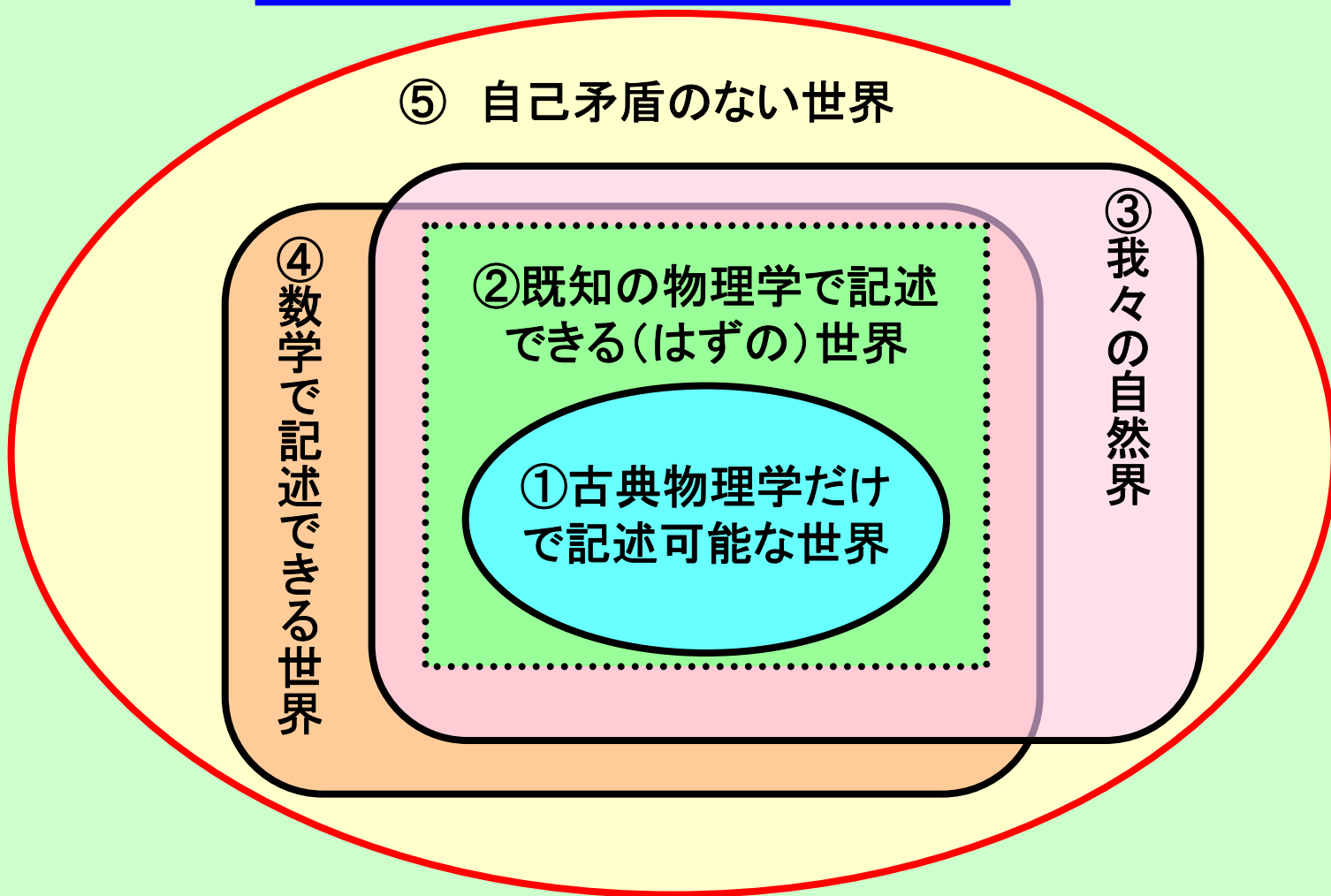


⑥ 科学は世界をどこまで記述できるか

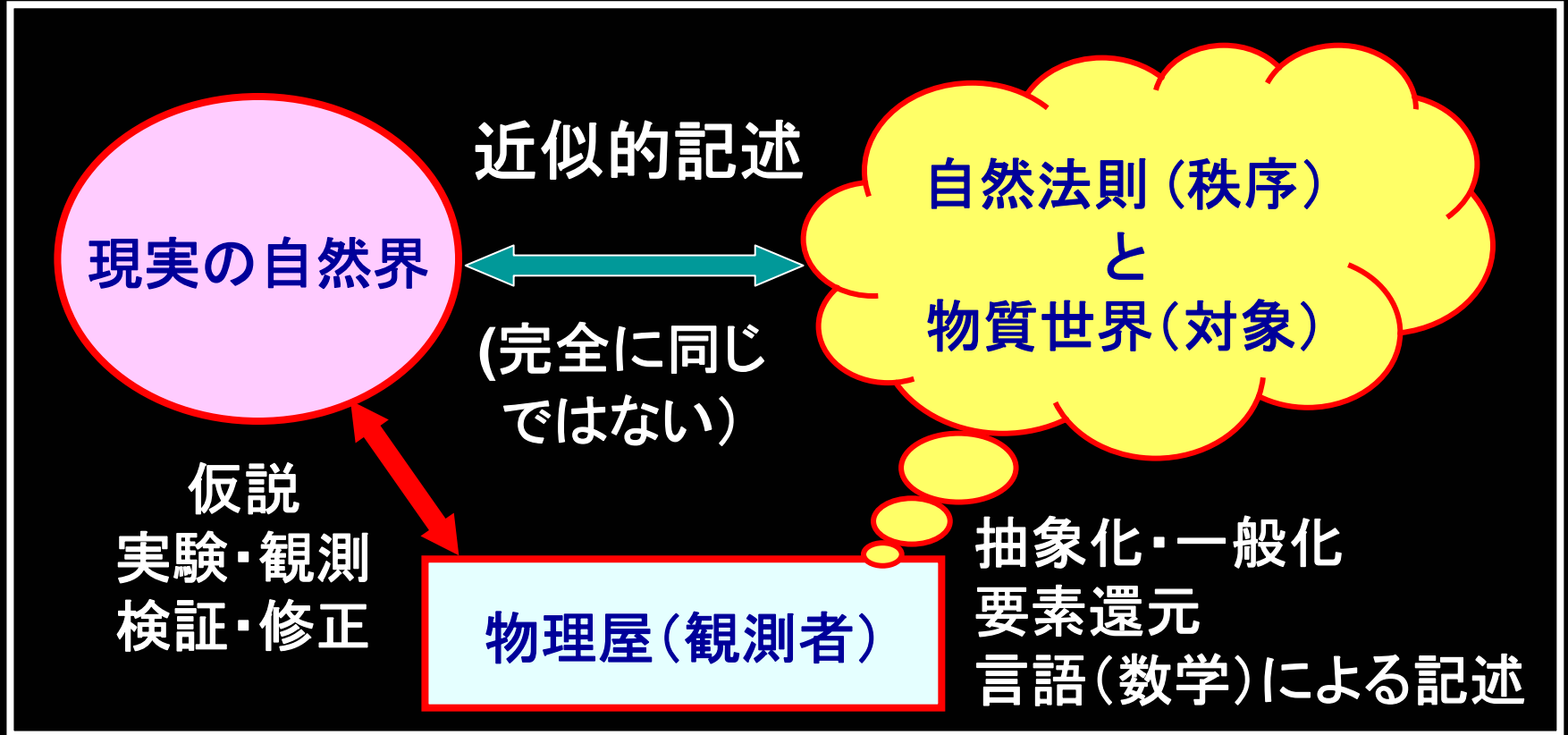
ありとあらゆる可能性

自己矛盾を含む世界



物理学の方法論：自然界理解の図式

このループを繰り返しながら近似の精度を高めていくのが科学という営み



↑ ↓ この方法論の妥当性の外部からのチェック ???

第三者機関（同業者、~~哲学者~~、納税者、文部科学省？）による検閲

物理法則と初期条件・境界条件

世界

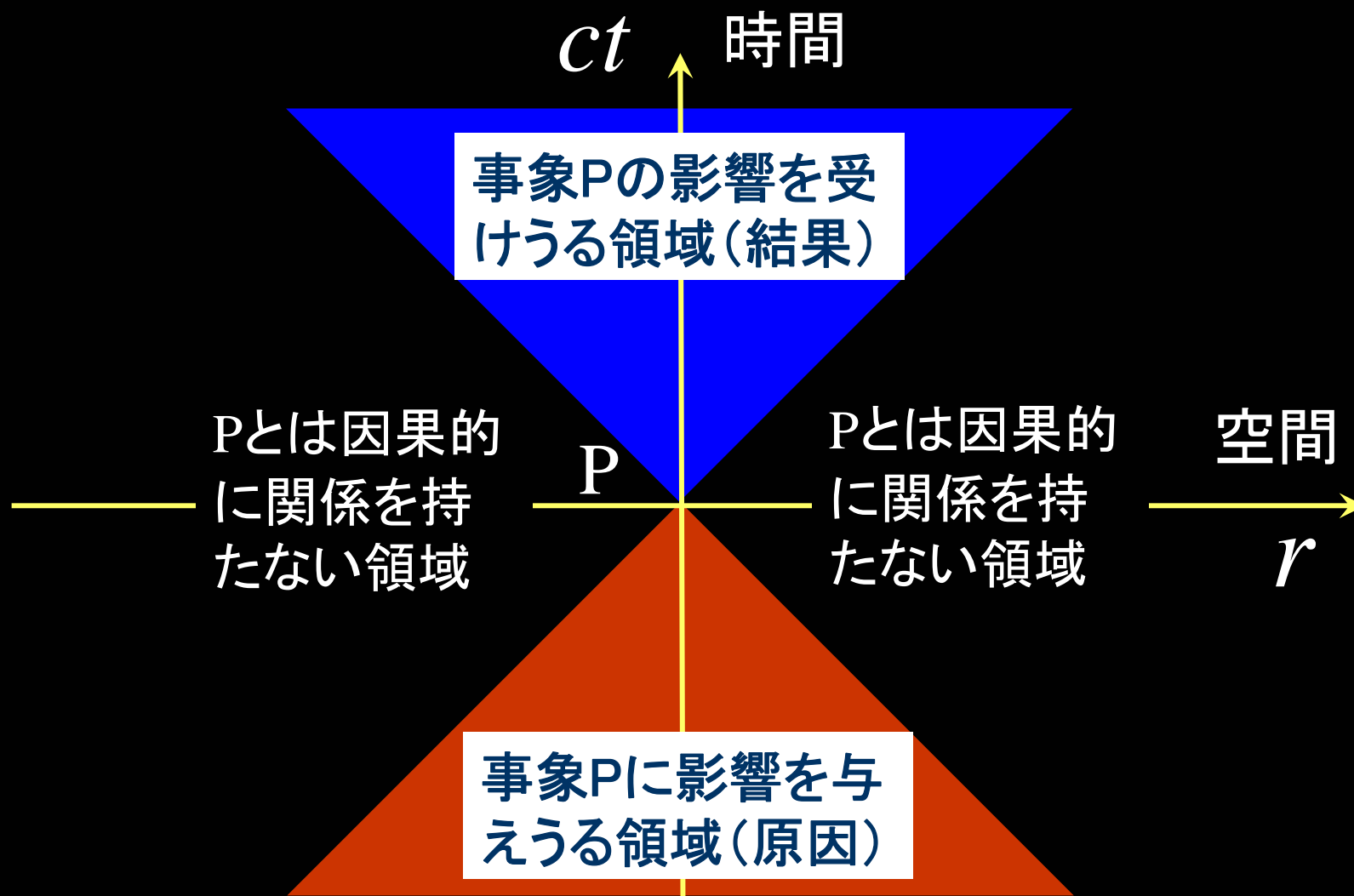
注目する
世界の一部

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}$$

- 物理学による世界の記述
 - 部分系を抽出
 - 系を近似して、ハミルトニアン $H(p, q, t)$ を設定 (ここに物理法則と粗視化が介在)
 - ハミルトン方程式
$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}$$
 - 初期条件・境界条件を与えてハミルトン方程式を解く (古典論を念頭においているが量子論の場合も同様)

c.f., 須藤靖:『解析力学・量子論』
(東京大学出版会、2008)

(物理学における)因果律



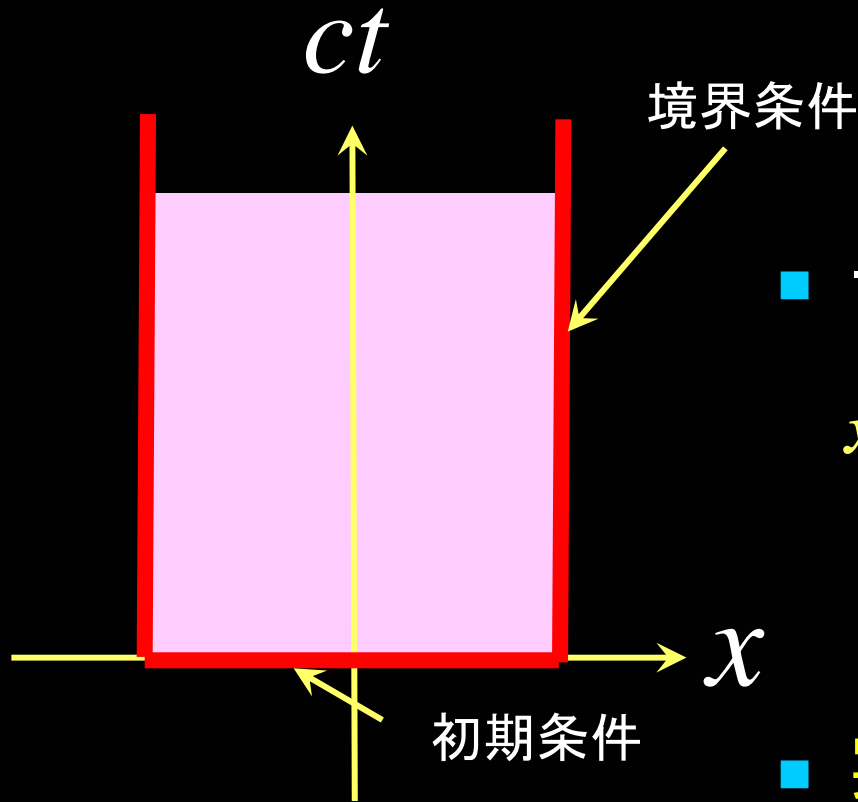
- 情報は光速 c を超えて伝わることはない

世界の時間発展を解く処方箋

- 世界を厳密・完全に記述し尽くすことは不可能
- 物理屋のアプローチ
 - 対象とする(興味ある)一部だけを抽出
 - その部分系が従う方程式を導く
 - その部分の外側の情報を、境界条件として与えられれば、原理的にはその方程式を解くことで世界の(一部の)時間発展を記述できる

簡単な例

- 一次元等加速度運動



$$\frac{d^2 x}{dt^2} = a$$

- 一般解

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

- $t=t_0$ における初期条件が x_0 (初期位置)と v_0 (初期速度)

- 実は $t > t_0$ である必要はない。数学的には2階微分方程式の一般解は2つの定数をもつだけで、初期=未来でも良い。

この境界での情報を与えることができればそれより外側の世界の情報は不要(というか尽くされている)

|

時間発展とは世界の一つの見かた

- $t > t_0$ であれば、過去(原因)が未来(結果)を生む、という時間発展的な解釈ができるが、 $t < t_0$ ならば、未来(結果)が過去(原因)を決める、という解釈も可能
 - つまり、過去から未来へという時間発展的な解釈は、必ずしも一意的なものではない
- 2次元時空内に $f(x, t) = 0$ という世界線が存在すると考えれば、これを x について解いて $x(t)$ という時間の関数を考えるような因果論的な解釈に必然性はない

因果論的な解釈が好まれる理由？

■ 人間の時間・空間の認識方法に起因？

- ある時刻で $-L < x < +L$ の領域を見ることはできるが、ある位置での過去と未来を見ることはできない
- 過去は覚えていても、未来は覚えていない（年をとると過去もまた忘れてしまうが、、、）
- この部分は、心理学・哲学の領域かも

■ 時間とは何か

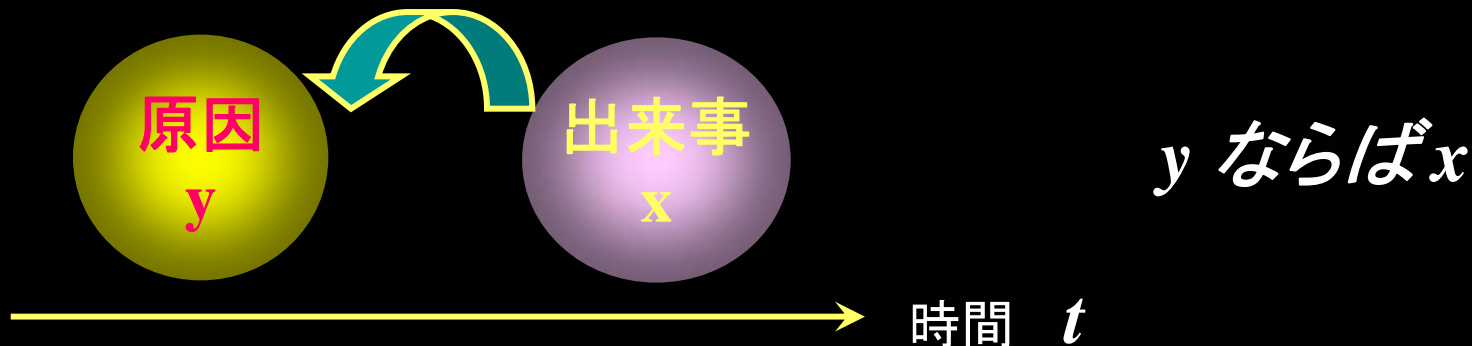
- 時間軸の過去と未来に関する非対称性に関係していることも確か
- その解明には、物理学的考察は不可欠

物理屋が考える決定論・因果律

- 物理学における「因果律」という言葉の意味
 - 情報は光速を超えて伝わることはない
 - これに矛盾する事実は何も知られていないという意味でこれを疑う必然性はない
- 何が原因で何が結果といった単純な意味づけはしないし、そもそも世界の「すべて」を説明できるとは考えていないはず(物理教最右翼を除く)
 - 多自由度や初期条件に対する強い依存性のため、決定論的系であっても現実的精度での予言は困難(複雑系)
 - 微視的世界には原理的不確定性が存在(量子論)
 - すべての法則を探り当てているわけではない(究極理論へ)
- 自由意志と物理学的世界観は相容れないものではない

科学哲学者の考える決定論なるもの

- 決定論とは: 某(科学)哲学教授Aの文章より
 - どんな出来事 x に対しても原因 y が存在し『 y ならば x 』を成り立たせるような厳密な因果法則が成り立っている
 - できごとAが生じると、それが原因となつてつねに必ずできごとBが生じる」という厳密な因果法則がこの世には成り立つと信じている
- その上でこの決定論は正しいのか?と問うている



科学は世界を語り尽くせない

■ 某哲学教授Aの文章より

- 科学が世界を語り尽くせないのは、科学の限界のゆえではない。そもそも世界は語り尽くせないのである...実在とは、語られた世界からたえずはみ出していく力に他ならない。その力を自分自身に、人間の行為に見てとるとき、そこにこそ「自由」の物語を語り出す余地も生まれる

■ 私の意見（別に目新しい見解でも何でもなくほとんどの科学者もこう考えてると思うが）

- この結論には別に反対する気はない。科学は「より正確に世界を記述する」ことを目的として常に努力しているが、「世界を語り尽くせる」と主張したことはないはず。しかし、それができない理由は、ここで述べられているような無内容でありながら甘美な修辞に満ちた文章とは無関係である。

量子論的限界

- 我々の日常的スケールではすべての現象は決定論的のように見える
 - 同じ初期条件ならば必ず同じ結果が得られる
 - 要素還元可能な事象はすべて高い精度で予言可能
- 一方、ミクロなスケール(原子のサイズ程度以下)を支配する量子論は決定論ではなくあくまで確率的にしか予言できない(と考えられている)
 - 予言の精度には原理的な限界がある

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (\text{ハイゼンベルクの不確定性原理})$$

多自由度系が自ら発現する新たな秩序

- 初期条件に対する強い依存性(複雑系)
 - 決定論的であっても、実質的には予言不可能
 - 量子論でなくとも、古典論のレベルでも実質的に予言不可能なことは数多い
- 要素に還元すれば無個性なパーツの集合となってしまうが、それらが集まり互いに相互作用することで、全く新しい多様性が出現(創発)
 - 素粒子論だけでは、この世の中を説明できない理由
 - 超伝導、超流動、生命現象(さらには脳や意識も)は典型例(⇒家先生を始めこれからの本講義の主テーマ)
 - 個人を要素と考えれば、この社会もまた60億人の人間の単なる寄せ集めだけでは決して説明できない多様性と秩序を発現している

時間の本質？

■ 時間の矢：時間軸の持つ非対称性

- 熱力学第二法則「エントロピー増大の法則」
- 「宇宙が膨張している」と認識する時間の向き
- 過去は記憶していても未来は記憶していない
- これらがいずれも「同じ時間」である必然性があるか？
- 仮に宇宙が収縮し始めたなら未来を記憶して過去を忘れるのか？つまり、時間軸の向きが逆転するのか？とか、、、

■ 時間は存在するか

- 時空間の一次元として存在するものなのか、あるいは、そもそも事象が変化するという事実に対してつけられているラベルに過ぎないのか

- これらはいずれも本質的な問題であるが、単に哲学的な議論を展開しても、飲み屋での酔っ払いの会話と大差なかろう。物理学に基づいた議論が必須。

科学哲学者の考える因果論（原因と結果）

■ 某哲学教授Bの文章より

- 私たちは、何か物事が起これば必ずその原因がある
と考える（原因了解）。しかしおそらくまた同時に、こう
考えていないだろうか。すなわち何か物事が起こった
とすれば、そこにはその物事が起こる十分な理由が
必ずあったのだ、と（理由了解）。
- この「理由了解」は通常「原因了解」と区別されない。
しかし実はこの二つは、根本的に相異なる世界了解
のパターンなのである
- **原因は結果に先行しない**：ビリヤードの遊技者の振る
舞いが原因でキューが押し出されボールと衝突する
という結果が引き起こされる。ここにおいて、原因と結
果はまったく同時であり、一体の事柄である

原因と結果とは何か？

- すでに述べたように、物理法則と境界条件の2つによって、部分系の(近似的)時間発展は決まる
 - 無理に原因と結果という2つに分離する必要はない(もちろん、主な原因は何か、という解釈は大切であろうが)。そもそも定義すらされていないし、物理屋はそのような浅薄な見方はしない
 - 「風が吹く(原因)⇒桶屋が儲かる(結果)」が間違っているわけではないが、そのような主張を展開してもあまり意味がない
 - にもかかわらず、 $t(\text{結果}) > t(\text{原因})$ あるいは $t(\text{結果}) \geq t(\text{原因})$ 、などという議論だけに終始して一体何の意味があろう



他の(科学)哲学者の見解

■ 某哲学教授Cの書評より

- 著者(先ほどのB教授)によれば衝突と始動とは「同時」なのである。たしかに言われてみればコロンブスの卵のようなもので、どんなに目をこらしても衝突と始動の間には時間差を認めることはできない。
- 著者は本書のクライマックスとも言うべき重要な一步を踏み出す。すなわち「因果関係」から「理由関係」への転換である。「私達が因果的な原因と了解するものとは実は十分な理由なのである」
- 私見によれば、(原因と結果は)説明的再構成という「物語り」のなかに組み込まれているのである。
- 自由は十分な理由の欠落点ではなく、十分な理由が多様な物語りに開かれた「理由の空間」を形作っている点に存すると思われるのである

科学哲学に無知な私の感想

- 結局は人間の自由意思の独立性という信念の吐露に過ぎず、説明に論理性が全く感じられない
 - 明確な定義をすることなく原因と理由を区別し、その言葉遊びによって問題が解決したとするのは無意味
- この結論そのものに反対するつもりはないが、そこで展開されているこじつけには啞然とせざるを得ない
 - 展開されている議論において論理性が完全に欠如
 - 「見ていないときに月があるのか」と問うのが哲学者のお約束であるならば、ボールの衝突に関する自分の観察ごときを基にして安易な結論を導くべきではない
 - ビリヤードのボールの衝突に基づく同時性の主張に至っては、まず自分の目の限界を疑うことから始めるべき
 - このようなお話にならない議論に対して、「コロンブスの卵」と評する他の哲学者がいることがなおさら信じがたい

「科学哲学」は科学を語ろうとしているか

- 科学哲学者は「科学は世界を語り尽くせるか」という問いかけをすることが多いらしい
 - 科学哲学者は「科学者は科学で世界を語り尽くせると信じている」と勝手に思いこんでいるようなふしがある
 - 世界をより適切に語るための永続的な営みが科学であるといっても良いくらいで、科学者は決して「尽くせる」と信じているわけではない
 - にもかかわらず、(科学)哲学者の一部は、科学が世界を語り尽くせない理由を切々と述べる
 - しかも、そこで展開されている論理は科学者の目からは科学的とは思えない
- 的外れな科学批判ではなく建設的な視点を提供すべき
 - 哲学者のためだけの哲学的議論に終始すべきではない

「科学哲学」は何を目指しているのか？

- 科学は、この世界を支えている法則と構造を明らかにするという明確な目標を持つ
 - 確かに分野が細分化されてしまった現状ではそれを見失ってしまっている科学者も多いかもしれない
 - それを補完するべく高い視野から現在の科学の方向性を議論してくれるのであれば「科学哲学」と呼んでもよからう
- 科学者にとってはすでに解決済みとしか思えないことを、自分の理解不足を棚に上げて詭弁を弄してほじくり返すことに意味があるだろうか
 - でなければ、同じ科学者の一員として議論すべきである
 - 確かに科学者＝悪、専門馬鹿といった予定調和的な結論は大衆受けするかもしれない
 - 電子はあるか、因果律はあるか、などという話は酒を飲んだときの議論のネタ程度で十分ではないか？
 - 私の勉強不足なのであれば(そうであってほしいと切に願う)科学哲学のゴールを明示してほしい

ジョン・バロウ氏の見解

- ケンブリッジ大学宇宙論教授 ジョン・バロウ氏
 - J.D.Barrow: *The universe that discovered itself*
“*the philosophy of science is about as useful to scientists as ornithology is to birds*”
 - ジョン・バロウ: 『宇宙に法則はあるのか』
(松浦俊輔訳: 青土社、2004)
「科学哲学は鳥類学が鳥の役に立つ程度にしか
科学者の役に立たない」
- 恐らくほとんどの科学者がこの意見に共感するであろう
 - ただし、科学者の単なる偏見・傲慢か、それとも科学哲学者に内在する問題かは立場によるかも、、、

(科学) 哲学者にこそ読んでほしい 物理学者の著作の例

- 伏見康治・柳瀬睦男編：『時間とは何か』（中公新書、1974）
- 佐藤文隆：『科学と幸福』（岩波現代文庫、2000）
- 佐藤文隆：『科学者の将来』（岩波書店、2001）
- ジョン・バロウ：『科学にわからないことがある理由—不可能の起源』（松浦俊輔訳：青土社、2000）
- ジョン・バロウ：『単純な法則に支配される宇宙が複雑な姿を見せるわけ』（松浦俊輔訳：青土社、2002）
- ジョン・バロウ：『宇宙に法則はあるのか』（松浦俊輔訳：青土社、2004）

世界は美しくあるべきか

- 世界を貫く基本物理法則は対称性によって支配されているというのが、物理屋の信念(宗教)
 - エネルギー保存則 \Leftrightarrow 時間的並進対称性
 - 運動量保存則 \Leftrightarrow 空間的並進対称性
 - 角運動量保存則 \Leftrightarrow 空間的回転対称性
- 自然界の法則(相互作用)はこのような「対称性」によって規定されていると考えるのがゲージ理論
 - 確かに現在知られている法則はすべてそのように定式化できる
 - これは決して自明ではなくまさに驚くべきことであり、物理屋の価値観に大きな影響を与えている
- しかしそうでなければならない理由がないのも事実

完全な対称性からのわずかなずれが大切？

- 実は自然も対称性を少しだけ破っていることが多い
 - 粒子の質量の起源（自発的対称性の破れ）
 - 対称性の破れ方こそ世界の多様性の源泉
- 完全すぎるものは美しくない？
 - 完全でないところが個性であり愛すべき点
 - 左右完全に対称な顔は良く見ると不気味？
 - なぜか、基本的な漢字の多くは左右対称性を微妙に破っているようだ
 - 月、火、水、木、金、土、日、大、中、小、人、生、山、川、光、門

要素還元的方法論の限界

- 複雑な現象を、細かい素過程に分解しそれぞれの要素を理解するのが伝統的な物理学の方法論
 - 素粒子物理学をはじめとして、この方法論の成功のおかげで20世紀の物理学は飛躍的に進歩した
- 一方、要素に分解してしまうと何も面白くないにもかかわらず、それらが複雑に絡まることで初めて見えてくる多様な現象が存在する(物理学の魅力⇒家先生)
 - これは統計物理学や物性物理学において顕著
 - 生物などはその端的な例である。要素に分解してしまっっては、生物と無生物の境界は定義できない
- しかしながら、それらの複雑な現象の理解はどうしてもケースバイケースで取り組むしかなく、普遍的な枠組みの構築は困難
 - 政治、社会、経済はまさにそのような例とも言える

自然法則は再現可能でなくてはならないか

- 同じ条件のものでは、常に同じ結果が再現できることが自然法則の大前提
 - しかし、そうでなければならぬ理由はあるのか
 - 自然法則が再現可能でないとしたときにどのような世界が具現するのか
 - 仮にそうだとすても、厳密に「同じ条件」が実現されることはあるのか
- 宇宙は膨張しているので、温度や密度が時々刻々変化している。もし、自然法則がこの宇宙の状態にも敏感に依存しているようなものであれば、厳密に同じ結果が再現される必要はない
 - 自然法則も時間変化して良いのではないか
 - 少なくとも基本物理定数が時間変化していけない積極的な理由は考えつかない

ディラックの大数仮説

- 我々の世界にはなぜか、 10^{40} あるいはその2乗といった、言語道断の桁を持つ(意味ありげな?)無次元量が存在する
- さらにそれらは、本来ミクロな物理法則だけで決まるものと、宇宙に関して初めて登場するものの2種類が存在

- 宇宙年齢と古典電子半径の通過時間

$$N_1 \equiv \frac{t_0}{e^2 / m_e c^3} \approx 6 \times 10^{39}$$

- 陽子電子間の電気力と重力の比

$$N_2 \equiv \frac{e^2}{G m_p m_e} \approx 2 \times 10^{39}$$

- これらが独立であるはずがない。つまり、たまたま現在成り立っているのではなく常に成立していると考えるのが自然 (P.Dirac 1937; Nature 137, 323)

$$G(t) \approx \frac{\alpha^2 \hbar^2}{m_p t} \propto \frac{1}{t}$$

(もし他の基本定数が時間変化しなければ)

基本物理「定数」は時間変化する？

- 「現在」が宇宙の歴史においてなんら特別な時期ではないとすれば(コペルニクスの)、物理「定数」は時間変化すると考えるほうが自然
- 連星パルサーの観測から重力定数については厳しい上限が導かれている

$$\dot{G}/G = (1.0 \pm 2.3) \times 10^{-11} \text{yr}^{-1} < 0.1/t_0$$

- 一方、微細構造定数については遠方クエーサーの吸収線の微細構造線の観測より有意な時間変化を主張するグループもある
 - Webb et al. PRL82(1999)884, PRL 87(2001)091301

$$\Delta\alpha_E / \alpha_E = (-0.72 \pm 0.18) \times 10^{-5} (0.5 < z < 3.5)$$

- 少なくとも、物理定数に対してすら「神聖にして侵すべからざるもの」というタブー視の風潮は弱まってきた

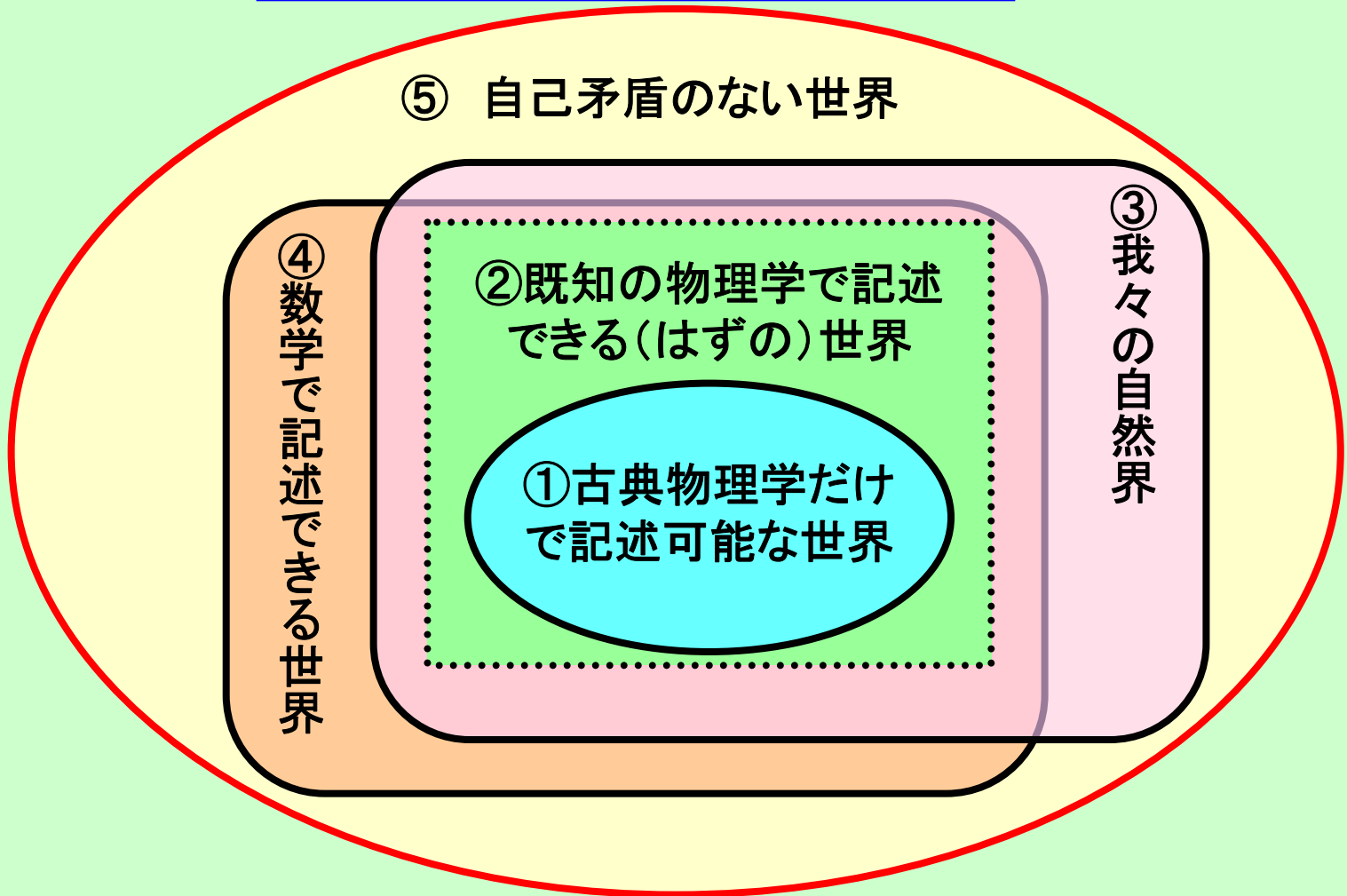
世界はどこまで理解できるのか

- この宇宙を支配している摂理や法則という抽象的な意味での「世界」が存在していること自体が不思議
 - 哲学者なら「世界は本当にあるのか」と問いかけることだろう
- その「世界」を我々のような人間が部分的であろうと理解できていることはさらに不思議
 - 我々はまだ不完全であるとはいえ、自然科学という体系の構築に成功している
 - ネアンデルタール人がそのようなことを成し遂げられるとは思えない
 - 世界を理解するための最低限の知性は何か
 - 我々人間はどこまで世界を理解可能な知性のレベルなのか

「世界」の可能性

ありとあらゆる可能性

自己矛盾を含む世界



科学を知り 世界を知る

- 現代科学は哲学を必要としているか？
 - 最近の天文学観測の進歩にともない、宇宙に関する理解は飛躍的に広がった
 - その結果、我々の宇宙さらには世界を理解するうえでは、それら以外にも宇宙や世界があるほうが自然なのではないかという考えすら生まれてきた
 - 我々人類はどこまで世界を理解できるかは明らかではない
 - 世界を知るという試みは、科学の原動力であり、決して終わることのない営みとして人類が存在する限りいつまでも続く文化である
- 「我々は何も知らなかった」と痛感する時期を迎えたい

**All truths are easy to understand
once they are discovered;
the point is to discover them.**

Hale Telescope at the Palomar Observatory

Photograph of 200-inch Hale telescope and dome.

Image Credits: Peter Smit and Charles K. Cahill

- Galileo Galilei