

我々は自然をどこまで矛盾なく記述できるか

酒井 一 博

法律科学研究所定例研究会
2015年5月20日

我々は自然をどこまで矛盾なく記述できるか

酒井 一 博
(法学部 消費情報環境法学科)

物理学とは何か？

- 自然現象を説明する学問
- 自然を記述する学問
- 未来を予測する学問

記述するとはどういうことか？誰が記述するのか？

- 現象の記述には「基準系」の指定が必要

最も自然な基準系は何か？

- 静止系

我々は静止しているのか？我々は静止を感じできるのか？

- 地球は太陽の周りを秒速30kmで公転

我々は静止を感じできない。絶対的な静止系の概念は存在しない。

- 慣性系：力のはたらいしていない物体が等速直線運動するように見える基準系

互いに等速で動いて行く全ての慣性系において物理法則は同等
(ガリレイの相対性原理)

光速の測定

1667年 ガリレイ：「もしも光速が有限ならば、少なくとも音速の10倍以上」

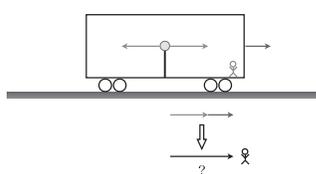
1676年 レーマー： $c = 200,000[\text{km/s}]$
(木星の衛星イオの食の周期の変動：木星が遠ざかる時 vs 近づくと)

1849年 フィゾー： $c = 300,000[\text{km/s}]$
(地上で初めて：歯車)

現在： $c = 299,792,458[\text{km/s}]$ (定義)

速度の加法性

速度は相対的な量であつたはず



発信源や観測者（の運動）が異なれば、光速も異なるのでは？

速度の加法性と光速速度

光源の速度により光速は変わるか？

星の観測 ⇨ 光速は光源の速度にはよらない

音のように、媒質に対して速度が定まっているのでは？
光を伝える媒質（＝エーテル）がある？
エーテルに対して我々ほどのくらの速度で動いているか
⇨ 「エーテルの風」の速度は？

- マイケルソン＝モーレーの実験（1881年～）
エーテルの風向きに対する方向が変われば
光速が変化し、干渉縞の見え方が変わるはず
⇨ 違いは観測されず：光はどの方向にも同じ速度で伝播
エーテルは我々に対して静止
一方地球は約 30km/s で公転していた



ガリレイの相対性 vs. 光速不変の原理

エーテルの概念の破綻
光速は観測系によらず不変

速度の加法性が成り立たない
⇨
ガリレイの相対性原理を修正する必要がある

特殊相対性理論（アインシュタイン、1905年）

光速不変の原理（相互作用の伝播速度の有限性）に基づく
新しい相対性原理（アインシュタインの相対性原理）から出発

定例研究会

光速不変の原理と事象の同時性

電車の中の人から見ると、電車中央の光源から出た光は同時に壁に到着する

外の人から見ると、光は後ろ側の壁に先に到着する

光速がどの慣性基準系でも一定とすると、事象の同時性は観測者によって異なる

光速不変の原理と時間の経過

光が光源から出発して天井の鏡で反射し帰ってくるまでの時間を考える

外の人から見た方が光の進む距離は長いので余計に時間がかかる

光が戻ってくるまでの間に、外の方が多くの時間が経っている（時間の進みが遅い）

特殊相対論

- 時間の経過は個々の慣性系に固有のものである
- 動いている慣性系の時間の進みは遅れて見える
- 電磁気学は特殊相対論の下ではじめて自己矛盾なく定式化される

一般相対論

ニュートンの運動方程式

「物体に生じる加速度は物体にはたらく力の合計に比例する」

$$m\ddot{\vec{x}} = \vec{F}$$

その比例定数が質量（慣性質量）

ニュートンの万有引力の法則

「あらゆる物体の間には、物体の質量と物体間の距離で定まる引力がはたらく」

$$|\vec{F}| = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

m_1, m_2 : 引力の強さを表す質量（重力質量）

慣性質量と重力質量は本来関係がなくともよいはずだが、なぜか非常に高い実験精度で一致（エトヴェシュの実験、1889年）

等価原理

窓の無い部屋に閉じ込められた人が、床に引きつけられる力を重力によるものであるか、遠心力などの加速度によるものか、区別ができるか？

⇒
できない。

「局所的には慣性力と重力の違いは区別できない」（等価原理）

一般相対性理論（アインシュタイン、1915年頃）の出発点

一般相対論のアイデア

「慣性質量と重力質量は等価」

⇒ 重力場のもとで、全ての物体は等しい加速度で運動する

⇒ 基準系をうまくとることで、局所的には重力の作用を消去することができる

あらゆる場所で重力の作用を消すには、時空の各点各点において基準座標の取り方を変える必要がある（曲線座標系）

しかしそのような座標系においては物体は自由に運動するように見える

一般相対論（一般相対性理論）

- 一般座標変換に関する相対性理論
- 重力の理論

重力 = 時空の歪み

我々は自然をどこまで矛盾なく記述できるか

一般相対論の検証、応用、予言 (1秒=1/3600度)

- 水星の近日点移動を説明

{	531秒/100年：他の惑星の影響
	残り 43秒/100年：一般相対論により初めて説明
- 応用例：GPS

GPS衛星の軌道：地上2万km

特殊相対論効果による遅れ： 7マイクロ秒/日

一般相対論効果による進み： 46マイクロ秒/日

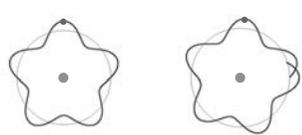
GPS衛星の時間は差し引き 39マイクロ秒/日 進む
- 重力崩壊（ブラックホール）
- 重力波

量子論の起こり

極微の世界ではニュートンの力学やマクスウェルの電磁気学では説明できない現象が山見られる

- 原子の安定性：電子はなぜ原子核に落ち込まないのか？
- 黒体放射：熱放射に電磁波の統計物理学を適用すると、紫外発散（紫外では光が粒子だと思おうまく説明できる）

前期量子論による説明 (ラザフォード 原子核の発見 1911年)
(ボーアの元素原子モデル 1913年)



軌道上の電子波が定常波となる場合のみ、電子は安定して存在
⇒ (ボーアの量子条件)

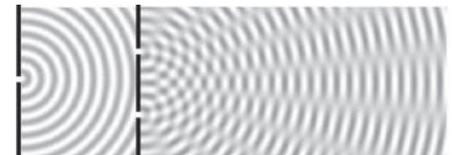
定常状態における電子のエネルギー（エネルギー準位）がとり得る値は離散的

電子が高いエネルギー準位から低いエネルギー準位に移るとき、エネルギーの差が一つの光子として放出される
⇒

当時知られていた水素原子スペクトルの実験結果を高精度で再現

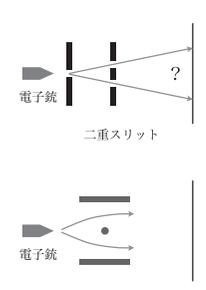
回折と干渉

- ヤングの実験

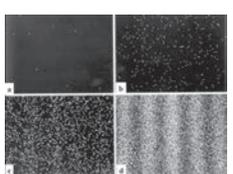


The Original Double Slit Experiment (Video by Veritasium)
<https://www.youtube.com/watch?v=Iu6tY6z00>

粒子の波動性（量子力学）



電子銃
二重スリット
?



電子銃

量子力学

- 極微の世界においては粒子の軌道の概念は存在しない
- 全ての物質は粒子であり波でもある（確率の波）
- 系の状態は波動関数（複素数を値をとる）によって表される

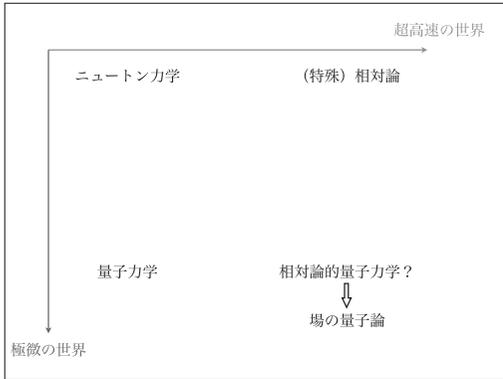
一粒子状態の座標波動関数： $\psi(\vec{x}, t)$

二粒子状態の座標波動関数： $\psi(\vec{x}_1, t_1; \vec{x}_2, t_2)$ etc.
- 観測が系の状態に影響を及ぼす
- 観測の結果は確率論的な意味でのみ定まる

粒子がどこに存在する確率が高いかを表す確率密度分布は

$$\rho(\vec{x}, t) = |\psi(\vec{x}, t)|^2$$

で与えられる
- 観測される前の状態は、一般に様々な固有状態の重ね合わせ
- 同時には観測できない物理量の組み合わせがある（不確定性関係）



「相対論的量子力学」の困難

ニュートン力学	特殊相対論
エネルギー $E = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$	$E = \frac{m}{\sqrt{1 - \bar{v}^2}}$
運動量 $\vec{p} = m \vec{v}$	$\vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - \bar{v}^2}}$
分散関係式 (物質波の性質を定める) $E = \frac{\vec{p}^2}{2m}$	$E^2 - \vec{p}^2 = m^2$ $\Leftrightarrow E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 + m^2}$

負のエネルギー状態がどうしても出てきてしまう

⇒ 量子力学の相対論的拡張を考えると、1粒子のみの量子力学ではうまく行かず、「場」の様々な振動モード (無限個!) を同時に量子化する必要がある (場の量子論)

場の量子論

- 粒子の生成・消滅を記述できる (ファインマン図)

電子・陽電子の対消滅・対生成過程 光子の放出

- 量子電磁気学の成功
様々な実験結果と驚くべき高い精度で一致
- 標準模型の成功
電磁気力だけでなく、原子核内の相互作用 (強い力、弱い力) についても場の量子論の枠組みを用いて完全に記述できる

場の量子論の厄介な点: 発散をどう抑え込むか?

場の量子論を用いた物理量の計算では至るところに発散 (無限大) が現れる

量子論: あらゆる想定し得る途中過程の波動関数を足し合わせて確率を計算

⇒ 極微のスケール (高エネルギー) での対生成・対消滅の可能性を全て含めると計算結果が無限大になってしまう (紫外発散)

繰り込み可能性

様々な場の量子論のうち、あるクラスの理論においては、計算結果に現れる全ての発散を有限個のパラメータの再定義によって吸収できる
最終的な計算結果はすべて有限

⇒ 繰り込み可能な理論

そうでないクラスの理論では、発散を吸収するのに無限個のパラメータを用いる必要がある (実験結果の予言ができなくなる)

⇒ 繰り込み不可能な理論

電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の三種をまとめて記述する標準模型は、繰り込み可能な理論

重力場の理論 (一般相対論) を量子化しようとすると、繰り込み不可能
場の量子論の枠組みを用いた重力の量子化はうまくいかない

究極理論探索の試み

- 余剰次元
カルツァ・クライン理論: 5次元の重力理論 (5次元方向は周期的) が4次元の重力と電磁気力を統一して記述 (ただし古典的)
- 大統一
電磁気力、弱い力、強い力の三種の力は、高エネルギーでは一種類の力として統一的に記述される
標準模型の複雑な素粒子の構成を説明、パラメータの数を軽減
- 超対称性
ボゾン (光子など) とフェルミオン (電子など) が一つの理論の中で対をなす発散を軽減

これらを組み合わせるだけでは、改善はするものの完全にはうまく行かない。何か欠けている。重力の量子化の問題を除いても、高エネルギーには我々の知らない新しい物理がある可能性が非常に高い

我々は自然をどこまで矛盾なく記述できるか

弦理論

- 「素粒子」は、極微の世界では1次元の広がりを持つ弦である

$$\sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-33} \text{cm}$$


$$\sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \sim 10^{19} \text{GeV}$$

弦理論:

量子力学と特殊相対論の原理に加えて、
「我々の世界は粒子ではなく弦からできている」ということだけを
新たに仮定して出発する、最も保守的な量子重力理論

量子重力: 実験による検証は望めない



よい理論 ≡ 美しい理論 = 仮定の少ない理論

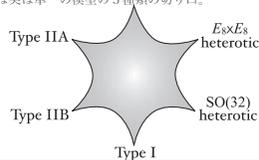
この意味で弦理論はよい理論 (→ 考察すべき優先順位の高い理論)
むしろ、あまりにもうまく行き過ぎていて

弦理論はなぜ有望か?

- 重力の存在を予言する (一般相対論を自動的に導く)
弦理論が立脚する原理に重力場の存在は含まれていない。
(元々は別の目的のために考案され「成功しなかった」理論。)
量子論および特殊相対論と整合する弦の理論を組み立てようとする、
どうしてもスピンの2の零質量場の存在が必要となる。この場の満たす方程式は
低エネルギーで一般相対論におけるアインシュタイン方程式を再現する。
- 矛盾のない量子重力理論を与える
しかも現在のところ唯一の成功例
- 大統一を自然に内包できる
量子重力理論としてだけでなく、あらゆる相互作用を記述する理論として有望
- 余剰次元を自然に内包している
- 超対称性が不可欠である
矛盾のない弦理論は、超対称性を必要とする (超弦理論)

弦理論はなぜ有望か? (続き)

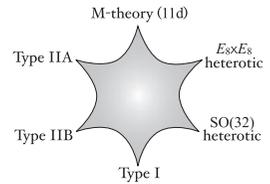
- カイラルなゲージ結合を許す
これまでのほとんどの統一理論では、これを実現するのが困難
- 理論に自由なパラメータがない
(究極理論!)
- 時空の次元、場の構成まで全て決まっている
時空の次元は10次元。
場の構成は、振動的 (「弦」描像がよい近似を与える場合) には5通り
許される。しかしながら、これらは実は単一の模型の5種類の切り口。



M理論

超弦理論を統合する 11次元理論 (未完成)

- M2ブレーン
(電気的; 2+1次元)
- M5ブレーン
(磁氣的; 5+1次元)



まとめ

我々は自然をどこまで矛盾なく記述できるか?

弦理論を考えれば、(様々な不自然さの問題は別にして)
物理学の基本法則に関する矛盾は今のところ解消されているように見える

一方で、弦理論は未完成の理論

弦理論自体が矛盾を含んでいない保証は全くない。

(ただしこれまであらゆる「矛盾」は見事に解消されてきた。

「矛盾」は探究の原動力であり、学問の出発点。)

弦理論の実験的検証は(おそらく今後も)全くない。物理学と呼べるか?
(ブラックホールのエントロピーの微視的導出に成功)

弦理論は我々の世界がなぜこのような形かを予言できていない
(どこまで予言されるべきか?)

我々は自然をどこまで記述できるか?