

超弦理論入門

茨城大学理学部 百武慶文

1. はじめに

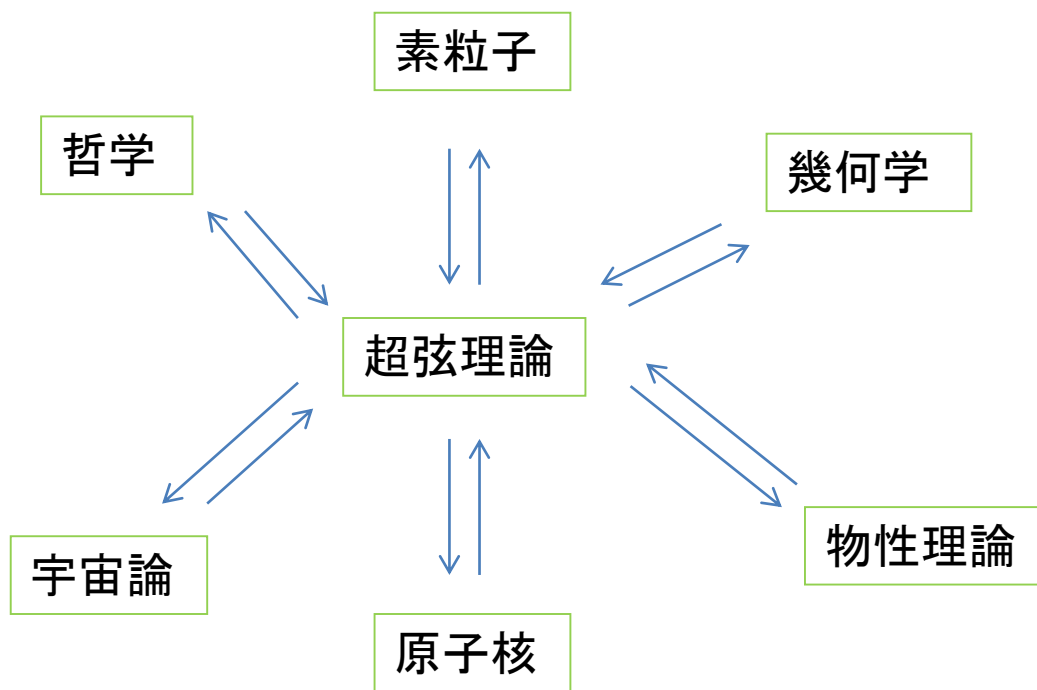
超弦理論とは何か？

- ミクロな世界の物質(素粒子)は弦からできているとする仮説。
- 実験では弦は観測されていないし、直接観測することはまず不可能。

なぜ超弦理論を研究するのか？

- 宇宙には未知の粒子がある可能性があり、新理論が必要になる。超弦理論は、重力と電磁力などを統一的に記述する理論になっている。
- ブラックホールのミクロな性質を研究できる。
- 宇宙論、とくに宇宙の始まりを議論できる可能性がある。

超弦理論は、実験的には検証されていないが、その数理的な構造はおそろしく精巧にできている。そして、既存の数学と物理(重力理論、場の理論、幾何学など)に多大な影響をおよぼし続けている。



この授業では、力学や電磁気学などの物理の進展を説明しながら、超弦理論の概要について解説したい。

現代物理学の概観

力学

物理学は17世紀にNewtonが力学を体系化したことにより発展する

1900

2000

電磁気学

量子力学

場の量子論

超弦理論

熱力学

統計力学

特殊相対性理論

一般相対性理論

理論の発展とともに
境界はなくなっていく
が、細分化も進む

2. 現代物理の始まり: 力学

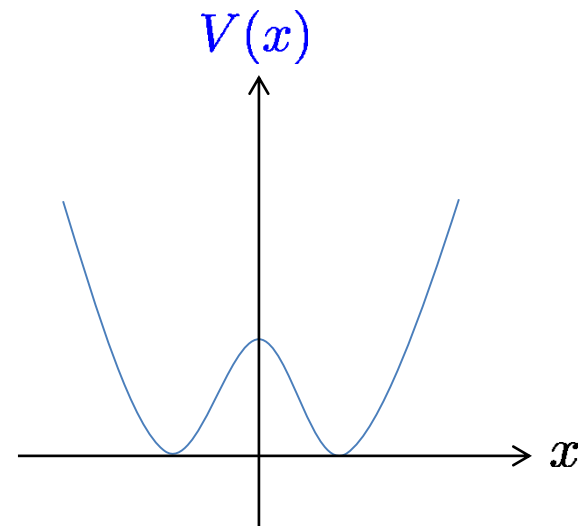
運動の第2法則

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$$

↑ ↑ ↑
質量 加速度 力

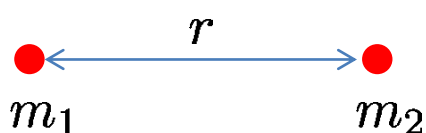
$$F = -\frac{dV}{dx}$$

ポテンシャルエネルギー



物体にはたらく力、あるいはポテンシャルエネルギー $V(x)$ 、が分かれば、物体がどのように運動するかを直感的に理解できる。

質量をもつ物体には万有引力がはたらく。

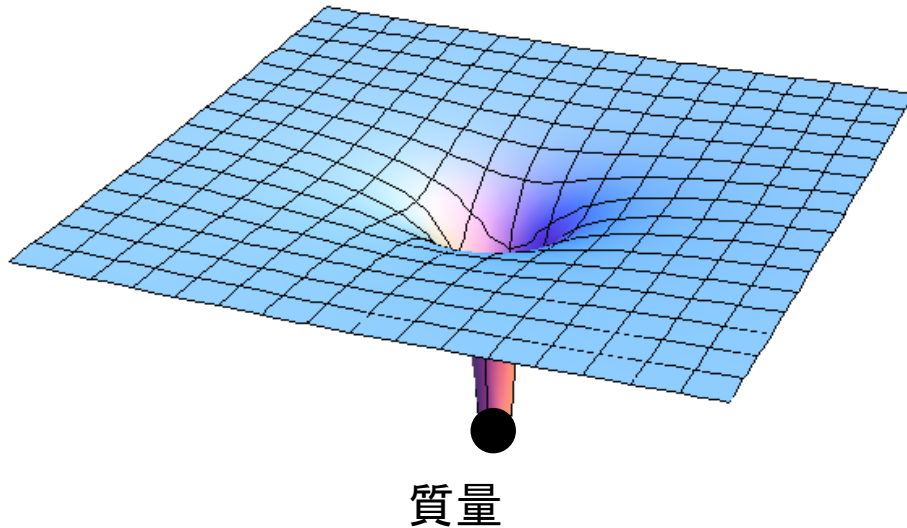


$$V(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r}$$

➡ 万有引力によって惑星の運動(楕円運動)を説明できる!

3. 重力の法則：一般相対性理論

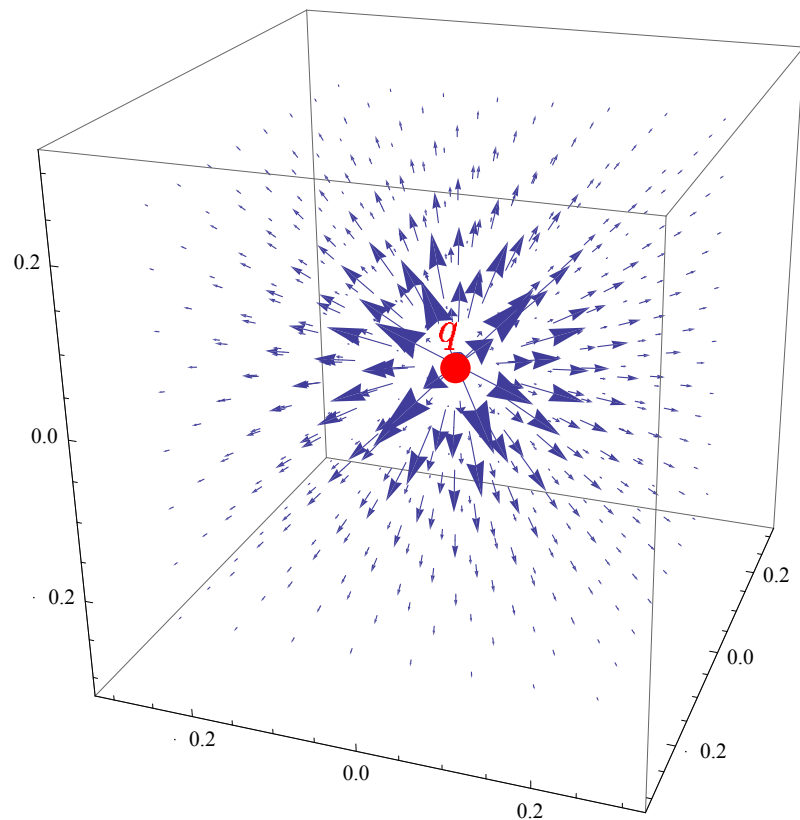
重力は、質量をもつ物体がつくる時空の歪み、によって記述される。
(1915 Einstein)



- ➡ 万有引力の法則を導出し、その補正も計算できる。(水星の軌道)
- ブラックホール解が存在する。(1916 Schwarzschild)
 - 時空の揺らぎは重力波になって伝わる。(理論的予想)

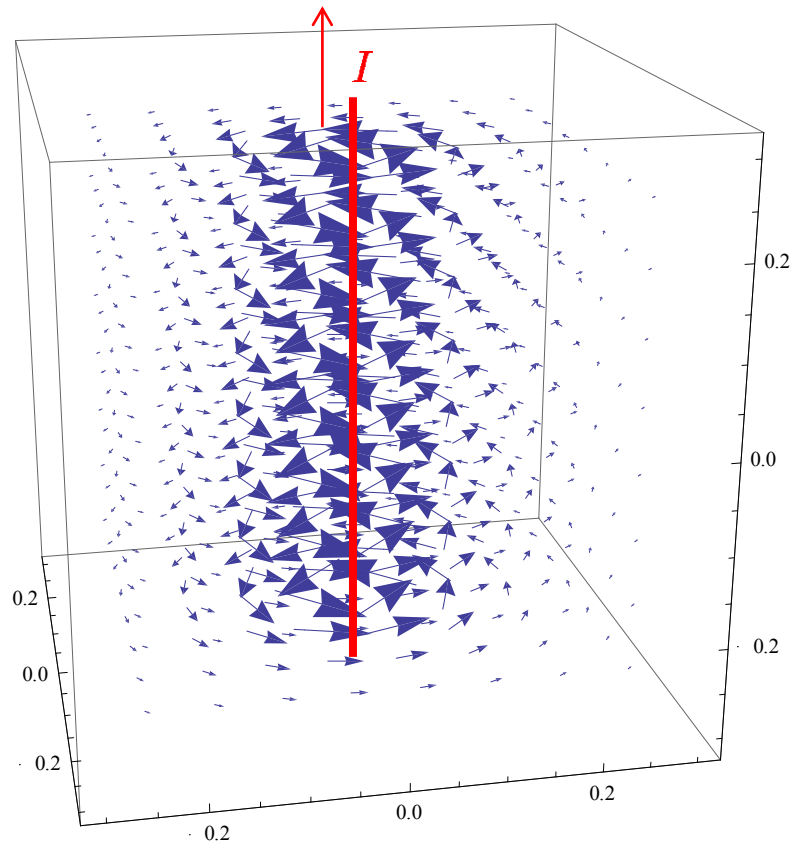
4. 現代技術の基礎：電磁気学

クーロン力: 電荷のまわりに電場が生じることで、力が伝わる。



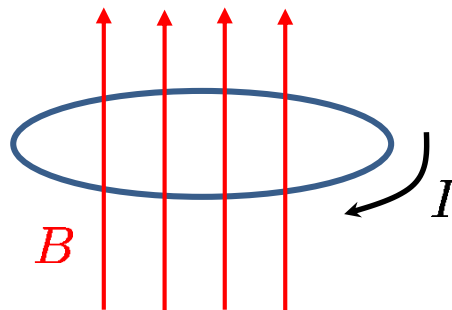
$$\text{電位 } \phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

電流によって磁場が生じる。



$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \log r \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

電場と磁場は互いに影響を及ぼす。



磁場が増加すると、電流が流れる。(Faraday)

- ➡ これらの現象を理論的に精査すると、電磁場の現象は Maxwell 方程式によって記述されることがわかる。(Maxwell)

Maxwell 方程式を解くと、電磁場が相互作用しながら光速でエネルギーを伝える波が存在する。これを電磁波とよぶ。

- ➡ **電磁波は光速で運動する光子。** ミクロな世界では電子は光子を媒介して力を受ける。

5. ミクロな世界の法則：量子論

重力とクーロン力はともに $V \sim -1/r$ のようなポテンシャルエネルギーで記述される。では、地球が太陽の周りをまわるように、電子は正電荷をもつ原子核の周りをまわることができるか？

No! 電子は加速運動をするときに電磁波を放出してエネルギーを失うので、安定ではなくなる。

➡ 古典力学の破綻

電子は連続的なエネルギーではなく、離散的なエネルギーしかとれないと考えると万事うまくゆく。(Bohr)

➡ 量子力学の構築 (Schrodinger, Heisenberg)

電磁気学は量子論として非常に精密に実験結果と一致する。
(Feynmann, Schwinger, Tomonaga)

6. 量子論と重力を融合する仮説：超弦理論

超弦理論の基本的な考え

大きいスケール(距離)から電子や光子などの素粒子を考察しても、電子や光子は「点」のまま。「点」は数学的には空間体積がゼロなので、物理的には不自然な感じが否めない。

そこで発想を転換して、現実の世界には最小のスケールがあるとして、そこから理論を制限できないだろうか？

➡ 1次元に広がりをもつ物体(弦)の導入

うまくいかないときは、理論を捨てればよい。(実際何度か捨てられた過去がある。)

弦は2種類ある。弦の振動状態によってエネルギー(質量)が異なる。

開いた弦(開弦)



光子を含む



量子論

閉じた弦(閉弦)



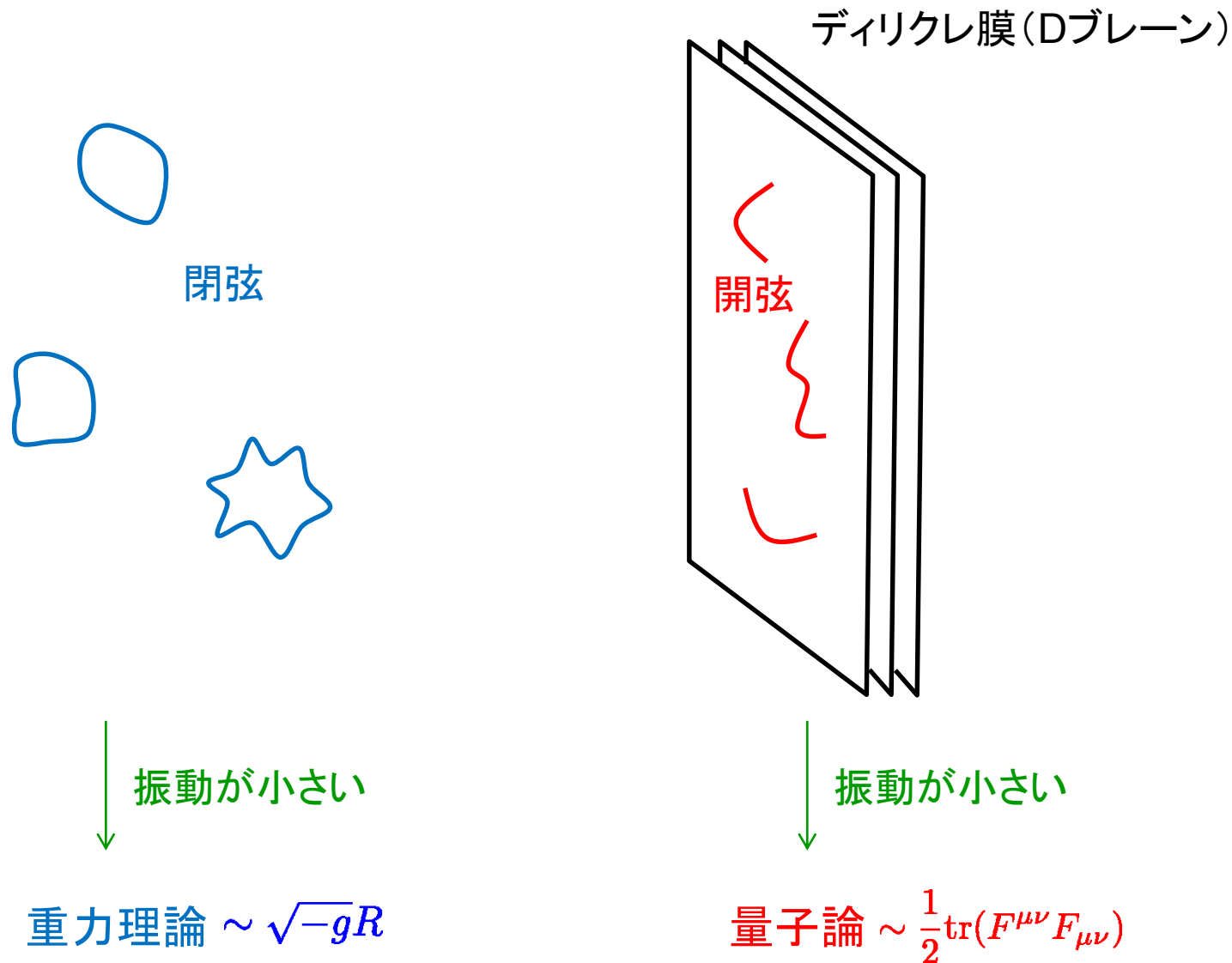
重力子(ただし未観測)を含む



重力理論

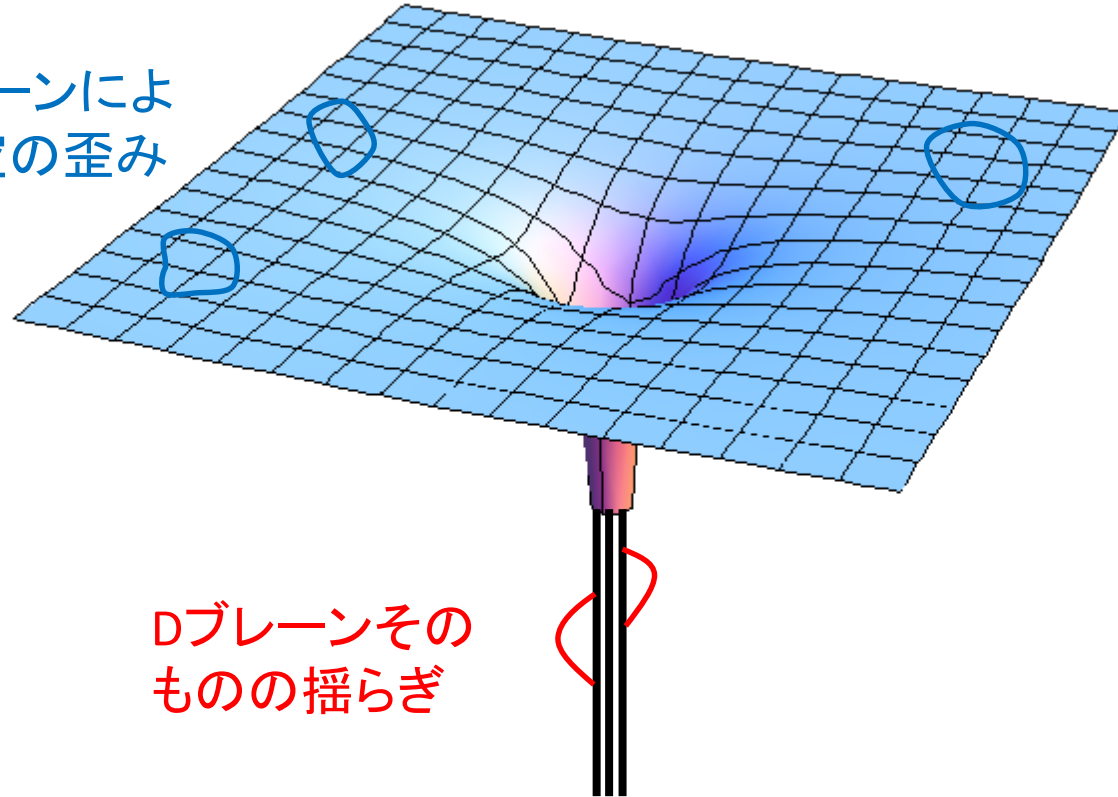
光子や重力子が量子論でも質量をもたないことを要請すると、超弦理論の時空は10次元になる。6次元空間が余分だが、どう処理すべきかは色々と研究されている。(幾何学)

現在の超弦理論の世界



ホログラフィック原理

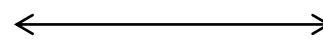
Dブレーンによる
時空の歪み



Dブレーンその
ものの揺らぎ

Dブレーンそのものの揺らぎは、Dブレーンによる時空の歪みに影響する。

量子論



重力理論

対応

7. まとめ

- 物理学では、ポテンシャルエネルギーの考え方は重要。
- 電磁気学は量子論として完成しているが、重力理論は量子論が完成していない。
- 超弦理論は重力の量子論であると期待される。
- ホログラフィック原理のような斬新な考えが提唱されている。

宇宙の始まりやブラックホールの量子論などを数理的に理解できない限り、(例え実験は不可能でも)理論屋は数理的な無矛盾性を手掛かりに、研究を続けるだろう。理解したいと思う気持ちが必要。