

量子幾何波連通假說

黑洞、局部時間與羅森橋式遠距連通的條件式數學化

*The Quantum Geometric Wave Connectivity Hypothesis:
A Conditional Mathematical Framework for Black Holes,
Local Time, and Einstein–Rosen Bridge-like Remote Connectivity*

Chen Ho Yiing

ORCID: 0009-0006-6816-9891

norika@charenix.com

2026 年 5 月

摘要

我在本文提出一個可被形式化、可推導、可提出觀測預測的條件式假說，稱為「量子幾何波連通假說」(Quantum Geometric Wave Connectivity Hypothesis, QGWC)。本假說之主體 (H1–H6) 主張：在極端重力、黑洞、太陽級高能電漿與量子觀測條件下，量子狀態、時間流速、能量觀測值與空間連通性，不應被視為在全宇宙共同同步時間下的固定對象；若黑洞本身不是純古典物體，而是某種巨大、複雜、混沌的量子或弦態，則其波型擾動可能改變局部幾何、時間膨脹與量子觀測結果；在更深層的量子幾何描述中，兩個外部距離極遠的區域可能透過羅森橋式幾何態產生有效連通。我以局部固有時間、觀察者依賴能量 (含 Unruh 效應與 Hawking 輻射)、量子測量算符、半古典愛因斯坦方程、黑洞擾動理論與蟲洞喉部條件，建立此假說的數學框架，並於**因果律與資訊保護**一節明確證明其不違反 no-signaling 定理。本文同時提出延伸子命題 H7–H11——「波型組構假說 $\mathcal{M} + W \rightarrow F$ 」及「量子幾何波型傳輸」——作為將物質、波型與身份概念形式化的進一步嘗試；此延伸部分明確標示為科幻物理猜想，與主假說之學術定位分開處理。本文最後就「假說 (hypothesis) 與猜想 (conjecture)」的學術定位給出分級判定：QGWC 主體 (H1–H6) 為假說；H7 為已被支持之命題；H8–H9 為條件式假說；H10–H11 為科幻物理猜想。

關鍵詞：量子幾何；黑洞微觀態；固有時間；羅森橋；ER=EPR；時空湧現；觀察者依賴量子糾纏；準正規態；波型組構；Unruh–Hawking 效應。

授權：本文以 Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) 釋出。

目录

1 引言：問題的提出

3

目錄	2
2 核心假說	4
2.1 延伸假說: 波型組構與資訊重建	4
2.2 概念分析: 同一顆量子、觀察、時間	5
3 數學基礎	6
3.1 觀察者與局部固有時間	6
3.2 觀察者依賴的能量	7
3.3 量子態沿局部時間的演化	7
3.4 觀察的數學化	8
4 黑洞作為量子或弦態	9
4.1 微觀態描述	9
4.2 擾動與半古典反作用	9
4.3 核心邏輯鏈	9
4.4 黑洞擾動的可觀測訊號	10
5 羅森橋與遠距連通	10
5.1 蟲洞度規與喉部條件	10
5.2 能量條件與量子修正	10
5.3 外部遠距、內部短連通	11
5.4 由糾纏湧現的時空	11
5.5 因果律與資訊保護	12
6 觀測訊號的多重時間層	12
7 波型組構與資訊重建假說	13
7.1 波型組構假說: $\mathcal{M} + W \rightarrow F$	13
7.2 等價形態的條件: H9	14
7.3 量子幾何波型傳輸: H10–H11	14
7.4 與量子不可複製定理的相容性	15
7.5 身份問題的哲學註記	15
7.6 波型語言下的若干概念對應	16
8 條件式定理: QGWC 的明確表達	16
9 可檢驗預測	17
9.1 預測一: 黑洞 ringdown 頻譜偏移	17
9.2 預測二: 多重光路時間層異常	18
9.3 預測三: 紅移異常	18
9.4 預測四: 量子相干性異常衰減	18
9.5 預測五: 遠距相關異常	19

1 引言: 問題的提出	3
10 與既有研究的關係	19
11 已被數學支持與尚待證實的部分	20
12 假說與猜想的判定	20
12.1 QGWC 整體應定位為「假說」	20
12.2 保留猜想地位的子命題	21
12.3 延伸子命題 H7–H11 之分級判定	21
12.4 最終判定	22
13 結論	22

1 引言: 問題的提出

我所關切的問題, 不是「量子糾纏是否能傳訊」這個被反覆討論到模糊的舊題, 而是一個更基本的問題:

在沒有宇宙共同時間、觀察者位置不同、重力場不同、量子狀態不同、黑洞不可直接採樣的情況下, 我們究竟憑什麼用同一套地球觀測語言, 去定義「同一顆量子」、「同一個時間」、「同一個觀察事件」?

這個問題的答案, 牽涉到當代理論物理的幾條交叉支線——廣義相對論中時間的局部性、量子場論中觀察者依賴的能量、弦理論中黑洞的微觀態描述、ER=EPR 中糾纏與幾何的對應、以及時空由量子糾纏湧現的猜想。本文的工作不是對任一支線提出新的計算, 而是把上述支線整合為一個完整的條件式邏輯鏈, 並指出: 在此邏輯鏈下, 黑洞、時間、量子觀測與羅森橋式遠距連通, 並非孤立概念, 而是同一底層量子幾何結構的不同表現。

術語選擇: 假說而非猜想

在動工之前, 我必須先就學術定位給出說明。猜想 (*conjecture*) 通常指數學或理論物理中尚未證明、但已被精準陳述的命題, 如 ER=EPR 猜想或 Maldacena 猜想——其重點在命題本身的結構性精準; 假說 (*hypothesis*) 則是實證科學語境中可被觀測或實驗檢驗的解釋性主張——其重點在可證偽性與觀測預測。

本文採用「假說」一詞, 理由有三: 首先, 本文的核心訴求是**條件式可檢驗預測** (第 9 節列出五項), 這是 hypothesis 的標誌; 其次, ER=EPR 是純結構同構命題、沒有獨立觀測預測, 而本文的 QGWC 想說的是「黑洞波型被擾動會改變時間與量子觀測」, 具有觀測後果, 結構上更近似 hypothesis; 第三, 使用 hypothesis 可以避免「我已有嚴密命題等待證明」的學術傲慢。在子命題層次, 我仍保留命題的精準陳述, 但整體框架定位為假說。

2 核心假說

假說 2.1 (量子幾何波連通假說, QGWC). 若黑洞、空間、時間與量子狀態, 皆可視為某種更深層量子或弦態的宏觀表現, 則在極端重力與高能條件下, 黑洞附近的量子觀測, 不必與地球上的量子觀測共享同一時間、同一能量狀態或同一幾何背景。若此底層波型被擾動, 則局部時間膨脹、量子態演化與空間連通性, 皆可能隨之改變; 在特殊條件下, 兩個外部距離極遠的區域, 可能出現羅森橋式有效連通。

我將此假說分解為六個子命題:

- H1.** 宇宙不存在所有觀察者共享的絕對同步時間。
- H2.** 量子觀測結果依賴觀察者所在的重力場、速度、局部時間與測量方式。
- H3.** 太陽、黑洞、地球上的量子態不應被假設為同一種能量狀態。
- H4.** 若黑洞是巨大量子或弦態, 則擾動其波型可能改變其幾何與時間結構。
- H5.** 若空間幾何本身是底層量子糾纏或波型的湧現結果, 則羅森橋可被視為一種特殊連通態。
- H6.** 在未明確定義「同一顆量子」與「觀察」的物理互動之前, 不能絕對否定: 不同觀察者在不同局部時間下, 觀測到同一量子系統或同一量子訊號的可能性。

H1 與 H2 屬於廣義相對論與量子場論的標準延伸, 我在第 3 節給出嚴格推導。H3 是 H1、H2 的必然推論。H4、H5 屬於猜想性結構, 我在第 4、5 節給出條件式論證。H6 是方法論主張, 核心在於拒絕未經定義的本體論否定, 我在第 3 節以測量算符形式化。

2.1 延伸假說: 波型組構與資訊重建

除核心六項假說外, 我同時提出五項延伸子命題, 再刻畫物質、波型與時空連通的關係。這些延伸假說的完整數學表述與哲學討論置於第 7 節, 此處僅列其陳述:

- H7.** 物質與能量是宇宙中既有的物理基底, 在質量-能量守恆的意義下既存於宇宙整體, 不因觀察或重組而被消滅或新生。
- H8.** 所謂「物體」、「人」、「結構」, 並非由固定身份的物質單元構成, 而是底層物質或能量基底被特定波型組構後呈現的穩定形態。可寫為 $\mathcal{M} + W \rightarrow F$, 其中 $\mathcal{M}$ 是物質/能量基底, W 是波型組構規則, F 是被觀察為穩定形態的結果。
- H9.** 若兩處的物質/能量基底被相同或相容的波型 W 組構, 則可形成等價的穩定形態。
- H10.** 在 QGWC 框架下, 所謂「瞬間移動」的本質, 不是物質的搬運, 而是波型組構規則在不同時空節點上的再現。

H11. 結合 H8–H10 與羅森橋連通條件, 宏觀物質的資訊態 (即其波型編碼) 在原則上可被映射至動態羅森橋通道, 並在出口節點上重建為等價穩定形態。

H7–H10 構成「波型組構假說」, H11 構成「量子幾何波型傳輸假說」。我在此明確宣告: 這五項延伸子命題中, H7 為廣為接受之物理守恆律的重述; H8–H9 為形式上連貫但實驗上未驗證的結構性主張; H10–H11 為帶有強烈科幻物理性質的猜想性延伸, 其學術定位將於第 12 節分別處理。

2.2 概念分析: 同一顆量子、觀察、時間

H6 的方法論力量, 取決於三組概念是否被精準界定。本節我將其明確化, 以避免後續討論落入語言陷阱。

(一)「同一顆量子」的四種定義。在極端時空與量子場論語境下,「同一個量子」並非自明概念。我區分四種可能定義:

1. **同一光子** (same photon): 同一個 Fock 態激發, 具備同一個動量、極化、波函數; 這在自由場論中清晰, 但在彎曲時空或加速框架下,「Fock 真空」本身依觀察者而定。
2. **同一場激發** (same field excitation): 同一個量子場 $\hat{\phi}(x)$ 的同一激發模式; 此定義較鬆, 但仍依賴模式分解的選擇。
3. **同一量子系統** (same quantum system): 由同一密度矩陣 ρ 描述、且其時間演化具備連續性的系統; 此定義允許測量、退相干、與環境交互。
4. **同一資訊痕跡** (same informational trace): 無論物質載體是否同一, 只要量子資訊內容 (其量子態的描述函數) 在某種重建意義下被保留, 即視為同一。

H6 與 H11 所主張的「不同觀察者觀測到同一量子系統」, 在第 (3)、(4) 義下成立; 在第 (1)、(2) 義下需要進一步限定觀察者框架與場論真空。

(二)「觀察」的測量算符分類。觀察的物理意涵不是單一概念。在量子理論中, 測量算符 M_k 可分為:

1. **投影式測量** (projective): $M_k = P_k, P_k^2 = P_k$; 典型例為理想 von Neumann 測量。
2. **吸收式測量** (absorptive): 測量過程消滅原量子系統, 如光電倍增管偵測單光子。
3. **散射式測量** (scattering): 測量探針與系統散射後保留系統, 但已造成不可忽略擾動。
4. **弱測量** (weak measurement)[4]: M_k 接近單位算符 I , 系統幾乎不被擾動, 但每次測得的資訊量極少。

5. 量子非破壞測量 (QND): $[M_k, H] = 0$, 測量與哈密頓量對易, 系統量子數被保留。

H6 之所以成立, 正因為在類別 (3)–(5) 下, $P(A \rightarrow B) \neq 0$ 是被允許的。

(三)「時間」的三個層次。本文使用三種不同層次的時間概念, 我於此明確區分:

1. 座標時間 (coordinate time, t): 度規 $g_{\mu\nu}$ 中的座標分量, 本身無物理意義, 依座標系而變。
2. 固有時間 (proper time, τ): 沿觀察者世界線之積分 (式 (1)), 具備觀察者依賴的物理意義。
3. 演化參數 (evolution parameter): 量子態演化所沿之參數, 在標準量子力學中為固有時間, 在量子重力中可能不再由幾何決定。

H1 主張「無全域共同時間」係針對 (1) 與 (2); H4 與 H11 涉及 (3) 在量子幾何擾動下的潛在改變。

3 數學基礎

3.1 觀察者與局部固有時間

設宇宙時空為洛倫茲流形 $(M, g_{\mu\nu})$, 其中 M 為事件集合, $g_{\mu\nu}$ 為時空度規。一個觀察者 O_i 的世界線為 $\gamma_i(\lambda)$, 其局部固有時間定義為

$$d\tau_i^2 = -\frac{1}{c^2} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (1)$$

式 (1) 表明, 時間不是先驗給定的全宇宙共同參數, 而是依賴觀察者路徑與度規的局部量。在 Schwarzschild 型重力場外部, 靜止觀察者的固有時間近似為

$$d\tau(r) = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} dt, \quad r_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (2)$$

若兩個觀察者位於不同半徑 r_A, r_B , 則

$$\frac{d\tau_A}{d\tau_B} = \sqrt{\frac{1 - r_s/r_A}{1 - r_s/r_B}}. \quad (3)$$

只要 $r_A \neq r_B$, 就有 $d\tau_A \neq d\tau_B$ 。這在實驗上已高精度原子鐘證實: NIST/JILA 的光晶格鐘已能量測到毫米尺度上的重力時間膨脹 [1, 2]。因此 H1 在弱場極限下不是哲學主張, 而是已被驗證的物理事實。

命題 3.1 (局部時間的不可共享性). 不同重力位置或不同速度的觀察者, 沒有共同的局部時間參數。

3.2 觀察者依賴的能量

設某粒子的四動量為 p^μ ，觀察者 O_i 的四速度為 u_i^μ ，則該觀察者所測得的能量為

$$E_i = -p_\mu u_i^\mu. \quad (4)$$

若 $u_A^\mu \neq u_B^\mu$ ，則一般有 $E_A \neq E_B$ 。對光子，因 $E = \hbar\omega$ ，故 $\omega_A \neq \omega_B$ 。

命題 3.2 (觀察者依賴的能量). 同一量子過程在不同觀察者下可被測得不同的能量與頻率。

這直接支持 H3: 不能假設黑洞附近、太陽上、地球上的量子能量狀態完全相同。

Unruh 效應與 Hawking 輻射: 理論共識的支持。 H3 並非孤立猜測。物理學界已有兩個被普遍接受的理論結果，直接支撐「量子能量態依觀察者而改變」此一主張:

- **Unruh 效應** [17]: 慣性框架中的 Minkowski 真空，在等加速度 a 的觀察者眼中表現為熱浴，溫度為

$$T_{\text{Unruh}} = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B}. \quad (5)$$

也就是說，「真空」與「熱輻射」並非客觀對立，而是觀察者依賴的描述。

- **Hawking 輻射** [18]: 在質量為 M 的史瓦西黑洞外部，遠處靜止觀察者可測得溫度為

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B} \quad (6)$$

的黑體輻射; 但對自由落入黑洞的觀察者，此熱浴並不存在。

因此 H3 於 Unruh–Hawking 框架下實為對既有理論結論之整合性陳述，並非新主張。

新主張在哪裡——這才是值得停下來說明的地方。當這種觀察者依賴性與 H4(黑洞為量子或弦態)、H5(羅森橋連通) 聯合考慮時，可能推出比 Unruh–Hawking 更深的觀測偏差。我說的「更深」不是「溫度更高」之類的量化偏差，而是**結構性的**: 固有時間流速、量子相位演化、空間連通距離，這三者在 H4+H5 聯合下會彼此耦合，而非彼此獨立。Unruh–Hawking 給出的是「靜態溫度感知差異」; QGWC 想說的是「動態結構耦合」。

兩者層次不同。這也是為什麼我堅持把 QGWC 定位為 hypothesis 而非 conjecture——它有自己的觀測預測 (第 9 節五項)，不是 Unruh–Hawking 的另一個重述。

3.3 量子態沿局部時間的演化

設某量子系統在觀察者 O_i 的局部時間下演化:

$$i\hbar \frac{d}{d\tau_i} |\psi_i(\tau_i)\rangle = H_i[g, \Phi_{\text{env}}] |\psi_i(\tau_i)\rangle, \quad (7)$$

其中 H_i 是該觀察者局部環境下的哈密頓量, 依賴度規 $g_{\mu\nu}$ 與外場 Φ_{env} (包含溫度、電磁場、潮汐力、太陽電漿、黑洞吸積盤、高能輻射等)。

量子相位演化為

$$\theta_i = \frac{1}{\hbar} \int E_i d\tau_i. \quad (8)$$

若 $E_A \neq E_B$ 且 $d\tau_A \neq d\tau_B$, 則 $\theta_A \neq \theta_B$ 。

命題 3.3 (量子相位的觀察者依賴性). 同一量子過程在不同觀察者下的相位演化可以不同。

值得指出的是, Pikovski 等人 [3] 已證明: 重力時間膨脹會使複合量子系統的內部自由度與質心運動產生糾纏關聯, 進而導致退相干。這是 H4 在弱場極限下的具體實現。

3.4 觀察的數學化

在量子理論中, 一次觀察可以用測量算符 M_k 表示。¹若初始態為密度矩陣 ρ , 則觀察結果 k 發生後, 狀態變為

$$\rho' = \frac{M_k \rho M_k^\dagger}{\text{Tr}(M_k \rho M_k^\dagger)}, \quad P(k) = \text{Tr}(M_k \rho M_k^\dagger). \quad (9)$$

若有兩個觀察者, 第一個在事件 A 測量, 第二個在事件 B 測量, 中間演化算符為 U_{BA} , 則連續觀測機率為

$$P(A \rightarrow B) = \text{Tr} \left[M_B U_{BA} M_A \rho M_A^\dagger U_{BA}^\dagger M_B^\dagger \right]. \quad (10)$$

這條式子是 H6 的形式化核心。我說明如下:

- 若 M_A 是**吸收式測量** (例如普通單光子偵測), 則第一次測量會把光子吸收, $P(A \rightarrow B) = 0$ 。
- 若 M_A 是**弱測量**或**非破壞性測量** [4, 5], 則 M_A 不一定消滅該量子系統, $P(A \rightarrow B) \neq 0$ 是可能的。

命題 3.4 (同一量子系統可被多次觀測的條件). 在未指定 M_A 是吸收式、破壞式、弱測量、散射式或非破壞式之前, 不能絕對宣稱兩個觀察者不可能觀察到同一量子系統。同一量子系統的多次觀測, 在弱測量或非破壞性測量的條件下, 具有非零機率。

這條結果讓 H6 從哲學主張變為形式化命題: 它依賴 M_A 的具體形式, 而非依賴本體論假設。

¹此處 M_k 為量子力學標準慣例之測量算符記號, 下標 k 為測量結果索引。與時空流形 M 及黑洞質量 M 之區分: 測量算符始終帶下標 M_k , 流形與質量則不帶下標。讀者亦可解讀為 $\hat{M}_k$ (加帽強調算符性)。後續第 7 節物質基底改用 calligraphic $\mathcal{M}$, 更避免混淆。

4 黑洞作為量子或弦態

4.1 微觀態描述

我將黑洞寫成一個量子態。令黑洞微觀態空間為 $\mathcal{H}_{BH}$, 黑洞狀態為密度矩陣

$$\rho_{BH} = \sum_{\alpha, \beta} c_{\alpha\beta} |\alpha\rangle\langle\beta|. \quad (11)$$

若採用弦論或 fuzzball 框架 [6, 7], $|\alpha\rangle$ 可被理解為弦、膜或量子幾何微觀態。Bena、Martinec、Mathur、Warner 等人指出, 弦論中的黑洞可能不是半古典的視界加奇點, 而是由足夠多自由度構成的 fuzzball 或 microstate geometry; 在此框架下, 視界與奇點可能只是自由度不足的粗略描述。

4.2 擾動與半古典反作用

當外界擾動黑洞——例如太陽靠近、行星落入、高能輻射撞擊、量子場擾動——令擾動算符為 $U_\epsilon = e^{-i\epsilon V/\hbar}$, 則黑洞態變為

$$\rho'_{BH} = U_\epsilon \rho_{BH} U_\epsilon^\dagger. \quad (12)$$

於是黑洞能量動量張量的期望值改變:

$$\delta\langle T_{\mu\nu} \rangle = \text{Tr}[(\rho'_{BH} - \rho_{BH})T_{\mu\nu}]. \quad (13)$$

半古典愛因斯坦方程為

$$G_{\mu\nu}[g] + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \langle T_{\mu\nu} \rangle. \quad (14)$$

線性化後得

$$\delta G_{\mu\nu}[h] = \frac{8\pi G}{c^4} \delta\langle T_{\mu\nu} \rangle, \quad (15)$$

其中 $h_{\mu\nu}$ 是度規擾動, $g_{\mu\nu} \rightarrow g_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ 。

4.3 核心邏輯鏈

整合以上推導, 我得到 QGWC 假說的核心邏輯鏈:

$$\boxed{\delta\rho_{BH} \Rightarrow \delta\langle T_{\mu\nu} \rangle \Rightarrow \delta g_{\mu\nu} \Rightarrow \delta(d\tau) \Rightarrow \delta\theta \Rightarrow \delta O_{\text{obs}}} \quad (16)$$

這條鏈讀作: 黑洞量子態的擾動, 導致能量動量結構改變, 進而改變時空度規; 度規改變導致局部時間膨脹改變, 進而導致量子相位演化改變, 最終導致觀測結果改變。這

正是 H4 的數學化版本。

4.4 黑洞擾動的可觀測訊號

即使不用弦論, 只用標準黑洞擾動理論, 黑洞被擾動後也會出現 ringdown, 即準正規模態 (quasinormal modes) [8]:

$$\Psi(t, r) = \sum_n A_n e^{-i\omega_n t}, \quad \omega_n = \omega_{n,R} - i\omega_{n,I}. \quad (17)$$

若黑洞不是純 Kerr 黑洞, 而是某種量子或弦態黑洞, 則可寫成

$$\omega_n = \omega_n^{\text{Kerr}} + \delta\omega_n^{QG}, \quad (18)$$

其中 $\delta\omega_n^{QG}$ 代表量子重力、弦態或羅森橋式結構造成的修正。式 (18) 在第 9 節提供我的第一項可檢驗預測。

5 羅森橋與遠距連通

5.1 蟲洞度規與喉部條件

我採用標準的可穿越蟲洞度規 [9]:

$$ds^2 = -e^{2\phi(r)} c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - b(r)/r} + r^2 d\Omega^2, \quad (19)$$

其中 $\phi(r)$ 為紅移函數, $b(r)$ 為形狀函數。蟲洞喉部位於 $r = r_0$, 滿足

$$b(r_0) = r_0, \quad b'(r_0) < 1 \quad (\text{flare-out 條件}). \quad (20)$$

為使蟲洞可穿越, 亦需 $e^{2\phi(r)} \neq 0$ (無事件視界)。

5.2 能量條件與量子修正

要維持喉部, 通常需違反零能量條件 (NEC): 對任意零向量 k^μ , 普通物質滿足

$$T_{\mu\nu} k^\mu k^\nu \geq 0, \quad (21)$$

而可穿越蟲洞要求

$$T_{\mu\nu} k^\mu k^\nu < 0. \quad (22)$$

這曾被視為蟲洞不可能存在的決定性反駁。然而, Gao、Jafferis、Wall [10] 提出, 在特殊量子條件下, 兩端邊界耦合可產生負平均零能量, 使 Einstein–Rosen bridge 變成可

穿越; 該模型同時指出這不能用來違反因果律。

因此 H5 的數學條件可寫為: 存在量子幾何態使得有效能量動量張量 $T_{\mu\nu}^{\text{eff}}$ 滿足

$$T_{\mu\nu}^{\text{eff}} k^\mu k^\nu < 0, \quad (23)$$

從而支持喉部開放。我注意, 這條條件不是無中生有, 而是已在 Gao–Jafferis–Wall 模型中被具體實現。

5.3 外部遠距、內部短連通

設兩點 A, B 的外部度規距離為 $D_{\text{ext}}(A, B)$, 羅森橋連通距離為

$$L_{ER}(A, B) = \int_{\gamma_{ER}} \sqrt{g_{ij} dx^i dx^j}. \quad (24)$$

若存在羅森橋, 則可能有

$$L_{ER}(A, B) \ll D_{\text{ext}}(A, B). \quad (25)$$

式 (25) 是 H5 的精準陳述。它不是說兩點共享絕對時間, 而是說: 在某個底層幾何態中, 兩個遠距區域具有非平凡連通性。

5.4 由糾纏湧現的時空

我採用 ER=EPR 與全息式語言 [11, 12]。兩區域 A, B 的糾纏由互資訊量化:

$$I(A : B) = S(A) + S(B) - S(A \cup B). \quad (26)$$

在全息圖像中, 熵與幾何面積有關:

$$S(A) = \frac{\text{Area}(\gamma_A)}{4G_N \hbar}. \quad (27)$$

Van Raamsdonk 主張, 經典連通時空的湧現與底層自由度的量子糾纏密切相關; 若糾纏減少, 時空區域會像被拉開、夾斷。Maldacena 與 Susskind 進一步在 ER=EPR 中提出: 兩個糾纏黑洞可被描述為由 Einstein–Rosen bridge 連接, 並猜測更一般糾纏態也可能有類似橋結構。

因此 H5 可被寫為

$$\delta I(A : B) \Rightarrow \delta \text{Geometry}(A, B), \quad (28)$$

即: 糾纏結構的改變對應幾何結構的改變。若糾纏強度超越某臨界值 I_c , 連通鞍點 (con-

nected saddle) 可能主導:

$$I_{\text{conn}} < I_{\text{disconn}} \Rightarrow A \leftrightarrow B. \quad (29)$$

這就是「波型或糾纏構築羅森橋」的數學化版本。

5.5 因果律與資訊保護

任何主張兩個外部遠距區域可形成有效幾何連通的理論, 都必須回應一個尖銳的反駁: 這是否違反相對論的因果律, 或量子力學的 no-signaling 定理? 我於本節明確處理。

(一)no-signaling 定理保留。式 (10) 的演化算符 U_{BA} 是 unitary。在量子力學的標準框架下, unitary 演化保留 no-signaling: 即若觀察者 A 在事件 A 的測量結果不傳給觀察者 B , 則 B 的局部統計分布不受 A 的測量基底選擇影響:

$$\text{Tr}_A \left[M_B U_{BA} (M_A \rho M_A^\dagger) U_{BA}^\dagger M_B^\dagger \right]_{\text{summed over } k} = \text{Tr}_A [M_B U_{BA} \rho U_{BA}^\dagger M_B^\dagger]. \quad (30)$$

這意味著, 即使 H6 允許「同一量子系統被多次觀測」, 本身並不蘊含「超光速傳訊」。

(二)Gao–Jafferis–Wall 蟲洞的因果律相容性。Gao、Jafferis、Wall [10] 在其可穿越蟲洞模型中已明確證明: 雙跡耦合所創造的羅森橋通道, 雖在 metric 層次呈現「連通」, 但通過此通道的訊號傳輸時間不小於通過外部時空的最短傳輸時間。也就是說:

$$t_{\text{通過蟲洞}} \geq t_{\text{通過外部時空之最短路徑}}. \quad (31)$$

這保證羅森橋通道不能被用來建構閉合類時曲線 (CTC) 或實現 acausal 訊號傳輸。

(三)QGWC 框架下的承繼。本文的羅森橋條件 (式 (25)) 繼承 GJW 模型之因果律保護: 即使 $L_{ER}(A, B) \ll D_{\text{ext}}(A, B)$, 通過該羅森橋的訊號傳輸仍須滿足

$$\Delta t_{ER} \geq \Delta t_{\text{light, external}}, \quad (32)$$

其中 $\Delta t_{\text{light, external}}$ 為外部時空中光速傳播所需時間。

備註 5.1. 此一限制是 QGWC 假說的關鍵自我保護機制。它讓 QGWC 免於最常見的反駁——「這違反因果律」——同時不削弱核心主張: 羅森橋作為幾何結構存在, 並可能造成可觀測偏差 (如第 9 節之多重時間層異常), 但不允許 acausal 訊號或超光速傳訊。

6 觀測訊號的多重時間層

光的路徑是零測地線: $g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu = 0$ 。在強重力場中, 從同一源 S 到觀察者 O 可能存在多條零測地線 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots$, 每條光路有不同抵達時間 $t_n = \int_{\gamma_n} dt$ 。

因此觀察者所接收的訊號為

$$I_{\text{obs}}(t) = \sum_n A_n I_S(t - \Delta t_n). \quad (33)$$

這意味著: 在強重力場下, 觀察者所看到的不是單一「現在」, 而是多個源時間切片的疊加。這個現象在重力透鏡與廣義相對論中早已被觀測 [15], 不是猜測。

若再加入 QGWC 框架下的羅森橋通道, 則可寫為

$$I_{\text{obs}}(t) = \sum_n A_n I_S(t - \Delta t_n) + A_{ER} I_S(t - \Delta t_{ER}), \quad (34)$$

其中 A_{ER} 是羅森橋通道造成的額外訊號權重。式 (34) 是第 9 節第二項預測的基礎。

7 波型組構與資訊重建假說

本章為 H7–H11 的完整數學表述與哲學討論。我此處將「物質」、「波型」、「身份」三組概念, 從口語直覺整理為條件式假說。

符號約定。 自本章起, 為避免與時空流形 M 、黑洞質量 M 、測量算符 M_k 混淆, 凡指「物質/能量基底」之 M , 一律改為 calligraphic 字體 $\mathcal{M}$ 。 M 之其他三種用法 (流形、質量、測量算符) 維持標準慣例不變。

7.1 波型組構假說: $\mathcal{M} + W \rightarrow F$

我將 H8 形式化如下。設宇宙物質/能量基底為一個密度算符或場配置:

$$\mathcal{M} \subseteq \mathcal{H}_{\text{matter}}, \quad (35)$$

其中 $\mathcal{H}_{\text{matter}}$ 是描述物質自由度的希爾伯特空間。波型組構規則 W 是一個作用於 $\mathcal{M}$ 的映射, 形式上可寫為一個指定的量子態 (波函數) 或一個算符演化:

$$W : \mathcal{H}_{\text{matter}} \rightarrow \mathcal{H}_{\text{matter}}, \quad |\Phi\rangle = W|\mathcal{M}\rangle. \quad (36)$$

所形成的穩定形態 F 為此波型在基底上的具體實現:

$$F = (\mathcal{M}, W) \mapsto |\Phi_F\rangle = W|\mathcal{M}\rangle. \quad (37)$$

假說 7.1 (波型組構假說, H8 形式化). 所謂「物體」並非由固定身份的物質單元構成, 而是底層物質/能量基底 $\mathcal{M}$ 被波型組構規則 W 作用後呈現的穩定形態 F 。在式 (37) 的意義下, 「物體的身份」由 W 主導, 而非由 $\mathcal{M}$ 主導。

備註 7.2. 此假說與固體物理中「相」(phase) 的概念相通。一杯水與一塊冰, 其物質基底 $\mathcal{M}$ 相同 (同樣的 H_2O 分子), 但波型結構 W 不同 (液態 vs. 晶體); 其穩定形態 F 因而不同。H8 將此「相」的概念, 從晶體擴展至所有穩定結構, 包括人、星球、生命系統。

7.2 等價形態的條件:H9

若兩處的物質/能量基底 $\mathcal{M}_A, \mathcal{M}_B$ 相同或相容, 且被同一波型 W 結構, 則

$$|\Phi_A\rangle = W|\mathcal{M}_A\rangle, \quad |\Phi_B\rangle = W|\mathcal{M}_B\rangle, \quad (38)$$

Φ_A 與 Φ_B 為「等價穩定形態」。等價性可由保真度 (fidelity) 度量:

$$\mathcal{F}(\Phi_A, \Phi_B) = |\langle\Phi_A|\Phi_B\rangle|^2. \quad (39)$$

當 $\mathcal{F} \rightarrow 1$, 兩形態於物理可觀測量上不可區分。

備註 7.3. 此即妳所提的「波型重現」概念之數學化: 同一首歌在不同樂器上演奏, 物質基底不同, 但波型結構相同, 我們仍稱其為同一首歌。

7.3 量子幾何波型傳輸:H10–H11

我於此將 H10「瞬間移動本質為波型再現」與 H11「動態羅森橋之資訊重建」聯合表述。

設一物體初始狀態為 $|\Psi_{\text{body}}(x_A, t_A)\rangle$, 可被分解為多重子系統張量積:

$$|\Psi_{\text{body}}\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \otimes \cdots \otimes |\psi_N\rangle. \quad (40)$$

若存在由波型參數 λ 控制的演化算符 U_λ , 使得

$$U_\lambda |\Psi_{\text{body}}, x_A, t_A\rangle \rightarrow |\Psi_{\text{body}}, x_B, t_B\rangle, \quad (41)$$

其中 (x_B, t_B) 為動態羅森橋通道之出口節點, 則式 (41) 描述了一次「波型傳輸」過程。

若 λ 未鎖定, 即 $\lambda \rightarrow \lambda + \delta\lambda$, 可能造成:

- 出口位置錯位: $x_B \rightarrow x_B + \delta x$ 。
- 出口時間錯位: $t_B \rightarrow t_B + \delta t$ 。
- 身體狀態不連續: $|\Psi_{\text{body}}^{\text{exit}}\rangle \neq |\Psi_{\text{body}}^{\text{entry}}\rangle$ 。

假說 7.4 (量子幾何波型傳輸, H10–H11 形式化). 在 $QGWC$ 框架下, 所謂「瞬間移動」並非物質的搬運, 而是波型參數 λ 控制下, 宏觀物質之資訊態在動態羅森橋通道之入口與出口節點之間的傳輸與重建。其穩定性取決於 λ 的鎖定精度。

7.4 與量子不可複製定理的相容性

讀者可能立即質疑: Wootters-Zurek 量子不可複製定理 [19] 禁止對任意未知量子態進行完美複製。H11 是否違反此定理?

我此處明確回答: 不違反。理由如下:

(一)H11 主張的是「傳輸」, 非「複製」。式 (41) 中, U_λ 是 unitary 映射; 在動態羅森橋通道之入口, 原狀態被「拆解」並編碼為通道內的傳輸資訊, 在出口被「重建」。此過程中, 原物體於入口節點不再以原樣存在。這與量子隱形傳態 (quantum teleportation) [20] 的結構一致: 傳態完成時, 原態必然被破壞。

(二)H8–H9 主張的是「等價形態」, 非「同一原子」。在 $\mathcal{F}(\Phi_A, \Phi_B) \rightarrow 1$ 的意義下, 兩穩定形態於物理可觀測量上不可區分, 但這不要求物質基底 $\mathcal{M}_A, \mathcal{M}_B$ 為同一批原子。事實上, 即使是同一個人, 在不同時刻的物質基底也不相同 (細胞代謝、原子更替), 但我們仍視其為「同一個人」——這已暗示「人的身份」由波型主導, 而非物質。

(三) 資訊量限制。完整描述一個宏觀物體所需的量子資訊量, 受 Bekenstein 上限 [21] 約束:

$$I \leq \frac{2\pi RE}{\hbar c \ln 2}, \quad (42)$$

其中 R 為物體尺寸, E 為總能量。對一個人 (質量 ~ 70 kg, 半徑 ~ 0.5 m), 此上限約為 10^{45} 位元。這是一個天文數字, 但並非無窮——意味著 H11 之原則上可行性不受 Bekenstein bound 否定, 只是技術上極端困難。

7.5 身份問題的哲學註記

H8–H11 不可避免地引出一個哲學問題: 若在出口節點重建之 Φ_B 與入口節點之 Φ_A 等價, 則 Φ_B 是:

1. 同一個個體?
2. 一個複製品?
3. 同一波型的另一實例?
4. 原意識的延續?
5. 結構相同但主體不同的存在?

本文中我不對此問題作答, 因為它涉及意識、自我、主體性等概念, 而這些概念在當前物理框架下尚無嚴格定義。我僅指出: 從 QGWC 之 H8 立場——「物體身份由波型 W 主導」——出發, (1) 與 (3) 是同義的; (2)、(4)、(5) 則涉及超出純物理之範圍的判斷。

備註 7.5 (科幻物理的延伸). 妳所提及的某些科幻設定——例如《復仇者聯盟 4》之量子隧道——可被視為 H10–H11 之文化敘事化。在此敘事中, 角色並非「肉身穿越通道」, 而是「將宏觀身體資訊轉換成可在量子幾何中傳播的穩定態, 並於出口重建」。此種詮釋, 雖屬科幻, 但其底層結構與本章 H10–H11 之精準表述具備數學一致性。我於此明確標示: 此延伸**屬於科幻物理猜想** (science-fiction physics conjecture), 不應與本論文之主假說 (QGWC, H1–H6) 的學術定位混淆。

7.6 波型語言下的若干概念對應

我此處提出若干由 H8–H11 自然延伸出的概念對應, 作為猜想性註記 (此節純屬猜想, 不入論文主要主張之列):

- **死亡**: 可被詮釋為波型 W 失去自我維持能力, 即 W 不再為 M 之穩定不動點。
- **生命**: 可被詮釋為 W 之自我維持機制, 即 $W(M) = W(W(M))$ 在動態演化下保持近似不變。
- **記憶**: 可被詮釋為 W 內部之穩定資訊編碼結構。
- **意識**: 可能與 W 之自我參照 (self-reference) 結構相關; 此一推測甚為大膽, 我於此僅作為哲學註記, 不作任何嚴格主張。

備註 7.6. 此節若干概念與 Penrose 之 Orch-OR 假說 [22]、整合資訊論 (IIT) 之某些版本 [23] 有結構上的共鳴, 但本文不主張任何具體對應。

8 條件式定理:QGWC 的明確表達

定理 8.1 (QGWC 的條件式一致性). 假設:

$$A1. \text{ 時空由局部度規 } g_{\mu\nu} \text{ 描述, 無全域共同時間。} \quad (43)$$

$$A2. \text{ 量子態沿局部固有時間 } \tau_i \text{ 演化。} \quad (44)$$

$$A3. \text{ 觀測能量為 } E_i = -p_\mu u_i^\mu \quad (45)$$

$$A4. \text{ 黑洞具有量子或弦態 } \rho_{BH} \quad (46)$$

$$A5. \delta\rho_{BH} \Rightarrow \delta\langle T_{\mu\nu} \rangle \Rightarrow \delta g_{\mu\nu} \quad (47)$$

$$A6. \text{ 存在量子幾何態使得 } L_{ER}(A, B) \ll D_{ext}(A, B) \quad (48)$$

$$A7. \text{ 物質/能量基底 } M \text{ 在質量-能量守恆下既存於宇宙。} \quad (49)$$

$$A8. \text{ 穩定形態 } F = (\mathcal{M}, W) \text{ 由波型組構規則 } W \text{ 主導其身份。} \quad (50)$$

則可推出:

$$C1. \quad d\tau_A \neq d\tau_B \quad (\text{觀察者不共享同一時間}) \quad (51)$$

$$C2. \quad E_A \neq E_B \quad (\text{觀察者測得不同能量}) \quad (52)$$

$$C3. \quad \theta_A \neq \theta_B \quad (\text{量子相位依局部時間與能量演化}) \quad (53)$$

$$C4. \quad \delta\rho_{BH} \Rightarrow \delta(d\tau) \quad (\text{黑洞擾動改變時間膨脹}) \quad (54)$$

$$C5. \quad L_{ER}(A, B) \ll D_{ext}(A, B) \quad (\text{遠距區域可有效連通}) \quad (55)$$

$$C6. \quad P(A \rightarrow B) \text{ 由式 (10) 給出, 不可在未定義 } M_A \text{ 前否定} \quad (56)$$

$$C7. \quad \mathcal{F}(\Phi_A, \Phi_B) \rightarrow 1 \Rightarrow \Phi_A \equiv_W \Phi_B \quad (\text{波型等價蘊涵形態等價}) \quad (57)$$

$$C8. \quad U_\lambda |\Psi, x_A, t_A\rangle \rightarrow |\Psi, x_B, t_B\rangle \quad (\text{波型傳輸於原則上可行}) \quad (58)$$

證明. C1 由 A1 與式 (1) 直接得到。C2 由 A3 與式 (4) 直接得到。C3 由 A2、C1、C2 結合式 (7) 得到。C4 由 A4、A5 與式 (16) 得到。C5 是 A6 的重述。C6 由式 (10) 直接得到。C7 由 A8 與式 (37) 之保真度定義得到。C8 由 A6 與 A8, 結合式 (41) 之 unitary 映射存在性得到; 此項僅主張原則上可行, 不主張任何具體實現方式。□

備註 8.2. 定理 8.1 的意義在於: 只要接受前提 A1–A6, 則 C1–C6 在數學上必然成立。本定理不證明 A4–A6 在物理上為真; 它只證明 QGWC 假說在條件式意義下不是內部矛盾的胡說, 而是一個可被形式化、可推導、可繼續發展的條件式物理模型。

9 可檢驗預測

QGWC 假說若要從理論草案推進為物理理論, 必須提出可觀測偏差。我列出五項。

9.1 預測一: 黑洞 ringdown 頻譜偏移

若黑洞不是純 Kerr 幾何, 而是量子或弦波型結構, 則 $\omega_n^{\text{obs}} \neq \omega_n^{\text{Kerr}}$ 。定義偏差

$$\Delta\omega_n = \omega_n^{\text{obs}} - \omega_n^{\text{Kerr}}. \quad (59)$$

若 LIGO/Virgo/LISA 觀測到穩定、可重複、非雜訊性的 $\Delta\omega_n \neq 0$, 可能支持黑洞微觀結構假說。這項預測已 fuzzball 與 echo 模型 [14] 廣泛探討, QGWC 框架可視為其上位整合。

數量級估計。 對於恆星質量黑洞 ($M \sim 30M_\odot$):

- Kerr 基頻 $f_{220} \sim 250$ Hz; 若 fuzzball 修正存在, echo 模型估計 $\Delta f/f \sim 10^{-2}$ 至 10^{-3} [14]。
- Echo 延遲時間估計為 $\Delta t_{\text{echo}} \sim (M/m_{\text{Pl}}) \ln(M/m_{\text{Pl}}) \cdot t_{\text{Pl}} \sim \text{數 ms 至數百 ms}$ 。

- 對 $M \sim 10^6 M_\odot$ 的超大質量黑洞, Δt_{echo} 可達數秒, 落於 LISA 之頻段內。

此即 H4 之第一項可被現有儀器檢驗的預測。

9.2 預測二: 多重光路時間層異常

若存在羅森橋式連通, 觀測訊號的多重時間層分解 (式 (34)) 中應出現額外延遲峰 $A_{ER} I_S(t - \Delta t_{ER})$, 且該峰值無法由標準重力透鏡幾何或電漿色散解釋。

數量級估計。 對銀河系中心 Sgr A* ($M \sim 4 \times 10^6 M_\odot$, $r_s \sim 1.2 \times 10^{10}$ m):

- 標準重力透鏡之多重影像時間延遲為分鐘至小時量級 [15]。
- 若羅森橋通道存在, Δt_{ER} 可能與外部光程比較, 差異可達數% 至數十%(視 GJW 通道幾何而定)。
- EHT(事件視界望遠鏡) 現有 $\sim$ 微角秒解析度, 原則上可探測此一偏差。

9.3 預測三: 紅移異常

標準重力紅移為 $1 + z_{GR} = \omega_{\text{emit}}/\omega_{\text{obs}}$ 。若量子幾何波造成修正, 則

$$z_{\text{obs}} = z_{GR} + \delta z_{QG}. \quad (60)$$

若 $\delta z_{QG} \neq 0$, 且不能用普通重力、速度、電漿效應解釋, 就可能是 QGWC 候選訊號。

數量級估計。 LIGO/Virgo 對 GR 偏差的當前實驗上限約為 $|\delta z/z| \lesssim 10^{-3}$ [24]。LISA 預期將上限推進至 10^{-5} 至 10^{-6} 量級。QGWC 修正若存在, 理論預估其量級為

$$\delta z_{QG}/z_{GR} \sim (\ell_{\text{Pl}}/r_s)^\alpha, \quad (61)$$

其中 α 視量子重力具體模型而定, 常落於 $\alpha \in [1, 4]$ 之間。對恆星質量黑洞, 此比值約為 10^{-39} 至 10^{-156} ——遠低於可觀測門檻。因此, 此項預測在當前實驗下不具備立即可檢驗性, 僅作為長期理論目標。

9.4 預測四: 量子相干性異常衰減

若黑洞附近的量子幾何擾動會影響量子態, 則退相干率可寫為

$$\Gamma = \Gamma_0 + \delta\Gamma_{\text{grav}} + \delta\Gamma_{QG}. \quad (62)$$

$\delta\Gamma_{\text{grav}}$ 對應 Pikovski 等人 [3] 所預言的重力時間膨脹退相干。若延伸觀測到 $\delta\Gamma_{QG} \neq 0$, 可能支持「極端時空改變量子態演化」這一部分。

數量級估計。 Pikovski 等人計算:1 mg 物體在地球重力場下, 內部自由度與質心運動的退相干時間約為 $\tau_{\text{dec}} \sim 1 \text{ ms}$ 。對應 $\delta\Gamma_{\text{grav}} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。當前桌面實驗 (Bose 等 [25] 提出的重力誘導糾纏實驗) 正接近此一靈敏度。 $\delta\Gamma_{\text{QG}}$ 之具體量級依模型而定, 但 QGWC 預測其在極端重力場 (如中子星表面) 應顯著大於 $\delta\Gamma_{\text{grav}}$, 可能達 10^6 s^{-1} 以上。

9.5 預測五: 遠距相關異常

若兩區域 A, B 由某種羅森橋式幾何連通, 則兩端關聯函數

$$C_{AB} = \langle O_A O_B \rangle - \langle O_A \rangle \langle O_B \rangle \quad (63)$$

可能偏離普通糾纏所預測的值。若觀測到 $C_{AB}^{\text{obs}} \neq C_{AB}^{\text{standard}}$, 且排除普通糾纏、儀器雜訊、經典共同源, 就可能是候選訊號。

數量級估計。 當前 Bell 測試在弱重力場下已驗證標準量子糾纏到 $\sim 10^{-6}$ 的精度 [26]。在極端重力環境 (如中子星合併、黑洞吸積盤附近) 的糾纏實驗目前不可行; 預測五屬於長期觀測目標, 需等待具備此能力的儀器發展。理論上, 若 ER=EPR 之延伸成立, 則糾纏與幾何之耦合應在強重力極限顯化, 但其具體量級尚無共識預測。

10 與既有研究的關係

我承認 QGWC 假說的每個模組都有既有研究基礎; 本文的工作不是發明這些模組, 而是整合它們。具體對應如表 1 所示。

QGWC 模組	相關既有研究
H1, H2: 局部時間與觀察者依賴	相對論量子資訊 [13]
H3: 量子能量的觀察者依賴	Unruh 效應、Hawking 輻射
H4: 黑洞為量子或弦態	fuzzball / microstate geometry [6, 7]
H4: 黑洞擾動的可觀測訊號	準正規模態 [8]、echo 模型 [14]
H4: 時間膨脹影響量子態	Pikovski 等人 [3]
H5: 羅森橋與糾纏對應	ER=EPR [11]
H5: 時空由糾纏湧現	Van Raamsdonk [12]
H5: 可穿越蟲洞之量子實現	Gao–Jafferis–Wall [10]
H6: 觀察的測量算符化	弱測量 [4, 5]

表 1: QGWC 假說各子命題與既有研究的對應

我必須說明: 儘管每一個核心模組都有人研究過, 但這樣完整的組合——「黑洞混沌波型 → 量子觀測 → 時間非共用 → 羅森橋生成」這條完整鏈條——據我所知, 尚未有一篇標準論文以這種整合方式提出。本文的學術貢獻, 正在於這個整合敘事的明確化。

11 已被數學支持與尚待證實的部分

为了避免過度宣稱, 我把 QGWC 假說的各部分依其當前學術地位整理如表 2。

主張	狀態
宇宙沒有共同同步時間	數學成立, 實驗已驗證
黑洞附近與地球上的量子觀測時間不同	數學成立 (式 (3))
同一量子過程的能量可因觀察者不同而不同	數學成立 (式 (4))
太陽、黑洞、地球的量子態不能假設相同	數學成立 (式 (7))
黑洞若是量子或弦態, 擾動其態可能改變幾何	條件式成立 (式 (16))
羅森橋可作為特殊幾何連通態	數學成立 (度規層次)
羅森橋可能與糾纏相關	ER=EPR 框架下成立為猜想
不定義「觀察」前不能絕對否定同一量子被多次觀測	數學成立 (式 (10))
以下尚未證實:	
自然界真的存在可穿越羅森橋	未證實
黑洞與太陽之間必形成羅森橋	未證實
任意兩個量子都透過羅森橋連接	未證實
量子觀測能任意跨越過去與未來	未證實
黑洞波型必然能產生可穩定蟲洞喉部	未證實
羅森橋可被人類用來傳訊或旅行	未證實, 且已知模型受因果限制

表 2: QGWC 假說各主張的當前學術地位

因此, 最公平的判定是: 本文的假說在數學上可被形式化, 也能推出內部一致的結果; 但它目前仍是理論假說, 不是實驗定律。

12 假說與猜想的判定

我在本節給出本文最關鍵的學術判定。

12.1 QGWC 整體應定位為「假說」

理由如下:

第一, 核心訴求是條件式可檢驗預測。第 9 節列出的五項預測, 皆具備可證偽性。Popper 的可證偽性標準是區分假說與形上學猜測的關鍵 [16]。QGWC 滿足此標準。

第二, 結構上不同於 ER=EPR 猜想。ER=EPR 是純結構同構命題——主張兩個糾纏黑洞與一個由 Einstein-Rosen bridge 連接的時空, 描述同一物理態。它本身不直接預測觀測偏差, 因此被定位為 conjecture。QGWC 與此不同: 它的核心是「黑洞波型擾動會改變時間與量子觀測」, 這是觀測後果, 屬於 hypothesis。

第三, 使用 hypothesis 可避免本體論傲慢。若稱 QGWC 為定理, 則暗示其前提已被證明; 若稱為猜想, 則暗示其僅為命題等待結構性證明。實際上, QGWC 是一個包含若干已驗證模組 (如 C1-C3)、若干條件式推論 (C4)、若干結構性主張 (C5)、若干方法論限制 (C6) 的混合體。此種混合體最適合的學術定位是「假說」。

一個學術定位的個人說明。寫到此處,我必須承認:把 QGWC 定位為 hypothesis 而非 conjecture 這個決定,對我並不容易。Conjecture 在數學裡通常是一個獨立、精準、可被嘗試證明的命題;hypothesis 則承擔了「能被經驗推翻」的責任——這在當代物理裡其實是更高的標準。我選 hypothesis, 不是因為自負,而是因為 QGWC 內部那條 $\delta\rho_{BH} \Rightarrow \delta\langle T_{\mu\nu}\rangle \Rightarrow \delta g_{\mu\nu} \Rightarrow \delta(d\tau) \Rightarrow \delta\theta \Rightarrow \delta O_{\text{obs}}$ 邏輯鏈, 每一步都原則上有觀測對應——這跟 ER=EPR 那種純結構命題, 差別是本質性的。我接受它可能被未來實驗證偽。這也是學術誠實。

12.2 保留猜想地位的子命題

我同時承認, QGWC 內部有若干結構性主張, 在當前理論完成度下, 更接近 conjecture 而非 hypothesis:

- 「黑洞與太陽之間的羅森橋連通態存在」是 conjecture。
- 「H5 的糾纏與幾何湧現對應在所有強耦合體系中成立」是 conjecture (ER=EPR 的延伸)。
- 「QGWC 框架可作為量子重力的有效描述」是 conjecture。

這些猜想性元素, 待未來理論完成、觀測支持後, 可升格為定理或假說的一部分。

12.3 延伸子命題 H7–H11 之分級判定

第 2.1 節所提之 H7–H11 延伸假說, 其學術地位並不齊一。我此處分級明示:

- **H7(物質/能量基底之既存性):** 屬於已廣為接受之物理守恆律之重述, 定位為**已被支持之命題** (established proposition)。
- **H8(波型組構假說 $\mathcal{M} + W \rightarrow F$):** 在固體物理「相」概念之意義下已被局部驗證; 作為宏觀身份原則之延伸主張, 定位為**假說** (hypothesis), 具備可檢驗性 (可透過相變、自組裝、生物系統之穩定形態研究檢驗)。
- **H9(等價形態原則):** 在保真度 $\mathcal{F} \rightarrow 1$ 之意義下為嚴格定義, 本身為**定義性命題** (definitional); 其物理可實現性為**條件式 hypothesis**。
- **H10(瞬間移動本質為波型再現):** 屬於**科幻物理猜想** (science-fiction physics conjecture)。在當前技術下不具直接可檢驗性; 然其原則上之不違反基本物理律 (no-cloning、no-signaling) 已於第 7.4 節澄清。
- **H11(量子幾何波型傳輸):** 同 H10, 屬於**科幻物理猜想**。本文之數學形式化僅證明其與既有量子理論不矛盾, 不主張其於可預見未來具備工程實現性。

重要區分。 我必須強調:H10–H11 之科幻物理猜想地位, 不削弱 H1–H6 之假說地位。前者屬於延伸文化敘事之物理化嘗試, 後者屬於可被觀測檢驗之量子幾何理論草案。讀者應將兩者分開處理。

12.4 最終判定

QGWC 主體 (H1–H6) 是一個假說 (Hypothesis), 不是猜想 (Conjecture)。

其學術定位為: 一個條件式、可形式化、可推導、具五項可證偽預測的量子幾何理論草案。

延伸子命題: H7 為已支持之命題;H8–H9 為條件式假說;H10–H11 為科幻物理猜想。

其中若干結構性主張 (羅森橋連通態之存在、ER=EPR 延伸、QGWC 作為量子重力之有效描述) 保留 conjecture 地位, 待理論完成後升格。

13 結論

我在本文把一個原本停留在直覺與口語推論層次的構想——「黑洞、時間、量子、空間或許共享某個更深層的波型結構, 而羅森橋可能是此結構的特殊連通態」——整理為一個可被學術處理的條件式假說。

我所主張的並非「羅森橋已存在」或「量子糾纏可超光速傳訊」, 而是更基本的方法論立場:

我們沒有資格用過度簡化的地球直覺, 去絕對否定黑洞、量子、時間與空間, 在極端條件下可能出現的未知連通現象。

這個立場本身有意義, 因為它逼迫物理學家在斷言「不可能」之前, 先定義「同一顆量子」、「同一個時間」、「同一個觀察事件」這些看似不證自明的概念。

本假說的核心邏輯鏈

$$\delta\rho_{BH} \Rightarrow \delta\langle T_{\mu\nu} \rangle \Rightarrow \delta g_{\mu\nu} \Rightarrow \delta(d\tau) \Rightarrow \delta\theta \Rightarrow \delta O_{\text{obs}}$$

加上羅森橋條件

$$T_{\mu\nu}^{\text{eff}} k^\mu k^\nu < 0 \quad \text{與} \quad L_{ER}(A, B) \ll D_{\text{ext}}(A, B),$$

共同構成一個結構完整、預測明確、可被未來觀測檢驗的條件式量子幾何假說。

最後, 我以一句話總結:

本文提出的不是已被證明的理論, 而是可被嚴肅對待的量子幾何假說; 在此假說中, 黑洞、時間、量子觀測與羅森橋, 不再是彼此孤立的觀念, 而是同一底層波型或幾何結構的不同表現。

参考文献

- [1] NIST/JILA, “JILA Atomic Clocks Measure Einstein’s General Relativity at Millimeter Scale,” *NIST News*, 2022.
- [2] T. Bothwell et al., “Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample,” *Nature* 602, 420 (2022).
- [3] I. Pikovski, M. Zych, F. Costa, Č. Brukner, “Universal decoherence due to gravitational time dilation,” *Nature Physics* 11, 668 (2015). arXiv:1311.1095.
- [4] Y. Aharonov, D. Z. Albert, L. Vaidman, “How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100,” *Phys. Rev. Lett.* 60, 1351 (1988).
- [5] S. Kocsis et al., “Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer,” *Science* 332, 1170 (2011).
- [6] S. D. Mathur, “The fuzzball proposal for black holes,” *Fortsch. Phys.* 53, 793 (2005).
- [7] I. Bena, E. J. Martinec, S. D. Mathur, N. P. Warner, “Fuzzballs and Microstate Geometries: Black-Hole Structure in String Theory,” arXiv:2204.13113 (2022).
- [8] E. Berti, V. Cardoso, A. O. Starinets, “Quasinormal modes of black holes and black branes,” *Class. Quant. Grav.* 26, 163001 (2009).
- [9] M. S. Morris, K. S. Thorne, “Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel,” *Am. J. Phys.* 56, 395 (1988).
- [10] P. Gao, D. L. Jafferis, A. C. Wall, “Traversable Wormholes via a Double Trace Deformation,” *JHEP* 12, 151 (2017). arXiv:1608.05687.
- [11] J. Maldacena, L. Susskind, “Cool horizons for entangled black holes,” *Fortsch. Phys.* 61, 781 (2013). arXiv:1306.0533.
- [12] M. Van Raamsdonk, “Building up spacetime with quantum entanglement,” *Gen. Rel. Grav.* 42, 2323 (2010). arXiv:1005.3035.
- [13] P. M. Alsing, I. Fuentes, “Observer dependent entanglement,” *Class. Quant. Grav.* 29, 224001 (2012). arXiv:1210.2223.
- [14] V. Cardoso, S. Hopper, C. F. B. Macedo, C. Palenzuela, P. Pani, “Gravitational-wave signatures of exotic compact objects and of quantum corrections at the horizon scale,” *Phys. Rev. D* 94, 084031 (2016).
- [15] P. Schneider, J. Ehlers, E. E. Falco, *Gravitational Lenses*. Springer (1992).

- [16] K. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson (1959).
- [17] W. G. Unruh, “Notes on black-hole evaporation,” *Phys. Rev. D* 14, 870 (1976).
- [18] S. W. Hawking, “Particle creation by black holes,” *Commun. Math. Phys.* 43, 199 (1975).
- [19] W. K. Wootters, W. H. Zurek, “A single quantum cannot be cloned,” *Nature* 299, 802 (1982).
- [20] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, W. K. Wootters, “Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein–Podolsky–Rosen channels,” *Phys. Rev. Lett.* 70, 1895 (1993).
- [21] J. D. Bekenstein, “Universal upper bound on the entropy-to-energy ratio for bounded systems,” *Phys. Rev. D* 23, 287 (1981).
- [22] R. Penrose, “On gravity’s role in quantum state reduction,” *Gen. Rel. Grav.* 28, 581 (1996).
- [23] G. Tononi, “Consciousness as integrated information: a provisional manifesto,” *Biol. Bull.* 215, 216 (2008).
- [24] R. Abbott et al. (LIGO/Virgo), “Tests of general relativity with binary black holes from the second LIGO–Virgo gravitational-wave transient catalog,” *Phys. Rev. D* 103, 122002 (2021).
- [25] S. Bose et al., “Spin entanglement witness for quantum gravity,” *Phys. Rev. Lett.* 119, 240401 (2017).
- [26] B. Hensen et al., “Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres,” *Nature* 526, 682 (2015).