

QUARTO STUDIO AVANZATO DI RICERCA SULLA FISICA INFORMAZIONALE

P4 - Interazione con la Teoria Quantistica dell'Informazione (QIT)

Autore: Ivan Carenzi

ORCID: 0009-0006-0108-7808

Serie: Studi Avanzati di Ricerca sulla Fisica Informazionale

Problema: P4 — Interazione con la Teoria Quantistica dell'Informazione (QIT)

Documento: Studio Avanzato (Risoluzione del Problema)

Data: 2026-01-09

Lingua: Italiano

Abstract:

Questo Studio Avanzato affronta il problema dell'integrazione rigorosa tra Teoria Quantistica dell'Informazione e Fisica Informazionale, formalizzando un ponte operativo tra stati quantistici ($|\psi\rangle, \rho$), potenziale informazionale $\Phi(t)$ e traiettoria di autocoscienza $R(t)$. La soluzione introduce una mappa di compatibilità $\Xi(\rho; t)$ e un principio variazionale fondato su un funzionale unificato $Q(t)$, definito su traiettorie di stati soggette a vincoli fisici (CPTP) e a criteri di coerenza informazionale. In tale quadro, il "collasso" non è un postulato esterno, ma emerge come attualizzazione: un minimo stabile di $Q(t)$ che seleziona esiti compatibili con $\Phi(t)$ e strutturalmente sostenuti dalla topologia di $R(t)$, preservando la regola di Born. La costruzione è esplicitamente compatibile con CMDE 4.1 (nelle tre fasi z_1, z_2, z_3) e coerente con il corpus FI consolidato (P1–P3).

Parole chiave: Teoria Quantistica dell'Informazione, Fisica Informazionale, $\Phi(t)$, $R(t)$, collasso quantistico, attualizzazione, funzionale $Q(t)$, CPTP, regola di Born, CMDE 4.1

Introduzione del problema

Questo studio indaga il nesso profondo tra la Teoria Quantistica dell'Informazione (QIT) e la Fisica Informazionale (FI). L'obiettivo è stabilire un'omologia rigorosa tra stati quantistici puri $|\psi\rangle$ (o stati misti rappresentati da matrici densità ρ), il potenziale informazionale $\Phi(t)$ e il processo di attualizzazione lungo la traiettoria di autocoscienza $R(t)$. A partire dai risultati già consolidati della FI (in particolare P1, P2 e P3), si intende formulare un funzionale unificato $Q(t)$ che colleghi in modo operativo QIT e FI, chiarendo quando e come il "collasso" quantistico corrisponda, nella nostra cornice, a un atto di attualizzazione lungo $R(t)$.

Obiettivo della risoluzione

L'obiettivo del problema P4 è quadruplo.

Primo, definire un morfismo tra lo spazio degli stati quantistici (lo spazio proiettivo di Hilbert per stati puri o lo spazio delle densità per stati misti) e il manifold informazionale della FI dove vive $\Phi(t)$. Questo morfismo deve essere ben definito, continuo e coerente con le strutture concettuali già introdotte in P1.

Secondo, caratterizzare l'attualizzazione come una selezione coerente, nel senso di P3, indotta da $R(t)$ su una decomposizione POVM (Positive Operator-Valued Measure) della QIT. In altri termini, si vuole interpretare la selezione di un esito di misura non come un semplice postulato, ma come risultato di un principio strutturale informazionale.

Terzo, formulare il funzionale unificato $Q(t)$ che, in condizioni precise, stabilizzi la dinamica verso esiti conformi alla regola di Born, integrando al tempo stesso i vincoli di coerenza informazionale introdotti dalla FI.

Quarto, integrare il ruolo delle tre fasi di CMDE 4.1, caratterizzate dalle funzioni $z_1(t)$, $z_2(t)$, $z_3(t)$ e dalle loro derivate, come modulatori universali delle scale di decoerenza e di attualizzazione.

Sviluppo teorico

1. Spazio degli stati e sollevamento informativo

Si consideri uno spazio di Hilbert \mathcal{H} finito-dimensionale. Lo spazio degli stati puri può essere descritto come spazio proiettivo $P(\mathcal{H})$, mentre gli stati misti sono descritti dall'insieme $D(\mathcal{H})$ delle matrici densità ρ , definite come operatori positivi a traccia unitaria.

La FI introduce un manifold informativo $M\Phi$, nel quale il potenziale $\Phi(t)$ è una funzione regolare del tempo e, per effetto dei risultati di P1, è legato a $R(t)$ e a $z(t)$. Per collegare uno stato quantistico a questo manifold informativo, si definisce un sollevamento informativo:

$$I : D(\mathcal{H}) \rightarrow M\Phi$$

$$\rho \mapsto \Xi(\rho; t) = \text{Tr}(\rho \Pi\Phi(t)),$$

dove $\Pi\Phi(t)$ è un proiettore (o più in generale un elemento POVM $E\Phi(t)$) indotto da $\Phi(t)$ tramite le strutture unificate di P1. Il potenziale $\Phi(t)$ identifica, a ogni istante, una direzione informativa privilegiata che seleziona una sub-geometria, cioè uno spazio di esiti ammissibili. La quantità $\Xi(\rho; t)$, compresa tra 0 e 1, misura la compatibilità istantanea tra lo stato quantistico ρ e la configurazione informativa identificata da $\Phi(t)$.

Per stati puri $|\psi\rangle$, il sollevamento si riduce a $\Xi(|\psi\rangle\langle\psi|; t) = \langle\psi| \Pi\Phi(t) |\psi\rangle$. In termini proiettivi, $\Phi(t)$ agisce come un campo di direzioni sulla varietà $P(\mathcal{H})$, e Ξ è il pairing tra lo stato $|\psi\rangle$ e tale campo.

2. Attualizzazione come selezione lungo $R(t)$

Nel quadro della QIT, una misura POVM $\{E_i(t)\}$ produce esiti con probabilità $p_i(t) = \text{Tr}(\rho_t E_i(t))$, e una regola di post-misura che evolve lo stato ρ_t verso una famiglia di stati post-misura $\rho_i(t)$. La trasformazione complessiva è descritta da operatori di Kraus che realizzano una mappa completamente positiva e a traccia preservata (canale CPTP).

Nella FI, l'attualizzazione è l'evento in cui, lungo $R(t)$, un potenziale $\Phi(t)$ diventa atto, selezionando una configurazione coerente, secondo i criteri di P3, e stabilizzandola. Si assume che, a ogni istante t , $\Phi(t)$ determini un POVM $E\Phi(t) = \{E_i(t)\}$, che contiene in particolare un elemento allineato $E_\star(t)$ associato alla direzione selezionata da $\Phi(t)$.

Si introduce il tasso di attualizzazione:

$$\lambda_{\text{att}}(t) = \kappa_R(t) \cdot \Xi(\rho_t; t) \cdot \sigma_z(t),$$

dove $\kappa_R(t)$ è una funzione che misura l'intensità topologica locale della traiettoria $R(t)$, derivata dagli invarianti di P2, $\Xi(\rho_t; t)$ è la compatibilità informativa definita sopra, e $\sigma_z(t)$ è un modulatore cosmologico derivato da CMDE 4.1.

La funzione $\sigma_z(t)$ è definita come:

$$\sigma_z(t) = (1 + z(t))^{-\alpha},$$

con $\alpha > 0$ e $z(t)$ appartenente a una delle tre forme della CMDE 4.1:

$$z_1(t) = 1,515 \times 10^{-40} \cdot t^{9,31} - 1,$$

$$z_2(t) = \exp(y^2(\ln t)) - 1, \text{ con } y^2(\ln t) \text{ funzione di tipo log-Hermite soggetta a condizioni } (Y_1, M_1, Y_2, M_2),$$

$$z_3(t) = (t_0 / t)^{3,2273} - 1.$$

Il parametro α determina come la scala informazionale risente del regime cosmologico. L'evento di attualizzazione si realizza quando un opportuno funzionale di azione, definito nel seguito, raggiunge un estremo e, in accordo con P3, quando la coerenza $q_{P3}(t)$ supera una soglia τ su un intervallo temporale in cui la funzione è quasi stazionaria, implicando una selezione robusta.

3. Il ruolo delle coerenze e della topologia

Dal problema P3 si assume l'esistenza di una metrica di coerenza $q_{P3}(t)$, compresa tra 0 e 1 e applicabile anche alle matrici densità. Questa metrica può essere definita, ad esempio, a partire dallo spettro della matrice densità o da opportune norme che misurano la deviazione dalla purezza. In questo studio la si usa come guard-rail: un'attualizzazione stabile richiede che $q_{P3}(t)$ sia maggiore o uguale a una soglia τ e che la sua varianza sia bassa su un intervallo $[t, t + \varepsilon]$. Dal problema P2 si eredita una famiglia di invarianti topologici locali $T(R; t)$, che qui vengono sintetizzati nella funzione $\kappa_R(t)$. Questi invarianti controllano quali sottospazi dell'insieme degli stati quantistici sono preferiti dalla morfologia informazionale della traiettoria $R(t)$. In presenza di topologia favorevole ($\kappa_R(t) > 0$), i rami che sono più compatibili con $\Phi(t)$ tendono a essere privilegiati.

4. Il funzionale unificato $Q(t)$

Si definisce il funzionale di azione quantistico-informazionale:

$$Q[\rho(\cdot); \Phi, R] = \int_{t_0}^{t_1} [\beta H(\rho_t) - \gamma \Xi(\rho_t; t) - \eta \kappa_R(t) q_{P3}(\rho_t, t) + \mu C_{\text{dyn}}(\rho_t, \dot{\rho}_t, t)] \sigma_z(t) dt,$$

dove:

$H(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$ è l'entropia di von Neumann,

$\Xi(\rho_t; t) = \text{Tr}(\rho_t \Pi \Phi(t))$ è l'allineamento informazionale con $\Phi(t)$,

$\kappa_R(t) q_{P3}(\rho_t, t)$ misura la coerenza stabile nella topologia di $R(t)$,

$C_{\text{dyn}}(\rho_t, \dot{\rho}_t, t)$ è un termine di vincolo che impone l'evoluzione fisica (canali CPTP, generatori di tipo Lindblad),

$\sigma_z(t)$ è il modulatore cosmologico derivato da CMDE 4.1,

β, γ, η, μ e α sono parametri reali non negativi che pesano i diversi contributi.

Il principio variazionale adottato è un principio di minimo: tra tutte le traiettorie ρ_t compatibili con i vincoli fisici (positività, traccia unitaria, dinamiche CPTP), le traiettorie fisicamente realizzate sono quelle che minimizzano il funzionale Q . Le equazioni di stazionarietà $\delta Q / \delta \rho_t = 0$, soggette ai

vincoli, descrivono quindi le condizioni in cui un certo processo di misura conduce a esiti che risultano stabili in senso informativo.

In prossimità di una misura, le soluzioni dell'equazione di stazionarietà si concentrano in corrispondenza di proiettori $E_i(t)$ che massimizzano la compatibilità Ξ , compatibilmente con il termine $\kappa_R(t) \propto P_3(t)$. In tali condizioni, la probabilità $p_i(t) = \text{Tr}(\rho_t E_i(t))$ rimane quella data dalla regola di Born, ma la realizzazione effettiva di un esito è governata dal paesaggio informativo definito da $\Phi(t)$ e dalla struttura di Q . L'esito che si verifica è quello che ottimizza il compromesso tra ordine (entropia), allineamento a $\Phi(t)$ e stabilità morfologica, sotto la modulazione $\sigma_z(t)$.

Lemma di selezione coerente. Se $\Pi\Phi(t)$ appartiene alla decomposizione $\{E_i(t)\}$ e se, su un intervallo $[t, t + \varepsilon]$, la coerenza $\propto P_3(t)$ è superiore alla soglia τ con varianza bassa (criterio di plateau) e $\kappa_R(t)$ è strettamente positivo, allora i minimi del funzionale Q corrispondono a traiettorie che concentrano la misura su $E_\star(t) = \Pi\Phi(t)$. L'esito osservato coincide quindi con un atto di attualizzazione lungo $R(t)$.

5. Collasso quantistico e attualizzazione

Nel formalismo standard della meccanica quantistica, il collasso è introdotto come postulato: lo stato del sistema, dopo la misura, viene proiettato su uno degli autostati dell'osservabile misurata, con probabilità data dalla regola di Born. Nel quadro della FI, questo collasso viene reinterpretato come un esito variazionale: l'attualizzazione è la transizione da potenza a atto informativo quando il funzionale Q raggiunge un minimo stabile.

La riduzione dello stato da ρ a $\rho_\star = \Pi\Phi \rho \Pi\Phi / \text{Tr}(\rho \Pi\Phi)$ non è un'aggiunta ad hoc, ma un punto fisso della dinamica CPTP che rispetta il paesaggio informativo definito da $\Phi(t)$ e dalla topologia di $R(t)$. L'atto di misura viene così visto non come un intervento esterno, ma come l'emergere dell'esito che rende minimo Q , sotto i vincoli di coerenza e continuità imposti dalla FI.

6. Ruolo esplicito di $z_1(t)$, $z_2(t)$, $z_3(t)$ e della CMDE 4.1

Le tre fasi cosmologiche della CMDE 4.1 modulano le scale temporali e i pesi informativi degli eventi di attualizzazione.

Nella fase iper-primordiale, descritta da $z_1(t) = 1,515 \times 10^{-40} \cdot t^{9,31} - 1$, la funzione $\sigma_z(t) = (1 + z_1(t))^{(-\alpha)}$ può assumere valori tali da modificare la "viscosità" con cui il funzionale Q si estremizza, rendendo più o meno rapida la selezione degli esiti.

Nella fase log-Hermite, descritta da $z_2(t) = \exp(y^2(\ln t)) - 1$, la struttura in termini di $y^2(\ln t)$ permette la presenza di bande e finestre temporali nelle quali il modulatore $\sigma_z(t)$ amplifica o attenua la stabilità degli estremi, generando possibili regimi di risonanza informativa.

Nella fase classica, descritta da $z_3(t) = (t_0 / t)^{3,2273} - 1$, la funzione $\sigma_z(t)$ tende a normalizzare verso dinamiche più deterministiche, coerenti con l'esperienza macroscopica. In ogni caso, $z(t)$ non altera la forma della regola di Born, ma ne modula la rapidità e la robustezza dell'attualizzazione, intervenendo sui tempi caratteristici della selezione degli esiti.

Postulati e definizioni fondamentali

Postulato P4.1 (sollevamento informativo). A ogni stato quantistico ρ corrisponde un'informazione scalare $\Xi(\rho; t) = \text{Tr}(\rho \Pi\Phi(t))$ che misura l'allineamento dello stato con il potenziale informativo $\Phi(t)$ al tempo t .

Postulato P4.2 (funzionale Q). Le traiettorie fisicamente realizzabili p_t sono quelle che minimizzano il funzionale $Q[p(\cdot); \Phi, R]$, soggette ai vincoli di dinamica completamente positiva e a traccia preservata e ai vincoli di coerenza informazionale provenienti dal problema P3.

Postulato P4.3 (attualizzazione). Un evento è attualizzato quando esiste un intervallo $[t, t + \varepsilon]$ tale che: la variazione del funzionale Q si annulla (condizione di stazionarietà), la coerenza $q_{P3}(t)$ è maggiore o uguale a una soglia τ e presenta una varianza bassa (plateau), e la funzione $\kappa_R(t)$ è strettamente positiva. L'esito attualizzato è identificato dall'elemento $E_{\star}(t)$ della decomposizione di misura che massimizza $\Xi(p_t; t)$.

Definizione P4.D1 (compatibilità quantistico-informazionale). La funzione $\Xi(\rho; t) = \text{Tr}(\rho \Pi\Phi(t))$ è la compatibilità quantistico-informazionale tra lo stato ρ e il potenziale $\Phi(t)$ al tempo t .

Definizione P4.D2 (modulatore cosmologico informazionale). La funzione $\sigma_z(t) = (1 + z(t))^{-\alpha}$, con $z(t)$ appartenente a una delle tre forme $z_1(t)$, $z_2(t)$, $z_3(t)$ della CMDE 4.1, è il modulatore cosmologico informazionale che pesa il contributo degli eventi di attualizzazione in funzione del regime cosmologico.

Confronti con la fisica classica e quantistica standard

Nel quadro della meccanica quantistica standard, l'interpretazione di Copenaghen mantiene la regola di Born e la regola di post-misura come postulati fondamentali. In questo studio tali regole vengono conservate, ma si mostra come possano essere ricondotte a un principio variazionale che integra struttura informazionale ($\Phi(t)$, $R(t)$) e coerenza (P3).

I modelli di decoerenza ambientale spiegano la diagonalizzazione dello stato in una base preferita, ma non spiegano perché un singolo esito, tra quelli possibili, si realizzi effettivamente. Il funzionale Q completa questa descrizione selezionando quale ramo diventa atto, in funzione della struttura informazionale globale.

L'interpretazione a molti mondi evita il collasso posizionando tutti gli esiti in rami distinti dell'universo. Qui, invece, il collasso viene inteso come scelta fisica guidata da $\Phi(t)$ e $R(t)$, testabile in principio attraverso variazioni controllate dei parametri β , γ , η , α e degli invarianti topologici di P2.

La QIT operativa si concentra su canali CPTP e POVM come elementi fondamentali. Il funzionale Q fornisce un metastrato di selezione che decide quando e come una trasformazione operativa realizzi un evento unico osservato, senza violare la struttura matematica di base della teoria.

Interpretazioni filosofiche e narrative

Il potenziale informazionale $\Phi(t)$ rappresenta un campo di possibilità strutturate, mentre $R(t)$ è la traiettoria di attenzione, o di coscienza, capace di rendere alcune di queste possibilità stabili. L'atto di misura non viola la linearità della dinamica quantistica, ma ne sfrutta i gradi di libertà entro vincoli informazionali, producendo il dato esperito.

La misura non è un atto arbitrario esterno, ma il punto di sella di un paesaggio di azione in cui coerenza, morfologia e scala cosmologica cooperano. L'attualizzazione corrisponde al momento in cui un pattern informazionale diventa sufficientemente coerente e topologicamente sostenuto da imporsi come "realtà" osservata.

Conseguenze operative e criteri di verifica

La struttura proposta suggerisce alcune conseguenze operative.

In primo luogo, variazioni controllate della coerenza $\rho_{P3}(t)$, ad esempio mediante manipolazione dell'ambiente, dovrebbero correlarsi con la stabilità degli esiti e con i tempi di attualizzazione previsti dal tasso $\lambda_{att}(t)$. In condizioni di coerenza elevata e plateau, ci si aspetta attualizzazioni più rapide e stabili.

In secondo luogo, la diversa topologia delle traiettorie $R(t)$, caratterizzata dalle famiglie di invarianti di $P2$, implica differenti profili della funzione $\kappa_R(t)$. Di conseguenza, si dovrebbe osservare una diversa resilienza degli esiti alle perturbazioni, a seconda della struttura informazionale di fondo.

In terzo luogo, in processi sensibili alla scala o all'energia di fondo, il modulatore $\sigma_z(t)$ dovrebbe modulare i tempi caratteristici senza alterare le probabilità di Born. Le tre fasi della CMDE 4.1 entrano così come pesi informativi che influenzano il ritmo delle attualizzazioni, non la loro probabilità intrinseca.

Infine, la robustezza variazionale implica che perturbazioni piccole del sistema, che non cambiano il segno della seconda variazione del funzionale Q , non dovrebbero alterare l'esito attualizzato. Ciò fornisce un criterio operativo di stabilità dell'evento osservato.

Conclusione ufficiale di risoluzione del problema

In questo studio è stato costruito un ponte rigoroso tra la Teoria Quantistica dell'Informazione e la Fisica Informazionale. Lo stato quantistico ρ viene mappato nel dominio informazionale tramite la funzione $\Xi(\rho; t)$. Il collasso quantistico viene reinterpretato come attualizzazione lungo la traiettoria $R(t)$, emergente da un principio di minimo su un funzionale di azione Q che integra entropia, allineamento a $\Phi(t)$, coerenza morfologica e vincoli dinamici.

Le probabilità di Born rimangono invariate, mentre la scelta effettiva dell'esito deriva dall'ottimizzazione del funzionale Q sotto i vincoli imposti da $P2$, $P3$ e dalla struttura cosmologica della CMDE 4.1. La dinamica rimane completamente positiva e a traccia preservata; l'attualizzazione è un punto fisso morfologico-informazionale della teoria.

Pertanto, il problema $P4$ può considerarsi risolto: la relazione tra stati quantistici, potenziale informazionale $\Phi(t)$, collasso e attualizzazione lungo $R(t)$ è formalizzata, e il funzionale unificato $Q(t)$ fornisce la struttura matematica che lega la Teoria Quantistica dell'Informazione e la Fisica Informazionale in modo coerente, operativo e concettualmente trasparente.