

プリンキピアの宇宙観とビッグバン宇宙観

目次

近代1：プリンキピアの世界像

近代2：電磁場の導入と実在性

現代1：特殊および一般相対性理論の世界像

現代2：量子力学および場の量子論の世界像

現代3：ビッグバン宇宙

階層混同複雑骨折的な誤解に陥らないこと

人間生活の空間サイズと時間サイズを絶対化する思い込み

原子を「1m」とすれば、人間は1千万「km」のサイズ

日常用語と物理用語 (物理概念) の混同

時間、空間、物質、力、粒子

物理学の拡大進化の無視

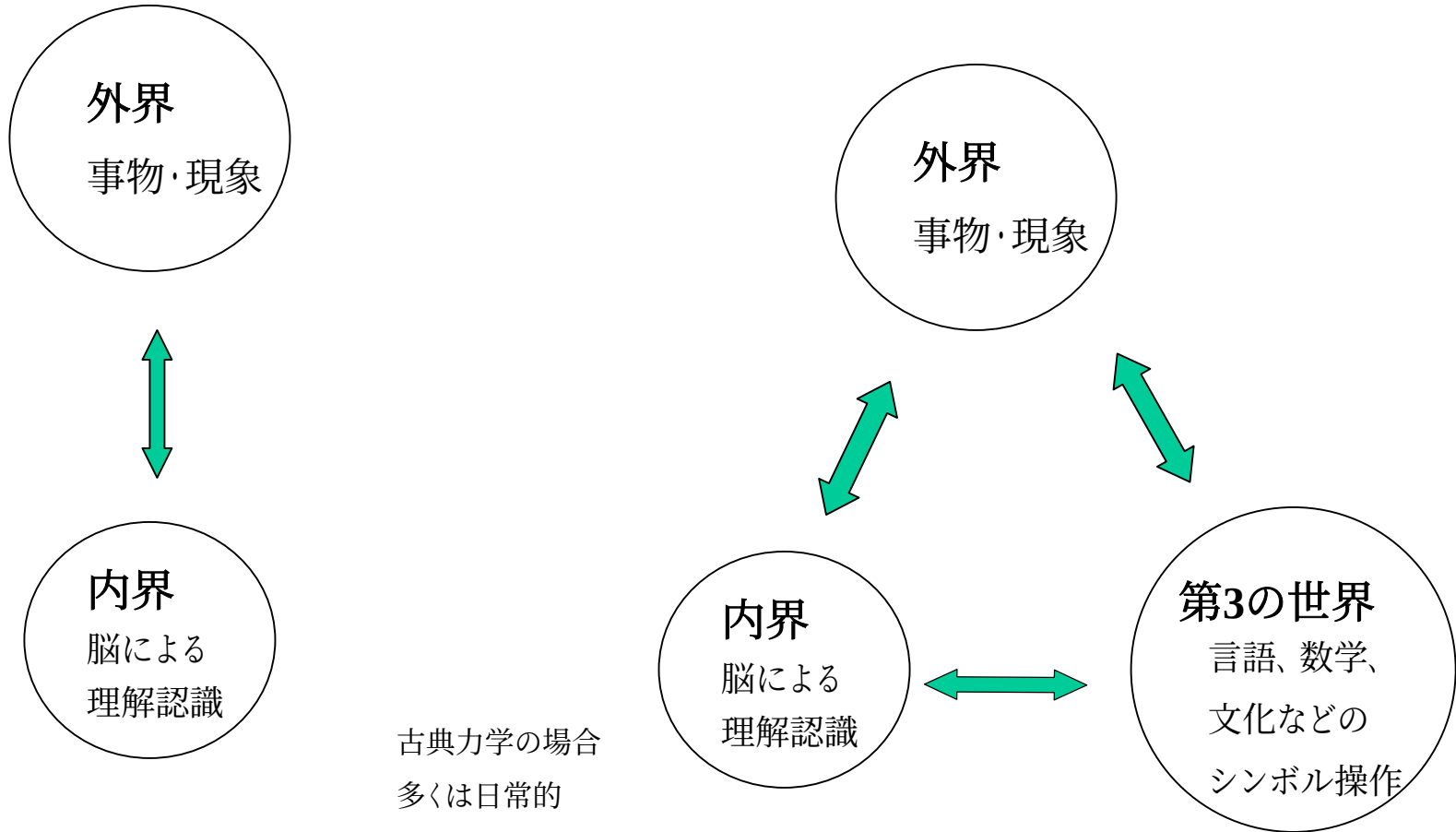
古典力学→量子力学

古典力学→相対論

自分の判断基準のあいまいなることへの無批判

非日常的な状態、状況の存在への想像力の欠如

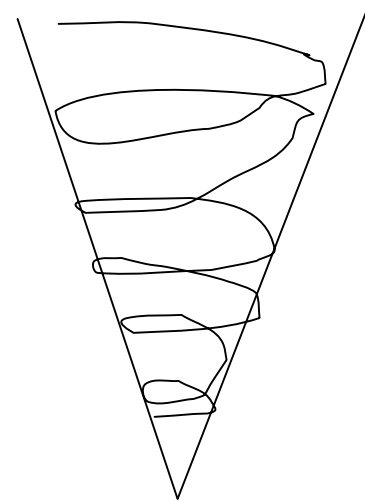
3つ世界



古典力学の場合
多くは日常的
大きさ、時間幅に
関わるものがほとんど

認識は固定されず、かつ単純には繰り返さない

- 上昇拡大する螺旋階段的認識の深まり
- 「直観的にピンとこない」というダダをこねる
⇒フィーリング、直観、思考の枠組みは
人生経験や学習で変わっていくもの！



宇宙という言葉の意味

- Space and Time: **時間と空間 (=万物の住処)**
- Cosmos: **美と調和の体系**
- Universe: **多様性の統一**
- Cosmogony: **神性または政治的権力の根拠**

近代1：プリンキピアの世界像

- ニュートン以前の世界像：「物体」と「空間」と「時間」は概念未分化、
渾然一体的、近代的学問以前
- ・ ニュートンの主たる業績
 - 1) 「自然哲学の数学的原理」(略称プリンキピア)
公理と数学的表現の使用
慣性の法則、(力と)運動の法則、作用反作用の法則
 - 2) 万有引力の発見と数学的定式化
 - 3) 微分積分法の発明

地上と天界の統一

- **絶対時間、絶対空間の中の物体粒子の運動**

等質無限連続な座標軸 (舞台、背景) としての時間、空間

時間と空間は相互に独立で、物体の運動とは独立で、先験的

恒久不変、不活性、

→ 空間、時間からの意味の剥奪

→ 「空間、時間の物理」と「物質 (物体) の物理」の分離

静止と等速度運動 (等直線運動) は局所的には区別できないこと

運動状態の変化の外因としての力

万有引力による天体の運動, 構造の決定

⇒地上と天界の一元的、統一的な宇宙観 (Universe)

デカルト的見方とニュートンの見方

デカルト的見方:

宇宙の出来事は関連しているとして、世界を複合体としてみる。

地上のことも天上のことも渾然一体となっていて、自然科学はいつも宇宙論であらざるをえない。(この意味でアリストテレスの考え方の線上にある。)

→天体の運行を数値的に計算して予言することはできない。

ニュートンの見方:

空間をからにして、そこに物をおく。なぜ、からなのかは問わないで、物体の運動だけを問う。絶対空間に固定してある系に対して加速度運動をすると力を受けるが、そうでないと受けないとして、絶対空間で宇宙の影響をすべて代表させた。世界の多くの現象をなにもからみあった複合体としないで、固々バラバラな局所的な運動法則で記述できるとした。

→こうして自然哲学(宇宙論)から自然科学を分離独立させることができた！

近代合理主義的自然科学、要素論的自然観の開始

ニュートン物理学

- ・ 力の影響下での物体 (または物質粒子) の運動についての物理学
- ・ 物質は (点) 粒子の集まりからなっている。
- ・ 物体の本質は広がり (明確な周縁の形) である
- ・ 粒子の空間的局在とその時間的な変化の記述:
(古典的) 軌道概念

△力の伝達の機構が不明。瞬時に伝わるのか？

「恒星が離れた惑星に円に近い経路 (軌道) をたどらせる」という遠隔作用の概念は深い謎に包まれていて、ニュートン自身、それが理論の問題点だと思っていたが、自分にできることを現実的にとらえ、その謎を後世の人に託した。

△電気、磁気、光に関係する現象の理解が弱点であった！

絶対空間、絶対時間という概念の衝撃と根強さ

- ・ **「空っぽの空間」を中世の人々は想像もできなかった。**
←中世の宇宙観は、静止している地球を中心とした同心球殻構造の有限な 宇宙であり、その外部には空間も含めて「何」もなかった！
- ・ **現代人の多くは、依然として、絶対時間、絶対空間を無意識的に想定していると思われる！**
- ・ **人間の視覚機構において慣性の法則は、ある意味で、埋め込まれている**
- ・ **(絶対)時間の観念の形成と剛体概念は相互規定的であるらしい。**
- ・ **注意！！**
- ・ **現代でもニュートン力学は巨視的世界については、第一近似としては正しい。
(→現代の理論はニュートン力学をある近似のもとで含む！)**

ニュートンの疑問ー物質粒子とは何かー

- **ニュートンの最後の著作「光学」、(後世への) 疑問**

電場概念

- ・ クーロン力の法則と万有引力 (重力) とは同じ形式をしている。

$$F_C = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (k : \text{constant}) \qquad F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (G : \text{gravity constant})$$

- ・ **しかし、ファラデーは電磁気現象の「直観的」描像として、「場」の概念を導入**

$$F_c = Q_2 E, \quad E \equiv k \frac{Q_1}{r^2} : [\text{電荷} Q_1 \text{のつくる電場}]$$

なぜ、力の代わりに電場を考えるか？

力の場合には力の源となる電荷 Q_1 とそれから力をうける電荷 Q_2 の両方を明示的に知る必要がある。しかし、電場の場合、力の源となる電荷 Q_1 を直接に知る必要もなく、電荷 Q_2 も初めに想定する必要はない。

確かに、静止電荷とその集まりだけを考える場合には力でも電場のどちらの考え方も同じ。しかし、運動している電荷の場合、その運動にいちいち対応して力を考えることは困難だが、電場の場合、問題にする点の電場の変化だけを知ればよい！

⇒ **電場の考え方がより一般性がある！**

場の概念の革命性

- 「場」の考え方は流体や音波を取り扱う方法として用いられてきたが、あくまで背後に粒子を想定したものであり、粒子の力学としてのニュートン力学から二次的に導出されたもの、すなわち、粒子の大集団を記述するひとつの便宜的な方法としての性格を持っていた。
- **力の伝達機構の理解が可能：媒達説**
 - →周囲の空間（物理空間！）の状態変化を媒介とした力の伝達
- **マックスウェルによりマックスウェル方程式として数学的に定式化され、電磁波が予言され、その後実証された！**
- **アインシュタインの「特殊相対論」において、物質の新しいとらえ方として確立した。**
- **「ニュートン以来の最も重要な発明」（アインシュタイン、インフェルト）**
- **ミクロな世界への適用：電磁場の量子化（場の量子論の事始！）**

電場と磁場の相互移行

電磁場からベクトルポテンシャル場へ

- ・ ゲージ変換に対する不変性
 - ・ ベクトルポテンシャルは実在か、
それとも単なる理論的概念か？
- アハラノフ・ボーム効果の予言 (図) と実証 (図)
- ⇒相互作用の統一理論における
ゲージ原理 (局所ゲージ変換に対する不変性)
の指導的役割

現代1：特殊および一般相対性理論の世界

- カーナビの原理には特殊相対論、一般相対論の結果が不可欠
運動系における時間の遅れ
弱い重力場における時間の進み
- 平行電流が接近または反発する理由
電流が流れるだけで、導線の中に特殊相対論効果が生じていた。
- 電場と磁場は座標系に依存して相互転化
- 電気力+ローレンツ変換から磁気力(ローレンツ力)は導出される
加速するほど粒子の質量は増加していく
たった5グラムの質量消滅で東京ドーム一杯分の湯を沸かす！

融合した時間と空間—時空—

可塑的な時空

- 重力の理論としての一般相対性理論
 - 物質と[時空の相互依存性
 - 時空の局所的なひずみとしての力
 - 物質 (質量) により歪む、変形する時空
- ⇒時空のアリ地獄としてのブラックホール

宇宙 (時空) の膨張の可能性の発見とアインシュタインの態度

宇宙の膨張抑止のための宇宙項の追加

←ニュートンの絶対空間 (空間の大局的恒常性) の思想の影響？

ハッブルの法則[1920年代]：膨張宇宙の発見！

←アインシュタイン「わが生涯の最大の誤り」

現代2：量子力学の世界

[量子力学の法則]

- 公理1：量子状態(ベクトル)とその重ね合わせの原理
- 公理2：量子状態の座標射影としての波動関数の確率解釈
- 公理3：観測可能な物理量はエルミート線形演算子として表される
- 公理4：（正準）量子化。座標と運動量に対応する演算子の交換関係は
はゼロではなく、 $i\hbar$ である。
- 公理5：物理量の観測；固有状態では固有値が観測され、一般の状態では
多数回の観測では期待値が得られる
- 公理6：量子状態の時間変化はシュレディンガー方程式で決まる。
- 公理7：量子的粒子の不可識別性と交換対称性
→二重スリットの両方を通過し、離れたところで干渉するという柔軟性

量子力学の世界

物質粒子はある場合には波動のように振る舞い、別の場合には粒子のように振舞う！ <-- 電子ビームの干渉実験

光は伝播する場合には波動(電磁波)として振る舞い、電子など物質粒子と相互作用する場合には粒子(光子)として振舞う！

<-- 光電効果、コンプトン散乱

原子の(励起)エネルギーはとびとびの値をとる(エネルギーの量子化)

不確定性関係

粒子の位置座標と運動量を同時には正確に決めることができない！

水素原子がつぶれないのも不確定性関係のおかげ

同種の粒子は原理的に区別できない！

すべての電子の基本的性質(質量、電荷、スピン、磁気モーメント)は極めて高い精度で同じである！

パウリの排他原理

量子数(の組)で指定される量子状態には電子は1個しか占有できない！
分子をあまり近くに接近させられない理由もパウリの排他原理である。パウリの排他原理は化学の法則の基礎である → ゆえに生命の基礎である

存在と状態の記述

- 対照とする系の部分系への分解
- 部分の間関係としての振る舞いの記述
- 部分系は一定の普遍性と独立性をもつ
- 部分間の作用に比べて、部分内の作用は強く
- 硬い部分系としての電子、原子、分子、原子核、クォークなど
- 柔らかい部分系としての台風など

場の量子論―場の一元論―

- 相対論＋量子力学＋古典的場の理論⇒場の量子論
- 物質と力 (相互作用) の基本は場であり、それがどのようにして
粒子性 (量子的粒子性) や波動性を示すかを記述するのが
場の量子論
- 物質場→フェルミ粒子 (物質構成粒子: 電子、陽子、中性子)
- 輻射場→ボース粒子 (力の媒介粒子: 光子、中間子)
- 負エネルギーをもつ物質粒子の充満した海 [=基底状態] としての
現代版真空
- 粒子の生成消滅、相互転化

個々の電子や個々のクォークはなぜ互いに瓜二つなのか？

- **粒子はそれ自体独立した存在ではなく、ある量子場の特殊な表れ（「よじれ」）**
- **全体的に見れば、量子場はいずこも皆同じ**
- **固体のように見える物質も、ぜんぜん場所をとることのない量子場の表れにすぎない。**
- **物質粒子とは単に量子場がたまたま集中しているところ、**
風呂場の蒸気が凝縮して水滴になるように、物質粒子は場から凝縮してくるのだ。

現代3：ビッグバン宇宙

- 20世紀初：銀河の「後退」の発見 ←星からのスペクトルの赤方偏移
1929年：ハッブルの法則：銀河の「後退速度」が距離に比例、方向に依存しない。

⇒ 銀河が張り付いている空間の膨張

ガモフの火の玉宇宙説← 元素合成の舞台として

3度K宇宙背景放射の残光

⇒ ビッグバン宇宙 (原初大爆発)：

始まりをもち、膨張、進化する統一した宇宙

ビッグバン宇宙をめぐる誤解 (1/2)

Q1:ビッグバンはどんな爆発だったのか？

誤解:ビッグバンは何もない空間内の特定の場所で炸裂した爆弾のようなものだった。

A1:ビッグバンは空間そのものの爆発だった。

Q2:銀河は光よりも速く後退できるか？

誤解:もちろん、不可能。特殊相対性理論に反している。

A2:確かに可能。特相対論における速度上限としての光速は物理情報の伝達則の上限であった、空間膨張速度の上限ではない。

膨張する宇宙では、後退速度は距離とともに増加し続ける。ハッブル距離と呼ばれる距離よりも遠い天体は、後退速度が光速を超える。これは相対性理論には矛盾しない。なぜならば、後退速度は「空間内を移動する物体の速度」ではなく、空間の膨張に起因しているからだ。

Q3:超光速で後退する銀河を観測できるか？

誤解:もちろん無理。そんな銀河から光は決して私たちに届かない。

A3:おそらくは可能。膨張速度は時間とともに変化しているから。

最初のうちは、光子は私たちには近づけない。しかし、ハッブル距離は一定ではない。ハッブル距離は次第に増加しているので、光子を含む領域まで伸びる可能性がある。こうして光子がハッブル距離よりも手前に来れば、光子は地球に近づくことができ、やがて私たちに届く。

ビッグバン宇宙をめぐる誤解 (2/2)

- **Q4:銀河の赤方偏移はなぜ起こるのか？**

- 誤解: 銀河が空間内を移動して私たちから遠ざかり、ドップラー偏移が生じる。

- **A4:空間が膨張し、そこを伝わる光波を引き伸ばすから。**

- 銀河は空間内ではほとんど静止しているので、すべての方向にほぼ同じ波長の光を発する。空間が膨張しているために、光が伝わるにつれて波長が引き伸ばされ、徐々に赤くなる。赤方偏移の大きさはドップラー効果によるものとは異なる値になる。

- **Q5:観測可能な宇宙の大きさは？**

- 誤解: 宇宙の年齢は140億年だから、観測可能な領域の半径は140億光年だ。

- **A5:空間が膨張しているため、半径140億光年よりも遠くの宇宙まで観測できる。**

- 光子が空間を移動してくる間にも、その空間は膨張を続けている。光が私たちに達した時には、光を発した銀河と私たちとの距離は拡大しており、光子の移動時間と光速をもとに単純に算出した値の約3倍になる。

- **Q6:宇宙の物体も、空間とともに膨張するのか？**

- 誤解: イエス。膨張によって、宇宙とそこに含まれるすべてが大きくなる。

- **A6:ノー。宇宙が大きくなっても、その中にある凝縮物体は膨張しない。**

- 初めのうちは、隣り合う銀河同士は引き離されていくが、最終的には銀河同士が互いに及ぼしあう重力が膨張の効果を上回る。こうして銀河ができ、ある大きさで平衡状態に達して安定する。

文献: G.H. ラインウィーバー、T.M. ディビス、日経サイエンス、2005年6月号, p.16, 日本経済新聞社

ピーター・アトキンス「ガリレオの指」、早川書房、2004年。

参考文献

佐藤文隆「宇宙論への招待ープリンキピアとビッグバンー」、(岩波新書)

宇宙と物理に関する物理学者の言葉の変遷を300年のタイムスパンで
深く鋭く切り込んでいる。

佐藤文隆「ビッグバンの発見」、(NHK新書)

佐藤文隆「量子力学のイデオロギー」(青土社)

渡辺 誓「認識とパターン」(岩波新書)

SSSP編「太陽系シミュレーター」(講談社ブルーバックスCD-ROM)

**P.R.ウォレス「量子論にパラドックスは」ないー量子のイメージ」
(シュプリンガー・フェアラーク東京)**

ニュートン力学の空間時間観、点粒子描像の根強さ、場の革命、
量子力学における位相相関の重要性、量子場からみた「粒子」を説得力をもって熱く論じている！

町田 茂「量子力学の反乱」[学習研究社]

外村 彰「ゲージ場を見る」(講談社ブルーバックス)

矢吹治一「真空・物質・エネルギー (場の量子論への系譜)」サイエンス社

K.C.コール「無の科学ーゼロの発見からストリング理論まで」(白楊社)

大変素養の深い科学ジャーナリストの著作

リー・スモーリン「量子宇宙への3つの道」(草思社)