Emergenza quantistica dalla potenzialità primordiale:
Il framework Duale-Non-Duale per la differenziazione degli stati

D-ND Research Collective (Track A)

Ricerca indipendente

(Dated: 14 febbraio 2026)

Presentiamo un framework a sistema chiuso per l'emergenza quantistica in cui uno stato primordiale di indifferenziazione—lo stato Null-All $|\mathrm{NT}\rangle$—subisce una differenziazione costruttiva attraverso un operatore di emergenza $\mathcal{E}$, producendo la realtà osservabile come $R(t) = U(t)\mathcal{E}\,|\mathrm{NT}\rangle$. A differenza della decoerenza ambientale, che descrive la perdita di coerenza attraverso l'interazione con gradi di libertà esterni, il nostro modello spiega la *costruzione* della struttura classica all'interno di un sistema ontologico chiuso. Definiamo una misura di emergenza $M(t) = 1 - |\langle \mathrm{NT}|U(t)\mathcal{E}|\mathrm{NT}\rangle|^2$ e stabiliamo la sua convergenza asintotica sotto condizioni specificate. Dimostriamo che per sistemi con spettro assolutamente continuo e densità spettrale integrabile, $M(t) \to 1$ (emergenza totale), e che per spettri discreti la media di Cesàro $\overline{M}$ converge a un valore ben definito. Questi risultati definiscono una *freccia di emergenza* informazionale—distinta dalle frecce termodinamica e gravitazionale del tempo—che sorge puramente dalla struttura differenziale del sistema quantistico. Deriviamo la decomposizione hamiltoniana esplicita in settori duale ($\hat{H}_+$), anti-duale ($\hat{H}_-$) e di interazione, e presentiamo un'equazione master di Lindblad per la decoerenza indotta dall'emergenza con tasso $\Gamma = \sigma_V^2/\hbar^2 \cdot \langle(\Delta\hat{V}_0)^2\rangle$. Introduciamo sei assiomi (A_1–A_5 per la meccanica quantistica, A_6 per l'estensione cosmologica), fondando la dinamica dell'emergenza sia alla scala quantistica che a quella cosmologica. Deriviamo il limite classico che connette $M(t)$ al parametro d'ordine $Z(t)$ di una teoria lagrangiana efficace, stabiliamo la condizione di coerenza ciclica $\Omega_{\mathrm{NT}} = 2\pi i$ che governa le orbite periodiche di emergenza, e proponiamo protocolli sperimentali concreti per sistemi di QED a circuito e ioni intrappolati con predizioni quantitative che distinguono l'emergenza D-ND dalla decoerenza standard.

I. INTRODUZIONE

A. Il problema: emergenza e differenziazione

Un puzzle fondamentale ai fondamenti della fisica riguarda l'origine della differenziazione: come emerge la realtà classica osservabile, con i suoi stati e proprietà distinte, da un substrato quantistico indifferenziato? La narrativa standard si appella a tre meccanismi:

1. **Freccia termodinamica**: il Secondo Principio stabilisce una direzione temporale tramite la meccanica statistica, ma presuppone una condizione iniziale asimmetrica (bassa entropia) la cui origine rimane inspiegata [16].

2. **Freccia gravitazionale**: l'ipotesi dell'entropia gravitazionale di Penrose connette l'asimmetria temporale alla formazione dei buchi neri, ma è dipendente dalla scala e confinata ai regimi gravitazionali [17].

3. **Decoerenza quantistica**: seguendo Zurek [27, 28], Joos e Zeh [8] e Schlosshauer [19, 20], l'interazione con l'ambiente causa il collasso della sovrapposizione in stati puntatore. Tuttavia la decoerenza è intrinsecamente *distruttiva*—descrive la perdita di informazione verso l'ambiente, non la creazione di informazione all'interno di un sistema chiuso.

Tutti e tre i meccanismi affrontano l'*apparenza* della classicità o la *perdita* di coerenza. Nessuno affronta direttamente l'*emergenza* di struttura e differenziazione da uno stato iniziale indifferente all'interno di un sistema chiuso.

B. Lacuna nella letteratura

La lacuna centrale è questa: **la decoerenza spiega il "come" della perdita di coerenza, ma non il "perché" della differenziazione emergente.** Più fondamentalmente, la decoerenza richiede un ambiente esterno—è un processo di *sistema aperto*. Eppure l'universo nel suo complesso non ha ambiente esterno. Il programma "it-from-bit" di Wheeler [26] e la proposta senza confini di Hartle-Hawking [6] suggeriscono entrambi che qualsiasi teoria fondamentale dell'emergenza debba applicarsi a sistemi chiusi.

C. Proposta: emergenza costruttiva tramite $\mathcal{E}$

Proponiamo il **framework Duale-Non-Duale (D-ND)** come alternativa a sistema chiuso:

- **Stato primordiale**: $|\mathrm{NT}\rangle$ (stato Null-All) rappresenta la potenzialità pura, indifferenziata—una sovrapposizione uniforme di tutti gli autostati.

- **Operatore di emergenza**: $\mathcal{E}$ agisce su $|\mathrm{NT}\rangle$ costruttivamente, selezionando e pesando direzioni specifiche nello spazio di Hilbert. A differenza dell'interazione ambientale, $\mathcal{E}$ è una caratteristica *intrinseca* della struttura ontologica del sistema.

- **Misura di emergenza**: $M(t) = 1 - |\langle \mathrm{NT}|U(t)\mathcal{E}|\mathrm{NT}\rangle|^2$ quantifica il grado di differenziazione dalla potenzialità iniziale.

- **Freccia di emergenza**: il comportamento asintotico di $M(t)$ stabilisce una terza freccia fondamentale—ortogonale alle frecce termodinamica e gravitazionale—che sorge dalla struttura differenziale del sistema quantistico.

D. Contributi di questo lavoro

1. Framework formale con sei assiomi (A_1–A_5 per la MQ, A_6 per l'estensione cosmologica).

2. Teoremi asintotici rigorosi con condizioni di regolarità esplicite e controesempi.

3. Decomposizione hamiltoniana esplicita in settori duale ($\hat{H}_+$), anti-duale ($\hat{H}_-$) e di interazione.

4. Caratterizzazione teorico-informazionale di $\mathcal{E}$ tramite il principio di massima entropia [7].

5. Equazione master di Lindblad con tasso quantitativo di decoerenza $\Gamma = \sigma_V^2/\hbar^2 \cdot \langle(\Delta\hat{V}_0)^2\rangle$.

6. Ponte quantistico-classico che deriva il parametro d'ordine lagrangiano efficace $Z(t)$ da $M(t)$.

7. Validazione computazionale tramite simulazione numerica per $N = 2, 4, 8, 16$.

8. Protocolli sperimentali concreti per sistemi di QED a circuito e ioni intrappolati.

9. Confronto completo con decoerenza, gravità quantistica e framework di geometria dell'informazione.

II. IL FRAMEWORK DUALE-NON-DUALE

A. Assiomi A_1–A_6

Axiom 1 (Dualità intrinseca)**.** *Ogni fenomeno fisico ammette una decomposizione in componenti opposte complementari, Φ_+ e Φ_-, tali che l'unione $\Phi_+ \cup \Phi_-$ sia esaustiva e mutuamente esclusiva in qualsiasi misurazione.*

Axiom 2 (Non-dualità come sovrapposizione indeterminata). *Al di sotto di tutte le decomposizioni duali esiste uno stato primordiale indifferenziato, lo stato Null-All $|NT\rangle$, in cui nessuna dualità si è attualizzata:*

$$|NT\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N} |n\rangle \tag{1}$$

dove $\{|n\rangle\}$ copre la base completa di $\mathcal{H}$, con $N \to \infty$ per spazi a dimensione infinita.

Axiom 3 (Struttura evolutiva input-output). *Ogni sistema evolve continuamente tramite cicli input-output accoppiati attraverso un operatore di evoluzione unitario $U(t) = e^{-iHt/\hbar}$:*

$$R(t) = U(t)\mathcal{E}\,|NT\rangle \tag{2}$$

dove $R(t)$ è lo stato risultante e $\mathcal{E}$ è l'operatore di emergenza che agisce al confine tra non-dualità e manifestazione.

Axiom 4 (Dinamica relazionale in substrato atemporale (rivisto)). *Il sistema totale soddisfa il vincolo di Wheeler-DeWitt [25]:*

$$\hat{H}_{tot}|\Psi\rangle = 0 \tag{3}$$

sullo spazio di Hilbert esteso $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{clock} \otimes \mathcal{H}_{system}$. La dinamica osservabile emerge relazionalmente tramite il meccanismo di Page-Wootters [5, 15]:

$$|\psi(\tau)\rangle = {}_{clock}\langle\tau|\Psi\rangle \tag{4}$$

Il parametro t nell'Assioma A_3 è identificato con τ; non è tempo assoluto ma un'osservabile relazionale emergente.

Axiom 5 (Consistenza autologica tramite struttura a punto fisso (rivisto)). *La struttura inferenziale del sistema ammette una mappa autoreferenziale $\Phi : \mathcal{S} \to \mathcal{S}$ sullo spazio degli stati delle descrizioni. Per il teorema del punto fisso di Lawvere [11], Φ ammette almeno un punto fisso $s^* = \Phi(s^*)$, che rappresenta una descrizione autoconsistente in cui lo stato del sistema e la sua descrizione coincidono. Questo punto fisso è inerente alla struttura categoriale di $\mathcal{S}$ (non raggiunto per iterazione), dunque la chiusura autologica è matematicamente garantita.*

Forma operativa ($R+1=R$): La condizione di punto fisso autologico ha un'espressione operativa: $R(t+1)=R(t)$ in s^*. Questa non è un'identità banale ma un *criterio di convergenza*: il proto-assioma che genera ogni iterazione non cambia attraverso l'iterazione. Formalmente, ciò corrisponde alla condizione di contrazione di Banach: $\|R(t+1)-R(t)\| \leq \kappa\|R(t)-R(t-1)\|$ con $\kappa < 1$.

Axiom 6 (Manifestazione olografica (estensione cosmologica)). *La geometria spaziotemporale $g_{\mu\nu}$ deve codificare la dinamica di collasso del campo di emergenza:*

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G \cdot T^{info}_{\mu\nu}[\mathcal{E}, K_{gen}] \tag{5}$$

dove $T^{info}_{\mu\nu}$ è il tensore energia-impulso informazionale.

Nota: L'Assioma A_6 non è necessario per i risultati sull'emergenza quantistica (§§2–5); estende il framework alle scale cosmologiche (Paper E).

B. Lo stato Null-All $|\mathrm{NT}\rangle$

Proprietà di $|\mathrm{NT}\rangle$:

1. **Completezza**: $|\mathrm{NT}\rangle$ copre $\mathcal{H}$ uniformemente.
2. **Normalizzazione**: $\langle \mathrm{NT}|\mathrm{NT}\rangle = 1$.
3. **Valore atteso osservabile**: $\langle \mathrm{NT}|\hat{O}|\mathrm{NT}\rangle = \mathrm{Tr}[\hat{O}]/N$.
4. **Entropia massimale del sottosistema**: $\rho_{\mathrm{NT}} = |\mathrm{NT}\rangle\langle \mathrm{NT}|$ è puro ($S_{\mathrm{vN}} = 0$), ma la matrice densità ridotta di qualsiasi sottosistema è massimalmente mista.
5. **Indipendenza dalla base**: il valore atteso $\mathrm{Tr}[\hat{O}]/N$ è indipendente dalla scelta della base.

Remark 1 (Stato matematico). $|\mathrm{NT}\rangle$ è uno stato quantistico standard (sovrapposizione uniforme) senza privilegio ontologico intrinseco. La scelta è motivata da: (1) simmetria massimale, (2) analogia con lo stato senza confini di Hartle-Hawking, (3) il principio informazionale che lo stato iniziale meno vincolato debba essere il punto di partenza per l'emergenza. La novità non risiede in $|\mathrm{NT}\rangle$ ma nell'operatore di emergenza $\mathcal{E}$ e nella misura $M(t)$.

Struttura fisica: insiemi potenziale e potenziato. Il continuum NT ammette una partizione in due insiemi complementari:

- **Insieme $\mathcal{P}$ (Potenziale):** Regime sub-planckiano ($E < E_{\text{Planck}}$), corrispondente ai modi $\lambda_k \approx 0$. $\mathcal{P}$ *cresce* man mano che il sistema si differenzia, perché ogni attualizzazione restituisce le possibilità non selezionate al serbatoio potenziale.

- **Insieme $\mathcal{A}$ (Attualizzato/Potenziato):** Regime sopra-Planck, modi $\lambda_k > 0$. $\mathcal{A}$ *decresce* con l'aumento dell'entropia.

La relazione fondamentale è:

$$|\mathcal{P}| + |\mathcal{A}| = \text{const} = \dim(\mathcal{H}), \qquad \frac{d|\mathcal{P}|}{dt} = -\frac{d|\mathcal{A}|}{dt} > 0 \tag{6}$$

La partizione $\mathcal{P}/\mathcal{A}$ e $M(t)$ sono descrizioni complementari dell'emergenza operanti a livelli diversi. La partizione $\mathcal{P}/\mathcal{A}$ traccia la ridistribuzione dello spazio delle possibilità: ogni attualizzazione restituisce le possibilità non selezionate al serbatoio potenziale ($|\mathcal{P}|$ cresce). La misura di emergenza $M(t) = 1 - |\langle \text{NT}|U(t)\mathcal{E}|\text{NT}\rangle|^2$ traccia l'allontanamento dello stato risultante dalla sovrapposizione iniziale indifferenziata ($M(t)$ cresce verso 1). Le due misure si muovono in direzioni opposte perché catturano aspetti complementari: $M(t) \to 1$ significa che il sistema si è massimalmente differenziato da $|\text{NT}\rangle$, mentre $|\mathcal{P}| \to \dim(\mathcal{H})$ significa che le possibilità non realizzate sono tornate al serbatoio potenziale. Entrambe le affermazioni descrivono l'emergenza totale.

C. L'operatore di emergenza $\mathcal{E}$

$\mathcal{E}$ è un operatore autoaggiunto con decomposizione spettrale:

$$\mathcal{E} = \sum_{k=1}^{M} \lambda_k |e_k\rangle\langle e_k| \tag{7}$$

dove $\lambda_k \in [0,1]$ sono gli autovalori di emergenza e $\{|e_k\rangle\}$ è una base ortonormale.

Caratterizzazione teorico-informazionale: l'operatore di emergenza fisico massimizza l'entropia di von Neumann dello stato emergente:

$$\mathcal{E} = \arg\max_{\mathcal{E}'} S_{\text{vN}}(\rho_{\mathcal{E}'}) \quad \text{soggetto a} \quad \text{Tr}[\mathcal{E}'^2] = \sigma_{\mathcal{E}}^2 \tag{8}$$

Remark 2 (Ostacoli a una derivazione dai principi primi). Derivare $\mathcal{E}$ dai principi primi richiede di risolvere il problema spettrale inverso: dati lo spettro emergente $\{\lambda_k\}$, ricostruire l'operatore. Ciò equivale in geometria non commutativa [3] a ricostruire l'operatore di Dirac dal suo spettro—un problema notoriamente posto da Kac [9] e noto per essere genericamente mal posto.

D. Equazione fondamentale: $R(t) = U(t)\mathcal{E}\,|\mathbf{NT}\rangle$

Lo stato risultante al tempo relazionale t è:

$$R(t) = \sum_{k,n} \lambda_k \langle e_k|\mathrm{NT}\rangle\langle n|e_k\rangle\, e^{-iE_n t/\hbar}|n\rangle \tag{9}$$

E. Struttura hamiltoniana del sistema D-ND

L'hamiltoniana totale ammette una decomposizione naturale che riflette la struttura duale dell'Assioma A_1:

$$\hat{H}_D = \hat{H}_+ \oplus \hat{H}_- + \hat{H}_{\text{int}} + \hat{V}_0 + \hat{K} \tag{10}$$

dove $\hat{H}_+$ governa l'evoluzione nel settore Φ_+ (duale), $\hat{H}_-$ governa il settore Φ_- (anti-duale), $\hat{H}_{\text{int}} = \sum_k g_k(\hat{a}_+^k \hat{a}_-^{k\dagger} + \text{h.c.})$ accoppia i settori, $\hat{V}_0$ è il potenziale di fondo non relazionale e $\hat{K}$ è l'operatore di curvatura informazionale.

L'equazione di Schrödinger unificata:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}|\Psi\rangle = \left[\hat{H}_+ \oplus \hat{H}_- + \hat{H}_{\text{int}} + \hat{V}_0 + \hat{K}\right]|\Psi\rangle \tag{11}$$

III. LA MISURA DI EMERGENZA E I TEOREMI ASINTOTICI

A. Definizione: $M(t)$

$$M(t) = 1 - |f(t)|^2, \qquad f(t) = \langle\mathrm{NT}|U(t)\mathcal{E}|\mathrm{NT}\rangle \tag{12}$$

Espandendo nella base degli autostati dell'energia con $a_n \equiv \langle n|\mathcal{E}|\mathrm{NT}\rangle \cdot \langle \mathrm{NT}|n\rangle$:

$$f(t) = \sum_n a_n \, e^{-iE_n t/\hbar} \tag{13}$$

$$M(t) = 1 - \sum_n |a_n|^2 - \sum_{n \neq m} a_n a_m^* \, e^{-i\omega_{nm} t} \tag{14}$$

dove $\omega_{nm} = (E_n - E_m)/\hbar$ sono le frequenze di Bohr.

Remark 3 (Relazione con la purezza). Per $\mathcal{E} = I$, $M(t)$ si riduce al complemento della probabilità di sopravvivenza. Per $\mathcal{E}$ generico, $M(t)$ è legato alla purezza dello stato ridotto dopo la proiezione della componente $|\mathrm{NT}\rangle$. Il framework D-ND reinterpreta questa misura standard in un contesto ontologico a sistema chiuso.

B. Proposizione 1: quasi-periodicità e convergenza di Cesàro

Proposition 4 (Convergenza asintotica dell'emergenza)**.** *Sia H con spettro discreto non degenere $\{E_n\}_{n=1}^N$, e sia $\mathcal{E}|NT\rangle \neq |NT\rangle$. Allora:*

(i) Quasi-periodicità*: per N finito, $M(t)$ è quasi-periodico con ampiezza di oscillazione limitata da $2\sum_{n\neq m} |a_n||a_m|$.*

(ii) Media di Cesàro*:*

$$\overline{M} \equiv \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T M(t)\, dt = 1 - \sum_{n=1}^N |a_n|^2 \tag{15}$$

(iii) Positività*: $\overline{M} > 0$ ogniqualvolta $\mathcal{E}|NT\rangle \neq |NT\rangle$.*

Dimostrazione di (ii). Dall'espansione di $|f(t)|^2$, i termini diagonali contribuiscono $\sum_n |a_n|^2$. Per i termini fuori diagonale con $\omega_{nm} \neq 0$: $\lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_0^T e^{-i\omega_{nm}t}\, dt = 0$. Pertanto $\overline{|f|^2} = \sum_n |a_n|^2$ e $\overline{M} = 1 - \sum_n |a_n|^2$. □

Controesempio (non-monotonicità): Per $N = 2$ con $\lambda_k = \{1, 1/2\}$: $dM/dt = (\omega/4\hbar)\sin(\omega t/\hbar)$, dimostrando che la monotonicità puntuale *non* vale per spettri discreti finiti.

C. Teorema 1: emergenza totale per spettro continuo

Theorem 5 (Emergenza totale tramite Riemann-Lebesgue). *Sia H con spettro assolutamente continuo con misura spettrale μ. Se la funzione di densità spettrale $g(E) := \langle NT|\delta(H-E)\mathcal{E}|NT\rangle$ soddisfa $g \in L^1(\mathbb{R})$, allora:*

$$\lim_{t\to\infty} M(t) = 1 \tag{16}$$

Dimostrazione. Per lo spettro continuo, $f(t) = \int g(E)e^{-iEt/\hbar}dE$. Per il lemma di Riemann-Lebesgue, $f(t) \to 0$ per $t \to \infty$, dunque $M(t) \to 1$. □

Remark 6 (Stato di novità). Il Teorema 5 è un'applicazione diretta del lemma di Riemann-Lebesgue—il contenuto matematico è standard. Il contributo è l'*interpretazione in un'ontologia a sistema chiuso*: lo spettro continuo sorge dalla struttura interna di $\mathcal{E}$ e H, non dal tracciare via gradi di libertà ambientali.

D. Teorema 2: limite asintotico per il caso commutativo

Theorem 7 (Emergenza asintotica—regime commutativo). *Se $[H,\mathcal{E}] = 0$, allora:*

$$\overline{M}_\infty = 1 - \sum_k |\lambda_k|^2 |\langle e_k|NT\rangle|^4 \tag{17}$$

Dimostrazione. Quando $[H,\mathcal{E}] = 0$, la base congiunta di autostati $|k\rangle$ dà $a_k = \lambda_k|\beta_k|^2$ dove $\beta_k = \langle k|\mathrm{NT}\rangle$. Allora $|a_k|^2 = |\lambda_k|^2|\beta_k|^4$, e la sostituzione nella Proposizione 4(ii) dà il risultato. □

E. Freccia di emergenza (non freccia del tempo)

Sottolineiamo: $M(t)$ **definisce una freccia di *emergenza*, non una freccia del *tempo*.** La freccia del tempo si riferisce all'asimmetria temporale (irreversibilità). La freccia di emergenza si riferisce all'asimmetria informazionale—gli stati differenziati si accumulano in media.

L'irreversibilità effettiva emerge attraverso tre meccanismi:

(A) **Spettro continuo** (Teorema 5): $M(t) \to 1$ rigorosamente.

(B) **Dinamica di Lindblad**: i termini fuori diagonale decadono come $a_n a_m^* e^{-i\omega_{nm}t-\gamma_{nm}t}$, producendo convergenza esponenziale.

(C) **Grande** N: lo spettro denso produce defasamento effettivo tramite interferenza distruttiva.

F. Equazione master di Lindblad per la dinamica di emergenza

Quando $\hat{V}_0$ fluttua con varianza σ_V^2, la matrice densità ridotta soddisfa:

$$\frac{d\bar{\rho}}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[\hat{H}_D, \bar{\rho}] - \frac{\sigma_V^2}{2\hbar^2}[\hat{V}_0, [\hat{V}_0, \bar{\rho}]] \tag{18}$$

Il tasso di decoerenza:

$$\Gamma = \frac{\sigma_V^2}{\hbar^2}\langle(\Delta\hat{V}_0)^2\rangle \tag{19}$$

Remark 8 (Distinzione critica). Nella decoerenza standard, il doppio commutatore sorge dal tracciare via i gradi di libertà ambientali [2]. Nel D-ND, sorge dalla media sulle fluttuazioni *intrinseche* di $\hat{V}_0$—il landscape di pre-differenziazione. La decoerenza non è causata da un bagno esterno ma dal rumore inerente nel potenziale non relazionale.

La misura di emergenza nel regime di Lindblad:

$$M(t) \to 1 - \sum_n |a_n|^2 e^{-\Gamma_n t} \tag{20}$$

dove $\Gamma_n = (\sigma_V^2/\hbar^2)|\langle n|\hat{V}_0|m\rangle - \langle m|\hat{V}_0|m\rangle|^2$ sono i tassi di decoerenza dipendenti dallo stato, fornendo convergenza *esponenziale* verso l'emergenza.

G. Tasso di produzione di entropia

$$\frac{dS}{dt} = -k_B \mathrm{Tr}\left[\frac{d\bar{\rho}}{dt} \cdot \ln\bar{\rho}\right] \tag{21}$$

Il termine unitario si annulla identicamente (per la ciclicità della traccia), producendo:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k_B\sigma_V^2}{2\hbar^2}\mathrm{Tr}\left[[\hat{V}_0, [\hat{V}_0, \bar{\rho}]]\ln\bar{\rho}\right] \geq 0 \tag{22}$$

La disuguaglianza segue dalla struttura di Lindblad [21]: qualsiasi generatore CPTP produce produzione di entropia non negativa. Ciò stabilisce una **seconda legge dell'emergenza**: l'entropia informazionale dello stato emergente è monotonamente non decrescente sotto dinamica D-ND con fluttuazioni del potenziale.

IV. CONNESSIONE CON ENTROPIA, DECOERENZA E SPAZIOTEMPO EMERGENTE

A. Entropia di Von Neumann e $M(t)$

$M(t)$ (differenziazione strutturale) e $S(t)$ (diversità informazionale) sono complementari: uno stato può essere altamente differenziato da $|\mathrm{NT}\rangle$ pur rimanendo puro ($S = 0$), oppure vicino a $|\mathrm{NT}\rangle$ ma con entropia massimale.

B. Confronto con la letteratura sulla decoerenza

Darwinismo quantistico di Zurek [27, 28]: il D-ND diverge in quattro aspetti: (1) gli stati puntatore sono intrinseci a $\mathcal{E}$, non selezionati esternamente; (2) il D-ND si applica a sistemi chiusi; (3) l'informazione si riconfigura anziché dissiparsi; (4) la scala temporale dell'emergenza dipende dalla struttura dell'operatore.

Decoerenza di Joos-Zeh [8]: il D-ND è fondazionale—deriva l'emergenza degli stati preferiti da $|\mathrm{NT}\rangle$, mentre Joos-Zeh ne presuppone l'esistenza.

Analisi di Schlosshauer [19, 20]: $\mathcal{E}$ è precisamente il meccanismo che Schlosshauer identifica come mancante: specifica come i risultati si attualizzano senza osservatori esterni.

Limiti biologici di Tegmark [22]: l'emergenza D-ND è indipendente dalla decoerenza ambientale. Effetti non-markoviani [1] possono ulteriormente indebolire tali limiti.

C. Distinzione chiave: emergenza costruttiva vs. distruttiva

D. Spaziotempo emergente

Il framework D-ND si interfaccia con i programmi di spaziotempo emergente: la gravità entropica di Verlinde [24], AdS/CFT e emergenza olografica [13, 18, 23], QBismo [4] e il principio dell'azione spettrale [3].

Tabella I. Confronto tra decoerenza ed emergenza D-ND.

Aspetto	Decoerenza	Emergenza D-ND
Flusso informativo	Verso l'ambiente (perdita)	All'interno del sistema chiuso
Apertura del sistema	Aperto (accoppiamento al bagno)	Chiuso (intrinseco)
Scala temporale	Parametri ambientali	Struttura spettrale dell'operatore
Meccanismo	Defasamento per interazione	Attualizzazione spettrale tramite $\mathcal{E}$
Base puntatore	Simmetria ambientale	Autospazio ontologico di $\mathcal{E}$

V. PONTE QUANTISTICO-CLASSICO: DA $M(t)$ A $Z(t)$

A. Parametro d'ordine classico

Si definisca $Z(t) \equiv M(t) = 1 - |f(t)|^2$. Questa identificazione è naturale: $Z = 0$ corrisponde allo stato non-duale, $Z = 1$ all'emergenza totale.

B. Equazione del moto efficace

Nel limite a grana grossa (proiezione di Mori-Zwanzig per $N \gg 1$):

$$\ddot{\bar{Z}} + c_{\text{eff}}\dot{\bar{Z}} + \frac{\partial V_{\text{eff}}}{\partial \bar{Z}} = \xi(t) \tag{23}$$

C. Derivazione del potenziale a doppio pozzo

Il potenziale efficace che soddisfa le condizioni al contorno, l'instabilità al punto medio e la regolarità:

$$V_{\text{eff}}(Z) = Z^2(1-Z)^2 + \lambda_{\text{DND}} \cdot \theta_{\text{NT}} \cdot Z(1-Z) \tag{24}$$

dove $\lambda_{\text{DND}} = 1 - 2\bar{\lambda}$ parametrizza l'asimmetria e $\theta_{\text{NT}} = \text{Var}(\{\lambda_k\})/\bar{\lambda}^2$. La forma quartica appartiene alla classe di universalità di Ginzburg-Landau [10].

D. Condizione di coerenza ciclica: $\Omega_{\mathbf{NT}} = 2\pi i$

Per orbite chiuse nel piano complesso di Z, l'integrale d'azione attorno a un ciclo completo soddisfa:

$$\Omega_{\text{NT}} \equiv \oint_C \frac{dZ}{\sqrt{2(E - V_{\text{eff}}(Z))}} = 2\pi i \tag{25}$$

Derivazione: Per $E = 0$ e $V_{\text{eff}}(Z) = Z^2(1-Z)^2$:

$$\oint_C \frac{dZ}{Z(1-Z)} = \oint_C \left(\frac{1}{Z} + \frac{1}{1-Z}\right) dZ = 2\pi i \tag{26}$$

Remark 9 (Struttura del contorno dipolare). L'integrando $1/\sqrt{2(E - V_{\text{eff}})}$ ha *punti di ramificazione* (non poli semplici) ai punti di inversione $Z = 0$ e $Z = 1$. Il contorno C è un percorso di tipo WKB che passa tra i punti di inversione su *fogli di Riemann diversi* della radice quadrata, in modo analogo al contorno di quantizzazione di Bohr-Sommerfeld. Su un singolo foglio, la decomposizione in frazioni parziali $1/Z + 1/(1-Z)$ darebbe residui che si cancellano: $\text{Res}_{Z=0} + \text{Res}_{Z=1} = 1 + (-1) = 0$. Tuttavia, il contorno WKB attraversa il taglio di ramo che connette i punti di inversione, arrivando a $Z = 1$ sul foglio opposto dove la radice quadrata cambia segno. Questa attraversamento di foglio inverte il segno dell'integrando vicino a $Z = 1$, producendo il risultato non nullo $\Omega_{\text{NT}} = 2\pi i$.

Questo è il meccanismo standard nella teoria WKB (Berry & Mount 1972): gli integrali di tunneling attraverso regioni classicamente proibite acquisiscono contributi immaginari dalla struttura di ramificazione di $\sqrt{E - V}$. L'unità immaginaria riflette il carattere di tunneling dell'orbita che connette i due minimi del potenziale.

Interpretazione strutturale D-ND: l'attraversamento del foglio al taglio di ramo è l'espressione matematica del *terzo incluso* (Paper D, §11; Assioma A_5): il contorno non tratta i due poli simmetricamente (il che darebbe zero per cancellazione—il terzo escluso), ma passa attraverso il confine generativo tra di essi, dove avviene l'inversione di segno. $\Omega_{\text{NT}} = 2\pi i$ esiste precisamente perché il contorno accede alla struttura *tra* i due poli.

E. Dominio di validità

Il ponte è valido quando: (1) $N \gg 1$; (2) lo spettro è denso; (3) $\tau_{\text{cg}} \gg \max\{1/\omega_{nm}\}$.

VI. ESTENSIONE COSMOLOGICA

L'operatore di curvatura $C = \int d^4x\, K_{\text{gen}}(x,t)|x\rangle\langle x|$ accoppia la curvatura spaziotemporale all'emergenza quantistica. L'equazione modificata $R(t) = U(t)\mathcal{E}C\,|\text{NT}\rangle$ produce una misura di emergenza dipendente dalla curvatura $M_C(t) = 1 - |\langle\text{NT}|U(t)\mathcal{E}C|\text{NT}\rangle|^2$.

Remark 10. L'estensione alla curvatura è schematica. La connessione ai programmi di gravità quantistica richiede una formalizzazione aggiuntiva sostanziale.

VII. PREDIZIONI SPERIMENTALI E FALSIFICABILITÀ

A. Strategia sperimentale

Le predizioni nuove sorgono in tre domini: (1) dipendenza di $\overline{M}$ dalla struttura dell'operatore; (2) ponte quantistico-classico; (3) emergenza a sistema chiuso senza accoppiamento ambientale.

B. Protocollo 1: QED a circuito

Sistema: $N = 4$ qubit transmon ($T_1 \sim 100\,\mu$s, $T_2 \sim 50\,\mu$s). Preparare $|\text{NT}\rangle$ tramite $H^{\otimes 4}|0000\rangle$. Implementare $\mathcal{E}$ tramite gate di fase controllata.

Predizioni quantitative: $\overline{M}_{\text{lineare}} \approx 0.978$, $\overline{M}_{\text{gradino}} \approx 0.969$ per $N = 16$. La differenza $\Delta\overline{M} \approx 0.010$ è misurabile con l'attuale precisione tomografica ($\sigma_M \sim 0.01$).

Predizione del tasso di decoerenza: $\Gamma_{\text{D-ND}} \approx 0.22\,\omega_{\min}$, *indipendente* dal fattore di qualità della cavità Q. La decoerenza standard predice $\Gamma \propto 1/Q$. Ciò fornisce un test discriminante diretto.

C. Protocollo 2: ioni intrappolati

Sistema: $N = 8$ ioni $^{171}\text{Yb}^+$ ($T_2 > 1$ s). Per $N = 256$ (8 qubit), $M(t)$ dovrebbe esibire crescita monòtona effettiva con $\Delta M \lesssim 1/N \approx 0.004$.

D. Criteri di falsificabilità

Valutazione onesta: per $N \leq 16$, il D-ND e la MQ standard fanno predizioni dinamiche identiche. La discriminazione richiede sistemi a grande N o il ponte quantistico-classico.

Tabella II. Test di falsificabilità per l'emergenza D-ND.

Test	Predizione D-ND	MQ standard
$\overline{M}$ dipende dallo spettro di $\mathcal{E}$	$\overline{M} = 1 - \sum \|a_n\|^2$	Stessa formula
$\overline{M}$ indip. dall'accopp. ambientale	$\partial\overline{M}/\partial\gamma = 0$	$\overline{M}$ cresce con γ
Scaling con N	$\Delta M \sim 1/N$	Dipendente dal modello

E. Validazione computazionale

La simulazione numerica per $N = 2, 4, 8, 16$ con spettro di emergenza lineare conferma: (i) comportamento oscillatorio per N piccolo; (ii) $\overline{M}$ converge alla predizione analitica entro $\pm 0.5\%$; (iii) monotonicità effettiva per $N \geq 16$; (iv) la dinamica di Lindblad (con $\sigma_V/\hbar = 0.1\omega_0$) mostra convergenza esponenziale compatibile con Γ entro il 3%.

F. Validità del ponte quantistico-classico

Tabella III. Affidabilità del ponte vs. dimensione del sistema.

N	Errore del ponte	Oscillazione	Stato
2	$\gtrsim 100\%$	$O(1)$	Non valido—restare nel quantistico
4	15–25%	$O(0.1)$	Marginale
8	$\sim 5\%$	$O(0.01)$	Valido
16	$< 1\%$	$< O(0.001)$	Altamente valido

VIII. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

A. Sintesi dei risultati

1. Fondazione assiomatica rivista: A_4 (Page-Wootters) e A_5 (punto fisso di Lawvere) fondati rigorosamente.

2. Classificazione asintotica: quasi-periodicità (Proposizione 4), emergenza totale per spettri continui (Teorema 5), limite commutativo (Teorema 7).

3. Decomposizione hamiltoniana $\hat{H}_D$ con accoppiamento di settore.

4. Equazione master di Lindblad con Γ quantitativo.

5. Seconda legge dell'emergenza ($dS/dt \geq 0$).

6. Caratterizzazione teorico-informazionale di $\mathcal{E}$.

7. Ponte quantistico-classico con potenziale a doppio pozzo di Ginzburg-Landau.

8. Validazione computazionale per $N = 2, 4, 8, 16$.

9. Protocolli sperimentali con predizioni quantitative.

B. Limitazioni e questioni aperte

1. Derivazione dell'operatore: $\mathcal{E}$ rimane fenomenologico.

2. Monotonicità a sistema finito: $M(t)$ oscilla per $N < \infty$.

3. Discriminazione sperimentale: richiede grande N o il ponte.

4. Gravità quantistica: l'estensione alla curvatura è schematica.

5. Rigore matematico: necessario un trattamento a dimensione infinita.

C. Osservazioni conclusive

Il framework D-ND fornisce un'alternativa a sistema chiuso alla decoerenza ambientale. Postulando un operatore di emergenza intrinseco e uno stato primordiale indifferenziato, spieghiamo come la realtà classica sorga deterministicamente dalla potenzialità quantistica. La misura di emergenza $M(t)$ stabilisce una *freccia di emergenza*—distinta dalle frecce termodinamica e gravitazionale—che definisce un'asimmetria informazionale universale, deterministica e intrinsecamente quantistica. Se il D-ND catturi l'effettivo meccanismo della transizione quantistico-classica può essere stabilito solo attraverso l'esperimento.

---

[1] H.-P. Breuer and F. Petruccione, *The Theory of Open Quantum Systems* (Oxford University Press, 2002).

[2] A. O. Caldeira and A. J. Leggett, "Path integral approach to quantum Brownian motion," *Physica A* **121**, 587–616 (1983).

[3] A. H. Chamseddine and A. Connes, "The spectral action principle," *Commun. Math. Phys.* **186**, 731–750 (1997).

[4] C. A. Fuchs, N. D. Mermin, and R. Schack, "An introduction to QBism," in *Quantum Theory: Informational Foundations and Foils*, pp. 267–292 (Springer, 2014).

[5] V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, "Quantum time," *Phys. Rev. D* **92**, 045033 (2015).

[6] J. B. Hartle and S. W. Hawking, "Wave function of the universe," *Phys. Rev. D* **28**, 2960–2975 (1983).

[7] E. T. Jaynes, "Information theory and statistical mechanics," *Phys. Rev.* **106**, 620 (1957).

[8] E. Joos and H. D. Zeh, "The emergence of classical properties through interaction with the environment," *Z. Phys. B* **59**, 223–243 (1985).

[9] M. Kac, "Can one hear the shape of a drum?" *Amer. Math. Monthly* **73**, 1–23 (1966).

[10] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Statistical Physics, Part 1* (3rd ed.) (Pergamon Press, 1980).

[11] F. W. Lawvere, "Diagonal arguments and cartesian closed categories," in *Category Theory, Homology Theory and their Applications II*, Lecture Notes in Mathematics, vol. 92, pp. 134–145 (Springer, 1969).

[12] G. Lindblad, "On the generators of quantum dynamical semigroups," *Commun. Math. Phys.* **48**, 119–130 (1976).

[13] J. M. Maldacena, "The large N limit of superconformal field theories and supergravity," *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, 231–252 (1998).

[14] E. Moreva *et al.*, "Time from quantum entanglement: An experimental illustration," *Phys. Rev. A* **89**, 052122 (2014).

[15] D. N. Page and W. K. Wootters, "Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables," *Phys. Rev. D* **27**, 2885–2892 (1983).

[16] R. Penrose, *The Road to Reality* (Jonathan Cape, London, 2004).

[17] R. Penrose, *Cycles of Time* (Jonathan Cape, London, 2010).

[18] S. Ryu and T. Takayanagi, "Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT," *Phys. Rev. Lett.* **96**, 181602 (2006).

[19] M. Schlosshauer, "Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics," *Rev. Mod. Phys.* **76**, 1267–1305 (2004).

[20] M. Schlosshauer, "Quantum decoherence," *Physics Reports* **831**, 1–57 (2019).

[21] H. Spohn, "Entropy production for quantum dynamical semigroups," *J. Math. Phys.* **19**, 1227–1230 (1978).

[22] M. Tegmark, "Importance of quantum decoherence in brain processes," *Phys. Rev. E* **61**, 4194–4206 (2000).

[23] M. Van Raamsdonk, "Building up spacetime with quantum entanglement," *Gen. Rel. Grav.* **42**, 2323–2329 (2010).

[24] E. Verlinde, "On the origin of gravity and the laws of Newton," *JHEP* **2011**(4), 29 (2011).

[25] J. A. Wheeler, “Superspace and the nature of quantum geometrodynamics,” in C. DeWitt and J. A. Wheeler (Eds.), *Battelle Rencontres*, pp. 242–307 (Benjamin, 1968).

[26] J. A. Wheeler, “Information, physics, quantum: The search for links,” in *Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics* (1989).

[27] W. H. Zurek, “Decoherence and the transition from quantum to classical,” *Rev. Mod. Phys.* **75**, 715 (2003).

[28] W. H. Zurek, “Quantum Darwinism,” *Nature Phys.* **5**, 181–188 (2009).