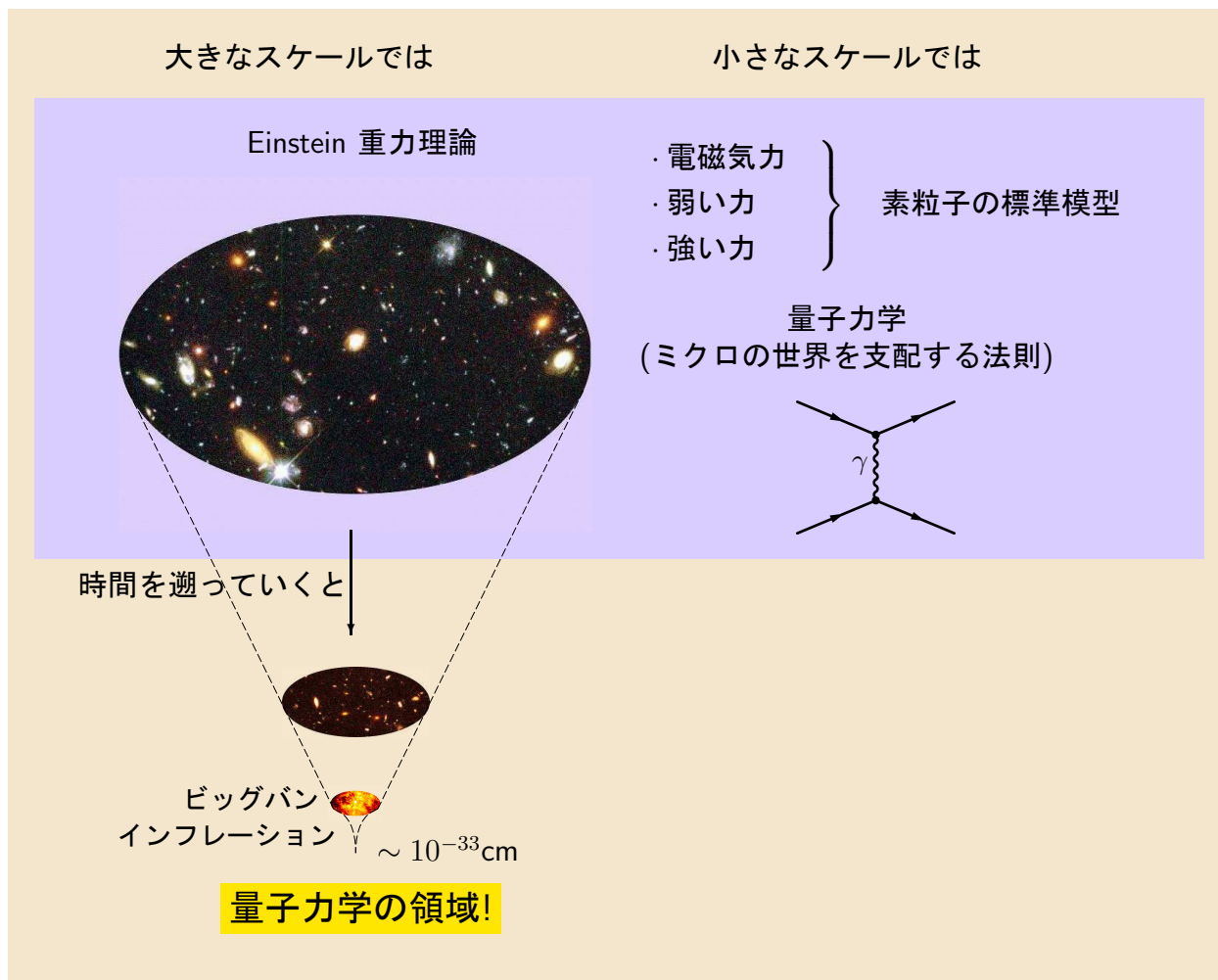


この宇宙を支配する法則は何だろうか？

私たちを構成する物質は、**素粒子**と呼ばれる基本的な構成要素からできていると考えられています。これら素粒子が動きまわるミクロな世界は、**量子力学**によって支配されています。そこでは、自然界に知られている4つの基本的な相互作用(力)のうち、電磁気力・弱い相互作用・強い相互作用の3つは**素粒子の標準模型**という一つの枠組みでよく記述できることが分かっています。

一方で、私たちをとりまく宇宙の構造や動きなど、大きなスケール(マクロ)の世界では、基本的な相互作用のもう一つである**重力**が支配的です。



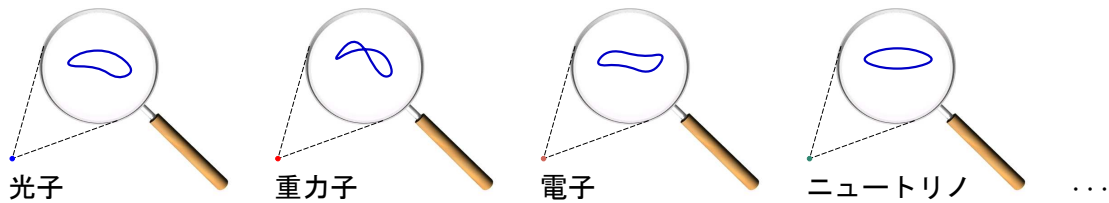
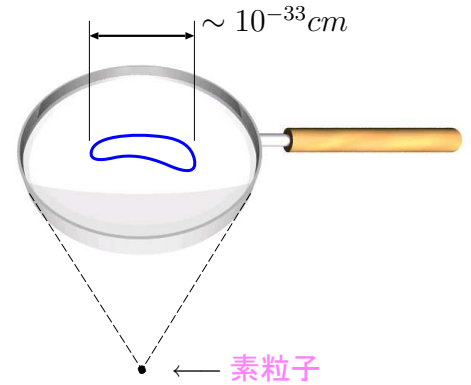
このような私たちの物質観の両極端は、宇宙初期を考えると出会うこととなります。宇宙が膨張しているという観測結果から、逆に時間を遡ってゆくと、宇宙全体が極めて小さな領域に縮んでいた時期があるはずで、そこでは、ミクロな法則である量子力学と、マクロを記述していた重力の理論とを組み合わせる必要があります。

自然界の4つの基本的な相互作用を統一的に扱う量子論、そのような理論の一つの候補が**“超ひも理論”**です。

素粒子は実は“ひも”である

物質の構造を細かく調べてゆくと、素粒子と呼ばれる基本的な構成要素からできているように思われます。現在の描像では、これらの素粒子は大きさのない点状のものと考えられています。ところが実は、この点に見えるものが、**大きさをもつ物体**である、というのが「**ひも理論**」の出発点です。

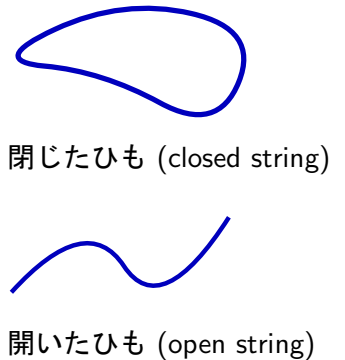
ひもは振動していて、このいろいろな**振動状態**がさまざまな種類の素粒子に対応しています。



ひもには

- { 端のあるひも (開いたひも: open string)
- { 輪になったひも (閉じたひも: closed string)

の2種類あります。これらは振動のしかたが異なり、異なる粒子を含んでいます。閉じたひもの振動モードを調べると、最も軽いモードには**重力子**が含まれていることが分かります。重力子は重力の相互作用を媒介する粒子であり、つまり、ひも理論は自然に重力を含む理論になっています。



すべての力 $\begin{pmatrix} \text{電磁気力} \\ \text{弱い力} \\ \text{強い力} \\ \text{重力} \end{pmatrix}$ を統一する理論

“ひも”の量子論

ひもの理論の量子力学を考えると、点粒子の場合とは異なるいくつかの特徴があります。

- 無限大の問題がない
ひもは有限の大きさを持つことから、点粒子に対する場の量子論に現れる発散の問題は、ひもの理論では抑えられるようです。
- “10次元”?
量子論として矛盾がないためには、ひもが動きまわる時空の次元に制限がつくことが分かります。ボゾン弦の理論の場合は26次元、超ひも理論の場合は10次元です。(時空と次元の詳しい説明は他のパネルで。)

いろいろなひも理論

ひも理論の作り方にはいろいろな選択肢があります。閉じたひもだけで理論を作るか、あるいは開いたひもを含めるのか。ボゾンのみで構成するか、フェルミオンも含めるのか。これは超対称性を導入するかどうかということに関係します。

Type I	Type IIB	Type IIA	Het-O	Het-E
ボゾンとフェルミオン				
Open と Closed	Closed のみ	Closed のみ	Closed のみ	Closed のみ
Bosonic	Type 0A	Type 0B	SO(16) × SO(16) ...	
ボゾンのみ	ボゾンとフェルミオン		ボゾンとフェルミオン	
Open と Closed	Closed		Closed	

理論が自己矛盾していないことや対称性を尊重するという条件を課すと、ひも理論の形はかなり厳しく制限されます。このような矛盾のないひも理論が 1980 年代後半に構成されました。しかし、理論は唯一ではなく、超ひも理論(上段)だけでも 5 通り作れることが分かりました。

では、自然界で選ばれている本当の理論はどれか一つなのでしょうか。それとも、互いに何か関係づけができるものなのでしょうか? これを判断するにはその後の研究を待たねばなりませんでした。

ひも理論に含まれる“拡がった物体”と双対性

ひもだけの理論として構成すると、矛盾のない超ひも理論は 5 種類作れました。ところが、よく調べてみると、ひも以外に**拡がりを持った物体**(「D-ブレーン」と呼びます)もまた、理論の構成要素として存在することが、1990 年代半ばの研究で示されました。実際にこれらの高次元物体は、結合定数の大きな極限などで、ひもの自由度に代わって主役を演じることとなります。

そして、その後の研究から、5 種類の理論は**双対性**という性質で互いに結びついていることが分かってきています。この対応づけにも D-ブレーンを含めて考える必要があり、これらの物体が存在することで、いろいろな理論の間に関係がつくのです。

包括的な理論? — M 理論

超ひも理論の間に関係があるということは、次のような示唆を与えます: 「ひも理論を統一する一つの理論があり、異なるいろいろなひも理論はその異なるいろいろな見方なのだ」。この一つの理論を仮に「**M 理論**」と呼んでいます。さまざまな極限でひも理論との対応づけがなされているなど、存在を暗示する証拠が調べられてきていますが、どの様な理論なのか、まだ具体的な構成は得られていません。ひもより次元の高い、膜を基本的な自由度としているのではないかとも言われています。構成的な定式化として、**行列模型**などさまざまなアプローチが試みられ、研究が進められている最中です。

この一つの理論を具体的に書き下すことができ、そして、この理論に基づいて、時空の成り立ちをも含めて自然界の構造を明らかにすることができれば、それは私たちの自然界への理解の一つの窮極の形と言えます。

超対称性 (Supersymmetry)

自然界の粒子は、統計性と呼ばれる性質に基づいて「**ボゾン**」と「**フェルミオン**」の 2 種類に分類できます(詳しくは下の囲みで)。この 2 種類の粒子を入れ替える対称性のことを「超対称性」と呼びます。ひも理論がこのような対称性を持つとき、それを「**超**」ひも理論と呼びます。

ボゾンとフェルミオン

同じ種類の素粒子は互いに区別ができません。粒子を入れ替えたときに、入れ替えに対して対称か反対称かは、粒子の「統計性」と呼ばれる性質です。**対称**のものをボーズ粒子(**ボゾン**)、**反対称**のものをフェルミ粒子(**フェルミオン**)と呼びます。

フェルミオンはパウリの排他律に従う粒子で、物質を構成する粒子のほとんどはこのフェルミオンからなっています。他方、力を媒介する粒子である光子や重力子などはボゾンです。

