

山岸・時間演算子とクロック部分系理論

— 第3版：パウリの定理が要るのはワイル関係であり、内部時計は障害を移しただけである — [論文

54]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan | 山岸勇輝ラボ

2026年8月 (第3版)

— From thinking to syncing. —

要旨

量子力学における「時間演算子 $\hat{T}$ の非存在」(パウリの定理) と、量子重力における「時間の消失」(ホイーラー＝ドウィット方程式 $\hat{H}\Psi = 0$) に対し、確立した内容——パウリの定理、POVM、Page--Wootters機構——を計算機アーキテクチャの語彙で整理する。新たな物理は一つも主張しない。第3版が加えるのは、第2版の証明と結語が実際に何に依拠していたかの点検である。第一に、定理2.1の証明が使っているのは交換関係ではなくワイル関係である。 $U_\epsilon^\dagger \hat{H} U_\epsilon = \hat{H} + \epsilon$ は $[\hat{H}, \hat{T}] = i\hbar$ から従わない——稠密領域上の正準交換関係はワイル関係を含意しない(ネルソンの反例)。実際、ガラポン(2002)は下に有界なハミルトニアンに正準共役な有界自己共役時間演算子を構成している。したがって「自己共役 $\hat{T}$ は存在しない」は言い過ぎであり、正しくは「ワイル関係を満たす自己共役 $\hat{T}$ は存在しない」である(定理2.1・観察2.3)。第二に、Page--Wootters機構はパウリの障害を解消していない。理想時計は $\text{spec}(\hat{H}_C) = \mathbb{R}$ を要求する——すなわちパウリの定理が必要とする「下に有界」という前提を外している。物理的な時計(下に有界)では時計指針は共変POVMに戻り、障害は再出現する。これは初版の「外部レンダリンググループ」に対して本稿自身が下した批判——問題の解決ではなく移動である——と同じ型である(観察4.4・第5.2節)。第三に、二つの困難は別根である。パウリの障害はスペクトルが下に有界という事実に、ホイーラー＝ドウィットの困難は $\hat{H}$ が拘束条件であること(再パラメータ化不変性)に由来する。Page--Woottersが答えているのは後者であり、前者に対しては場所を変えているにすぎない(第6節)。第四に、「Read-Only 属性」という読みには既に正しい名前がある。POVM性が意味するのは非鋭敏(unsharp)であって読み書きの非対称性ではない。しかも「時間に書き込む」に対応する操作は形式のどこにも存在せず、「読み出し」の側も量子測定の擾乱で崩れる。比喩は両半分とも外している(観察3.3)。

本稿の位置づけ：用いた内容はすべて確立している(パウリ1933とその後の精緻化、POVMとしての時間観測量、Page--Wootters機構1983とその実験的例証)。新しい定理も予言もない。本稿が行うのは、それらを計算機アーキテクチャの語彙で整理し、その語彙がどこで正しく、どこで外れているかを書くことである。第7節(宇宙OSの読み)は第3層(非科学)として隔離され、第2～6節はそれに一切依存しない。

1. 序論

量子力学において、位置 $\hat{x}$ や運動量 $\hat{p}$ は自己共役演算子であるが、時間 t はパラメータとして扱われる。パウリ（1933）は、正則な時間演算子が存在しえないことを論じた。さらに正統的量子重力におけるホイーラー＝ドウィット方程式

$$\hat{H}\Psi = 0$$

では時間微分項が消滅し、宇宙の波動関数は静的となる（「時間の問題」）。

本稿はこの二つを計算機アーキテクチャの語彙で整理する。ただし第3版は、二つを一つの困難として扱わない——両者は別の根から来ており、片方に効く機構が他方に効くとは限らないからである（第6節）。

2. パウリの定理：前提を含む正確な言明

定理 2.1 (パウリの定理・第3版で前提を補った形)

ハミルトニアン $\hat{H}$ のスペクトルが下に有界であるとき ($\text{spec}(\hat{H}) \subseteq [E_0, \infty)$)、 $\hat{H}$ とワイル関係

$$e^{ia\hat{T}} e^{ib\hat{H}} = e^{iab\hbar} e^{ib\hat{H}} e^{ia\hat{T}} \quad (a, b \in \mathbb{R}) \quad (2)$$

を満たす自己共役演算子 $\hat{T}$ は存在しない。

証明 [証明の骨子] ワイル関係(2)より、 $U_\epsilon \equiv e^{-i\epsilon\hat{T}/\hbar}$ は $\hat{H}$ を平行移動する：

$$U_\epsilon^\dagger \hat{H} U_\epsilon = \hat{H} + \epsilon$$

したがって $\hat{H}|E\rangle = E|E\rangle$ なる固有状態に対し $U_\epsilon|E\rangle$ は固有値 $E + \epsilon$ の固有状態である。 ϵ は負を含む任意の実数を取りうるから、スペクトルは $\mathbb{R}$ 全体でなければならない。これは下に有界という前提と矛盾する。

注記 2.2 (前提の重要性)

「下に有界」という前提は本質的である。エネルギーが下に有界であること——基底状態が存在し、系が無限にエネルギーを放出し続けられないこと——は物理的安定性の要請であり、この安定性こそが時間演算子を排除している。

観察 2.3 (第3版：証明が使っているのは交換関係ではない)

第2版は本定理を正準交換関係

$$[\hat{H}, \hat{T}] = i\hbar \quad (4)$$

の下で述べ、そこから $U_\varepsilon^\dagger \hat{H} U_\varepsilon = \hat{H} + \varepsilon$ を導いていた。この一行は式(4)からは従わない。

形式的には、 $A = i\varepsilon \hat{T}/\hbar$ 、 $B = \hat{H}$ と置いたベイカー＝キャンベル＝ハウスドルフ展開

$$e^A B e^{-A} = B + [A, B] + \frac{1}{2}[A, [A, B]] + \dots$$

において $[A, B] = (i\varepsilon/\hbar)[\hat{T}, \hat{H}] = \varepsilon$ は c 数となり、以降の項が消えて級数は終端する。しかしこの終端は $[\hat{T}, \hat{H}]$ が空間全体で恒等作用素の定数倍であることを要し、稠密な不変領域上で式(4)が成り立つことでは足りない。非有界作用素を指数の内側から外へ通す操作を正当化するもの——それがまさにワイル関係(2)である。

そして稠密領域上の正準交換関係はワイル関係を含意しない（ネルソンの反例。Reed & Simon 第I巻 VIII.5 節を見よ）。したがって第2版の定理は、その証明が支える範囲より強く述べられていた。

この差は空虚ではない。ガラポン（2002）はパウリの暗黙の仮定を明示したうえで、下に有界な、あるいは離散的なスペクトルを持つハミルトニアンに正準共役な、有界自己共役時間演算子を実際に構成している。すなわち式(4)のみを課すなら、下に有界なハミルトニアンに対しても自己共役な時間演算子は存在しうる。排除されるのはワイル関係を満たすものである。第3版は定理2.1 をその形で述べる。

観察 2.4 (第3版：領域の問題は避けて通れない)

式(4)には有限次元の解が存在しない。任意の行列に対し $\text{tr}[\hat{H}, \hat{T}] = 0$ である一方、 $\text{tr}(i\hbar I) = i\hbar N \neq 0$ だからである（数値確認済： 6×6 のエルミート行列対 200 組すべてで $|\text{tr}[\hat{H}, \hat{T}]| = 0$ ）。したがって $\hat{H}$ と $\hat{T}$ は必然的に非有界であり、定義域の指定なしに演算子等式を書くことはできない。観察2.3 の指摘は形式上の細事ではなく、この定理が住んでいる場所そのものに関わる。

3. POVMによる回避：時間観測量は非鋭敏である

定理2.1 はしばしば「量子力学に時間観測量は存在しない」と要約されるが、これは正確ではない。

3.1 自己共役演算子とPOVM

量子力学における観測量の最も一般的な記述は、自己共役演算子（射影値測度、PVM）ではなく **POVM**（正作用素値測度）である。POVM は

$$\{E(\Delta)\} : E(\Delta) \geq 0, \quad \int E(d\lambda) = I$$

を満たす作用素値測度であり、射影性 $E^2 = E$ を要求しない。

事実 3.1: 到着時刻（time of arrival）をはじめとする時間観測量は、POVMとしては実在する（Kijowski 1974; Werner 1986; Muga & Leavens 2000）。パウリの定理が排除するのは正準共役な自己共役演算子であって、時間に関する測定可能量そのものではない。

3.2 【第3版】「Read-Only 属性」ではなく「非鋭敏観測量」

第2版はこの区別を宇宙OSの語彙で「時間は Read-Only 属性を持つ」と読み、次の表を与えていた。

構造	数学的対応	第2版のOS的読み
位置・運動量	自己共役演算子（PVM）	読み書き可能なレジスタ
時間	POVM（射影的でない）	読み出し専用（Read-Only）

観察 3.3 (第3版：この読みが指しているものには既に名前があり、それは Read-Only ではない)

POVM性が意味するのはその観測量が非鋭敏（unsharp）であること——射影値測度による鋭い（反復可能な）表現を持たないこと——である。これは量子測定論の標準的な語彙であり（Busch, Grabowski & Lahti）、読み書きの非対称性とは別の概念である。

「Read-Only」という語は三箇所を外れている：

- 1. 位置も運動量も、現実の測定では POVM で記述される。POVM性は時間だけを選び出す性質ではなく、したがって「時間だけが Read-Only」という区別を支えない。
- 2. 「時間書き込む」に対応する操作が形式のどこにも存在しない。比喩が禁じている操作が最初から無いのだから、禁止は内容を持たない。
- 3. 「読み出し」の側も成り立たない。計算機の Read-Only は読み出しが対象を変化させないことを含意するが、量子測定は一般に系を擾乱する（第2版が自ら注記していた点）。

したがって第3版は「Read-Only 属性」という呼称を取り下げる。残るのは事実3.1 そのもの——時間観測量は非鋭敏な観測量として実在する——であり、これは量子力学の内部の事実であって、比喩による補強を要しない。

【第2版の訂正・据え置き：論文29への参照は削除済】：初版はここで「この読みは論文29（Adler--Bardeen Read-Only ロック）で導入した属性概念と整合する」と述べていた。論文29第2版は「 $16\pi^2$ に Read-Only 属性が

設定されている」という主張自体を撤回している——同じ $1/(16\pi^2)$ は4次元場の理論のあらゆる1ループ量に現れる普遍的な因子であり、その多くは現に高次補正を受けるためである。撤回された概念に整合性を求めることはできない。第3版は、その撤回に加えて借り手の側の呼称そのものを取り下げる。

4. Page--Wootters機構：静的宇宙からの時間の創発

4.1 機構の内容

Page と Wootters (1983) は、大域的に静的な宇宙において時間が内部的に創発する機構を示した。宇宙を「時計部分系 C 」と「残りの系 S 」に分割し、大域状態が制約

$$\hat{H}|\Psi\rangle = 0, \quad \hat{H} = \hat{H}_C \otimes I_S + I_C \otimes \hat{H}_S \quad (7)$$

を満たすとする。時計状態 $|t\rangle_C$ を $\hat{H}_C$ の生成する並進で定義し、条件付き状態

$$|\psi_S(t)\rangle \equiv {}_C\langle t|\Psi\rangle$$

を構成すると、この条件付き状態はシュレーディンガー方程式に従う：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_S(t)\rangle = \hat{H}_S |\psi_S(t)\rangle$$

すなわち大域状態が静的であっても、部分系から見た相対的な時間発展は通常の量子力学に従う。時間は外部から与えられるパラメータではなく、時計部分系と残りの系の相関から創発する。

注記 4.2 (第3版：「厳密に」の条件)

第2版は条件付き状態が厳密にシュレーディンガー方程式に従うと書いていた。これは式(7)のように時計と系の間に相互作用項がない場合に限られる。Smith & Ahmadi (2019) は、相互作用項があるとき条件付き状態が時間非局所なシュレーディンガー方程式に従い、系のハミルトニアンが自己共役な積分作用素に置き換わることを示している。本稿の $\hat{H}$ にはその項がないので言明は保たれるが、「厳密に」は条件付きの語である。

4.2 本稿の描像との対応（第2版・据え置き）

Page--Wootters	宇宙OSの読み
大域状態 $ \Psi\rangle$ ($\hat{H} \Psi\rangle = 0$)	静的データベース（不変スナップショット）
時計部分系 C	システムクロック（内部デバイス）
条件付き状態 $c\langle t \Psi\rangle$	時刻 t におけるフレーム読み出し
C - S 間のもつれ	データとクロックの相関

【第2版の注記・据え置き】：初版はこの表について「単なる比喻ではなく確立した物理的機構に対応することを保証する」と述べていた。対応表が示すのは本稿の語彙に対応物が実在することに限られる。対応がつくこと自体は、その語彙が説明力を持つことを意味しない。本稿の描像は Page--Wootters 機構に何も付け加えておらず、新たな予言も導出も与えない。

なお本機構は理論的提案に留まらず、Moreva ら（2014）による量子光学系での実験的例証、および Giovannetti, Lloyd & Maccone（2015）による精緻化が行われている。

4.3 【第3版】この機構はパウリの障害を解消しない

観察 4.4 (理想時計は前提を外しているだけである)

式(7)が非自明な解を持つには、 $\text{spec}(\hat{H}_C)$ が $-\text{spec}(\hat{H}_S)$ と交わらねばならない。 $\hat{H}_S$ のスペクトルが $[E_0, \infty)$ に含まれ上に非有界であれば、 $\hat{H}_C$ のスペクトルは $(-\infty, -E_0]$ に達する必要がある——すなわち $\hat{H}_C$ は下に有界でない。実際、教科書的な「理想時計」は $\text{spec}(\hat{H}_C) = \mathbb{R}$ を取り、それによって $|t\rangle_C = e^{-i\hat{H}_C t/\hbar}|0\rangle_C$ が完全な共変族をなす。

ここが要点である。 $\text{spec}(\hat{H}_C) = \mathbb{R}$ とは、定理2.1 が必要とする「下に有界」という前提を外すことに他ならない。理想時計はパウリの障害を解消しているのではなく、障害が及ばない場所で仕事をしている。

そして物理的な時計は下に有界である。下に有界な $\hat{H}_C$ を持つ時計では、時計指針は自己共役演算子ではなく共変POVMに戻る——事実3.1 の状況がそのまま時計の内部で再現される。パウリの障害は消えていない。時計の中へ移っている。

これは本稿が自分で下した批判と同じ型である（第5.2節）。

5. 訂正：外部クロックから内部クロック部分系へ

訂正記録 5.1（初版・据え置き）：本論文の初版は、時間発展を「静的データベース Ψ を順次読み出す外部レンダリンググループ」として定式化していた。この定式化は撤回済である。理由は明白である——時間発展を外部ループに委ねるならば、そのループ自身が従う時間は何かという問いが直ちに生じ、時間の問題は系の外側へ押し出されるだけで解決されない。「問題の解決」ではなく「問題の移動」に留まる。第2版はこれを内部クロック部分系による定式化へ置き換えた。

5.1 【第3版】同じ型が、別の場所に残っていた

第2版は初版の外部ループを「問題の移動にすぎない」という理由で退けた。この判定は正しい。しかし第2版が採用した内部時計もまた、パウリの障害に対しては移動である（観察4.4）。

移動先が違うだけである。初版は系の外へ移し、第2版は時計の中へ移した。前者は無限後退を生むので明確に悪いが、後者が解決であるかのように書かれていた点は正されねばならない。Page--Wootters が解決しているのはホイーラー＝ドウィットの困難であって、パウリの困難ではない。

自分の下した批判は、自分の次の一手にも当てる——第3版がここで行うのはそれだけである。

6. 【第3版】二つの困難は別根である

観察 6.1

第2版の結語は、パウリの定理とホイーラー＝ドウィットの困難をいずれも「時間を系内部の正準変数として扱おうとすること」から生じると述べ、Page--Wootters により両者は同時に解消するとしていた。この一本化を訂正する。

困難	根	Page--Wootters は
パウリの定理	$\text{spec}(\hat{H})$ が下に有界であること	前提の外で働く（観察4.4）
	——一つの系のスペクトルの事実	障害を時計の中へ移す
時間の消失	$\hat{H}$ が拘束条件であること	答えている
	——再パラメータ化不変性のゲージの事実	相関から時間を再構成する

二つは別の場所から来ている。パウリの障害はスペクトルの下限という、単一の系についての事実である。ホイーラー＝ドウィットの困難は、 $\hat{H}$ がそもそも時間発展の生成子ではなくゲージ変換の生成子であるという、

理論の構造についての事実である。前者は安定性が課す制約、後者は一般共変性が課す制約であって、同じ語（「時間」）が二度現れているにすぎない。

一つの機構が両方を解くと書くには、両方が同じ根を持つことを先に示さねばならない。本稿はそれを示していない——示せていないことが分かった、というのが第3版の内容である。

7. 宇宙OSにおける解釈 — 第3層（非科学）

以下は解釈であり、定理ではない。第3層（非科学）として隔離する。前節までの内容は、以下をまったく用いない。計算機アーキテクチャにおけるメモリ・命令分離（ハーバードアーキテクチャ）との類比は、パウリの定理に直感的な読みを与える。データ領域の内部に実行状態を指すポインタを正準変数として構築しようとする試みは、自己参照的な構造を要求する。定理2.1 が示すのは、エネルギーが下に有界であるかぎりそのような構築が（ワイル関係の意味で）不可能であることであり、これは「安定なシステムは自身の実行位置をデータとして書き換えられない」という保護機構として読める。ただし観察3.3 のとおり、この読みが名指しているものには「非鋭敏観測量」という正しい名前が既にある。類比は直感を助けるかもしれないが、正確さの点では既存の語彙に劣る。本稿は、この類比が物理的必然であることの独立な証明を与えていない。

8. 結論

本稿では以下を確立した。

1. パウリの定理を、「スペクトルが下に有界」および「ワイル関係」という二つの前提を明示した形で述べた（定理2.1）。第2版が用いていた正準交換関係だけでは、証明の要となる一行が従わない（観察2.3）。稠密領域上の交換関係はワイル関係を含意せず、ガラポン（2002）は下に有界なハミルトニアンに共役な有界自己共役時間演算子を構成している。
2. 式 $[\hat{H}, \hat{T}] = i\hbar$ には有限次元の解が存在しない（ tr による障害・数値確認済）。したがって定義域の問題は形式上の細事ではない（観察2.4）。
3. 同定理は時間観測量の存在を否定しない——到着時刻等は POVM として実在する（事実3.1）。
4. 【第3版】「Read-Only 属性」という呼称を取り下げた。POVM性が意味するのは非鋭敏（unsharp）であり、(i) 位置・運動量も POVM で測られる、(ii) 「時間への書き込み」に対応する操作が形式に存在しない、(iii) 読み出しも擾乱を伴う、の三点で比喻は外れている（観察3.3）。
5. Page--Wootters機構により、静的な大域状態から条件付き状態が時間発展を示すことを引用した（第4節）。ただし「厳密に」は時計と系に相互作用がない場合の語である（注記4.2）。

6. 【第3版】Page--Wootters はパウリの障害を解消しない——理想時計は $\text{spec}(\hat{H}_C) = \mathbb{R}$ を取ることで定理2.1の前提そのものを外している。物理的な（下に有界な）時計では指針は共変POVMに戻り、障害は時計の中へ移る（観察4.4）。
7. 【第3版】これは初版の外部ループに本稿自身が下した批判——問題の移動にすぎない——と同じ型である。移動先が系の外から時計の中へ変わっただけである（第5.2節）。
8. 【第3版】二つの困難は別根である——パウリはスペクトルの下限（安定性）、ホイーラー＝ドウィットは $\hat{H}$ が拘束条件であること（一般共変性）。一つの機構が両方を解くと書くには、両方が同じ根を持つことを先に示さねばならない（第6節）。

結語: 第2版は「二つの困難は同時に解消する」と結んでいた。第3版が示したのは、解消したのは片方であり、もう片方は場所を変えただけだということである。そして場所を変えることを「解決ではない」と最初に書いたのは、本稿自身であった。自分の下した批判を、自分の次の一手にも当てる——時間についての結論ではなく、それが本稿の残すものである。

改訂記録

第3版（2026年8月）で加えたもの

1. 題名は変えず、副題のみ差し替えた。主題名はそのまま保つ。
2. 定理2.1 にワイル関係を前提として明記した（観察2.3）。第2版は正準交換関係のみを課し、そこから $U_\epsilon^\dagger \hat{H} U_\epsilon = \hat{H} + \epsilon$ を導いていたが、この一行は交換関係からは従わない。ガラポン（2002）の構成を挙げ、差が空虚でないことを示した。
3. 観察2.4 を新設した： $[\hat{H}, \hat{T}] = i\hbar$ に有限次元解はない（tr 障害・数値確認済）。
4. 観察3.3 を新設し、「Read-Only 属性」の呼称を取り下げた：正しい名前は非鋭敏観測量であり、比喩は読み・書きの両半分とも外している。
5. 注記4.2 を新設した：条件付き状態が「厳密に」シュレーディンガー方程式に従うのは、時計と系に相互作用がない場合に限る（Smith & Ahmadi 2019）。
6. 観察4.4 と第5.2節を新設した：Page--Wootters はパウリの障害を解消せず、理想時計は前提（下に有界）を外しているにすぎない。物理的な時計では障害は共変POVMとして再出現する。初版の外部ループに本稿が下した批判と同型である。
7. 第6節を新設した：二つの困難は別根（スペクトルの下限／拘束条件）であり、第2版の結語の一本化を訂正した。
8. 第7節を第3層として明示的に隔離した。
9. 参考文献の自己引用に DOI を付し、書式を統一した。

第2版で訂正した点（据え置き）

1. 初版の「外部レンダリンググループ」定式化を、問題を系外へ移動させるのみで解決にならないため撤回（訂正記録5.1）。
2. 論文29 の Read-Only 属性への参照を削除——同概念は論文29第2版で撤回されている（第3.2節）。
3. 対応表について「単なる比喻でないことを保証する」という表現を弱めた——対応がつくことは説明力を意味しない（第4.3節）。
4. 定理2.1 の「下に有界」という前提を明示した（注記2.2）。

参考文献

1. Pauli, W. (1933). *Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik*. Handbuch der Physik, Vol. 24. Berlin: Springer.
2. Galapon, E. A. (2002). *Pauli's theorem and quantum canonical pairs: the consistency of a bounded, self-adjoint time operator canonically conjugate to a Hamiltonian with non-empty point spectrum*. Proceedings of the Royal Society of London A, 458, 451-472. arXiv:quant-ph/9908033
3. Reed, M., & Simon, B. (1980). *Methods of Modern Mathematical Physics I: Functional Analysis* (revised ed.), Section VIII.5. New York: Academic Press.
4. Busch, P., Grabowski, M., & Lahti, P. J. (1995). *Operational Quantum Physics*. Lecture Notes in Physics m31. Berlin: Springer.
5. DeWitt, B. S. (1967). *Quantum theory of gravity. I. The canonical theory*. Physical Review, 160(5), 1113--1148.
6. Page, D. N., & Wootters, W. K. (1983). *Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables*. Physical Review D, 27(12), 2885--2892.
7. Kijowski, J. (1974). *On the time operator in quantum mechanics and the Heisenberg uncertainty relation for energy and time*. Reports on Mathematical Physics, 6(3), 361--386.
8. Werner, R. (1986). *Screen observables in relativistic and nonrelativistic quantum mechanics*. Journal of Mathematical Physics, 27(3), 793--803.
9. Muga, J. G., & Leavens, C. R. (2000). *Arrival time in quantum mechanics*. Physics Reports, 338(4), 353--438.
10. Moreva, E., Brida, G., Gramegna, M., Giovannetti, V., Maccone, L., & Genovese, M. (2014). *Time from quantum entanglement: An experimental illustration*. Physical Review A, 89(5), 052122.
11. Giovannetti, V., Lloyd, S., & Maccone, L. (2015). *Quantum time*. Physical Review D, 92(4), 045033.
12. Smith, A. R. H., & Ahmadi, M. (2019). *Quantizing time: interacting clocks and systems*. Quantum, 3, 160. arXiv:1712.00081
13. 山岸勇輝 (2026). アドラー＝バーディーン注記 [論文29]、第2版. Zenodo. 10.5281/zenodo.21601581
14. 山岸勇輝 (2026). 四つのプランク量は、一つの規則の四つの実例である [論文40]、第3版. Zenodo. 10.5281/zenodo.21435739
15. 山岸勇輝 (2026). 練行足としての時間 [論文82]、第3版. Zenodo. 10.5281/zenodo.21735260
16. 山岸勇輝 (2026). 関係としての時間（ライブニッツ） [論文97]. Zenodo. 10.5281/zenodo.21758697
17. 山岸勇輝 (2026). 二つの時計、一つの尺度 [論文118]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22036237

18. 山岸勇輝 (2026). 第四の時計 [論文119]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22036353

— *From thinking to syncing.* —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)