

2016年12月17日 立正大学シンポジウム
「現在」という謎—時間の空間化とその批判

物理学における時間

力学・熱力学・相対論・量子論の時間

谷村 省吾

名古屋大学大学院情報科学研究科

第2版, 2016年12月17日作成・公開

時間とは、すべてのことが同時に起きるのを防ぐ自然法則である。

ウディ・アレン

Time is nature's way of keeping everything from happening at once.

Woody Allen

はじめに

- 私は物理学者である（工学部応用物理学科と理学研究科物理学専攻を出た）。
- 専門は、量子論・力学系理論・その他、数理物理的なこと。
- **時間**についてなら語れることはあるが、
- **現在という謎**については考えたことがない。そもそも謎なのか？とさえ思う。
- **時間の空間化**という概念はわからなくはないが、**批判**すべき対象だとは思わない。

この講演では

- 標準的な物理学の理論では時間という概念がどのように扱われているか概観する。
- 最近、David Mermin という物理学者が [Now](#) についての論文をいくつか書いている。彼の論点を紹介する。

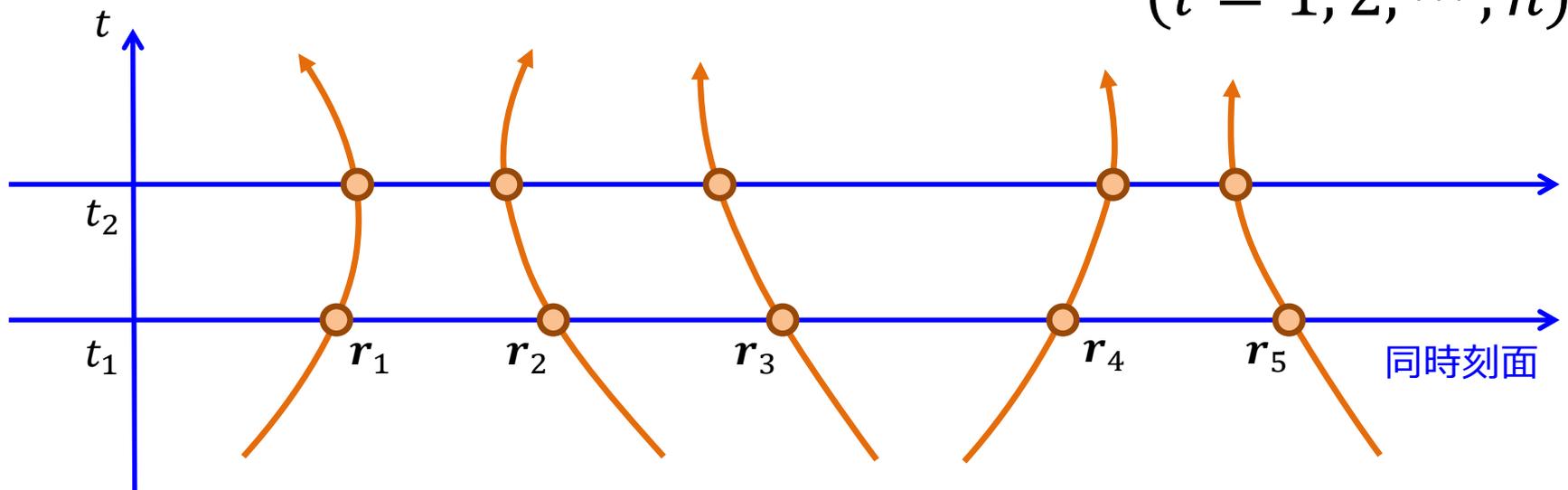
力学における時間

ガリレイ・ニュートンの時間（絶対時間）

一斉的：すべての物体に共通する時刻があり、一斉に時間が流れる

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_n(t))$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$



運動方程式に込められた運動観

決定論的な初期値問題：ある時刻における系の状態がわかれば、任意の時刻（未来も過去も）の系の状態が決定される。

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_i(\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_n(t))$$

$$\mathbf{r}_i(0), \dot{\mathbf{r}}_i(0) \mapsto \mathbf{r}_i(t), \dot{\mathbf{r}}_i(t) \text{ for } \forall t$$

逐次発展的な運動観：現在の状態が無限小の未来の状態を逐次的に決めていく。

$$\mathbf{r}_i(t) \mapsto \mathbf{r}_i(t + \varepsilon)$$

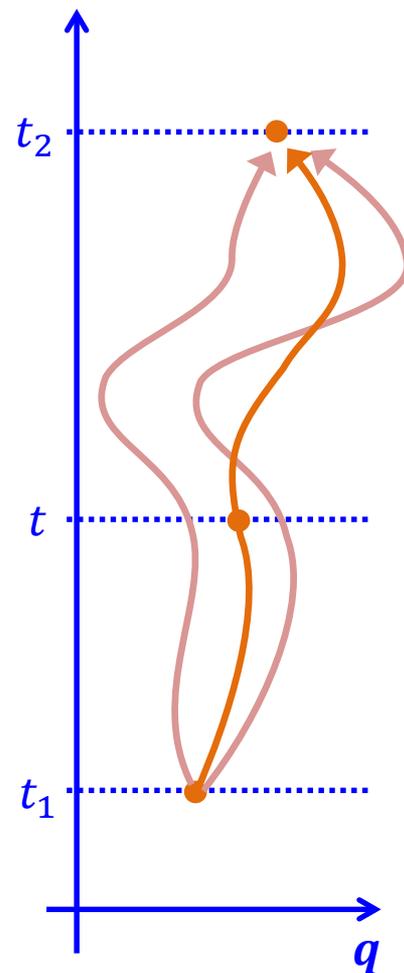
解析力学における時間

ラグランジュ・ハミルトンの最小作用の原理：

始点と終点を結ぶ経路のうち、作用積分の値が極小となる経路が現実の経路となる。

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) dt$$

過去と未来は対等な境界条件とみなされる。逐次発展というよりは、過去と未来で挟まれた中間経路が決まる、という運動観。



ポアンカレの時間概念

- 我々は二つの時間経過が等しいかどうかについて直接の直観を持っていない。そういう直観を持っていると信じている人は幻覚に欺かれているのである (科学の価値 p.50)
- 正午から1時までの間に、2時から3時までと同じ時間が流れたというとき、この断定はどういう意味を持つのであろうか。…必ず、ある程度の任意性を伴った定義を用いて、自分なりに与える意味以外には何もないのである (科学の価値 p.50)

ポアンカレの時間概念

- 時間の定義は力学の方程式ができるだけ簡単になるような定義でなくてはならない (科学の価値 p.56)
- 「外から力を受けていない物体は等速直線運動する」という言明 (慣性の法則) は、時計とものさしに対する要請である。

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t \\ y = y_0 + v_y t \\ z = z_0 + v_z t \end{cases}$$

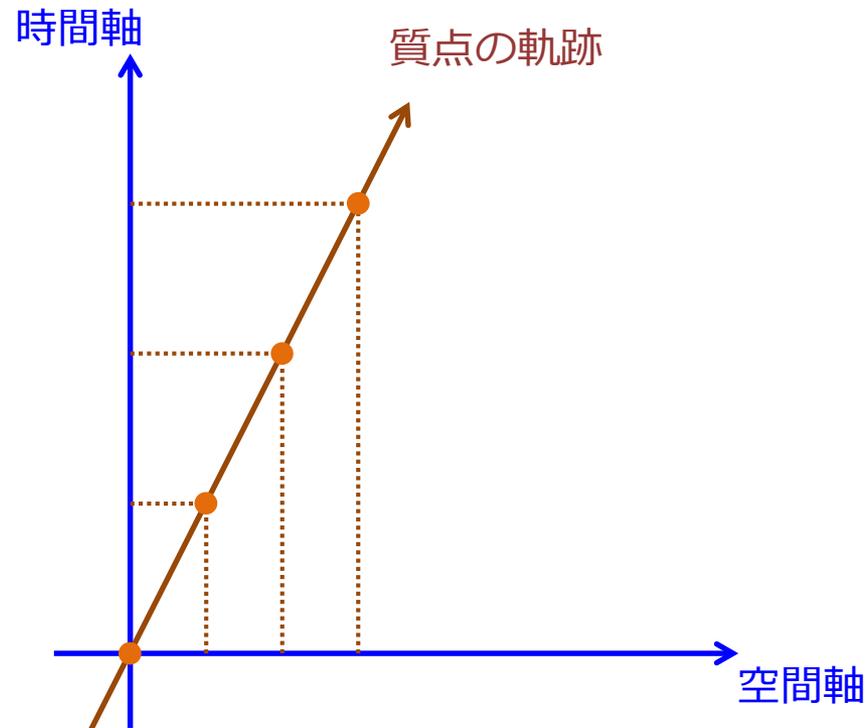
時間の空間化 とはどういうことか？

- 時計とは？
- 標準的力学系、規格化された力学系である。
- 例：等速直線運動や振り子や地球の自転や電磁波や心拍など
- 軌道に等間隔の目盛りをつける、針の角度を等間隔に刻む、往復運動をカウントするなどして、空間の刻みを時刻に読み替えている。
- 時計は、安定性のある運動によって時間経過を空間位置変化に変換するシステム。

時間の空間化

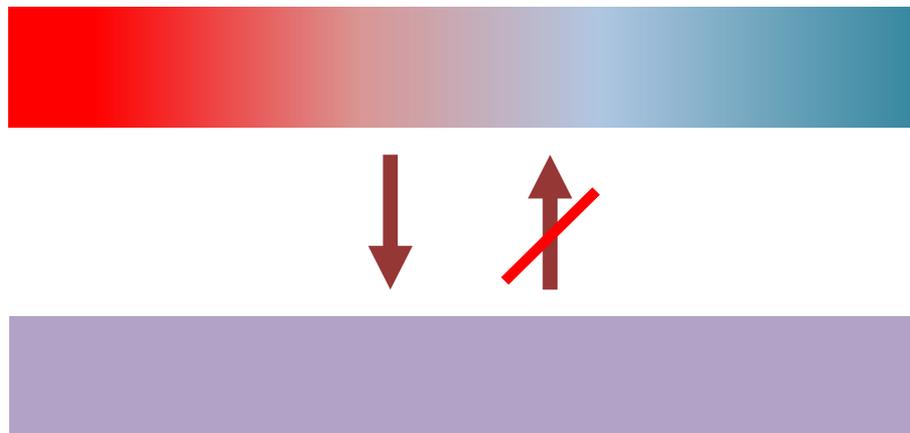
等速直線運動する質点があれば、等間隔の空間目盛りを、等間隔の時間に写像できる。

→ 時空図 space-time diagram



熱力学における時間

- 力学法則は時間反転対称性を持つ。すべての運動は原理的に可逆。
- 熱力学は、不可逆な変化の存在を認める。
- 不可逆過程：熱伝導・拡散・混合・摩擦熱の発生など



熱力学における時間順序

- 熱力学には時間の前後関係がある。
- 孤立系のエントロピーは平衡状態の順序に関して非減少関数：

$$X_1 < X_2 \Rightarrow S(X_1) \leq S(X_2)$$

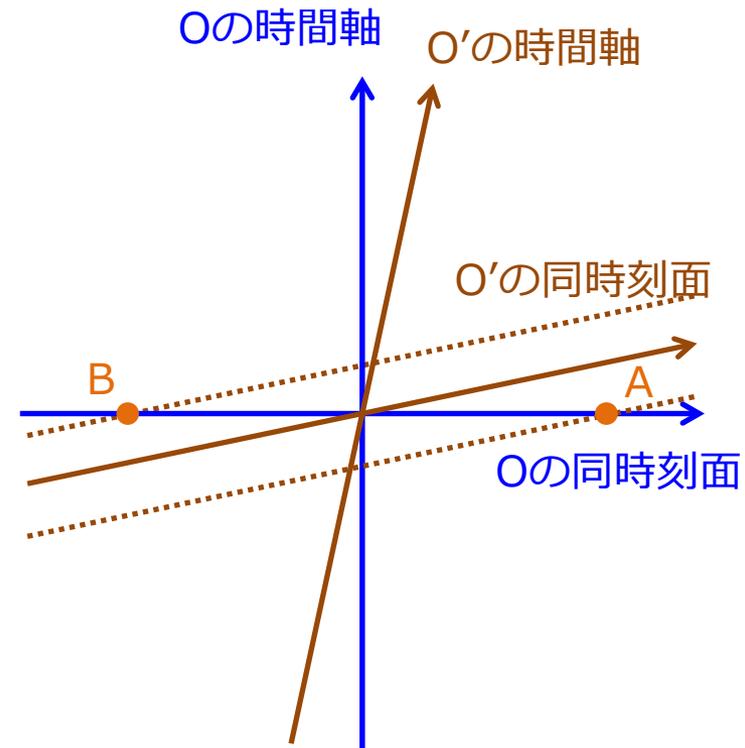
- (狭義の) 熱力学には定量的時間概念はない。
- 熱力学は、非平衡状態において時々刻々に起こる現象を語れない。「単位時間あたりの仕事量」も予測できない。

特殊相対論

- 事象(event)の集合としての時空(space-time)
- 標準力学系としての光：光速一定・直線運動。光を手がかりとして、ものさし・時計・座標系を定める。
- 慣性系：力を受けていない物体が等速直線運動しているように見える座標系
- 相対性原理：すべての慣性系で物理法則は同型であるべし。

特殊相対論における時刻

- 同時刻の相対性：
観測者（慣性系） O にとっては事象 A と B が同時であっても、他の観測者 O' にとっては同時ではないことがあり得る（ガリレイ・ニュートンの絶対時間・全宇宙を一斉に刻む同時刻という概念の否定）。

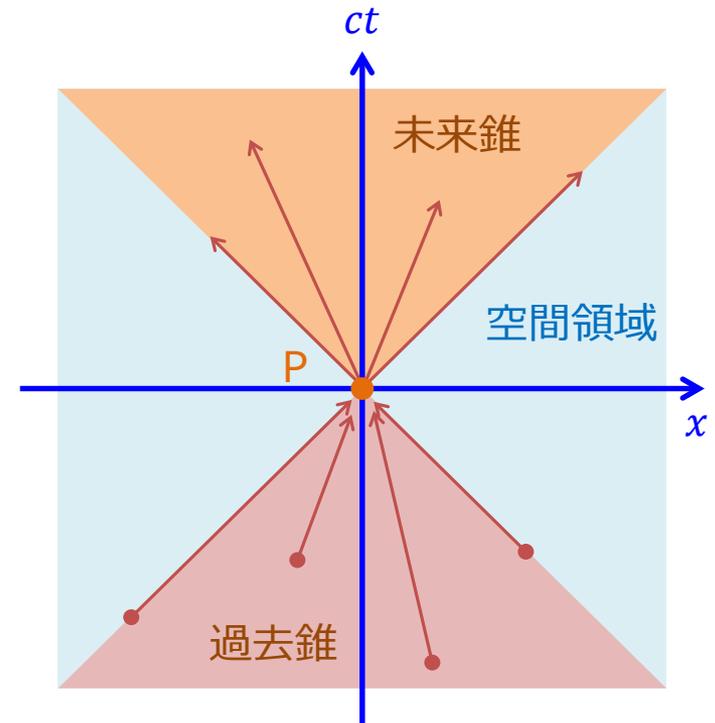


特殊相対論における時間

- 慣性系は、各時空点に座標（時刻と位置）を割り当てる。
- ローレンツ変換：慣性系から別の慣性系への変換。座標値は絶対的な意味は持たない。
- 固有時：（等速直線運動しているとは限らない）各時計が刻む時刻。一斉性は失われる。双子のパラドクスや寿命の延長など。

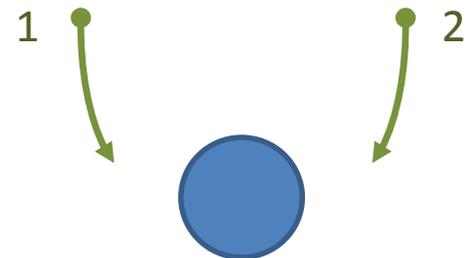
時空の因果構造

- 時空点Pの未来錐 = 事象Pが影響を与えうる時空点の集合
- 時空点Pの過去錐 = 事象Pに影響を与えうる時空点の集合
- 時空点Pから空間的に離れた領域 = 事象Pと因果関係を持ち得ない時空点の集合。便宜的にPと同時刻とみなしてもよい。



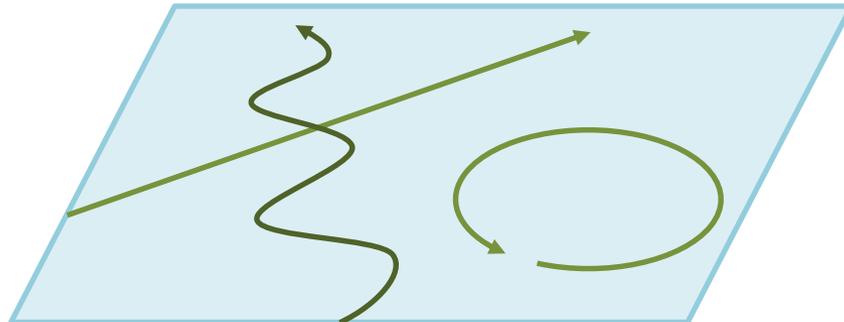
一般相対論

- 事象(event)の集合としての時空(space-time)
- 力を受けていないはずの物体の運動が等速直線運動から外れることがある。
- 全時空を覆う慣性系は存在しない。
- 座標系は便宜的なものにすぎない。
- 相対性原理：すべての座標系で物理法則は同型であるべし。



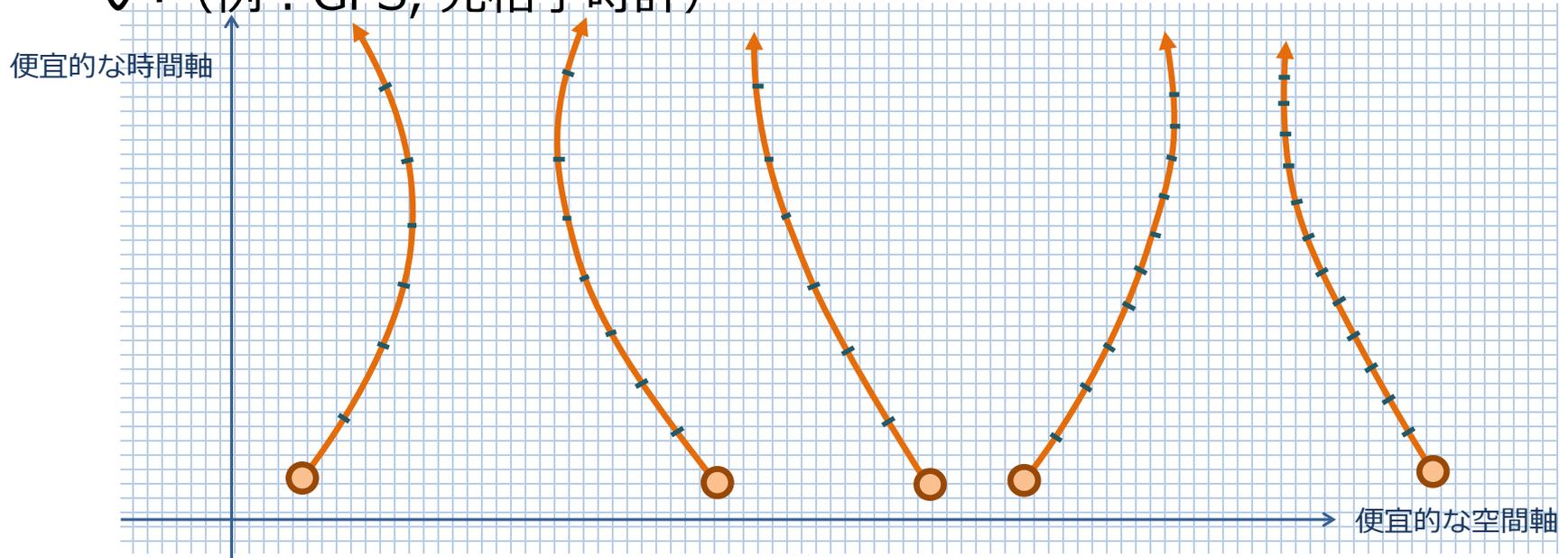
特殊相対論と一般相対論

- 特殊相対論：平坦な時空の幾何学
- 一般相対論：曲がった時空（一様でない重力場）の幾何学
- 「特殊相対論は、加速する物体の運動を扱えない」「特殊相対論は、加速する観測者を扱えない」といった言説は誤りである。



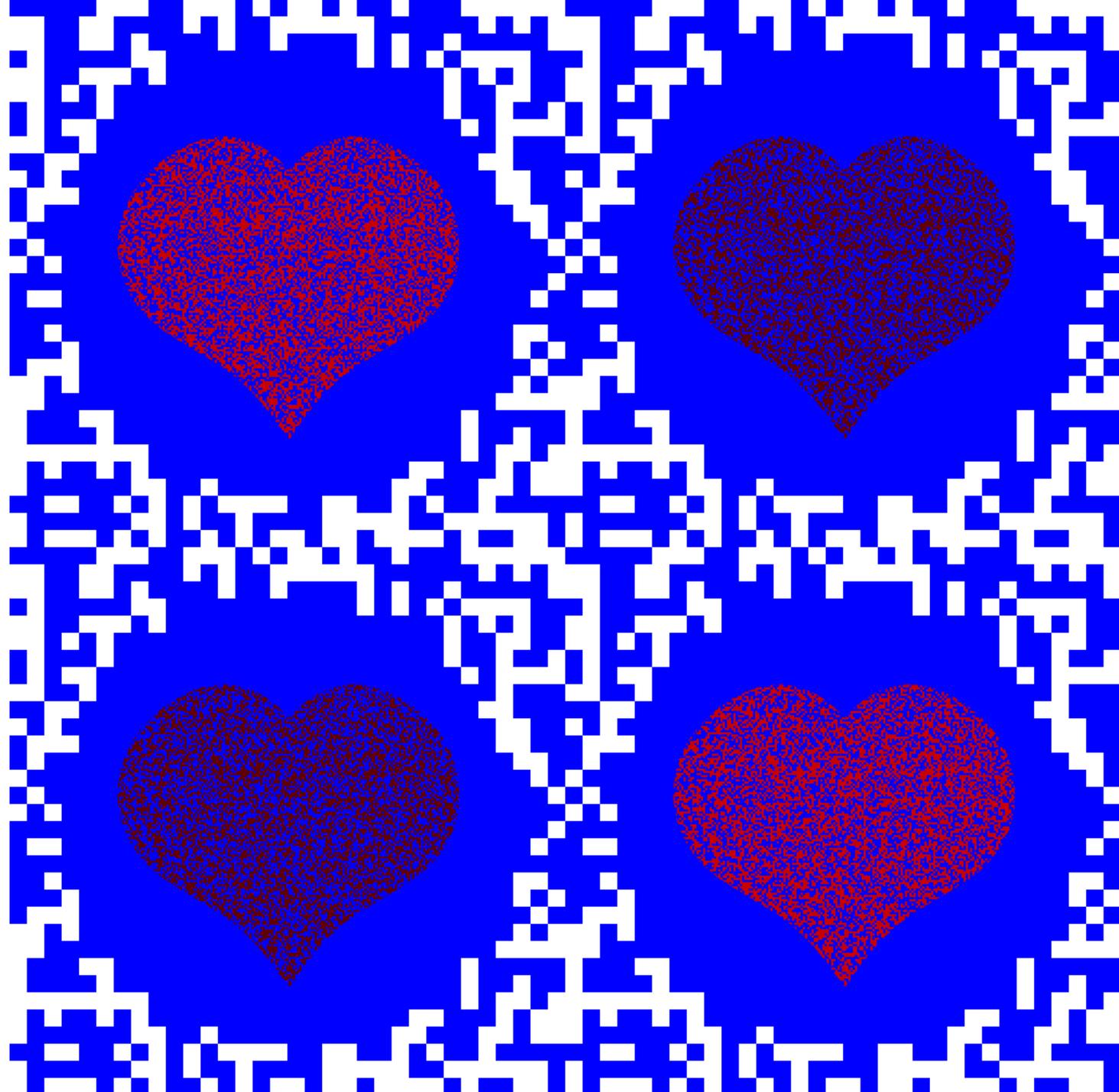
一般相対論における時間

- 時間は座標の一つであり、座標は各時空点に便宜的に割り当てられた番地にすぎない（曲線座標でもかまわない）
- 各物体の軌跡(time-like curve)には固有時というパラメータがあてがわれる。同時性は保証されない（例：GPS, 光格子時計）



同時性の錯覚

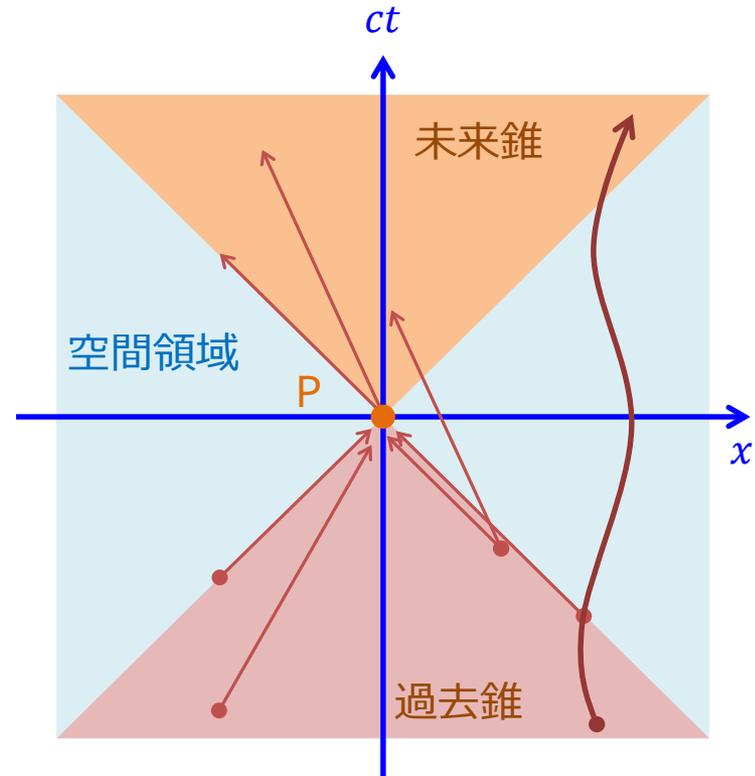
- NHK「爆笑問題のニッポンの教養」の錯視のページ
- <http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/bakusho2007.html>



我々が「現在」と思っているもの

光速=毎秒3億メートル
音速=毎秒340メートル
神経パルスの伝達速度=?
身体運動=毎秒1~10メートル

30メートルの距離
光なら1000万分の1秒
音なら10分の1秒



我々は、現時点における世界を瞬時に見渡している、現在の世界というものがありありと実在している、という感覚を持ちがちだが、それは、我々が近視眼的で、分解能の低い、鈍い感覚と、のろまな体と、短い寿命しか持っていないという制約に関して無自覚であるがゆえに生じた錯覚である。物理的な「現在」は影響の及ばない遠くであり、不可知ではないが推測するしかない存在である。

量子論における時間

- 量子力学においては、時間は観測者（記述者）が設定するパラメタである：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_t\rangle = \hat{H} |\psi_t\rangle$$

または

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \hat{A}(t) = [\hat{A}(t), \hat{H}]$$

- 場の量子論においては、時空座標は、各時空点の物理量を指示するために観測者が設定するパラメタである。

$$\hat{\Phi}(x, y, z, t), \quad i\hbar \frac{\partial}{\partial x^\mu} \hat{\Phi}(x, y, z, t) = [\hat{\Phi}, \hat{P}_\mu]$$

量子論における時間と観測

- 波束の収縮の問題（？）：観測した途端に量子状態が変わる？ 超光速の変化？ 微分方程式では表せない急変化？

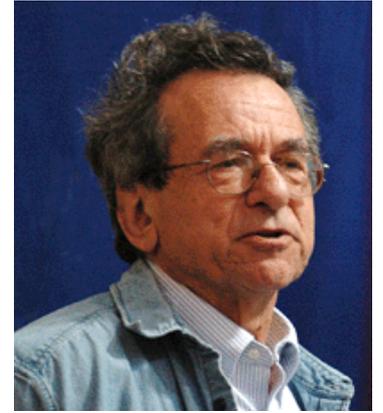
$$\hat{\rho} = |\psi\rangle\langle\psi| \mapsto \hat{\rho}' = \hat{\Pi}_a \hat{\rho} \hat{\Pi}_a^\dagger$$

- ここでは深入りしない。私の見解では、一定の状態にもとづいて逐次観測の結合確率を普通のボルン確率解釈で計算すればよく、「状態の急変」という物理現象はない。空間的に離れた物理量演算子は可換なので、「超光速の影響」はない。

ここまではオーソドックスな物理の話

- 意外性のある話はなかっただろうと思います。
- ここから話題を替えます。
- マーミンという物理学者が「現在」について論じていることを、かいつまんで紹介します。

David Mermin



- 1935年、アメリカ生まれ
- 物性物理・固体物理の理論家
- 「2次元空間では連続対称性が破れる相転移は起きない」というMermin-Wagnerの定理や超流動の研究が有名
- ユニークな語り口の物理学解説書も著している（『量子のミステリー』など）
- 量子基礎論・量子情報科学の先覚者でもある
- 最近では QBism 推し

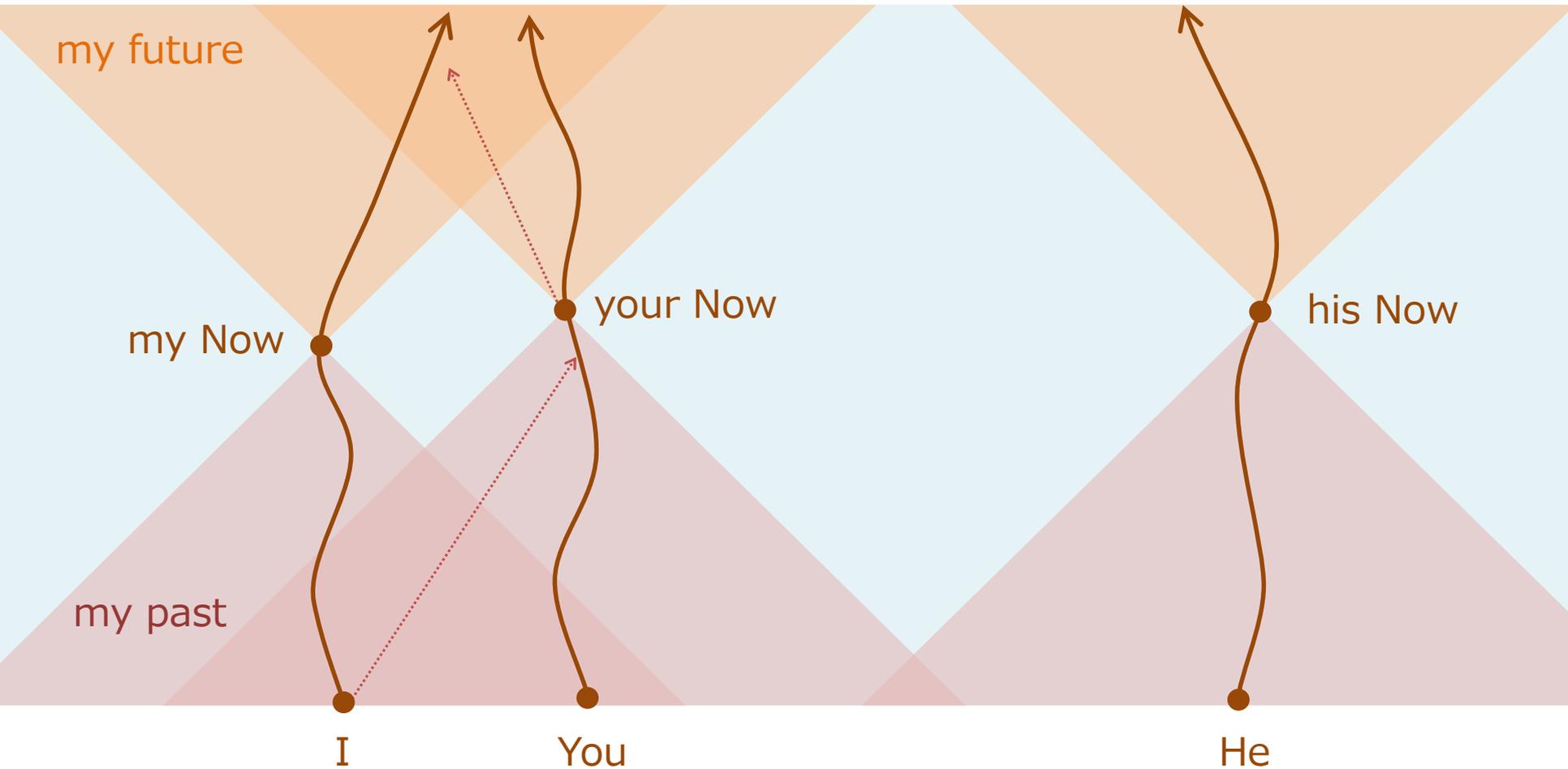
David Mermin の論文

1. What I think about Now, *Physics Today*, March 2014, pp.8-9 →
2. QBism puts the scientist back into science, *Nature*, March 2014, Vol. 507, pp.421-423 →
3. QBism as CBism: Solving the problem of the Now, arXiv 1312.7825 →

The problem of “the Now”

- 各自は現在という瞬間をつねに感じている。
- 現在は過去と未来を厳然と切り分ける。
- 過去のことは知っている・思い出せる、未来のことは想像しかできない。
- 現在は過去から未来に向かって進行しており、さっきまで未来だった時空点は過去に移る。
- この「現在」という概念を、現代の物理学は適切に記述していない、物理学の時空に my Now という特別な点はないし、my Now が上記のような性質を持つことを物理学は説明していない、というのがMerminのおおよその論点。

イメージ図



my Now は時空を進行し、未来を過去に変えながら今を生きている。

Merminが問題にしていること

Physics seems to have nothing whatever to say about the Now even at a single place, but deals only with relations between one time and another, in spite of the fact that the present moment is immediately evident as such to each and every one of us. (Mermin, *What I think about Now*; *Physics Today*, March 2014, pp.8-9)

「現在の瞬間」があることは誰にでも明らかであるが、そのような概念について物理学は何も語らない。物理学は、ある時刻と別の時刻の関係を扱うだけだ。

それは問題なのか？

Merminの問題を平易な言葉で言い表すと：

Nowって何？ 私の居場所としての my Now, 私から片時も離れることのない my Now, 私の未来を食いつぶして過去へと変えていく my Now, my Nowっていったい何のよ！？

Nowの性質を物理学的に記述してください。できれば Nowの性質を物理学から導いてください。

正直に申し上げるが、私（谷村）はMerminが何を問題にしているのかわからない。また、何を示せばMerminの問題提起に答えたことになるのかもわからない。

Mermin自身の答え

- Nowの問題は新しい物理法則を発見することによって解かれるようなものではない。
- 「世界の物理学的記述にNowがない（のはおかしい）」という結論へと導いてしまう我々の誤った前提を見い出すことによって、Nowの問題は解消するであろう。
- 誤りの一つ：我々は、主観（私）と客観（外界）という二分法にあまりにも慣れており、私は物理的世界の外にいるように思い込んでしまうものだ。
- もう一つ：時空図という概念はあまりにも便利なので、4次元時空が実在すると思いついてしまう。しかしそれは誤謬である。

皆さんご納得いただけましたか？

- 誤りの一つ：我々は、主観（私）と客観（外界）という二分法にあまりにも慣れており、私は物理的世界の外にいるように思い込んでしまうものだ。
- もう一つ：時空図という概念はあまりにも便利なので、4次元時空が実在すると思いついてしまふ。しかしそれは誤謬である。
- だから、Nowの問題などない。時空は便利な図式にすぎず、時空にNowが物理学的に定置されていないからといって気にすることはない(?)

現在主義との関係

- 現在主義：過去・現在・未来のうち現在だけが存在する、とする立場。
- Nowの問題：「現在」すら物理的実体ではなく幻想ではないか、という問い。
- Nowの問題が解消したあとに何が残るのか？

このあたりが私の限界

まとめに入らせていただきます。

まとめ 1/3

- 物理学の理論における時間概念のありようを概観した。
 - ニュートン力学：全宇宙を覆う時刻が一斉に進行するという時空観。逐次発展的な運動観。時間反転については対称。
 - ラグランジュ・ハミルトン力学：始点と終点是对等な境界条件。最小作用の原理によって全時間にわたる運動が決定するという運動観。
 - 物体の運動を記述する図面として時空図が導入された。
 - （電磁場などの場の理論には触れなかったが）時空には場の量が置かれる場所・座標という役割もある。

まとめ 2/3

- 物理理論における時間概念のありよう：
 - 熱力学：時間順序概念があるだけ。時間間隔の定量的評価はしない。不可逆過程・エントロピー増大という方向によって過去と未来の非対称性が生ずる
 - 特殊相対論：同時性の絶対性が破綻。過去と未来は定義できるが、同時は便宜的に定義される。
 - 一般相対論：曲がった時空間上では、時間は便宜的な座標にすぎない。各時計の固有時という概念と、2つの事象の因果関係は、well-defined.
 - 量子論：時間は自然現象の記述者が設定するパラメータ。

まとめ 3/3

- 錯覚：我々が物体や景色を瞬間的に一望しているという感覚は、我々の身体と生活範囲の制約から生じた錯覚である。我々が思っている現在には、空間的な奥行と時間的な遅れがある。
- Merminの唱えるNowの問題とその解消について紹介した。
 - 「各自が自分の現在という瞬間を有している」という感覚は抜き去りがたい。
 - だが、物理の時空図ではすべての時空点が平等な「うつわ」であり、my Now, your Nowという特別な点に特別な役割を与える理由が物理学にはない。
 - My Nowにこだわるのは自己中心の天動説なのか？時空図が実在物だと思ふことが幻想なのか？

ご清聴、ありがとうございました