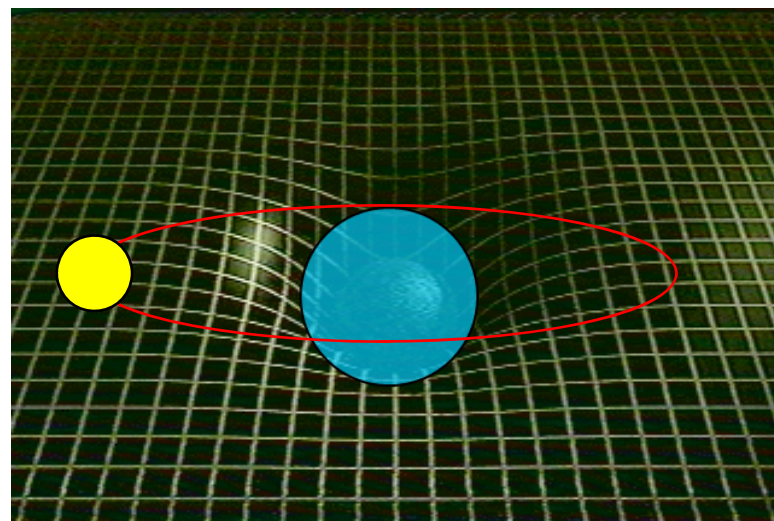
時空のゆがみ



物質(エネルギー)



重力

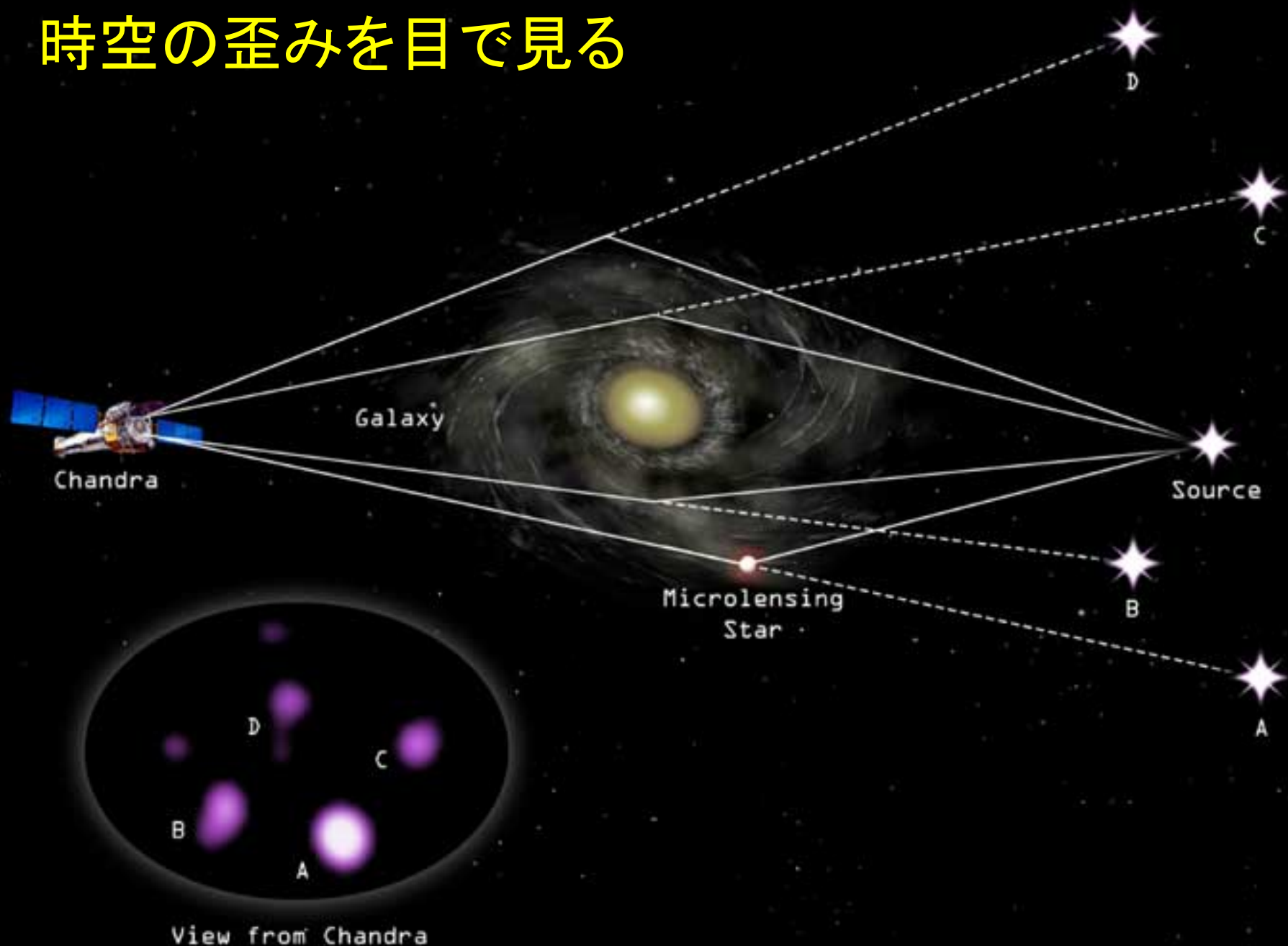


重力の量子論 = 時空の量子論

c.f.) dark energy

⇒ 時空そのものの概念を考え直さなければいけない

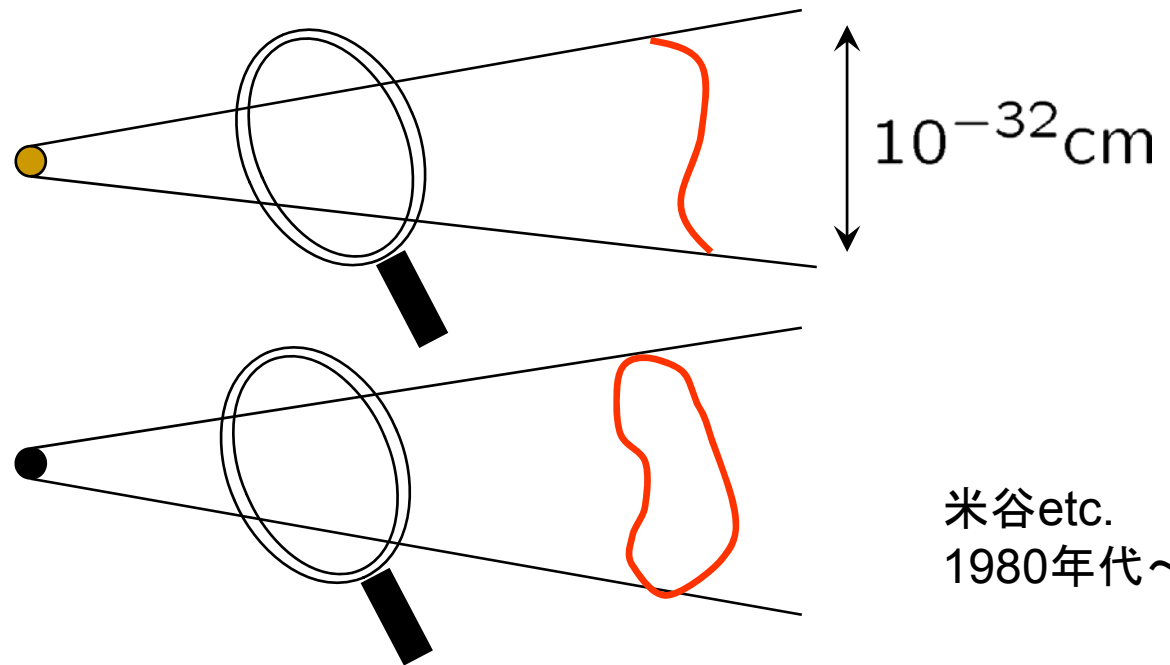
時空の歪みを目で見る



超弦理論 — 重力の量子論への重要な手がかり

■ 弦の振動の仕方によって様々な粒子を表す

光子
グルオン
 W^\pm , Z など



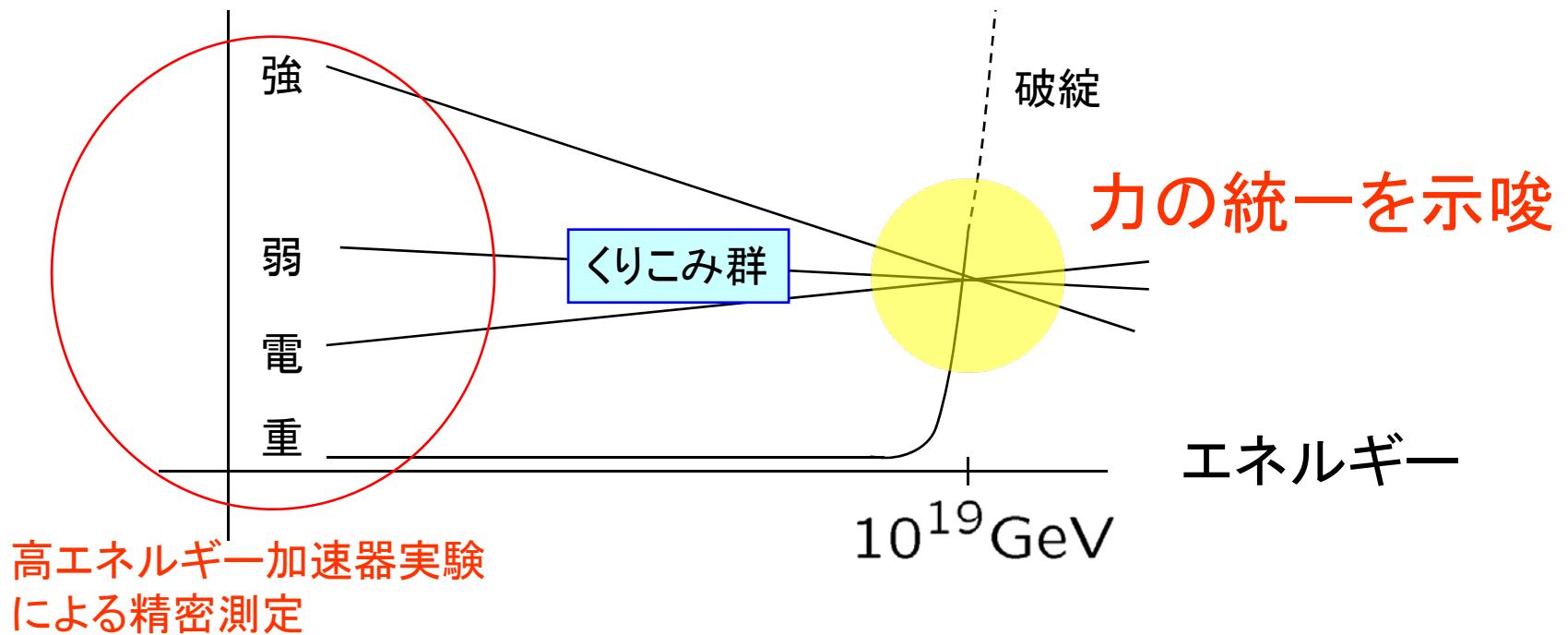
グラビトンなど

米谷etc.
1980年代～

嫌でも重力を含んでしまう！ c.f.) ハドロンの理論としての弦の失敗

超弦理論の実験的証拠？

相互作用の強さ



- 重力を含む力の統一が、プランクスケール付近で起こる
- プランクスケールの物理を記述する理論は？ **超弦理論が自然な候補**

偉そうなことを言っても、何も予言できないじゃないか！

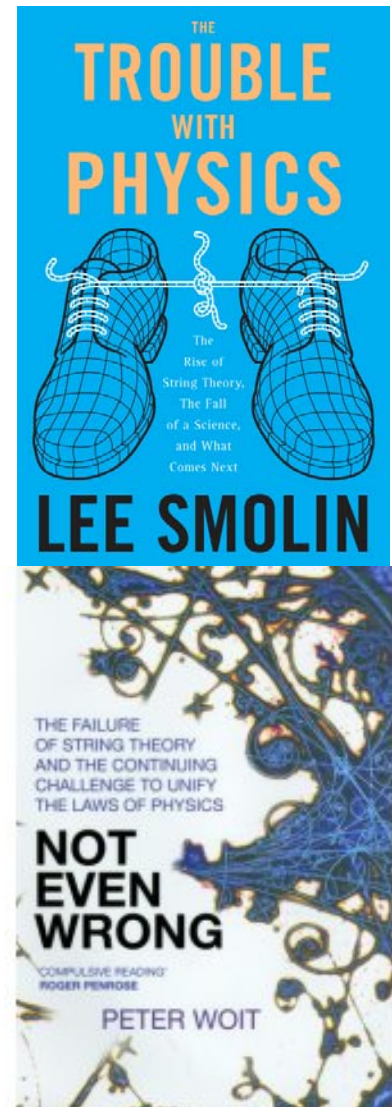
■ The Trouble with Physics

(Lee Smolin)

The Rise of String Theory,
the Fall of a Science,
and What Comes Next

■ Not Even Wrong (Peter Woit)

The Failure of String Theory
and the Continuing Challenge
to Unify the Laws of Physics



しかし、状況はだいぶ変わってきた

- 85年頃 弦の**摂動論**の研究、**予言能力なし**

10次元時空 : 現実世界(4D)と矛盾

→ 6次元分、手で丸める (コンパクト化)

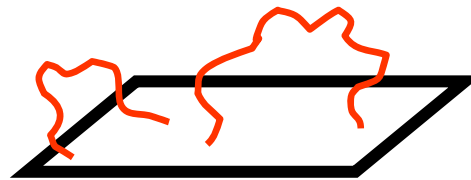
- 95年頃 ポルチンスキー : 「**弦の凝縮状態**」



点状



ひも状



膜状

membrane

・・・一般次元の‘膜’

総称して「**ブレーン**」

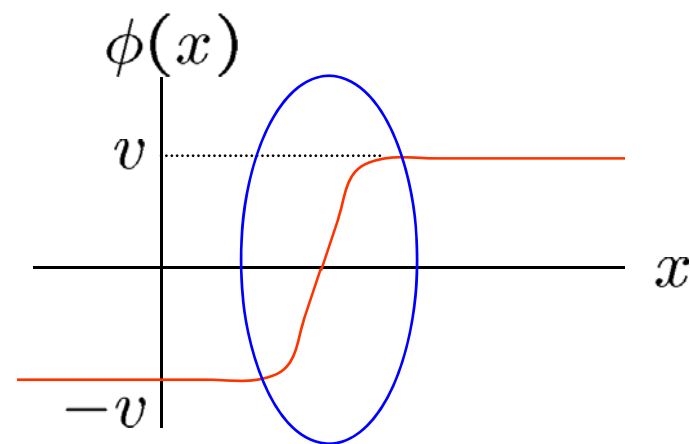
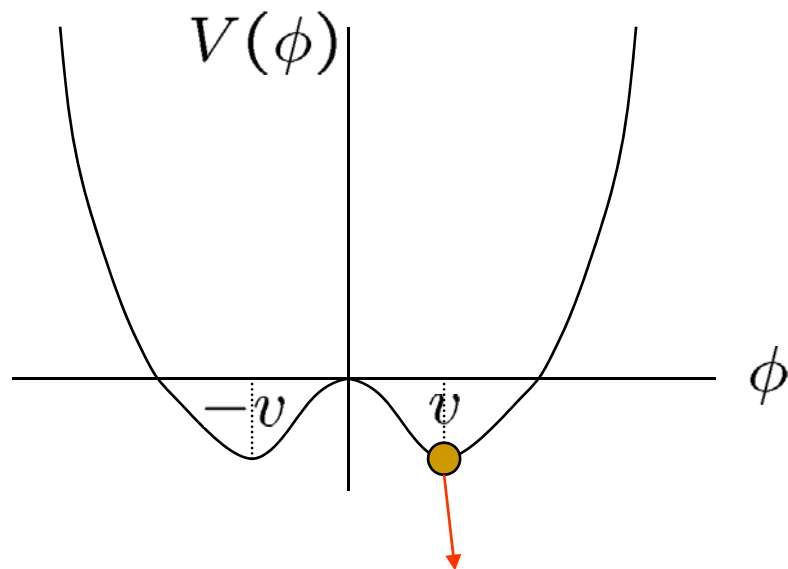


超弦理論の非摂動的性質が見えてきた

■ ブレーンは、弦理論におけるソリトン

c.f.) スカラー場の理論に現われるソリトン

古典運動方程式の解



摂動論では、この周りのゆらぎしか考えない

空間的に局在したエネルギーを持つ
非摂動的な配位

「ブレーン革命」 '95～

- 超弦理論における双対性

type I, IIA, IIB, heterotic, M theory,...

実は一つの理論の別の側面にすぎない。

- 超弦理論の非摂動的定式化 **行列模型**

- **ゲージ・重力対応**

ハドロン物理への応用 c.f.) 夏梅氏、金茶会

ブラックホール熱力学の微視的な起源

- 低エネルギーで標準模型となるブレーン配位

- ブレーン・インフレーション

「シミュレーション革命」'08～

□ References

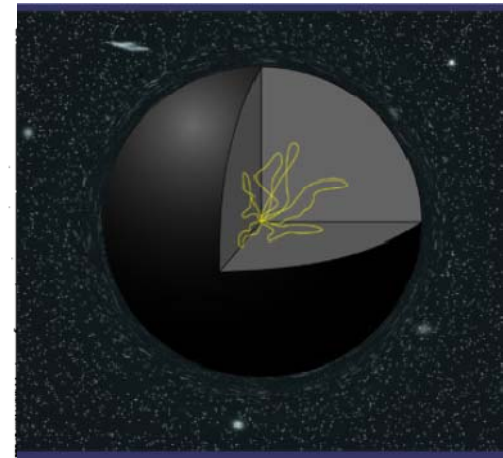
PRL 99 ('07) 161602 [arXiv:0706.1647]

PRL 100 ('08) 021601 [arXiv:0707.4454]

↓毎日(08.1.20)

ブラックホール内部 超弦理論で解明

高エネ研、スパコン使い再現



超弦理論が予測するブラックホール内部の様子。素粒子を表す多数の「弦」が、中心に端を持ちながら描かれている。高エネルギー加速器研究機構提供

究極の理論とされる「超弦理論」に基づくブラックホール内部を、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)などの研究チームがシミュレーションで再現し、英国のホーキング博士の理論に一致することを確かめた。謎の多いブラックホール研究を進展させると共に、極めて困難な超弦理論の証明にスーパーコンピュータのシミュレーションが有効であることを初めて示した点でも注目されそうだ。ブラックホールは、質

量が大きな星の進化の最終段階などで作られる天体。重力が極めて強いため、光さえも抜け出せないと考えられていた。これに対し、ホーキング博士は74年、真空中でも粒子と反粒子が対になって生成と消滅を繰り返す量子効果と、アインシュタインの一般相対性理論を組み合わせ、外から見るとブラックホールから熱的な放射が生じているようになるとする理論を提案。ブラックホールは最終的には「蒸発」すると主張し、大きく注目された。しかし、ブラックホールの中心付近は一般相対性理論を適用できず、

超弦理論
超弦理論は、すべての素粒子は「粒」ではなく、一次元的な広がりを持った極めて微小な「弦」として考える理論。「超ひも理論」とも呼ばれる。弦の振動の仕方などによってさまざまな素粒子を表すことができる。素粒子の間に働く基本的な相互作用には、電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用、重力の4種類がある。重力以外の三つを記述する理論はあるが、重力まで含めた究極の理論はこれまでなかった。超弦理論では、重力を伝える素粒子「重力子」も含むため、四つの相互作用を統一して考えることが可能な理論として期待されている。しかし、弦の間に働く相互作用が強いいため、具体的な計算が非常に難しく、実証された例はほとんどない。

量が大なる星の進化の最終段階などで作られる天体。重力が極めて強いため、光さえも抜け出せないと考えられていた。これに対し、ホーキング博士は74年、真空中でも粒子と反粒子が対になって生成と消滅を繰り返す量子効果と、アインシュタインの一般相対性理論を組み合わせ、外から見るとブラックホールから熱的な放射が生じているようになるとする理論を提案。ブラックホールは最終的には「蒸発」すると主張し、大きく注目された。しかし、ブラックホールの中心付近は一般相対性理論を適用できず、

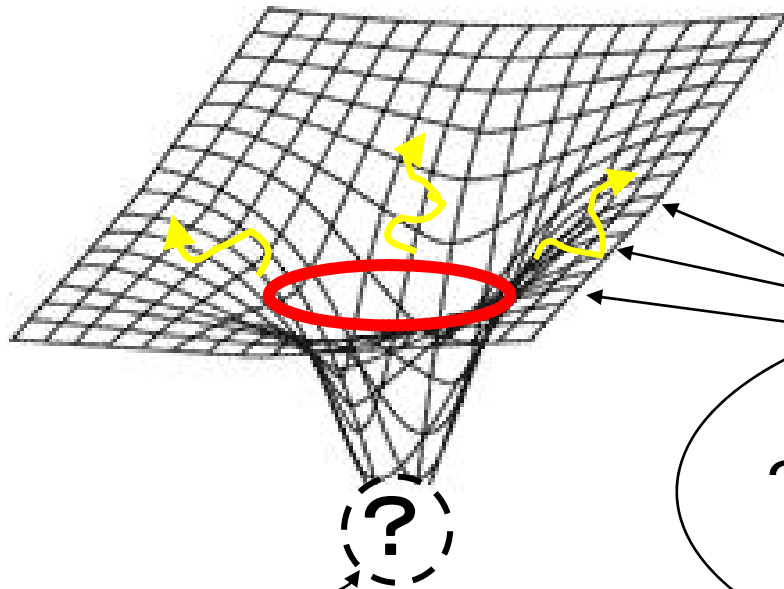
超弦理論は、すべての素粒子は「粒」ではなく、一次元的な広がりを持った極めて微小な「弦」として考える理論。「超ひも理論」とも呼ばれる。弦の振動の仕方などによってさまざまな素粒子を表すことができる。素粒子の間に働く基本的な相互作用には、電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用、重力の4種類がある。重力以外の三つを記述する理論はあるが、重力まで含めた究極の理論はこれまでなかった。超弦理論では、重力を伝える素粒子「重力子」も含むため、四つの相互作用を統一して考えることが可能な理論として期待されている。しかし、弦の間に働く相互作用が強いいため、具体的な計算が非常に難しく、実証された例はほとんどない。

超弦理論が予測するブラックホール内部の様子。素粒子を表す多数の「弦」が、中心に端を持ちながら描かれている。高エネルギー加速器研究機構提供

どのような状態かは謎だった。
宇宙の起源
解き明かせるか
超弦理論によると、ブラックホールの内部は強い重力のため、素粒子を表す「弦」が中心に凝縮。中心に両端を持つ多数の弦が描らいた状態になっていると予測される。
そこで研究チームは、同機構のスーパーコンピュータを使ってこの予測を検証した。「弦」の振動を周波数に応じて効率よく計算する新しい手法で計算した結果、ホーキング博士が示した理論と一致することが分かった。
研究責任者の西村淳同機構素粒子原子核研究所准教授(素粒子物理学)は「ブラックホールの性質が超弦理論で理解できたということは、ほとんど明らかでなかった超弦理論の存在を示す有力な証拠になる。今後この理論に基づく計算機シミュレーションによって、宇宙の起源や素粒子の性質などを解明したい」と話している。

ブラックホールは、単なる「黒い穴」じゃない！

■ ホーキング輻射(1974年)



何もない真空中でも...

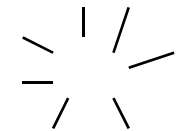
?



対生成



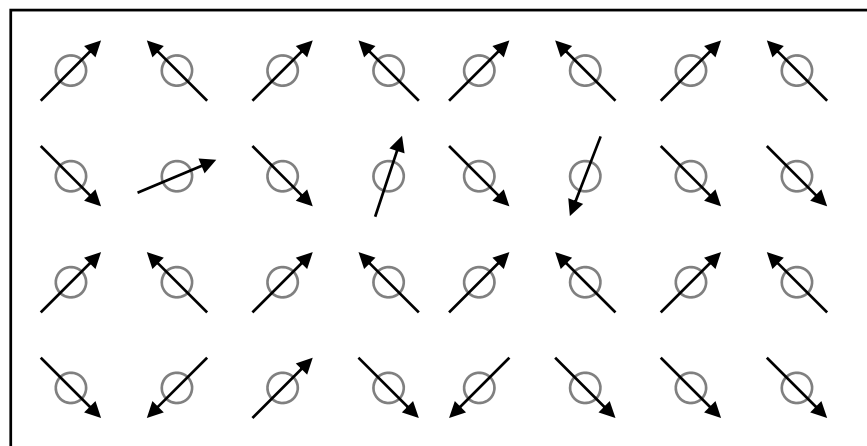
対消滅



温度を持った‘物体’に見える

ブラックホールの中には何がある？

■ 物性理論における例：磁性体



(無数の原子から成る)

温度 T の平衡状態
エネルギー $E(T)$

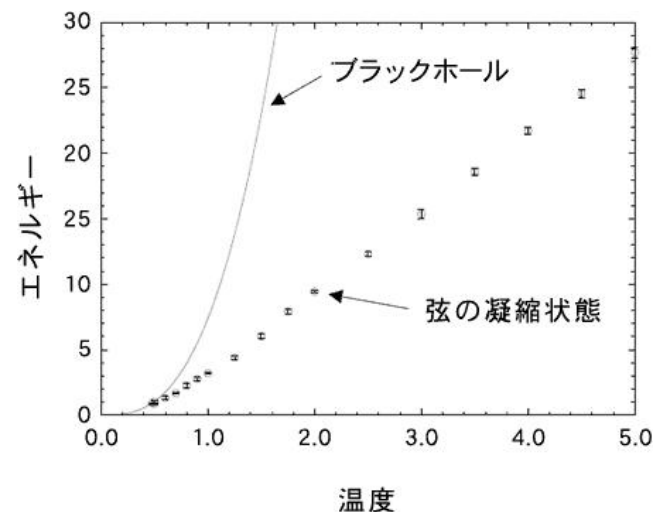
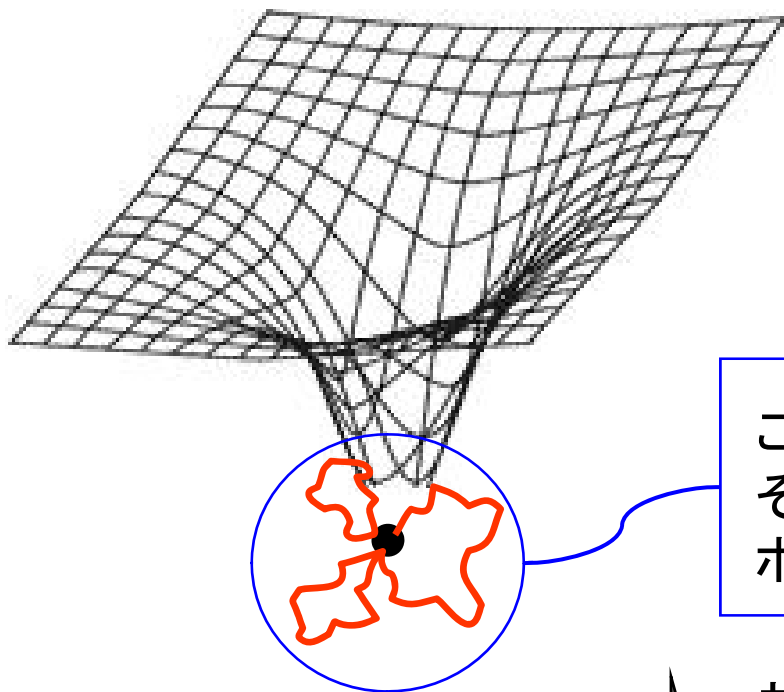
↑
微視的構造から決まる

ブラックホールの場合、これが何か？

ブレーンでブラックホールを作る

97年～ マルダセナ、ウィッテン、...

■ 今回の研究('07)



この弦の凝縮状態を数値シミュレーション。そのエネルギーの計算に初めて成功。ホーキングの理論と一致。



超弦理論が予測する
ブラックホール内部の様子を実証

D0ブレーンの低エネルギー有効理論

Witten ('96)

- 10次元の $\mathcal{N} = 1$ $U(N)$ 超対称ゲージ理論を
1次元にdimensional reduction

16個の超電荷

$$S_b = \frac{N}{\lambda} \int_0^\beta dt \operatorname{tr} \left\{ \frac{1}{2} (DX_i(t))^2 - \frac{1}{4} [X_i(t), X_j(t)]^2 \right\}$$

$$S_f = \frac{N}{\lambda} \int_0^\beta dt \operatorname{tr} \left\{ \frac{1}{2} \psi_\alpha D\psi_\alpha - \frac{1}{2} \psi_\alpha (\gamma_i)_{\alpha\beta} [X_i, \psi_\beta] \right\}$$

$A(t)$: $U(N)$ ゲージ場

$$D = \partial_t - i [A(t), \cdot]$$

$X_j(t)$ ($j = 1, \dots, 9$)

周期的境界条件

$\psi_\alpha(t)$ ($\alpha = 1, \dots, 16$)

反周期的境界条件

$$\beta = \frac{1}{T}$$

温度

- 有効結合定数 $\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{T^3}$

以下一般性を失うことなく $\lambda = 1$

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{高温} & \Rightarrow \text{弱結合} \\ \text{低温} & \Rightarrow \text{強結合} \end{array} \right.$
 高温展開 (Kawahara-J.N.-Takeuchi '07)
 10次元ブラックホールからの予言

フーリエモード・シミュレーション

Hanada-J.N.-Takeuchi, PRL 99 (07) 161602 [arXiv:0706.1647]

■ 格子正則化の問題

$\{Q, \bar{Q}\} \propto P_\mu$ → 並進対称性
格子では離散的なもののみ。

■ 一次元系では、非摂動的にゲージ固定が可能

$$A(t) = \frac{1}{\beta} \text{diag}(\alpha_1, \dots, \alpha_N) \quad -\pi < \alpha_a \leq \pi$$

$$S_{\text{FP}} = - \sum_{a < b} 2 \ln \left| \sin \frac{\alpha_a - \alpha_b}{2} \right|$$

$$X_i^{ab}(t) = \sum_{n=-\Lambda}^{\Lambda} \tilde{X}_{in}^{ab} e^{i\omega n t} \quad \omega = \frac{2\pi}{\beta}$$

Fourier mode cutoff



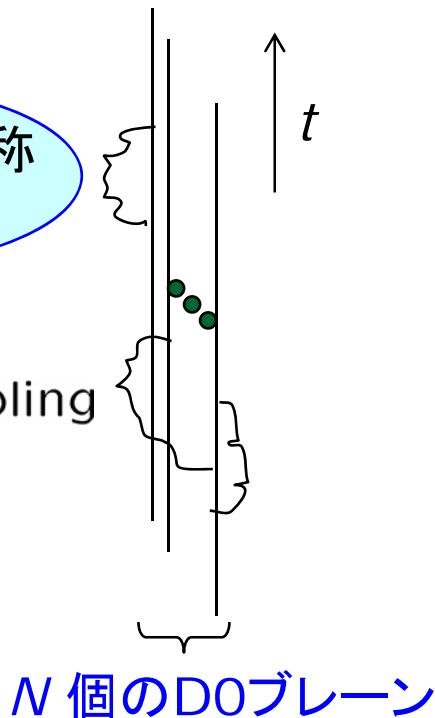
強結合ゲージ理論からブラックホール熱力学へ

Itzhaki-Maldacena-Sonnenschein-Yankielowicz '98

1次元 $U(N)$ 超対称
ゲージ理論

温度 T

λ : 't Hooft coupling



ホライズン

10次元 IIA 超重力理論
0-ブレーン解

near-extremal
 $\lambda = g_s N \alpha'^{-3/2}$

ブラックホール熱力学

$$\frac{1}{N^2} \left(\frac{E}{\lambda^{1/3}} \right) = C \left(\frac{T}{\lambda^{1/3}} \right)^p$$

$$C = \frac{9}{14} \left(4^{13} 15^2 \left(\frac{\pi}{7} \right)^{14} \right)^{1/5} = 7.407\dots$$

$$p = \frac{14}{5} = 2.8$$

Klebanov-Tseytlin '96

D0ブレーンに端を持つ
開弦の統計力学

?

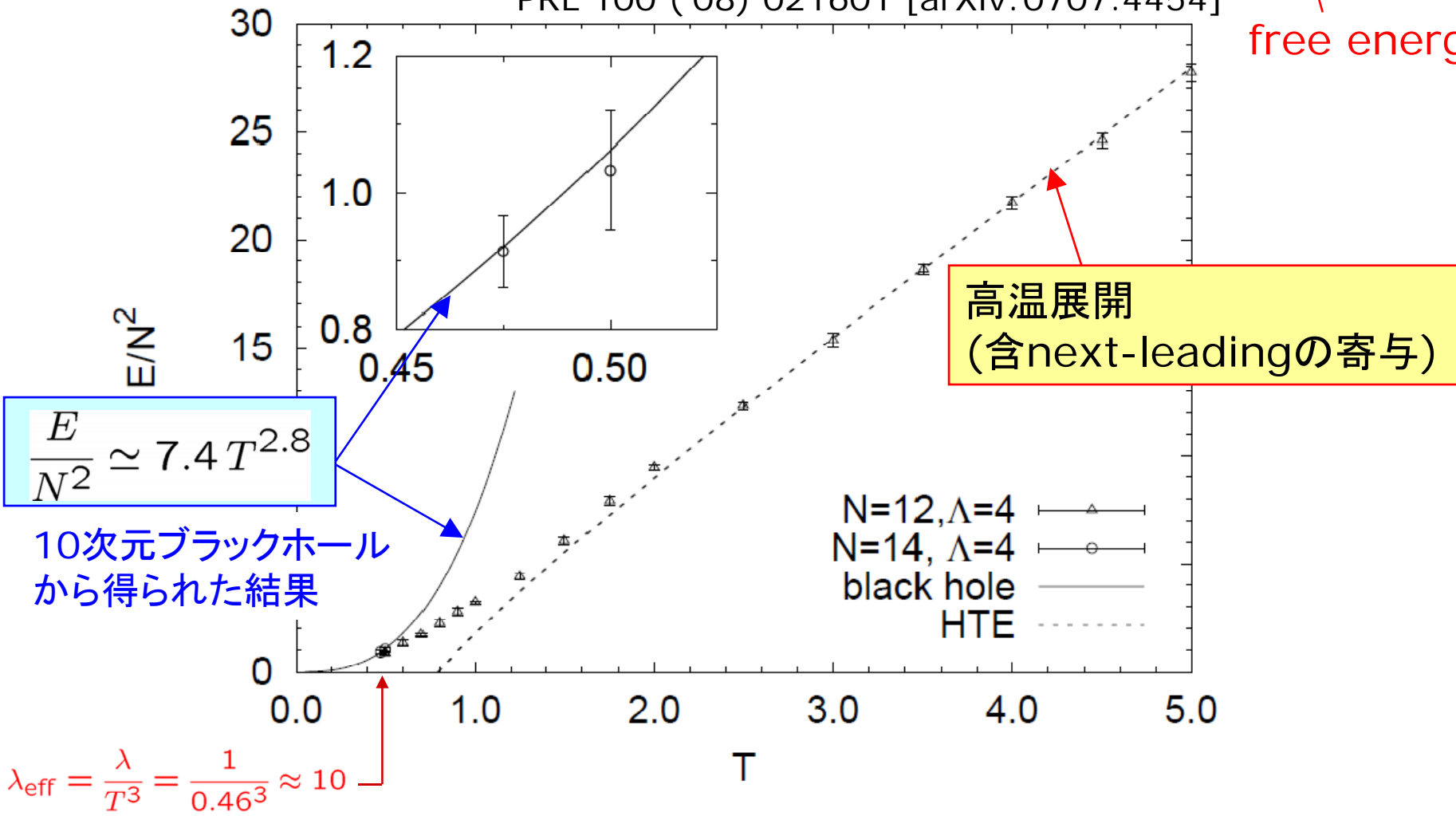
λ, N が
大きい極限

結果：内部エネルギー

$$E = \frac{\partial}{\partial \beta} (\beta \mathcal{F})$$

Anagnostopoulos-Hanada- J.N.-Takeuchi,
PRL 100 ('08) 021601 [arXiv:0707.4454]

free energy



専門家からのコメント

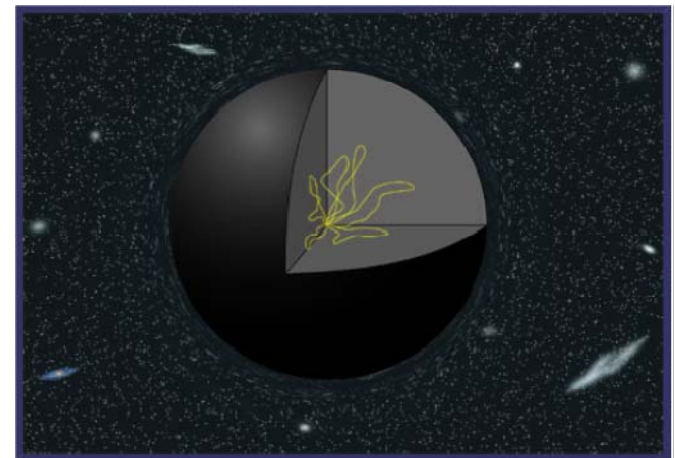
Lubos Motl氏 “Reference Frame” より引用

THE MOST IMPORTANT EVENTS IN OUR AND YOUR
SUPERSTRINGY UNIVERSE AS SEEN FROM A
CONSERVATIVE PHYSICIST'S VIEWPOINT

saturday, january 19, 2008 ... 

Numerical BFSS matrix model & black holes

They have used powerful computers and flexible algorithms to optimize their calculation and the resulting energy-temperature relation agrees with gravity even at strong coupling and even though the agreement cannot be guaranteed by any supersymmetric non-renormalization theorems because the whole setup breaks supersymmetry. Of course, I have never had any doubts that it would work but it is cool that one can actually do it. They can now literally calculate how the black holes are composed out of stringy objects.



超弦理論の非摂動的定式化



- 10次元の $\mathcal{N} = 1$ $U(N)$ 超対称ゲージ理論を

1次元にdimensional reduction

→ D0-ブレーンの低エネルギー有効理論

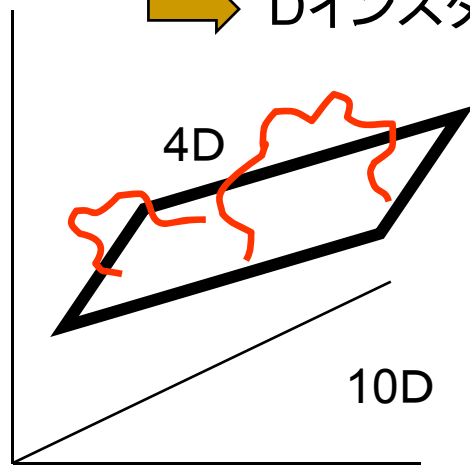
別の解釈

M理論(BFSS '97)

0次元にdimensional reduction

→ Dインスタントンの低エネルギー有効理論

タイプIIB超弦理論
(IKKT '97)



ブレーン自体のダイナミクスを解く

もともと弦の伝播する10Dの世界に
我々の4Dの世界が現れるか？

4次元時空が出てくるのか？

- IIB行列模型 (石橋・川合・北澤・土屋 '97)

$$S = N \text{tr} \left\{ -\frac{1}{4} [X_\mu, X_\nu]^2 + \frac{1}{2} \psi_\alpha (\Gamma_\mu)_{\alpha\beta} [X_\mu, \psi_\beta] \right\}$$

$X_\mu(t) \quad (\mu = 1, \dots, 10)$

- 「慣性モーメント・テンソル」

$$T_{\mu\nu} = \frac{1}{N} \text{Tr}(X_\mu X_\nu)$$

10×10 実対称行列の固有値 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{10}$

SO(10)対称性の自発的破れを見るオーダーパラメタ

$N \rightarrow \infty$ の極限で、

$$\langle \lambda_1 \rangle = \langle \lambda_2 \rangle = \langle \lambda_3 \rangle = \langle \lambda_4 \rangle \gg \langle \lambda_5 \rangle$$

というようなことが、起こるのか？ SO(10)→SO(4)

時空次元に対する様々なアプローチ

- **低エネルギーの有効理論** (青木・磯・川合・北澤・多田 '98)
ブランチポリマー的な構造の持つ複雑なダイナミクス

- **ガウス展開法**

$SO(4)$ を保つ解が最も低い自由エネルギー (J.N.-杉野 '01)
次数を上げるテクニック (川合・河本・黒木・松尾・篠原'01、青山・川合・渋佐)
単純化した模型での計算 (J.N.-大久保-杉野'05)
6D IKKT模型 (青山-J.N.-大久保 in prep.)

- **フェルミオン行列式の位相の効果**

つぶれた配位 (但し $d \geq 3$) を favor (J.N.-Vernizzi '00)
この効果を取り入れる新しいシミュレーション法
(Anagnostopoulos-J.N. '02)
6D IKKT模型 (東-花田-J.N.-竹内 in prep.)

$d=3$ の時空が
選ばれる(?)

時空次元に対する様々なアプローチ(続)

- いろいろな次元を持った**ファジー多様体**に対する有効作用
(北澤、高山、今井、金子、松本)

- **ゲージ/重力対応**の応用

D0ブレーンの有効理論を考えて、SO(9)のSSBが**重力側**で不安定性として見えないか？

(石橋明浩・磯・J.N.・住友)

Cosmophysicsグループ
との共同研究

行列模型の観点では、古典的な時空の描像は
低エネルギーでのeffectiveな概念

プランクスケールくらいに小さくなっている余剰次元を
時空計量で表現するのが、どこまで正しいか？

Randall-Sundrum模型
フラックス・コンパクト化
ランドスケープ
ストリング・インフレーション
.....

超弦理論はどこまで来たか ~まとめに代えて~

QCD

超弦理論

強い相互作用

記述するもの

重力を含むすべての相互作用

自由なクォーク

摂動論

10次元時空

閉じ込め

非摂動ダイナミクス

コンパクト化

格子ゲージ理論 (Wilson '74)

非摂動的定式化

超対称行列模型(BFSS, IKKT)

強結合展開

解析手法

ガウス展開法

シミュレーション(Creutz '80)

シミュレーション

SU(2)、NJL模型
クエンチ近似

単純化した模型

超対称性の低い模型、toy model
低エネルギー有効理論

ハドロンの性質

目標

ブラックホールの性質
時空次元、標準模型の導出

超弦理論は未完成・・・

■ ブレーンに基づく定式化 BFSS or IKKT

「時間」の取り扱い方で意見が分かれる。。。

もっと自然な定式化があるのか？

■ 「ランドスケープ」

我々の世界は、超弦理論の記述しうる

無数の世界の一つに過ぎない？ 人間原理、「宇宙定数」の確率分布

■ 宇宙観測、加速器実験 との関わり

インフレーション、ダークエネルギーを説明できるか？

ガンマ線バーストやLHC実験から、新しい手がかりは？