基礎物理学の課題

- 量子論と相対論の統合は可能か -

- ・統一理論がなぜ必要か
- ・量子重力:問題の性格
- ・量子重力の解決としての超弦理論
- ・統一理論の歴史と展望

相対論と量子論の統一

・現代物理学の基礎法則における2本柱 :





重力と時空の理論:万有引力による、宇宙の 大局的階層構造を記述

アインシュタイン 特殊相対性理論 1905年 一般相対性理論 1915年

素粒子、原子、分子、…からなる物質のミクロな 階層構造を記述,20世紀初頭の物理学の 危機(何故物質は安定に存在できるか)を克服,

プランク 作用量子の発見 1900年 アインシュタイン 光量子論、1905年 1925年 - 30年位までにほぼ完成 ハイゼンベルグ,シュレージンガー,ディラック、

物理法則を最も基本的なレベルまでさかのぼり、この宇宙についてより深〈理解するには、この二つの柱の両方が同時に役割を果たす領域を探求することが不可欠.しかし、相対論と量子論を同時に取り扱うと根本的な困難にぶち当たる.

・宇宙の構造と歴史 ← Big Bang scenario

宇宙の大局的構造と短距離構造は実は切り離せない関係にある

極大と極小の出会い

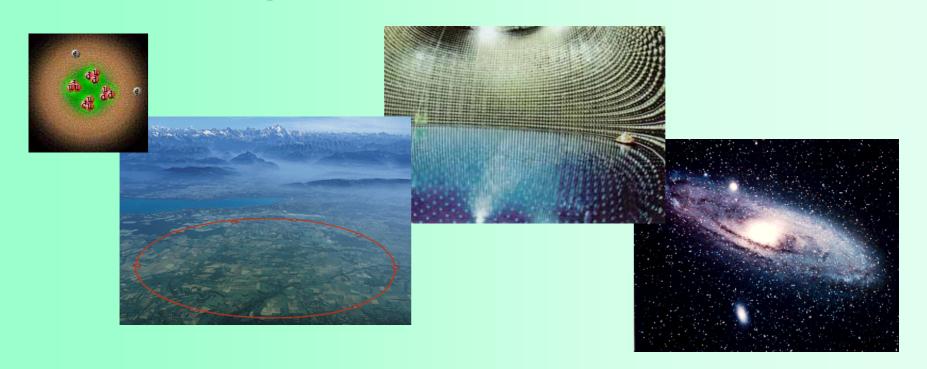
- ・宇宙の誕生の瞬間には、現在観測可能な 宇宙の領域 10^{-32} cm もプランク長さ程度 10^{28} cm の超極小領域であった
- ・素粒子の世界を探求するための 実験室 - 宇宙そのもの 光,ニュートリノ,重力子,...
- ·人類が作った最大の実験装置 巨大粒子加速器, superKamiokande, ...

量子力学の不確定性関係

$$\Delta x \Delta p \ge h$$
$$\Delta t \Delta E \ge h$$

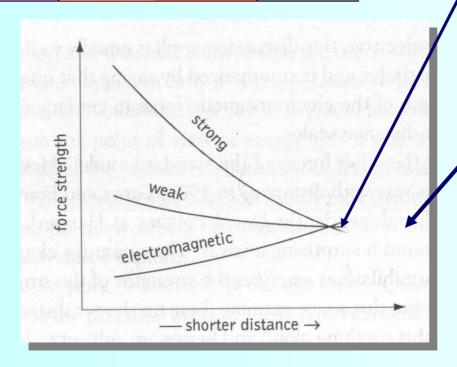


$$\Delta x, \Delta t \to 0 \Rightarrow \Delta p, \Delta E \to \infty$$



自然界の4つの基本相互作用

Strong Gravity Electromagnetic (Electroweak) Carried Graviton Photon Gluon (not yet observed) Quarks and Quarks Charged Leptons Acts on AII and Gluons and W W



量子論と相対論の統一の問題は相互作用 の統一と密接不可分に結びつく

3種の力の統一のスケール

$$\approx 10^{-29} cm$$

量子重力の典型的スケール:

Planck scale

$$\sqrt{\frac{Gh}{c^3}} \approx 10^{-33} cm$$

重力の古典論 = Einstein の一般相対性理論

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

$$\kappa^2 = 8\pi G$$

- 一般座標不变性
- ·等価原理

場の方程式:

時間空間の幾何学的構造(左辺) が物質や光の存在(右辺)と 絡み合いながら決まる構造

左辺 = 'made of marble'

Geometry of space-time

右辺 = 'made of mere wood'

Quantum theory of matter

重力以外のすべての物質とその相互作用は量子論に支配されている。

従って、重力と他の力を満足ゆ〈仕方で定式化するには 一般相対論=幾何学と量子論の融合が不可欠。

量子論の性格

「状態」は常に揺らいでいる. 物理量は確率的にしか決定されない.

粒子と波の2重性

- ・状態の重ね合わせの原理
- ·不確定性原理

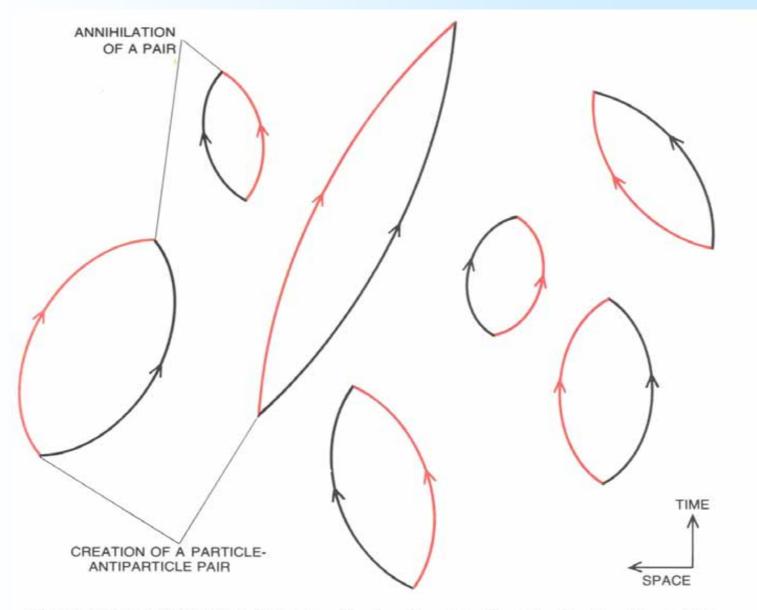
$$\psi = \sum c_n \psi_n$$

$$\Delta x \Delta p \ge h$$

これにより,古典物理学ではどうしても説明できない物質の安定性が説明できる.

「真空」といえども、量子論(場の量子論)によれば、ミクロのスケールでは絶え間なく粒子の生成消滅により揺らいでいる.

一般相対性理論を量子論によって取り扱えば,重力子の生成消滅により,時空自身,つまり時間の進み方,空間の距離などが絶え間な〈揺らぐ.



"EMPTY" SPACE-TIME is full of "virtual" pairs of particles (black) and antiparticles (color). Members of a pair come into existence simultaneously at a point in space-time, move apart and come together again, annihilating each other. They are called virtual because unlike "real" particles they cannot be detected directly. Their indirect effects can nonetheless be measured.

アインシュタイン(1879-1955)の夢と悩み

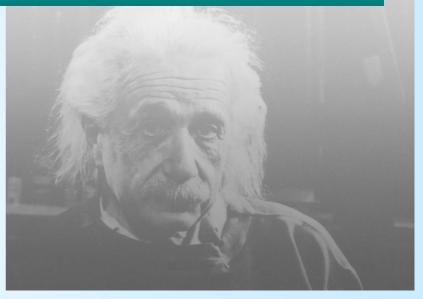
「量子力学」、および(彼自身の)「統一場理論」についてのアインシュタインの言葉

"Your claim that the concepts p, X will have to be given up, if they can only claim such a "shaky" meaning, seems to me to be fully justified.

The Heisenberg-Bohr tranquilizing philosophy-or religion? – is so delicately contrived that, for the time being, it provides a gentle pillow for the true believer from which he cannot very easily be aroused.

So let him lie there."

1928年(49歳), アインシュタイン からシュレーシンガーへの手紙のなかの一節



"The skeptic will say that this is a miracle creed. Admittedly so, but it is a miracle creed which has been borne out to an amazing extent by the development of science."

1950年(71歳)、Scientific American に載ったアインシュタイン自身 による解説記事の一節

紫外破綻 = 繰り込み不可能性

重力場(=時間空間の幾何学)の「量子的揺らぎ」は,短距離のスケール(a)がゼロに近づくにつれて際限なく強くなる。このことは、逆に長距離のスケールでの量子的揺らぎが、非常によい近似で無視できることの裏返し。

この量子効果は、無限に異なった種類の発散量を含む形で観測量に影響する。

$$\sum_{n} \left(\frac{\kappa}{a^{(D-2)/2}}\right)^{2n} f_n$$

a = 量子的揺らぎが 起こっている距離 のスケール

時空が連続的である限り a はゼロに限りなく近づくことができるこの発散を打ち消すには、無限に多くの物理定数の導入が必要

この問題は、一般相対論が、重力の「基本理論」ではないこと、

つまり、

長距離スケールでは極めて有効である一方、 短距離スケールでは、破綻をきたす

という意味で

現象論的「有効」理論とみなされるべき強い証拠

同じような性格の 理論 の例

- ・フェルミの弱い相互作用の理論
- ・強い相互作用に対するシグマ模型

.... など

これらの 'effective theory' は、現在ではいずれも、よりミクロレベルで繰り込み可能なゲージ場の理論によって置き換えられている

紫外破綻の別の現れ: ブラックホールの蒸発と情報消失パズル

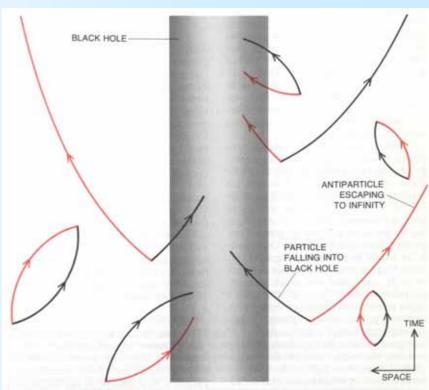
ブラックホールを量子論によって扱うと、実は真空の揺らぎに起因する輻射により最終的には蒸発してしまうという結論に至る (Hawking, 1974)

ブラックホールに落ち込んだ情報が、 蒸発 とともに失われると、量子力学の確率解釈を支えている基本原理である ユニタリ性(確率保存)に矛盾する

ブラックホールの表面 = 事象の地平面

であるため、表面では遠方外側に比べて時間の進み方が無限に遅れる。 遠方に届〈波は、ブラックホール表面 で無限に高い振動数を持っていたことになる。 つまり、ここでも「極大と極小の出会い」が 起こる。これも**紫外破綻**のあらわれ

> 従って、 問題の**真の解決**には、やはり、 **量子論と相対論の融合**が不可欠



IN THE NEIGHBORHOOD OF A BLACK HOLE one member of a particle-antiparticle pair may fall into the black hole, leaving the other member of the pair without a partner with which to annihilate. If surviving member of pair does not follow its partner into black hole, it may escape to infinity. Thus black hole will appear to be emitting particles and antiparticles.

紫外破綻の解決には何が必要か

短距離スケールの量子効果を制御する機構

·対称性? 重力以外の相互作用の場合 = ゲージ対称性

重力の場合、ゲージ不変性にあたるのは一般座標不変性 しかし、それは短距離では無力

1970年代から80年代にかけて、その方向で有望視され追求されたのは

超対称性 Supersymmetry

·fermion と boson を入れ替える操作に関する対称性

しかし、超対称性だけでは、少なくとも通常の場の理論の 枠内にとどまる限り、短距離の量子的揺らぎをおさえられない

いずれにしても、通常の<u>場の理論の枠内での対称性</u>では,重力にともなう 短距離の量子的揺らぎを制御できず、**量子的揺らぎのなんらかの切断が必要**

場の理論の枠を越えた新しい原理が必要

超弦理論: 紫外破綻を克服し、重力を含めて自然界のすべての基本相互作用を統一するためのまった〈新しい機構を強〈示唆

しかし、現在の発展段階では、

超弦理論は新しい枠組みとして 理想的な構造の存在を指し示している

にしても、まだ

理論自身の全貌が見えてはいない また、そのため現在の段階では Predictability ('falsifiability')を備えた 「理論」とは言えない

したがって、理論そのもののさらなる解明に力を注いでいるのが 現時点の状況

・統一理論らしさ

・弦理論の意味するもの

弦とは

弦 fundamenral string ('F1')

- ・太さ =ゼロ
- ・質量密度 = 厳密に一定、弦理論の基本定数 = $1/2\pilpha'$

$$\sqrt{lpha'} \equiv \ell_{\it S}$$
 : 長さの基本単位

閉じた弦 (closed string): 重力子を含む

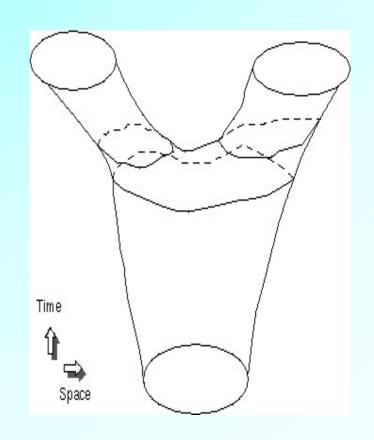


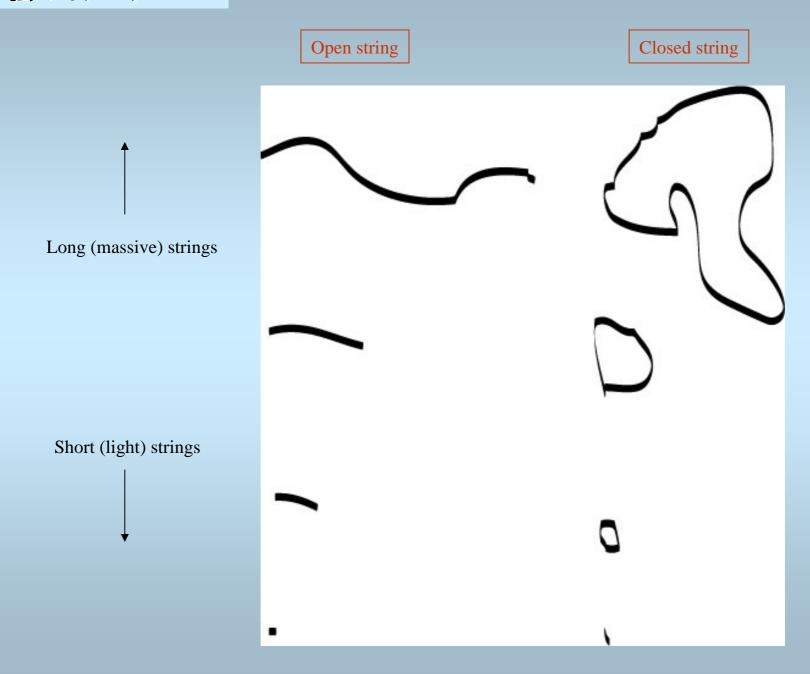
開いた弦 (open string): ゲージ場を含む ノ



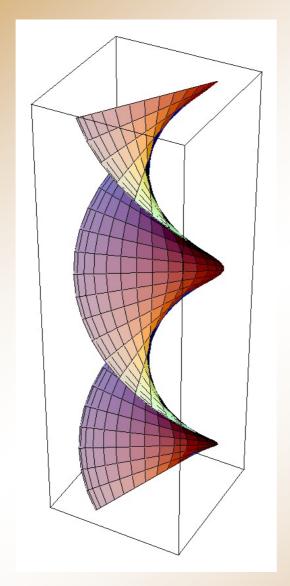
つまり、「万有引力」を説明する

そして,長距離のふるまいは 〔拡張された〕一般相対性理論と 調和する

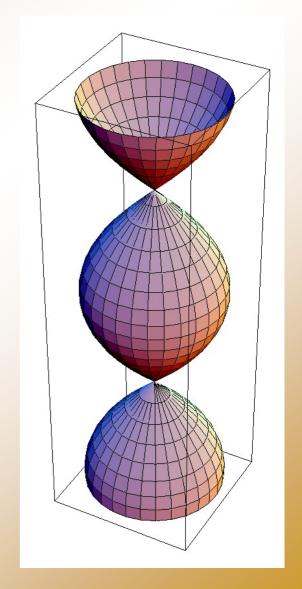




graviton



dilaton



time

統一理論らしさ

・運動と相互作用の完全な統一

弦の運動の法則と相互作用の法則が同時に決まる

·背景独立性

すべての可能な外場は、弦の状態の真空での凝縮として理解できる

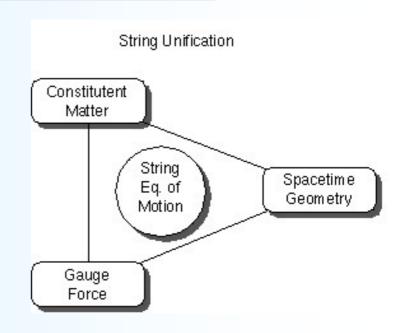
このため、原理的には、通常は物理の「理論」では前提として与えるべき結合定数および背景時空の幾何学、などのパラメタがすべて 'self-consistent' に理論自身から決められる構造を持つ

・時空次元すらも「力学的」に決められる

低エネルギーでの「有効」次元が何故4であるかを説明する可能性が秘められている. 余剰次元6に積極的な役割.

・紫外破綻の解消

弦の基本単位付近のスケールでは、古典幾何学にもとづ〈通常の時空概念は通用しない. 短距離での場の揺らぎが自動的に切断される機構が内臓されている.



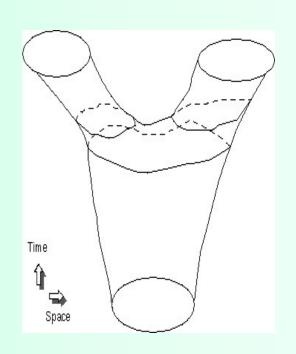
「点から弦」が何故これほど重大な結果に導くのか

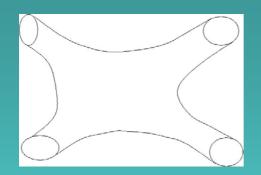
弦の運動 = 「世界膜」の力学は、共形不変性(conformal invariance) という、きわめて高度な対称性を満たす。

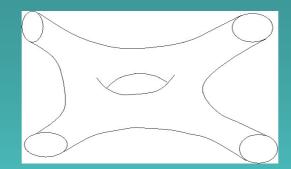
世界膜の力学は、世界膜を base space とし、時空を target space とする2次元場の理論とみなすことが できる。共形不変性を「厳密」に満たす2次元場の理論 (共形場理論)は場の理論としては、非常に特別なクラスの理論であり、きわめて強い縛りのもとで定義され、自己完結的なさまざまな性質を備えている。

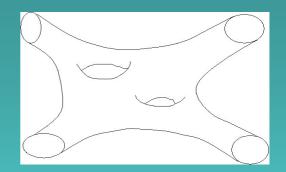
世界膜のグローバルなトポロジーの違いにより、時空の力学としては多様な粒子間相互作用を包含できる。

つまり、弦という拡がりを導入したことによりはじめて 可能になった世界膜のきつい対称性が、時空での 対称性を説明し、同時に紫外領域の量子的揺らぎを 制御している









何故重力が必然的に含まれるか

世界面の共形不変性 = 局所(ゲージ)対称性

この局所対称性により、弦の揺らぎの自由度は、時空の各点ごとに D-2個に減る。この自由度の減少を、時空の場の対称性として表現 すれば、時空の局所対称性になり、それは必然的に一般座標不変性を 含む。

世界面対称性

- 1

時空対称性

弦の背後に何があるか

弦理論のこれらの性質は、摂動論という近似的 計算法の枠内で見えているものである

摂動論を超えて弦理論をどう定義すべきかは、 残念ながらまだ解明されていない

また、それを支配する原理が何かもわかっていない

しかし、

- ・ 弦理論を特徴づける**基本的長さ** が重要な意味を持つことは疑いない
- ・また、摂動論の対称性である**共形不変性** とこの基本的長さの関係を非摂動論的に 解釈しなおすことが重要

一つのアナロジー: 共形不変性 と 断熱不変量に対するボーアの量子条件

「基本的長さ」の意味

重力定数との関係

$$G_{10} \sim e^{2\phi} \ell_s^8/h$$

 ϕ

Dilaton

弦の相互作用の強さを決める弦の振動モードのひとつ、重力子の仲間

一般相対論的古典物理への移行

$$h \to 0 \Rightarrow \ell_s \to 0$$

つまり、

古典論から量子論への移行は、量子重力の立場からは時空における基本的長さの導入そのもの

一つの可能な意味づけ: space-time uncertainty relation

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

T. Yoneya, 1987

 ΔT : 時間的方向の距離の不確定さ

△X : 空間的方向の距離の不確定さ

 $\Delta X \sim \ell_s^2 \Delta E / \hbar$

- ・ 弦の拡がりが時空の幾何学に与える影響を定性的にとらえている
- ・ 共形不変性からの直接的な帰結
- ・ 短距離と長距離の相関関係を示す
- ・ 弦の力学に現れるい〈つかの典型的スケールを説明する
- ・この関係の有意味な実現には、超対称性の存在が間接的に重要

・弦理論の歴史

1969 ~ 1972	Veneziano formulaeString interpretation(Nambu-Goto action)
1973 ~ 1976	Relation with General Relativity (Einstein theory and Supergravity)
1985 ~ 1987	© Classification of perturbative string theories (I, IIA, IIB, $H_{SO(32)}$ and $H_{E_8 \times E_8}$)
1993 ~ 1995	Relations ('dualities') among perturbative string theories
1995 ~ present	 'M-theory' conjecture (connection to 11D supergravity) Role of 'D-branes' Gauge/String duality

弦理論の現在の状況は、19世紀終わりにおける原子論の立場と 似通っている

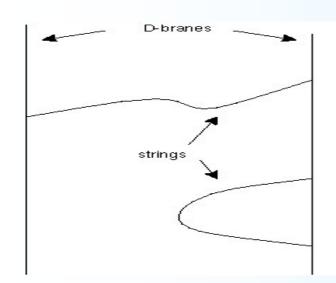
紫外問題の深刻さは、実は、量子力学誕生前夜における 古典物理学の危機に勝るとも劣らない問題

時空に量子論を適用すると、この巨大なほとんど平坦な時空の存在自体を自然に説明できない

・ゲージ理論による統一理論の歴史

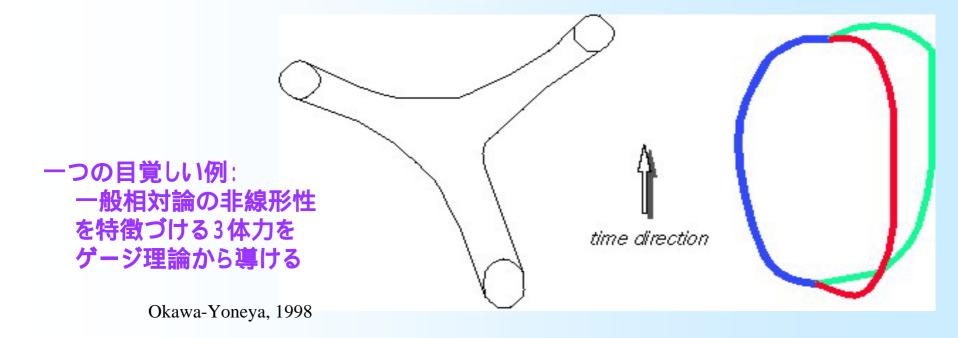
1915 Einstein による General Relativity の建設
1917 重力と電磁気力の統一に関して、数学者
H. Weyl による「ゲージ原理」の提唱
.....
1954 Yang-Mills による non-Abelin gauge theory
の提唱
.....
1967 Weinberg-Salam 電弱統一理論の提唱
.....
1982 CERN にて、ゲージボソンの確認

- 1 弦理論の全体像は、まだ捉えられていない
 - ・ 摂動的真空の分類(安定解、不安定解の両方)、それらの間の 関係がかなりはっきりしてきた
 - ・ 非摂動的な構造も見え始めている
 - ・理論の非摂動的な定式化をどのような原理や基本的自由度 に基づき行うべきかの探求が目下の最大の課題
- 2 しかし、これまでの成果だけからでも、**場の理論の枠を超えた 基本法則を定式化すべき新しい枠組み**の存在が強く示唆されている
 - ・これまでまった〈無関係であった場の理論としての ゲージ理論と重力理論が、実はあるひとつの構造の 相補的な記述とみなせる (90年代後半から最近までの発展 Maldacena,) 'gauge/gravity(string) duality', 'holography',
 - ・ブラックホールのエントロピーの量子統計的解釈が 初めて可能になった Strominger-Vafa, 1995
 - ·統一や発散の困難の解決に向けた多くのアイデアを包含している Born-Infeld, Kaluza-Klein, Elementary domain(Yukawa), Noncommutative spacetime, Induced gravity, ... etc Unification of Ideas!



重力理論とゲージ理論のあいだの双対的 関係の基礎にあるDブレーン

弦理論はもはや「弦」だけの理論ではない 弦理論の背後にあると予想される理 論体系をM理論と呼ぶことある



・実験的検証は可能か

量子重力の典型的スケール : Planck length

$$\ell_P = \sqrt{Gh/c^3} \sim 10^{-33} {\rm cm}$$

String scale との関係は dilaton の真空期待値で決まる

$$\ell_s \sim e^{-\phi/4} \ell_P$$

残念ながら、摂動論では、dilaton の真空期待値の 信頼のおける予言は、今のところ不可能

しかし、現在の到達可能スケールである $\sim 10^{-17} {
m cm}$

との懸隔も、人類の長い歴史という立場から見れば、それほど恐るべきものではないかも知れない

- 13桁 = 日常のスケール 1cm と 原子核の大きさとの隔たり + 21桁 =と 銀河系の大きさとの隔たり

潜在的には、直接的検証につながる弦理論の様相は十分ある

・ 重力子の仲間を検出する:宇宙論的データの精密化により 将来検出される可能性がある

dilaton, antisymmetric tensor field, and other supersymmetric partners

'extra space-time dimension's を検出する

perturbative string theory にとって自然な時空次元は 10次元(ないし11次元), ただし、通常の連続的時空の幾何学は通用しない

- 10から4へ? 無数に可能に存在しそうな「真空」解のどれが実現するのか?
 - compactification scenario
 - world-brane scenario
 - Landscape, 'discretuum', 最近のホットな話題の一つ

余剰次元の効果は、たとえば、重力ポテンシヤルの一般相対論からの 微細なずれに寄与する

究極的統一理論の建設とともに解かれるべき理論的課題

- ・ 素粒子と標準模型の パラメタ と対称性(およびその破れ)の導出 クオークとレプトンの質量、世代数、CP violation、....
- ・宇宙生成の標準理論(Big Bang 理論)の説明 初期条件の予言 宇宙定数、inflation、......
- ・ そのほかの宇宙論的データ・ 暗黒物質、.....

長い時間を必要とする極めて困難な課題、 しかし、それによりこれまでよりはるかに 深められた観点から宇宙の究極的な理解が 可能となるだろう 推薦参考図書 ワインバーグ Dreams of a final theory





おわりに : 相対論と量子論

の統合は可能か

超弦理論は,弦の<u>量子論から</u>一般相対論を導き,さらに 素粒子相互作用を記述するためのゲージ相互作用も自然 に含む.その意味では,すでに理論的にはある意味で 「統合」を成し遂げている.

しかし,未だ不完全な発展途上の理論.

だが、超弦理論により,重力を含む自己矛盾のない量子論の可能性が,<u>初めて明らかにされた</u>ことの重要性は何人にも否定しがたい意味があるだろう.

(多分, アインシュタインにとっても)

アインシュタインの死後50年を経て, 私たちは,今,ようや(統合への 「夜明け前」に来ている!