

Quantum Foundations 2024  
2024.3.11-12(芝浦工業大学)

# 量子力学に因果観は必要か？

Is the idea of causality necessary  
for quantum mechanics?



一関工業高等専門学校 白井仁人

Hisato Shirai

「量子力学の諸解釈」  
森北出版(2022)

# 概要

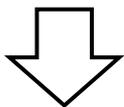
ベルの不等式の破れは「局所性または実在性を否定する」とよく言われる。しかし、因果性を捨てる道もある。本発表では、因果の観念を捨てることが奇妙でないこと、そして、実験がそれを支持していることを説明し、因果の観念を捨てた世界観がどのようなものか議論する。

Violation of Bell's inequality is often interpreted to deny locality or reality. However, there is also a way to abandon the idea of causality. In this presentation, I will explain that it is not strange to abandon the idea of causality, and that it is supported by experiments. We will then discuss a worldview denying causality.

# 1-1. ベルの不等式の破れ

A) 実在性 (Reality) }  
B) 局所性 (Locality) } → Bell's inequalities

Experiments → Violation of Bell's inequalities  
→ 局所実在性の否定 Local Realism is denied.



①局所性の否定 (T. Maudlin, D. Bohm, ...)

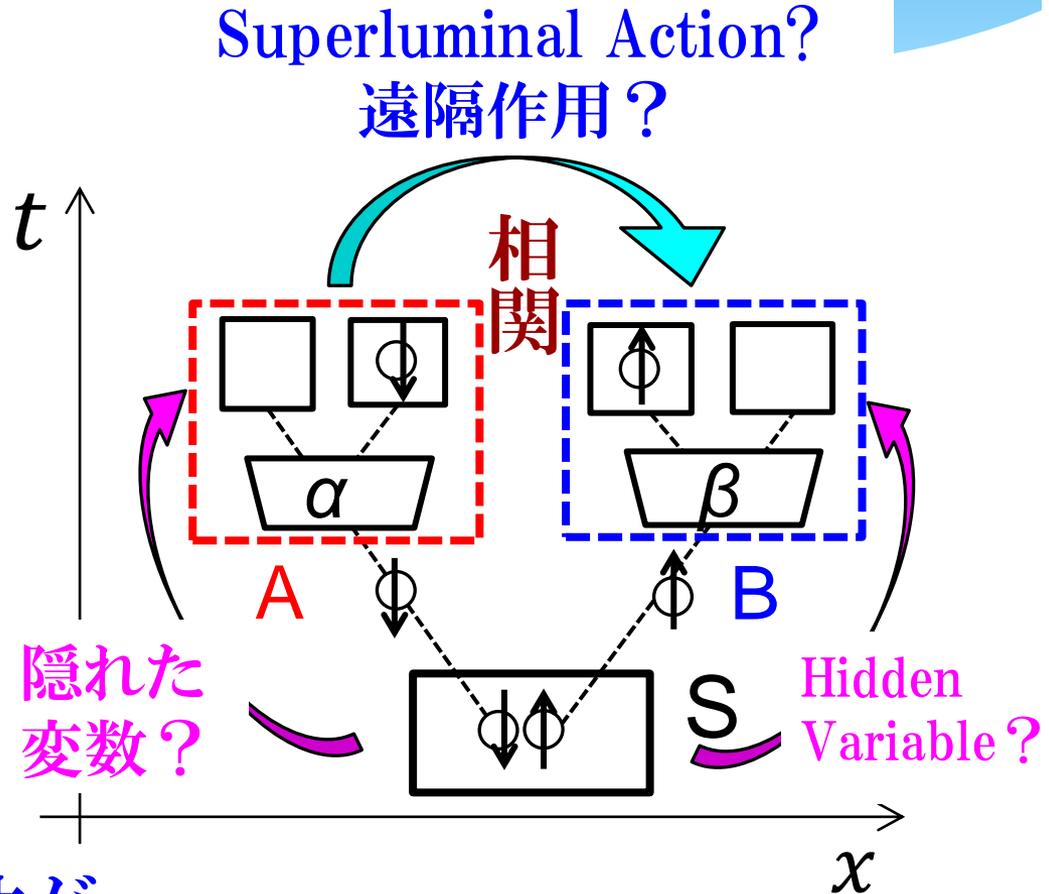
②実在性の否定 (A. Zeilinger, ...)

③因果性の否定 (H. Shirai, ...) この可能性を

議論したい。

# 1-2. 因果的な見方 Causal View

- ① AB間に相関がある (事実)。
- ② Sが原因 (想像) : 隠れた変数 → ベル不等式 → 実験と矛盾。
- ③ AかBが原因 (想像) : 遠隔作用 → 相対論と矛盾



⇒ 原因という考え方自体が量子力学と合わないのでは?

The causal view does not match quantum mechanics.

# 1-3. 因果をやめる

## Without Causality

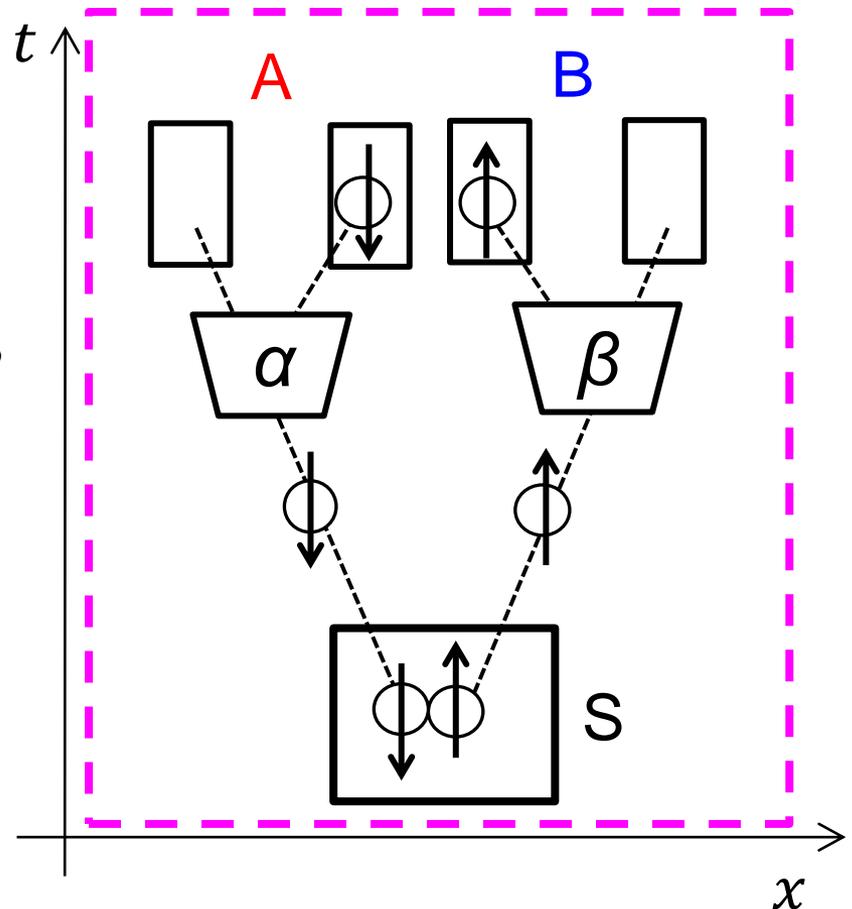
- 相関の原因が過去(どこかの時刻と場所)にあるという考え方をやめる。
- 全体の環境に応じて、系の分布全体が決まると考える。

The whole of the environment determines the whole of the distribution.



変分原理の考え方。

Variational View.



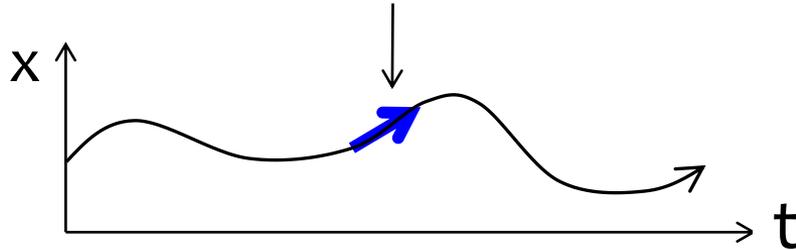
# 2-1. 微分的な見方 vs 変分的な見方

(1) ニュートン力学: 微分方程式

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

因果的  
な見方

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t) \cdot \Delta t$$

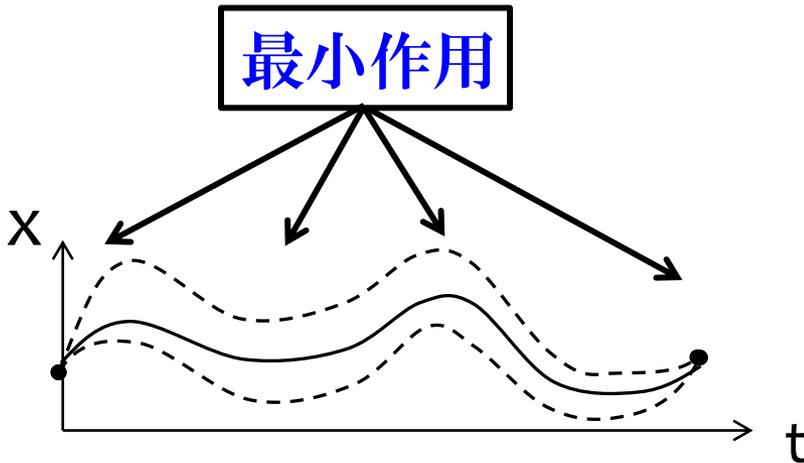


過去の値が次の未来を  
決めていく。過去が原因。

(2) ラグランジュ力学: 変分法  $I = \min.$

全体論的  
な見方

最小作用



最小作用の原理。環境全体  
が分布全体を決める。現在  
は未来を含む全体が決める。

## 2-2. 量子力学の解釈に適用

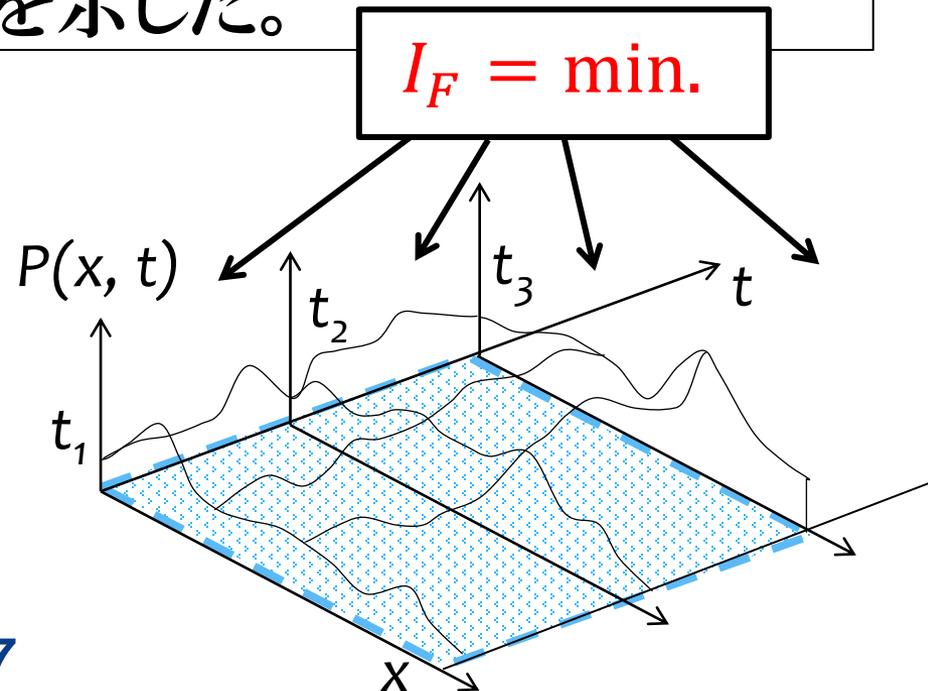
We apply the variational view to interpretation of QM.

**変分法的な世界観**を量子力学の解釈に適用する。

R. Frieden (1994) は、フィッシャー情報量が最小という変分原理からシュレーディンガー方程式やクライン-ゴルドン方程式が導出できることを示した。

- この結果に基づき白井 (1998, 2021) は環境全体に応じて領域全体の分布が決まるという全体論的な考え方を提案した。
- 現在の分布は過去だけでなく未来にも依存する。

7



## 2-3. 因果を捨てた解釈

単純な因果を捨てた解釈はたくさんある。

Many interpretations abandoned the idea of causality.

- A) **超決定論 (Superdeterminism)**: J. S. Bell (1985, BBC)
- B) **変分法的解釈 (Variational)**: H. Shirai (1998, 2021)、変分法的な確率過程解釈 (K. Yasue, 1999)、関係ブロックワールド解釈 (M. Silberstein, 2018)、ラグランジアンモデル (K. B. Wharton, 2007, 2010)。
- C) **双方向因果解釈 (Retrocausality)**: トイ・モデル (H. Price, 2008)、R. Corry (2015)、確率過程解釈 (M. Nagasawa, 2012)、因果的に対称なボームモデル (R. I. Sutherland, 2008, 2015)。
- D) **時間を超越した解釈**: 交流解釈 (J. G. Cramer, 1986)。

# 3. 実験結果を見ると・・・

Experimental results suggest ...

# 3-1. 実験実験結果を見ると・・・

## Experimental results suggests ...

### 遅延選択量子消しゴム実験 (Kim et al., 1999)

- D3で検出→干渉縞なし。D1, D2→干渉縞あり。
- D0での検出より未来に D1, D2, D3での検出がある。

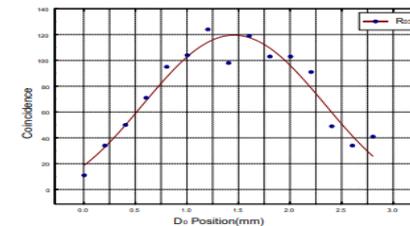
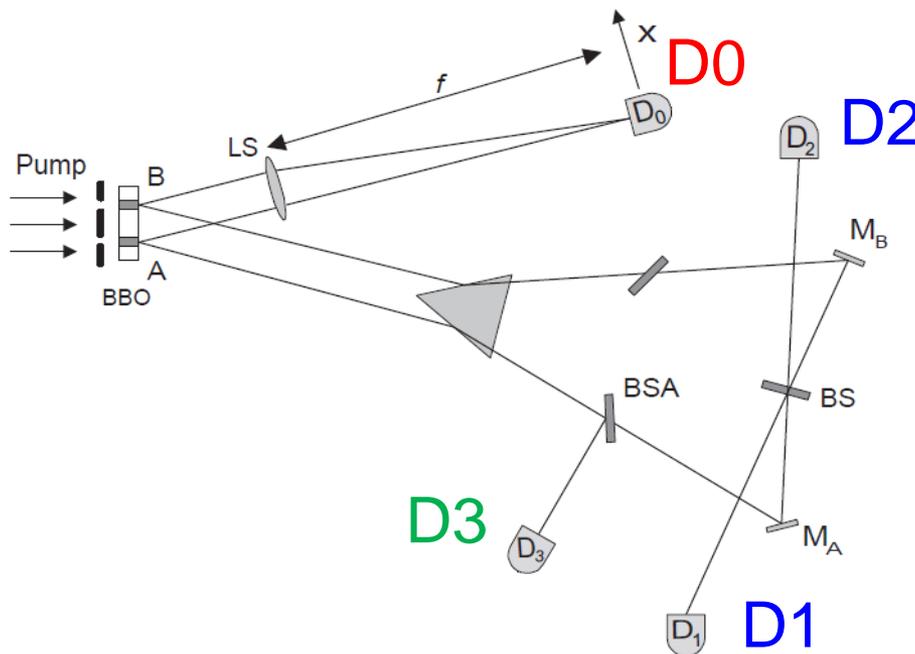


FIG. 5.  $R_{03}$  ("joint detection" rate between detectors  $D_0$  and  $D_3$ ). An absence of interference is clearly demonstrated.

D3, D0

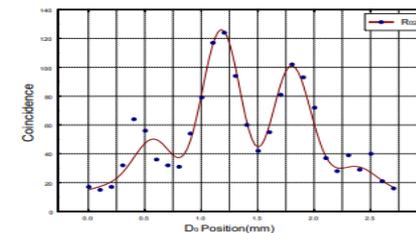
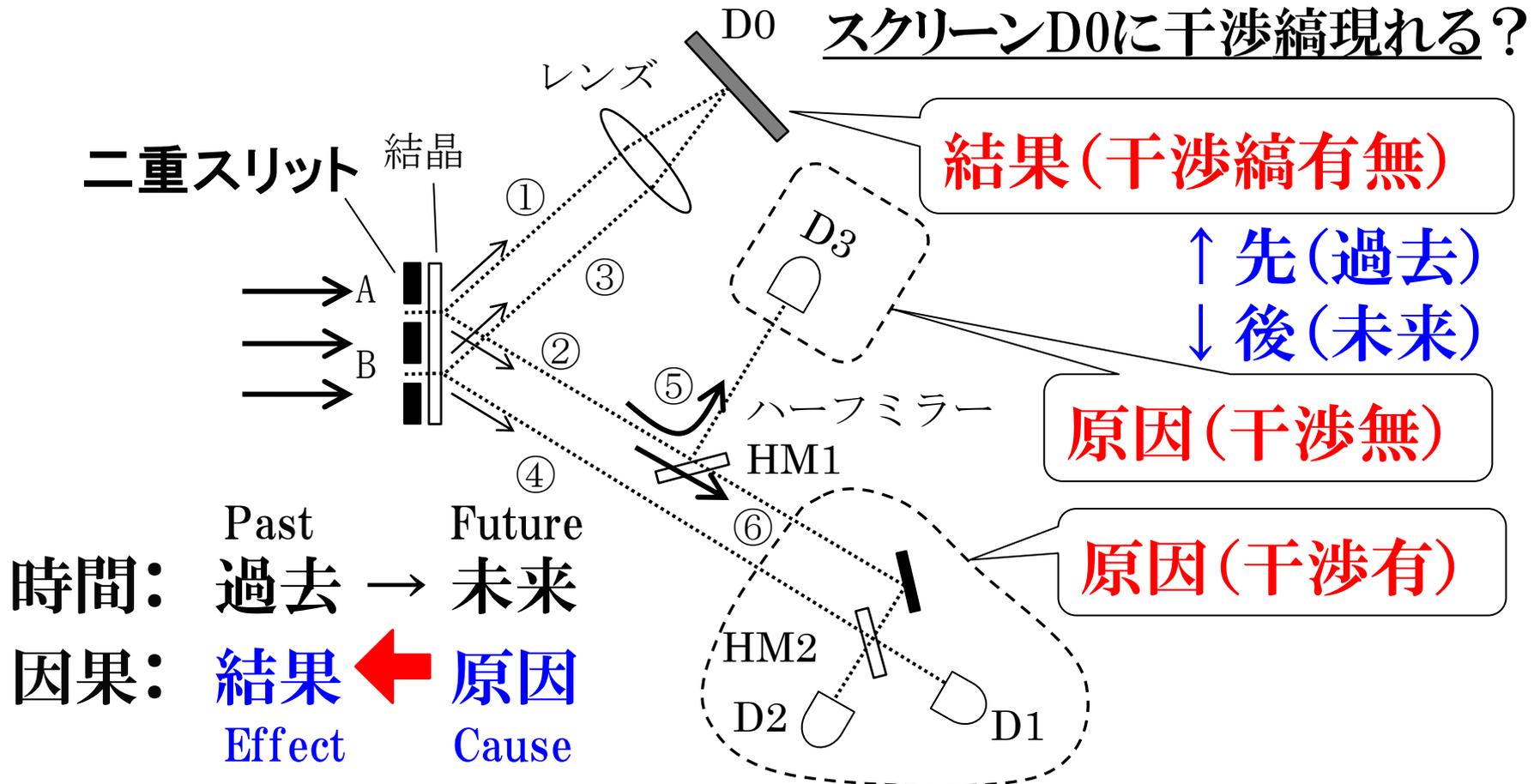


FIG. 4.  $R_{02}$  ("joint detection" rate between detectors  $D_0$  and  $D_2$ ). Note, there is a  $\pi$  phase shift compare to  $R_{01}$  shown in Fig.3

D2, D0

# 3-2. 遅延選択量子消しゴム実験(2)

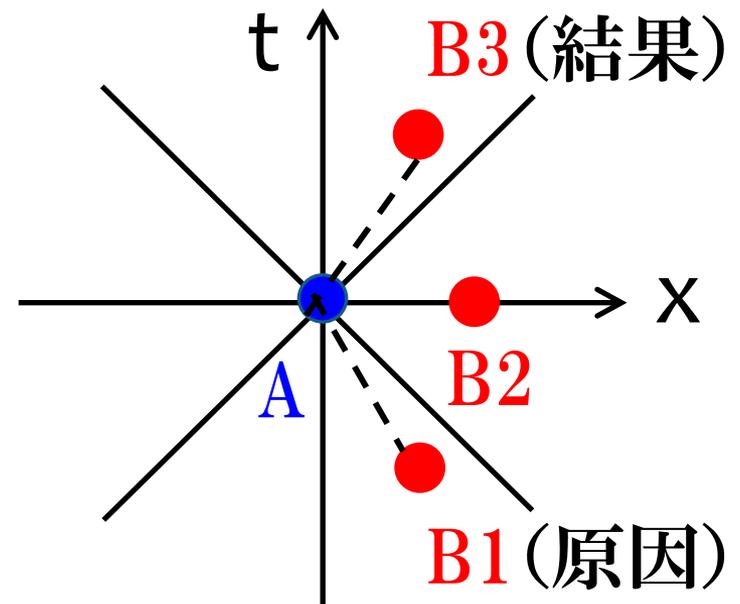
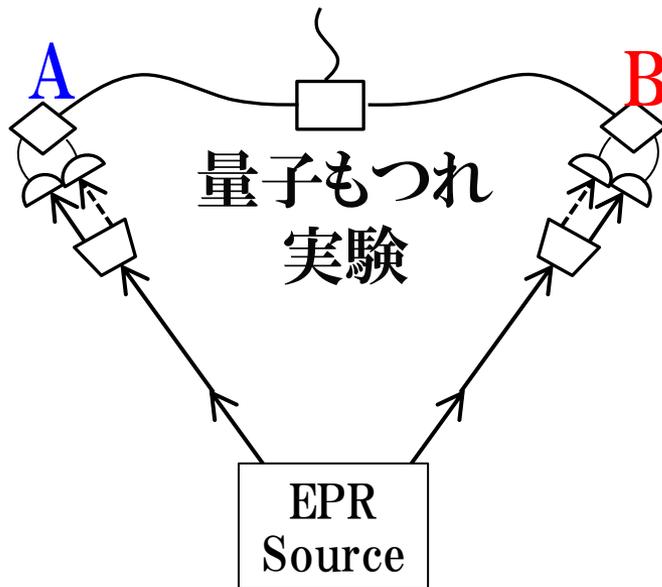


実験結果は因果観を捨てることを支持するように見える。

実在性や局所性を捨てても実験結果と合わない。

## 3-3. 量子もつれ実験

- 重要なことは、実在性や局所性を捨てても、実験結果を説明できないことである。
- 他にも量子もつれ実験を考えられ、どんな時空関係にでも設定できる。そこに因果を適用すると、設定ごとに(ご都合主義的に)原因を変えることになる。相対論と合わない。自然がそのようになっているとは思えない。



# 4. 因果を捨てた世界観：

## 因果と自由意志

Causality and free will

## 4-1. 自由意志の問題 Free will

因果の観念を捨てていない物理学者は多い。その理由は、自由意志の概念をあきらめなければならなくなるからだと思われる。

- [A. Zeilinger\(2010\)](#):我々は暗黙の内に実験家の**選択の自由**を仮定します。…。この**基本的仮定は科学を行うのに本質的**です。もしこの仮定が成り立たないと、実験で自然に問いかけることは全く意味を成しません。
- [木村元\(2023\)](#):個人的には**自由意志の仮定を安易に捨てることはできない**と思っています。
- [N. Gisin\(2014\)](#): 自由意志がなければ、合理的な思考はあり得ません。結果として、**科学と哲学が自由意志を否定することはまったく不可能**です。

## 4-2. 自由意志不要 Without Free will

- [J.S. Bell\(1985, BBC interview\)](#) (超決定論を示唆): 超光速と不気味な遠隔作用から逃れる方法がある。しかし、それは宇宙における完全なる決定論と、自由意志の完全な欠如を伴う。世界が超決定論的であるならば、…、私達の行動もまた、事前に全て決められていることになる。
- [G. t'Hooft\(1980\)](#): ...。したがって、ボブは自由意志からではなく、あらかじめ決められた相関関係によって決定を下したと想定する必要があると思います。
- [G. Musser\(2015\)](#) 私はこの陰謀説をリストに加えようとは考えていなかった。…。トホーフと話をする機会を得て、考えを変えた。…。トホーフは、誰かが陰謀と見るものは、ほかの誰かにとっては物理法則なのだと指摘する。世界の多くのものは、一見陰謀のように思えるが、じつは、さまざまな物体の振る舞いを調和させている、十分な基盤に支えられた諸原理の結果なのだ。

## 4-3. 陰謀論か？ Conspiracy?

- 変分法的な見方（自由意志を捨てた見方）は、未来が現在を決めるように見えるため、**陰謀論**だと批判されることがあるが、それは誤解である。
- 自分の選択が何かにコントロールされていると考えるから陰謀的に思える。そこにはすでに**因果の考えが入っている**。変分法的な考え方は、過去から未来までの全体が調和的に決まっていると考える。

Variational view  $\neq$  Conspiracy

Variational view + ~~Causality~~  $\rightarrow$  Time-sym. ~~causality~~  
 $\rightarrow$  Retrocausality  $\rightarrow$  ~~Conspiracy~~

## 4-4. 谷村省吾、マーミンの意見

- [谷村省吾\(2021\)](#) (自由意志について): 私は二通りの仮説を持っている。一つは…。もう一つは、最終的な判断を左右する外来要因のすべてが意識にのぼるわけではなく、しかも要因は他用で複雑に入り組んでいるために何が何を決定しているのか誰にもわからず、自分が自由に決めたと思っているだけだ、という答えである。
- [N.D.Mermin\(2014\)](#) (「Now」の問題について): 世界の物理的記述に「今」が入り込む余地がないという問題は、間違いを特定することで解決される。…、私たちの経験を簡潔に表現しようとする漫画(4次元時空図のこと)と経験そのものを混同すべきではない。

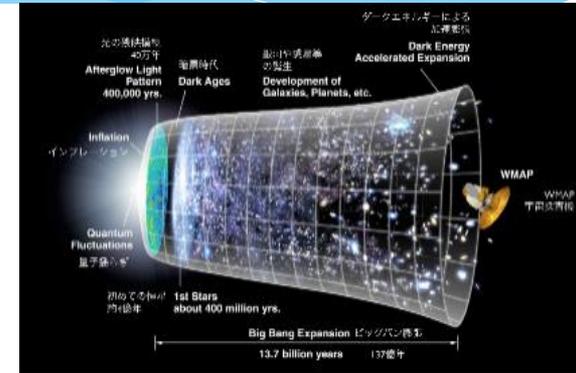
## 4-5. この考え方はどうか (提案)

- 物理学の概念と哲学の概念は区別すべきではないか。We should distinguish between concepts in physics and concepts in philosophy.  
【物理】時間対称性、干渉性、光の波長、…  
【哲学】流れゆく「今」、自由意志、クオリア、…
- 物理学は実験に基づくが、哲学は経験に基づく。
- 自由意志は(経験に基づく)哲学の概念だから、物理学はそれと矛盾しても問題ない。つまり、自由意志を捨てても物理学に問題は生じない。

# 4-6. 物理的世界 と 経験的世界

Objective

【物理的世界】 四次元ブロック宇宙  
(実験・法則に基づく想像、仮説)  
時間対称、時間軸あり、時流れず、  
「今」なし、因果なし、自由意志なし、  
クオリアなし、物質あり、…

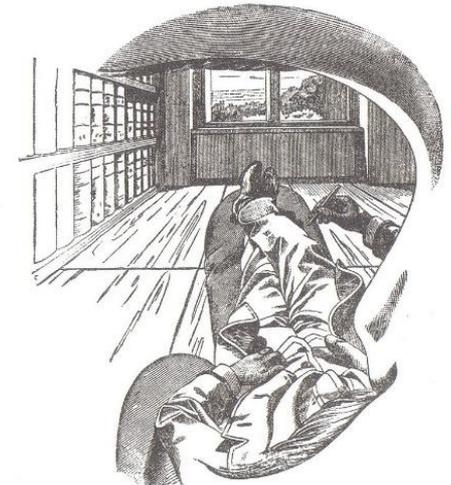


Courtesy of NASA  
WMAP Science Team

Subjective

【経験的世界】 (経験に基づく)  
時間対称なし、時流れる、「今」あり、  
因果あり、自由意志あり、クオリアあり、  
赤の「赤さ」あり、…

「ある」の意味が違う



## 4-7. 物理概念とパラドクス

- どちらの概念か区別しにくいものがあり、パラドクスがつきまとう。 There are confusive concepts.

- ① エントロピー Entropy → Maxwell's demon
- ② 粗視化、識別可能性 → Gibbs's paradox
- ③ 確率、波動関数 Wave function → Schrodinger's cat

熱力学エントロピー:  $dS = dQ/T$ ,  $S = -k_B \sum p_i \log p_i$

量子エントロピー: 混合状態  $\rho = \sum \eta_i |i\rangle\langle i|$

$$I_Q = -\text{tr}(\rho \log \rho) = -\sum \eta_i \log \eta_i$$

エントロピー型不確定性 (Umegaki, 1993): 純粋状態

$$I_x = -\sum |\varphi_i|^2 \log |\varphi_i|^2, I_x + I_p \gtrsim \log(e/2)$$

エントロピー型ベル不等式 (Braunstein, 1988):

$$I(a; d) \leq I(a; b) + I(b; c) + I(c; d)$$

## 4-8. この考え方はどうか (検討中)

①Physical World, ②Probabilistic W., ③Empirical W.

Objective	【①物理世界】 時間対称、時は流れ <u>ない</u> 、 エントロピー <u>一定</u> 、量子確率、因果 <u>なし</u> 、 自由意志 <u>なし</u> 、選択の自由 <u>なし</u> 、…、(法則)	(仮説的) 理論的
	【②確率世界】 時間非対称、時は流れ <u>ない</u> 、 エントロピー増大、確率あり、統計的な因果あり、 自由意志 <u>なし</u> 、自由度増大あり、…、(粗視化)	認識論的
Subjective	【③経験世界】 時間非対称、時は流れる、 エントロピー増大、主観確率(無知)、因果あり、 自由意志あり、選択の自由あり、…、(経験)	経験論的

# まとめ

◎ 本発表で言いたかったこと。

1. ベルの不等式の破れは因果性の否定と捉えることもできる。実験はそれを支持している。
2. 変分法的な見方(自由意志の否定)は陰謀論と違う。
3. 物理学の概念と哲学の概念を区別すべき。

(A) 物理世界を表す言葉(時間対称性、時空、波長など)と(B) 経験世界を表す言葉(自由意志、流れる「今」など)は説明の対象が異なるから、(A)と(B)が矛盾しても問題は生じない。(A)は、実験や法則、理論を通して見えてくる仮説的な実在世界のモデルを表す言葉。(B)は、直接的な経験や記憶を通して見える主観世界を表す言葉。