

AUTO RICERCA

Quando allontaniamo il rumore possiamo sentire la musica

*Risposta al commento
di Leonardo Chiatti*

Diederik Aerts

Numero 27
Anno 2023
Pagine 135-144

 LAB

Innanzitutto, vorrei ringraziare Leonardo Chiatti per il suo interessante commento (Chiatti 2023) al nostro articolo (Aerts & Sassoli de Bianchi 2023a). Nel frattempo, ho letto anche la risposta dettagliata del mio coautore, Massimiliano Sassoli de Bianchi (2023), e concordo pienamente con le sue argomentazioni. Vorrei rispondere brevemente anch'io, raccontando qual è la base speculativa su cui poggia la storia che riportiamo nel nostro articolo.

Già alla prima lettura del commento di Chiatti, molto ben argomentato, è emerso in me spontaneo il ragionamento che svilupperò in questa mia risposta. Quindi, eccoci qui.

Il primo elemento del mio ragionamento riguarda il *condensato di Bose-Einstein*, realizzato in diversi laboratori nel 1995, da diversi gruppi che sono stati poi premiati con il Nobel (Cornell & Wieman 2002, Ketterle 2002). È stato un risultato che ha certamente meritato questo premio, ma mi ha colpito che nessuno si sia soffermato a lungo su ciò che ritengo sia il suo aspetto più spettacolare. La cosa più sorprendente, a mio avviso, è la dimostrazione sperimentale che, se si elimina con cura il *rumore* dei fotoni termici, che in modo casuale bombardano costantemente gli atomi o le molecole di un gas sufficientemente diluito, questo si mette spontaneamente in uno stato altamente ordinato, caratterizzato dalla *coerenza quantistica*. Diventa “un’entità singola” che porta ancora in sé “i molti”, cioè le molecole che prima erano presenti. Quindi, per usare la metafora che descrive il *calore* come un *rumore casuale di fotoni*, quando il rumore viene allontanato, possiamo sentire la *musica*.

Ma cos'è questa musica? È una domanda che dovremmo avere il coraggio di porci.

Il secondo elemento del mio ragionamento riguarda lo status scientifico della teoria che chiamiamo *termodinamica*. Sappiamo che l'attuale termodinamica, la parte della fisica in cui si studiano l'energia e l'entropia, è una scienza fisica *classica*, e per classica intendo qui *non quantistica*. Esiste anche una *termodinamica quantistica*, che è in pieno sviluppo, ma ci sono questioni fondamentali ancora irrisolte che la caratterizzano, e soprattutto ancora non comprese. Queste sono legate alla natura dell'entanglement e al modo in cui

compare spontaneamente in numerose situazioni (Gemmer, Michel e Mahler 2009, Mahler 2015).

Il terzo elemento del mio ragionamento consiste in un'intuizione sulla struttura dell'entanglement, che ha avuto origine molto tempo fa, nella mia tesi di dottorato, dove mostro in modo molto generale, e con teoremi matematici molto esaustivi, che la meccanica quantistica basata sugli *spazi di Hilbert* è strutturalmente incapace di descrivere delle *entità quantistiche separate*. Il risultato nella mia tesi è costruttivo, nel senso che partendo da una formulazione assiomatica della meccanica quantistica hilbertiana, dimostro che due dei suoi assiomi sono d'ostacolo, e che senza questi due assiomi anche delle entità quantistiche separate *possono* essere descritte (Aerts 1982).

In un capitolo di un libro in preparazione (Aerts & Sassoli de Bianchi 2024), con il mio coautore cerchiamo di rendere queste analisi matematiche nel mio dottorato, che sono assai impegnative, accessibili anche a coloro che non desiderano addentrarsi nei dettagli matematici dell'assiomatica quantistica, ed è lì che mi è apparsa chiara questa particolare struttura dell'entanglement, che vorrei ora proporre come terzo elemento del mio ragionamento.

Consideriamo uno *stato entangled* di due entità di spin $-\frac{1}{2}$ in uno *stato di singoletto*, detto anche *stato di Bell* (gli spin $-\frac{1}{2}$ sono spesso anche denominati *qubit*). L'*entropia di von Neumann* di questo stato è pari a zero. Ma ogni singolo spin si trova in uno stato descritto da un *operatore densità*, con massima entropia di von Neumann. Quindi, collegando questi spin tra loro tramite entanglement, si riesce a portare il loro stato di massima entropia individuale a uno stato congiunto di entropia uguale a zero. Se pensiamo al modo assai macchinoso in cui, come conseguenza della *seconda legge della termodinamica classica*, l'entropia di un sottosistema può diminuire, solitamente richiedendo uno scambio di energia, quello che succede con gli spin dovrebbe suscitare tutta la nostra attenzione.

Gli approcci esistenti alla *termodinamica quantistica* non sanno bene come inquadrare e comprendere questo fenomeno di diminuzione dell'entropia di von Neumann, quale conseguenza dell'entanglement, anche se ciò non viene ammesso esplicitamente (Gemmer, Michel & Mahler 2009, Mahler 2015). Spesso si usano espressioni per l'entropia che sono differenti da quella di von Neumann, che non portano a questo fenomeno, ma a mio avviso sono solo degli

adattamenti che partono da un modo di ragionare sbagliato, perché classico, quando invece abbiamo a che fare con delle entità quantistiche. Inoltre, un aspetto importante sembra essere passato inosservato, ossia che gli stati descritti dagli operatori densità, come quelli in cui si trovano individualmente i due spin, quando congiuntamente si trovano nello stato di singoletto, non possono essere associati a degli *autovettori*. Quindi, l'espressione "gli spin risiedono individualmente in stati descritti da operatori densità" è in realtà già problematica di per sé, in quanto non c'è praticamente nulla "in cui risiedere". Strutturalmente parlando, accade qualcos'altro.

Quello che accade può essere identificato in modo semplice se si scende al livello di una versione assiomatica della teoria quantistica standard, che partendo da una descrizione generale dei *reticoli di proprietà* di un'entità, procede poi a una loro graduale realizzazione entro la struttura di uno *spazio di Hilbert complesso* (Aerts 1982). Ma il fenomeno molto particolare che si verifica quando "due entità, tramite entanglement, formano un'unica entità" può anche essere osservato direttamente, senza considerare le implicazioni strutturali. Infatti, le due entità individuali, cioè i due spin presi singolarmente, sono in una condizione di *assoluta incertezza*, perché non esiste la possibilità di fare previsioni certe su di loro, di nessun tipo, essendo proprio questo il significato dell'operatore densità che descrive la loro condizione. E, davvero miracolosamente, entrando in entanglement l'uno con l'altro, i due spin sono in grado di porsi in uno stato congiunto dove, invece, c'è assoluta certezza circa l'esito di almeno un esperimento, nella fattispecie quello che dà come risultato "sì" se uno degli spin è "su", e "no" se entrambi gli spin sono "giù" (o, per dirla in altro modo, è totalmente certo che entrambi gli spin non sono "giù" e che entrambi gli spin non sono "su", il che significa che anche l'esito di un secondo esperimento, che dà come risultato "sì" se uno degli spin è "down" e "no" se entrambi sono "up", è sempre certo).

Possiamo anche esprimere ciò che avviene quando due spin entrano in entanglement nel modo seguente. Entrambi, pur non essendo individualmente in un autostato, possono crearne uno relativamente al duo che essi formano. Se ci apriamo a questa intuizione, e utilizziamo gli esempi di entanglement nel *dominio cognitivo* su cui ha lavorato il nostro gruppo (Aerts et al. 2019),

possiamo osservare che potrebbe essere una specifica forma di *cooperazione*, anziché una misteriosa e inspiegabile *correlazione*, ciò che porta a far emergere, tramite una modalità di tipo “bootstrap”, la certezza specifica di un autostato dall’incertezza assoluta dei singoli stati.

Insieme ai dottorandi del *Centro Leo Apostel* dell’Università di Bruxelles (VUB), *Jonito Aerts Arguëlles*, *Lester Beltran* e *Suzette Geriente*, i cui temi di ricerca hanno contribuito a sviluppare questa intuizione, e al loro co-promotore *Sandro Sozzo*, abbiamo recentemente analizzato questa situazione in dettaglio (Aerts et al 2024). Per illustrare l’idea, abbiamo utilizzato l’esempio della *caccia*, essendo questa probabilmente una delle più antiche forme di cooperazione raffinata promossa dai nostri antenati.

Abbiamo immaginato due individui che cacciano insieme, ma non per la prima volta, nel senso che possiedono già una storia di caccia in comune, di modo che una nozione raffinata di “caccia” si sia già potuta sviluppare nella mente di entrambi. È quindi primordiale che le loro azioni e decisioni, in quanto duo collaborativo, portino al miglior risultato possibile per quanto riguarda la caccia. Ciò che ciascuno fa e decide individualmente è funzionale solo nella misura in cui è al servizio delle loro azioni e decisioni comuni, poiché solo quando questo si realizza il duo può avere successo.

È chiaro che una strategia congiunta di questo tipo comporti spesso la necessità di una grande incertezza, per quanto attiene ai singoli cacciatori. L’animale da cacciare può improvvisamente girarsi a causa di ciò che uno dei due individui sta facendo, costringendo il secondo a fare qualcosa di completamente diverso da ciò che per lui era la cosa giusta da fare solo un secondo prima, e così via. Le “correlazioni presenti nei comportamenti dei due”, e sono numerose, sono quindi una conseguenza della loro “cooperazione nella partecipazione alla caccia”. Non a caso un concetto come quello di “caccia” emerge in entrambi, in modo incrementale, per consentire a una forma così raffinata di cooperazione di prendere forma nel tempo.

Il mio coautore mette in campo, giustamente, l’*interpretazione concettualistica* (Aerts 2009, Aerts & Sassoli de Bianchi 2023b), nella sua risposta al commento di Chiatti (Sassoli de Bianchi 2023a), sottolineando l’abbondanza della presenza della cognizione,

sempreché questa interpretazione si riveli essere corretta.¹ Ciò che posso aggiungere, in relazione alle conferme sperimentali dell'abbondanza dell'entanglement nelle regioni quantistiche della nostra realtà, è che potrebbero benissimo essere delle “forme collaborative di cognizione” a rendere l'entanglement così abbondante.

Per portare un gas bosonico a diventare un condensato di Bose-Einstein, gli attuali sperimentatori quantistici, nei loro laboratori, sono in grado di rimuovere i fotoni “rumorosi” in modo così preciso da ottenere una temperatura del gas che è milioni di volte più fredda del luogo più freddo che sia mai esistito, o che mai esisterà, spontaneamente (cioè senza l'influenza umana), nel nostro universo materiale ed energetico. È interessante soffermarsi un momento a considerare perché il raffreddamento del sito del gas porti all'emergenza della coerenza, cioè a considerare come la musica emerge da sotto il rumore, e cosa impedisce che lo stesso accada con un gas come quelli che troviamo nel nostro ambiente naturale sulla Terra.

Prendiamo l'aria nella stanza in cui ci troviamo, dove le molecole d'aria sono costantemente in violenta collisione tra loro e con la superficie delle entità che si trovano nella stanza, a una velocità media che è quella di un aereo a reazione. Entrano in collisione a tale velocità anche con la nostra pelle, ma questa si è talmente adattata a questo costante e violento bombardamento che noi, soggettivamente, sentiamo e percepiamo l'aria in una stanza come se fosse quasi ferma. Questo è anche il motivo per cui immaginiamo che le molecole d'aria siano tra loro *vicine*, ma se consideriamo il loro comportamento, fatto di continui scontri violenti ad alta velocità, questa nostra rappresentazione soggettiva è molto lontana dalla realtà.

Quando il gas viene raffreddato, il comportamento violento delle molecole d'aria si calma, iniziano a muoversi molto più lentamente, ed è come conseguenza di questo rallentamento che iniziano a influenzarsi reciprocamente in modo coerente. In gergo tecnico quantistico, si dice che “le *lunghezze d'onda di de Broglie* cominciano a sovrapporsi”, per cui l'interferenza quantistica e

¹ Sull'interpretazione concettualistica, vedi anche il Numero 24 di *AutoRicerca*, Anno 2022 [NdE].

l'entanglement fanno spontaneamente la loro comparsa. In realtà, si può sostenere che è solo a una tale temperatura molto bassa, quando il condensato di Bose-Einstein può iniziare a organizzarsi, che le molecole di gas sono davvero vicine tra loro, abbastanza vicine da poter fare insieme quella musica che sono destinate a fare, considerando ciò che sono. A temperatura ambiente, invece, restano distanti nel loro comportamento altamente disorganizzato, come lo farebbero dei musicisti che, pur potendo potenzialmente fare musica insieme, sono impegnati in cose così completamente diverse che il loro strumento musicale non è nemmeno a portata di mano.

Dato il freddo straordinario creato nei laboratori dagli sperimentatori, si potrebbe sostenere che gli esseri umani, utilizzando l'intuizione e la comprensione della realtà che hanno accumulato nelle ultime centinaia di anni, e l'ingegno tecnico associato, stanno creando una nuova realtà fondamentale, che si comporta spontaneamente in modo molto coerente, come predetto dalle nostre migliori teorie. Questa è la natura della musica che possiamo ascoltare, quando il rumore viene allontanato.

Cosa ci permettono di dire i ragionamenti precedenti? Magari non di affermare, ma quantomeno di suggerire come possibilità, sulla preoccupante prospettiva di *morte termica* che la termodinamica classica irrevocabilmente predice, per la realtà materiale ed energetica che ci circonda. Ebbene, che si tratterebbe di un'asserzione assai incompleta, poiché si basa su una teoria classica che, come sappiamo, fornisce solo una buona approssimazione per delle situazioni in cui esiste un numero incalcolabile di elementi di disturbo casuali. Nemmeno sappiamo se gli stati privi di coerenza quantistica delle entità macroscopiche che ci circondano sarebbero simili a quelli degli spin in uno stato di singoletto, il che indicherebbe che ci sono in gioco delle correlazioni nascoste che non abbiamo ancora scoperto, o per dirla in modo più significativo, delle *collaborazioni nascoste* (Aerts et al. 2024). E non sappiamo nemmeno se, invece, gli stati classici sarebbero dovuti alla presenza di un ambiente fatto di troppe perturbazioni casuali, che abbiamo chiamato rumore, o se si tratta di qualcos'altro ancora che realmente accade.

Questo stato di cose ci porta facilmente a fare delle previsioni troppo semplicistiche per il futuro della realtà materiale ed energetica che ci circonda. I ragionamenti precedenti ci

permettono, a mio avviso, di essere quantomeno costruttivamente fiduciosi che gli esseri umani, magari in collaborazione con altre intelligenze che non abbiamo ancora incontrato, saranno sempre più in grado di contribuire a plasmare la loro vastissima realtà materiale ed energetica a favore di ciò che è buono e bello. In questo modo, non si verificherà l'orrore finale della morte termica, se non altro non nel modo previsto dalla termodinamica classica.

Ora, anche se la parte materiale ed energetica dell'involucro *macroscopico* (dove c'è palesemente una difficoltà nel mantenere stabilmente la coerenza che si manifesta invece, spontaneamente, nella parte dell'involucro *microscopico*, così come nella parte cognitivo-concettuale dell'involucro macroscopico) giungerà a un certo punto, irrevocabilmente, alla morte termica, resta la domanda di quale sia il suo status all'interno dello strato intrinseco profondo della realtà. Forse che le menti umane sono destinate a perpetuarsi per mezzo di altre entità, e i corpi umani sono solo bruchi che aspettano le farfalle per poter volare via.

Vorrei citare nuovamente una delle metafore del nostro articolo, soprattutto per mostrare che nella nostra realtà esistono due possibilità. Possiamo chiederci se la materia-energia può far parte dell'involucro macroscopico similmente al modo molto frammentato in cui alcuni artefatti della cultura umana si ritrovano nei cumuli di rifiuti presenti nelle discariche cittadine. Per esempio, nei frammenti di testo appartenenti a dei libri che sono stati fatti a pezzi, finendo in discarica. Questa possibilità corrisponde alla situazione dove la coerenza viene irrevocabilmente persa perché i portatori di questa coerenza vengono distrutti, nella costante dinamica evolutiva dei processi di costruzione e distruzione.

Tuttavia, esiste anche la seconda possibilità, che abbiamo già evocato, ossia che gli stati descritti dagli operatori di densità, che sperimentiamo con la parte materiale ed energetica dell'involucro macroscopico, sarebbero di fatto come gli stati di spin- $\frac{1}{2}$ quando sono in uno stato singoletto, cioè uno stato di entanglement. Ciò significherebbe che non abbiamo ancora scoperto le loro correlazioni, o meglio, le loro cooperazioni. Il testo in questione sarebbe allora ancora intatto, ma siamo noi, con i nostri corpi, a non percepirlo nella sua integrità, ma solo come delle istantanee molto locali, che non ci permettono di sperimentare la coerenza della sua totalità.

Anche questo potrebbe essere possibile, proprio come accade ai bambini della prima elementare, che sono ancora dei lettori principianti, e probabilmente per circa un anno vedono i testi intatti, contenenti delle storie complete, proprio in questo modo, fino al momento in cui sono in grado di iniziare a leggere porzioni di testo più estese, potendo in questo modo sperimentare la piena coerenza dell'intera storia che, passo dopo passo, mettono insieme, mentre la leggono.

È anche in questo modo che, a mio avviso, la morale, l'etica e l'estetica portano in sé la formazione più profonda della realtà, quella che si sforza di essere buona e bella.

Bibliografia

- Aerts, D. (1982). Description of Many Separated Physical Entities Without the Paradoxes Encountered in Quantum Mechanics. *Foundations of Physics* 12, pp. 1131-1170. doi: 10.1007/BF00729621.
- Aerts, D. (2009). Quantum Particles as Conceptual Entities: A Possible Explanatory Framework for Quantum Theory. *Foundations of Science* 14, pp. 361-411. doi: 10.1007/s10699-009-9166-y.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Geriente, S., Sassoli de Bianchi, M. and Sozzo, S. (2019). Quantum Entanglement in Physical and Cognitive Systems: A Conceptual Analysis and a General Representation. *The European Physical Journal Plus* 134, 493. doi: 10.1140/epjp/i2019-12987-0.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Geriente, S. and Sozzo, S. (2023). Entanglement as a method to reduce uncertainty. *International Journal of Theoretical Physics* 62, 145. doi: 10.1007/s10773-023-05404-x.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi, M. (2023a). Una prospettiva scientifica sull'eterna lotta tra il bene e il male nel viaggio irreversibile della materia-vita-cultura e della sua evoluzione. *AutoRicerca* 27, pp. 75-120.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi, M. (2023b). The physics and metaphysics of the conceptuality interpretation of quantum mechanics. arXiv:2310.10684.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi (2024). *A Quantum Quest*. In preparazione.
- Chiatti, L. (2023). Commento all'articolo di Aerts & Sassoli de Bianchi. *AutoRicerca* 27, pp. 121-126.
- Cornell, E. A., and Wieman, C. E. (2002). Nobel Lecture: Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments. *Reviews of Modern Physics* 74, 875. doi: 10.1103/RevModPhys.74.875.
- Gemmer, J., Michel, M. and Mahler, G. (2009). *Quantum Thermodynamics: Emergence of Thermodynamic Behavior Within Composite Quantum Systems. Lecture Notes in Physics* 784. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.

- Ketterle, W. (2002). Nobel lecture: when atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser. *Reviews of Modern Physics* 74, 1131. doi: 10.1103/RevModPhys.74.1131
- Mahler, G. (2015). *Quantum Thermodynamic Processes*. Pan Stanford: Singapore.
- Sassoli de Bianchi, M. (2023), La traccia di una speranza: risposta al commento di Leonardo Chiatti. *AutoRicerca* 27, pp. 127-133.