AutoRicerca

Quando le menti si intrecciano

Il mio incontro con Diederik Aerts

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Numero 31
Anno 2025
Pagine 99-128

LAB

Constantin Piron

Philippe A. Martin

Ho studiato fisica all'Università di Losanna, negli anni Ottanta del secolo scorso, dove ho avuto la possibilità di imparare la meccanica quantistica da *Gérard Wanders* e *Dominique Rivier*, due studenti di *Ernst Stueckelberg*, e da *Jean-Jacques Loeffel*, un allievo di *Pauli* (si veda la Figura 1). In seguito, fui assistente di *Constantin Piron*, a Ginevra, per il suo famoso corso di meccanica quantistica. Anche Constantin era uno studente di Stueckelberg, oltre che di *Josef-Maria Jauch*. Ho poi svolto la mia tesi di dottorato con *Philippe-André Martin*, compagno di università di Piron e anch'egli studente di Jauch. In altre parole, ho avuto la possibilità di imparare la meccanica quantistica da persone che avevano ricevuto una formazione di altissimo livello e che erano veramente interessate e impegnate a capirla, sia dal punto di vista matematico che concettuale.

A proposito dell'insegnamento della fisica quantistica, Jauch scrisse nel 1968 la seguente osservazione, che è sempre attuale[1]:

> Ci sono molti studenti ovunque che superano gli esami di meccanica quantistica con il massimo dei voti senza capire veramente cosa significhi. Spesso le cose vanno anche peggio. Invece di apprendere la meccanica quantistica come dei pappagalli, imparano solo alcune particolari tecniche di approssimazione, come la teoria delle perturbazioni, i diagrammi di Feynman o le relazioni di dispersione, che poi li porta a credere che queste utili tecniche siano equivalenti alla base concettuale della teoria. Questa tendenza è presente in molti libri di testo ed è incoraggiata da alcuni fisici di spicco.

[1] Jauch, J. M. (1968). *Foundations of quantum mechanics*, Addison-Wesley Series in Advanced Physics, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

Quando, in tempi più recenti, sono entrato in contatto con *Diederik Aerts*, dopo molto tempo che non praticavo più la fisica, credo che sia solo perché ho avuto dei maestri così autorevoli, che mi hanno fornito la giusta prospettiva e postura mentale, che si è potuta sviluppare una collaborazione affascinante e fruttuosa, in seguito anche con altri collaboratori del suo dinamicissimo *Brussels group*, in particolare *Sandro Sozzo* e *Tomas Veloz*, ma anche *Christian De Ronde*, *Lester Beltran*, *Lyneth Beltran*, *Suzette Gerente* e *Jonito Aerts Arguëlles*.

Figura 1 Una foto dei primi anni Novanta. Io sono il secondo da sinistra. Al centro, con la giacca, Jean-Jacques Loeffel, con cui ho svolto la mia tesi di laurea. Il penultimo della fila è Gérard Wanders, che fondò l'Istituto di Fisica Teorica dell'Università di Losanna, e tutto a destra c'è Paul Erdös.

Anche Diederik è stato un allievo di Constantin Piron, anzi è stato lo studente che Piron considerava il più brillante tra tutti, colui che ha realmente raccolto l'eredità della scuola ginevrina portandola a una nuova fase di importanti sviluppi e scoperte. Quando ero a Ginevra – negli anni 1990-1991 – non ho avuto la fortuna di incontrare Diederik, che aveva conseguito il dottorato in fisica teorica dieci anni prima, nel 1981. Tuttavia, essendo quotidianamente in contatto con

Constantin durante la mia permanenza al *Département de Physique Théorique*, molte volte lo sentii pronunciare il suo nome, sempre con grande ammirazione ed emozione nella voce. Ad esempio, in relazione alla sua formulazione più precisa della nozione chiave di *elemento di realtà* nella sua tesi[2], Piron scrisse (la traduzione dal francese è mia)[3]:

> A prima vista, sembra che ci sia una difficoltà concettuale nell'attribuire proprietà allo spazio vuoto, come ad esempio affermare che è quasi euclideo e che esiste un campo di gravitazione. Infatti, come verificare tali affermazioni senza dover introdurre apparati e, così facendo, non abbiamo più il vuoto. Questo apparente paradosso è stato risolto da Dirk Aerts, grazie a una formulazione precisa delle nozioni di elemento di realtà e di progetto sperimentale. Secondo Aerts, infatti, un progetto sperimentale è un esperimento che se volessimo potremmo certamente eseguire, tale che il suo esito positivo è stato definito una volta per tutte. In pieno accordo con la definizione di Einstein, Aerts sostiene allora che il sistema possiede un elemento di realtà e che la proprietà è attuale, se possiamo affermare in anticipo che, in caso di esecuzione del corrispondente progetto sperimentale, la risposta positiva sarebbe certa.

---

[2] Aerts, D. (1981). *The One and the Many: Towards a Unification of the Quantum and Classical Description of One and Many Physical Entities*. Doctoral dissertation, Brussels Free University.

[3] « A première vue, il semble qu'il y aurait une difficulté conceptuelle à attribuer des propriétés à l'espace vide, comme par exemple affirmer qu'il est quasi-Euclidien et qu'il y règne un champ de gravitation. En effet comment vérifier de telles affirmations sans devoir y introduire des appareils et dans ce cas on n'a plus le vide. Cet apparent paradoxe a été résolu par Dirk Aerts grâce à une formulation précise de la notion d'éléments de réalité jointe à une définition précise des projets expérimentaux. En effet, selon Aerts, un projet expérimental est une expérience qu'on pourrait fort bien éventuellement exécuter, et dont le résultat positif a été défini une fois pour toutes. En plein accord avec la définition d'Einstein, Aerts prétend alors, que le système possède un élément de réalité et que la propriété est actuelle, si on peut affirmer par avance que dans l'éventualité de l'exécution du projet correspondant la réponse positive est certaine ». Piron, C. (2002). Introduction à la Physique Quantique, *arXiv:physics/0204072 [physics.gen-ph]*.

Il nome e il lavoro di Diederik vengono altresì citati in tutti i testi più importanti scritti successivamente da Constantin. Nel suo libro del 1990 sulla meccanica quantistica, elaborato in parte a partire dagli appunti dattiloscritti del suo famoso corso (si veda la Figura 2), scrisse quanto segue nella prefazione (la traduzione dal francese è mia)[4]:

> Dieci anni fa, gli ortodossi raggiunsero il traguardo, paradossalmente tutti d'accordo nel dare ragione sia a Bohr che a Einstein. Certo, la fisica quantistica era più complicata di così, ma in nessun caso e in nessun modo si doveva abbandonare il profondo realismo del fisico sperimentale. È allora che, seguendo questo approccio, D. Aerts, della Free University of Brussels, ha difeso una tesi, *The One and the Many* (L'uno e il molteplice). Con un'analisi raffinata condotta in termini semplici e alla portata di tutti, scoprì e poi dimostrò l'impossibilità di uno schema vettoriale adeguato alla descrizione di sistemi quantistici separati. Risolse così il famoso paradosso di Einstein, Podolsky e Rosen e allo stesso tempo demolì due dei quattro assiomi della 'logica quantistica'. La teoria fu totalmente rinnovata e quasi miracolosamente liberata da altri paradossi.

L'importanza della tesi di Diederik è stata sottolineata anche da *B. C. van Fraassen*, nel suo libro sulla meccanica quantistica[5]:

---

[4] « Il y a dix ans les orthodoxes touchaient au but, paradoxalement ils s'accordaient alors tous pour donner raison à la fois à Bohr et à Einstein. Certes la physique quantique était plus compliquée, mais en aucun cas et d'aucune manière le réalisme profond du physicien expérimentateur ne devait être abandonne. C'est alors, que poursuivant cette approche, D. Aerts de l'Université Libre de Bruxelles, soutenait une thèse, *The One and the Many*. Par son analyse fine, en termes naïfs de tous les jours, il découvrait, puis démontrait l'impossibilité d'un schéma vectoriel adéquat a la description des systèmes quantiques sépares. Il résolvait ainsi le célèbre paradoxe d'Einstein, Podolsky et Rosen et démolissait du même coup deux des quatre axiomes de la 'logique quantique'. La théorie en était totalement renouvelée et débarrassée quasi-miraculeusement des autres paradoxes ». Piron, C. (1990). *Mécanique quantique. Bases et applications*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

[5] Van Fraassen, B. C. (1990). *Quantum mechanics: an empiricist's view*, Clarendon Press, Oxford.

I tre problemi principali nel fondamento filosofico della meccanica quantistica sono la misura, i paradossi e il problema delle particelle identiche. Ognuno di essi riguarda la composizione di più sistemi – a volte interagenti e a volte no – che è una questione sottile nella meccanica quantistica. Dirk Aerts riassume molto opportunamente queste questioni come il problema dell'uno e del molteplice, che ha con lui assunto una nuova forma di vita.

Figura 2 I libri di Piron sono sempre in bella vista nelle biblioteche scientifiche, per esempio qui al Learning Center dell'EPFL, a Losanna. Foto, per gentile concessione di Françoise Piron.

Per tornare a me, dopo il mio dottorato a Losanna, durante il quale ho lavorato su uno dei temi di ricerca tradizionali della scuola svizzera di fisica matematica – la teoria dello scattering non relativistico e il problema del tempo di ritardo – e dopo aver trascorso i dieci anni successivi lavorando come manager nell'industria, nel 2004 decisi

che era il momento di tornare alla mia passione di sempre (o meglio, tentare di farlo): la ricerca e l'insegnamento. Fu allora che il nome di Diederik, che avevo sentito pronunciare tante volte da Constantin, risuonò di nuovo nella mia mente. Così, cercando su Google, scoprii il suo sito personale, molto ben curato, dal quale era possibile scaricare i preprint di tutti i suoi articoli pubblicati.

La lettura del suo articolo del 1999, intitolato *The stuff the world is made of: physics and reality*[6] (La sostanza di cui è fatto il mondo: fisica e realtà), fu per me come un'epifania, e ricordo che inviai immediatamente una lettera a Diederik (una di quelle tradizionali, scritta con l'inchiostro, su carta) in cui esprimevo, tra le altre cose, la mia ammirazione per il suo lavoro. Eccone un estratto (la lettera era datata 8 settembre 2004):

> Caro Prof. Aerts, [...] recentemente ho avuto l'occasione di leggere alcuni dei suoi eccellenti lavori sulla meccanica quantistica e sulla relatività, che sono riuscito a scaricare dal suo sito Web. Conoscevo già alcuni dei bellissimi risultati della scuola di meccanica quantistica di Geneva-Brussels, poiché nel 1989 stavo iniziando una tesi di dottorato sotto la direzione di Constantin Piron, a Ginevra. Ma non ero a conoscenza dei numerosi progressi compiuti da allora. Devo ammettere che sono soprattutto colpito dal valore delle sue scoperte che, a mio parere, aspettano ancora di essere riconosciute come vere e proprie pietre miliari nella comprensione della realtà fisica (e forse anche oltre), e certamente meriterebbero una migliore diffusione nella comunità scientifica. [...] Vorrei investire un po' di tempo nel tentativo di comprendere a fondo l'approccio della scuola di Geneva-Brussels, di cui ho avuto un primo assaggio nel 1989. E apprezzerei molto la sua guida a questo proposito [...].

Ricordo che rimasi piuttosto deluso nel non ricevere alcuna risposta alla mia lettera. Così, acquistai due degli otto volumi della serie

[6] Aerts, D. (1999). The stuff the world is made of: physics and reality. In D. Aerts, J. Broekaert and E. Mathijs (Eds.), *Einstein meets Magritte: An Interdisciplinary Reflection* (pp. 129–183). Dordrecht: Springer.

Einstein meets Magritte[7], per leggere più attentamente e più profondamente gli articoli pubblicati, per poi inviare una seconda lettera a Diederik, verso la fine dello stesso anno, questa volta includendo ogni sorta di domande e osservazioni sul suo lavoro.

Per esempio, mi aveva incuriosito la sua nozione di *accadimento* (*happening*), utilizzata per definire l'importante nozione di *esperienza* (personale), che egli considerava formata da due aspetti fondamentali, un *aspetto di creazione* e un *aspetto di accadimento*, dove, per citare dal già citato articolo del 1999: "una creazione è quell'aspetto di un'esperienza creato, controllato e agito da me, e un accadimento è quell'aspetto di un'esperienza che si rende disponibile alla mia creazione, controllo e azione". Quindi, chiesi nella mia lettera:

> Lei usa il concetto di *accadimento* in sostituzione del concetto di *evento*, di cui sarebbe una generalizzazione. Tuttavia, a mio parere, il concetto di accadimento è ridondante rispetto al concetto di *esistenza*. Ciò che ritengo nuovo nella sua descrizione non è tanto il concetto di accadimento, quanto il fatto che lei ha dato una definizione molto semplice, naturale e, soprattutto, operazionale dell'esistenza: qualcosa esiste nel mio presente se questo qualcosa è a me disponibile per essere sperimentato (se così avessi deciso nel mio passato). Quindi, la mia realtà presente è l'insieme di tutte le cose esistenti nel mio presente, e tutte le cose esistenti sono per definizione quelle che sono disponibili alla mia esperienza.

Mi aveva incuriosito molto anche la sua *visione della creazione-scoperta* (*creation-discovery view*) e, in relazione alla nozione di *osservazione*, chiesi anche:

> Sono rimasto un po' confuso quando lei definisce il secondo aspetto di un'esperienza – l'accadimento – come l'aspetto dell'osservazione. In effetti, se ho compreso correttamente la sua teoria, gli accadimenti non sono solitamente osservati, la caratteristica degli accadimenti

[7] Alcuni articoli di Diederik sono stati pubblicati negli atti della conferenza *Einstein meets Magritte*, una riflessione interdisciplinare su scienza, natura, azione umana e società, di cui è stato il coordinatore scientifico e artistico.

> essendo proprio quella di essere disponibili. Ma per quanto ho capito, un'osservazione è sempre un'azione su un pezzo di realtà, che quindi influisce sulla realtà, e in tal senso, a mio avviso, è più simile a una creazione. Infatti, anche nei casi particolari in cui l'osservazione non perturba l'entità, perturberà comunque ciò che la circonda, nonché l'osservatore stesso come conseguenza dell'atto conoscitivo. Quindi, in generale, un'osservazione non dovrebbe essere considerata come un caso speciale di creazione? Naturalmente, la mia difficoltà è probabilmente solo legata alla scelta della parola "osservazione" in questo contesto.

Diederik aveva anche espresso in modo molto chiaro qualcosa che aveva sempre affascinato anche me, e che in un certo senso era sotto gli occhi di tutti: che la *non-località quantistica* era solo una parola che nascondeva una possibilità più profonda (a patto di prendere la teoria quantistica sufficientemente sul serio). Questa possibilità più profonda è che la nostra realtà fisica sarebbe di natura *non-spaziale*. Così, sempre in quella mia lunga lettera, scrissi:

> Un punto importante che lei sottolinea nella sua visione della creazione-scoperta è che noi (in quanto coscienze umane) partecipiamo alla creazione di un'entità e, di conseguenza, anche alla creazione della nostra realtà percepita. Sebbene organizziamo la nostra realtà macroscopica in uno spazio a tre dimensioni, la non-località quantistica dimostra che il micromondo non può essere inserito in un teatro tridimensionale così ristretto. Inoltre, poiché il macro è costituito da un insieme di micro, si può affermare che anche i macro-oggetti non possono essere considerati appartenere interamente allo spazio a tre dimensioni, sebbene appaiano tali ai nostri sensi. D'altra parte, questo significa che lo spazio a tre dimensioni è solo una costruzione umana, cioè il modo in cui gli esseri umani (se non altro quando si trovano nel loro stato intrafisico) organizzano la loro percezione di un'entità dimensionalmente superiore, di cui lo spazio a tre dimensioni può essere visto come una sorta di confine. Non ho nulla da obiettare, ma allora non crede che questo implichi che non ci sia più spazio per l'interpretazione einsteiniana della relatività? In effetti, la non-

> spazialità significa che la realtà contiene lo spazio e non il contrario, cioè che lo spazio (più precisamente lo spazio fisico) contiene la realtà. In altre parole, lo spazio fisico va visto come una delle entità che compongono la realtà (probabilmente il confine di un'entità dimensionalmente più grande). [...] Quindi, se viaggio nello spazio, sto viaggiando attraverso un'entità, cioè attraverso l'etere, per cui il mio viaggio è una creazione e l'effetto sul mio orologio è l'effetto di una creazione. Perché il mio punto è: se lo spazio fisico non è, come lei dice così intelligentemente, un ambiente onnicomprensivo, ma solo un costrutto umano, allora, a rigore, non esiste un continuum spaziotemporale nel senso di un contenitore (assoluto) della realtà. Quindi, la relatività è solo un effetto dinamico e non può essere interpretata come un effetto cinematico (dovuto a un cambiamento di coordinate spaziotemporali). Tuttavia, sembra che lei prenda comunque molto sul serio l'interpretazione di Einstein, e la mia domanda è allora: Perché? So quanto sia rischioso oggi parlare di etere ma, in fondo, non crede che la visione della creazione-scoperta, più la non-località, significhino semplicemente che l'interpretazione di Lorentz è l'unica interpretazione relativistica possibile?

Chiaramente, all'epoca ero più favorevole a una visione dinamica (processuale) della relatività, alla Lorentz. Questo perché ritenevo che (vedi la precedente citazione di Piron) se lo spazio ha delle proprietà, allora dobbiamo considerarlo come una sorta di entità fisica in cui siamo tutti immersi, e quindi muoversi nello spazio avrebbe degli effetti, come appunto il rallentamento del mio orologio se decido di viaggiare su un'astronave. Oggi credo di aver cambiato idea e di considerare lo spazio, e lo spaziotempo, più in modo relazionale, cioè più come una costruzione; quindi, non proprio una sostanza a sé stante, o quantomeno non una sostanza ordinaria. In altre parole, torno a sostenere una visione geometrica einsteiniana della relatività. Ma devo ammettere che le mie opinioni su questi temi fondamentali sono in continua evoluzione.

Si noti però che Einstein, a differenza di Diederik, considerava lo spaziotempo come un teatro complessivo della nostra realtà fisica, motivo per cui non riusciva a digerire l'idea dell'*entanglement*, che

descriveva come un'improbabile "azione fantasma a distanza". La visione della relatività che emergeva dalle idee di Diederik era in questo senso molto diversa, proprio per il suo abbandono dell'ipotesi che "lo spazio contiene la realtà".

Comunque, anche questa mia seconda lettera rimase senza risposta, così immaginai che il professor Aerts fosse uno di quei tipi estremamente occupati che, a causa dei troppi impegni, non sono disponibili a interagire con delle persone sconosciute, soprattutto se esterne al mondo accademico (come lo ero io all'epoca). Scoprirò in seguito che mi sbagliavo su tutta la linea.

In quegli anni (2006-2007), avevo ricominciato a insegnare fisica per qualche tempo, al liceo di Lugano; quindi, dovetti tornare alle cose di base, reimparando come insegnare concetti e nozioni elementari a ragazze e ragazzi che si avvicinavano alla materia per la prima volta. Naturalmente, il programma scolastico imponeva di presentare un certo numero di contenuti in una determinata forma e, purtroppo, il mio margine di manovra era molto ridotto. Così, dopo un periodo di insegnamento di due anni, decisi di concentrarmi su altre cose (all'epoca ero anche impegnato nell'insegnamento di pratiche di esplorazione interiore, come lo yoga e la meditazione), ma mi rimase il desiderio di scrivere qualcosa di veramente elementare sulla fisica, rivolto a un pubblico molto ampio.

Il risultato fu un libro in cui cercai di fornire ai lettori gli elementi necessari per comprendere le ipotesi, le teorie, i ragionamenti e gli esperimenti che hanno caratterizzato la grande caccia all'atomo nel corso dei secoli[8]. Se racconto tutto questo è perché, verso la fine del libro, accennai al fatto che gli atomi, e più in generale le "particelle" elementari, non esistono veramente, perché non sono corpuscoli, non sono onde, non sono campi, ma "qualcos'altro": un qualcos'altro non-spaziale. In altre parole, esistono, sì, ma non come

[8] *L'atomo che non c'è - Viaggio alla ricerca dei costituenti ultimi dell'universo*. Pubblicato nel 2010 per conto dell'autore.

elementi spaziali della nostra realtà, non come piccoli mattoni o onde, come si ama solitamente pensare.

Naturalmente, quando negli ultimi capitoli del libro cercai di spiegare questo tipo di cose, tornai alle mie letture dei testi di Piron ed Aerts, e più precisamente all'approccio operazionale e realistico *della scuola di Geneva-Brussels sui fondamenti della fisica*, cercando di trovare dei modi semplici per spiegare come funziona la nostra costruzione della realtà, e in particolare di immaginare delle situazioni semplici che spiegassero che le proprietà di un sistema fisico, durante le misure quantistiche, non solo vengono create dalle misure stesse (la maggior parte delle volte), ma sono anche *effimere*.

Aerts concepì ogni sorta di "modello giocattolo" per spiegare l'emergere delle strutture quantistiche, come il celebre esempio riportato nella sua tesi di un cubo di legno che possiede entrambe le proprietà di *essere bruciabile* e *galleggiare sull'acqua*, i cui test corrispondenti, tuttavia, non sono compatibili. Riflettendo sul suo esempio, mi venne allora in mente di descrivere una situazione in cui i test non solo erano incompatibili, ma erano altresì associati a delle proprietà effimere, nel senso che perdevano il loro status di proprietà attuale subito dopo la misura, come accade anche alle entità microscopiche (si pensi a un elettrone che, una volta rilevato in una data regione, a causa della cosiddetta *diffusione della funzione d'onda*, evolve quasi istantaneamente in uno stato che non è più localizzato in essa).

Forse a causa delle mie origini italiane, il mio esempio riguardava uno *spaghetto crudo,* e le due proprietà incompatibili da me identificate erano la *solidità* e la *mancinità*, definite in un modo molto specifico che non è qui il caso di spiegare. Ora, dopo aver scritto il libro, e averlo autopubblicato[9], decisi di provare a distillare

[9] Si noti tuttavia che in ultimo l'esempio degli spaghetti crudi non fu pubblicato in questo libro, ma inserito in un video di YouTube; si veda *https://youtu.be/nN3BWe4LanQ*. Una "traslitterazione" leggermente rivista e ampliata del video si trova in *AutoRicerca* 19 (2019).

alcuni dei suoi contenuti in un articolo a carattere didattico, curioso di vedere se sarei riuscito a pubblicarlo da qualche parte. Così, redassi un articolo in cui giustamente citai il lavoro di Aerts e Piron, e naturalmente presentai anche l'esempio che avevo trovato con i due test sperimentali incompatibili da eseguire su uno spaghetto crudo, che ritenevo essere un'illustrazione significativa di autentiche proprietà quantistiche riferite a un'entità macroscopica.

Non pensai di inviare il preprint dell'articolo a Constantin, dato che non ero più in contatto con lui da quando avevo lasciato Ginevra, quasi vent'anni prima, né lo inviai a Diederik, a causa dell'impressione negativa che mi era rimasta con le mie lettere senza risposta, ma anche perché temevo che non avrebbe trovato particolarmente interessante ciò che avevo scritto. Poiché ero (e sono tuttora) membro dell'*American Association of Physics Teachers* (AAPT), provai prima a pubblicarlo sull'*American Journal of Physics* (AJP). In sostanza, i due revisori apprezzarono l'articolo, ma ritennero che fosse meglio inviarlo a una rivista con un orientamento più filosofico. In particolare, il secondo revisore scrisse:

> Sono pienamente d'accordo con la conclusione generale di questo autore secondo cui non esistono le particelle microscopiche. Ci sono infatti solo i campi quantistici. Molti altri sono giunti a questa conclusione, il più importante (ma sicuramente non il primo) è Steven Weinberg, la cui affermazione che campi quantistici costituiscano la "realtà essenziale" è spesso citata. È un punto di vista che i fisici in generale devono comprendere e adottare, in modo che gli studenti (e i fisici!) possano finalmente iniziare a capire i concetti della QFT alla base della MQ e che molte delle interpretazioni stravaganti della MQ svaniscano. Ma l'autore si avvicina a questa conclusione da un punto di vista che ritengo troppo generale e filosofico per l'AJP. Il suo articolo è molto più lungo e particolareggiato di quanto non sembri giustificato per esprimere il suo punto essenziale. Non sono nemmeno sicuro che abbia bisogno di sviscerare il significato di "realtà" tornando alla definizione di EPR. Ci sono modi più diretti per confutare la "realtà" delle microparticelle. Per esempio, Michael Redhead ("A philosopher

> looks at QFT", in Philosophical Foundations of QFT, ed. by H.R. Brown and R. Harre, Oxford UP, 1988) sostiene, giustamente, che un'ontologia particellare non può essere corretta a causa dei fenomeni osservati in relazione al vuoto quantistico, come lo spostamento di Lamb e l'effetto Casimir. Nel vuoto quantistico non esistono particelle, ma solo campi "a punto zero". Il problema è più educativo che filosofico. I fisici e, soprattutto, gli insegnanti di fisica pensano ancora in termini di un'ontologia particellare senza speranza. Molte persone (Weinberg, l'autore, Redhead, io, molti altri) hanno sottolineato la scorrettezza di questo approccio e la confusione che sta producendo, ma la mitologia delle particelle persiste. Il problema non è nella fisica o nella filosofia, ma semplicemente nell'educazione della comunità dei fisici alla "nuova" (ma oramai vecchia di decenni) realtà. Come farlo? Sto pensando di scrivere un libro divulgativo sul tema, e forse l'autore dovrebbe considerarlo a sua volta.

Per farla breve, seguendo il consiglio ricevuto, inviai l'articolo a una rivista filosofica (si trattava del *British Journal for the Philosophy of Science*), ma mi dissero subito che non era adatto, perché non era abbastanza filosofico! Quindi tornai a provare altre riviste di fisica, in particolare *Foundations of Physics*, dato che vi avevo pubblicato anni fa un articolo insieme a Philippe Martin[10], in un numero speciale in onore dei sessant'anni di Piron[11], e anche perché il mio articolo, per quanto didattico, trattava di questioni fondazionali.

All'epoca il capo redattore era *Gerard 't Hooft*. Mi scrisse direttamente e mi fece notare che il mio manoscritto era troppo lungo e che le diverse argomentazioni non erano presentate in modo sufficientemente nitido e mirato. Mi fece a sua volta notare che era più adatto a una rivista di filosofia, ma aggiunse che lo avrebbe riconsiderato se avessi migliorato la presentazione, secondo

[10] Martin, Ph. A. & Sassoli de Bianchi, M. (1994). Spin precession revisited. *Foundations of Physics 24*, pp. 1371–1378.

[11] Aerts, D. (1994). Continuing a quest for the understanding of fundamental physical theories and the pursuit of their elaboration. *Foundations of Physics 24*, pp. 1107–1111.

i suoi suggerimenti, cosa che ovviamente feci. Ma anche in questo caso la recensione non fu sufficientemente positiva: il recensore riteneva che l'articolo offrisse una buona panoramica di molti argomenti consolidati (e che fosse quindi piacevole da leggere!), ma secondo lui/lei non fornivo alcun argomento originale che andasse oltre la letteratura esistente.

Provai con altre riviste, anche insolite, ma non ebbi fortuna e alla fine mi ritrovai piuttosto scoraggiato. Sentivo che i revisori apprezzavano tutti il contenuto dell'articolo, ma apparentemente non abbastanza per accettarlo. E ad essere sincero, sentivo anche che non riuscivano a cogliere appieno tutte le sue sfumature. Erano sensazioni che avrei sperimentato molte volte negli anni a venire, lavorando con il gruppo di Bruxelles, poiché l'approccio di questa scuola sembrava essere in grado di suscitare in molti ricercatori delle forti idiosincrasie, non sempre fondate sulla razionalità, che probabilmente andrebbero indagate più dal punto di vista della psicologia e della sociologia che della fisica.

D'altra parte, è anche vero che all'epoca non mi aspettavo molto, dato che non pubblicavo un vero articolo scientifico da molti anni e che avevo scritto l'articolo in questione soprattutto per il piacere di farlo, oltre che, naturalmente, perché pensavo offrisse un punto di vista interessante, degno di essere condiviso. A questo punto, però, le mie precedenti remore vennero meno e presi il coraggio di inviare il preprint anche a Diederik. Questa volta, fortunatamente, lo feci utilizzando la posta elettronica e non quella ordinaria, inviandogli il seguente breve messaggio.

> Gentile professor Aerts, le allego il preprint di un testo che ho scritto qualche tempo fa e che potrebbe essere di suo interesse. In particolare, spero che le piacerà l'esempio degli "spaghetti italiani crudi", un'entità macroscopica semplice che possiede delle proprietà effimere che intrattengono delle relazioni di incompatibilità.

Non mi aspettavo certo una risposta, vista la mia precedente esperienza, ma mi sbagliavo: la risposta arrivò molto rapidamente e

non era del tipo che avrei potuto prevedere. Il 13 agosto 2010, Diederik mi scrisse parole molto gentili:

> Caro Massimiliano (se posso), che articolo bello e interessante. E mi scalda il cuore leggere che sei stato assistente di Constantin Piron [...], ed è bello che tu gli dedichi questo articolo[12]. Inoltre, mi piace molto il tuo esperimento con gli spaghetti italiani, che in effetti illustra bene la differenza tra il tipo di incompatibilità sperimentale esemplificata dal mio esempio del pezzo di legno, e l'incompatibilità quantistica. Molto bello. Naturalmente, devo essere onesto, uno dei motivi per cui mi piace così tanto il tuo articolo è perché contiene molte delle riflessioni che ho fatto nel mio passato lavoro nel corso degli anni, che tu conosci naturalmente, dato che lo citi in modo appropriato, quindi va bene così. Ma hai anche presentato queste cose in modo molto chiaro e pertinente. Ti direi, affrettati a metterlo sull'archivio[13], questo tuo piccolo gioiello di sottili riflessioni scientifiche (e sorprendentemente, tutte queste cose, sebbene io abbia fatto un grande sforzo quando ci lavoravo per presentarle a conferenze, eccetera, non sono ancora note alla grande maggioranza dei fisici quantistici) [...].

Dalla sua risposta capii subito che non aveva mai ricevuto le lettere che gli avevo inviato anni prima, così decisi di non menzionare la cosa (Diederik è venuto a conoscenza delle mie lettere senza risposta solo in tempi molto recenti, anche perché dopo qualche tempo dimenticai completamente l'episodio). Invece del professore scontroso e inaccessibile che mi ero immaginato, il vero Diederik si rivelò una persona estremamente disponibile e sensibile, dotata di

[12] La dedica era: "Dedico questo articolo al professor Constantin Piron, uno dei fondatori della scuola di Geneva-Brussels di meccanica quantistica, di cui ho avuto il piacere di essere l'assistente circa una ventina d'anni fa. Interagire con Constantin per più di un anno, quasi su base giornaliera, ha cambiato in modo irreversibile il mio modo di guardare ai misteri del mondo quantistico, il quale, un po' paradossalmente, era solito divenire allo stesso tempo meno e più misterioso quando mi trovavo in sua presenza".

[13] Il riferimento è all'archivio della Cornell University (*https://arxiv.org*), dove la quasi totalità dei fisici deposita i propri preprint, prima di inviarli a una rivista.

notevoli qualità umane; qualità che avrei imparato a conoscere meglio nel corso degli anni.

Per farla breve, da quel primo contatto nacque un intenso scambio, fatto di lunghe e-mail e, occasionalmente, anche di lunghissime conversazioni su Skype. Diederik riuscì facilmente a "contagiarmi" con il suo entusiasmo per le questioni fondazionali della fisica, e così iniziai a scrivere numerosi articoli sulle nozioni discusse negli anni dalla *Brussels school* (scuola di Bruxelles).

Dopo questo primo articolo che scrissi sull'effimerità delle proprietà quantistiche, che alla fine venne pubblicato[14], dopo qualche tempo ne scrissi un secondo, in cui rivisitavo alcune delle nozioni che avevo esplorato durante la mia tesi di dottorato, come la nozione di *tempo di soggiorno* di un'entità fisica in una data regione dello spazio, che reinterpretavo alla luce della visione di creazione-scoperta di Aerts e della sua analisi della non-spazialità[15].

Poiché la mia tesi di dottorato riguardava anche lo studio dei processi di scattering non relativistici, ero altresì incuriosito dalla possibilità di inventare una macchina macroscopica che simulasse in qualche modo un processo di scattering quantistico unidimensionale e, dopo averci riflettuto per un po', con una certa soddisfazione trovai un modo per farlo (si veda la Figura 3)[16].

Leggendo e approfondendo l'approccio sviluppato da Diederik e collaboratori, continuai poi con piacere a inventare delle nuove situazioni macroscopiche che imitassero gli effetti quantistici, come feci in due articoli che scrissi sui 'dadi quantistici' che vengono lanciati in modo tale da creare i tipici effetti di interferenza quantistica, ma anche di entanglement, violando massimamente le disuguaglianze di Bell quando due dadi si connettono, fornendo un

[14] Sassoli de Bianchi, M. (2011). Ephemeral properties and the illusion of microscopic particles. *Foundations of Science 16*, pp. 393–409.

[15] Sassoli de Bianchi, M. (2012). From permanence to total availability: a quantum conceptual upgrade. *Foundations of Science 17*, pp. 223–244.

[16] Sassoli de Bianchi, M. (2013). The delta-quantum machine, the k-model, and the non-ordinary spatiality of quantum entities. *Foundations of Science 18*, pp. 11–41.

interessante esempio complementare al famoso 'modello dei contenitori d'acqua' proposto da Diederik, dove questa volta l'entità composita non deve rompersi affinché si creino le correlazioni[17].

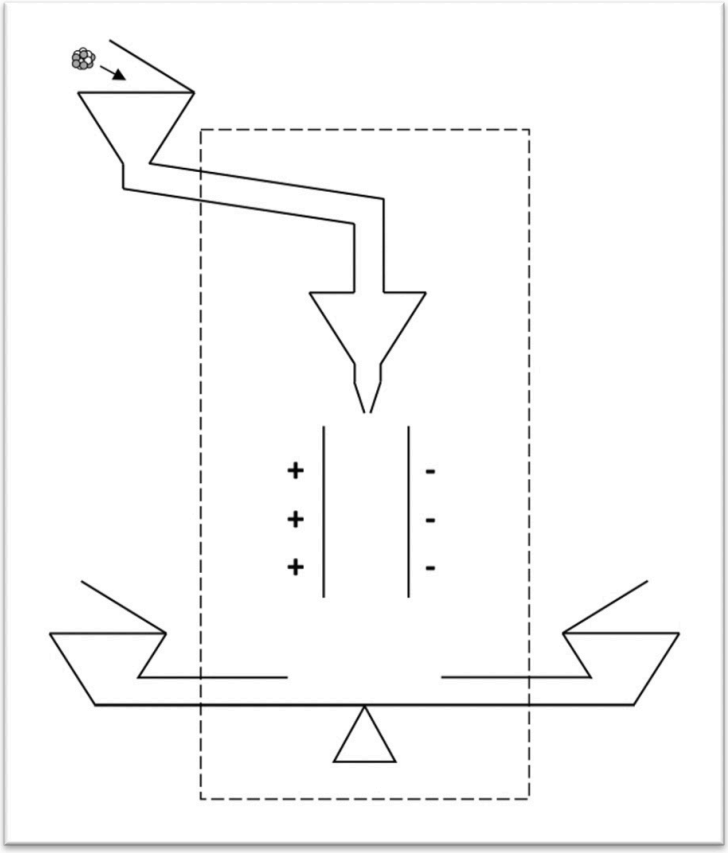

Figura 3 Una descrizione semplificata di una macchina δ-quantistica, in grado di generare le probabilità di trasmissione e riflessione di un processo di scattering quantistico unidimensionale.

Scrissi anche degli articoli che avevano come unico scopo quello di far conoscere meglio i risultati della Brussels school, in quanto ero davvero

[17] Sassoli de Bianchi, M. (2013). Quantum dice. *Annals of Physics 336*, pp. 56–75. Sassoli de Bianchi, M. (2014). A remark on the role of indeterminism and non-locality in the violation of Bell's inequality. *Annals of Physics 342*, pp. 133–142.

sorpreso di come questo approccio decisamente originale fosse rimasto in gran parte sconosciuto al di fuori della ristretta cerchia degli addetti ai lavori[18]. Questo impegno lo porto avanti ancora oggi, perché spesso i risultati importanti ottenuti nella scienza vengono dimenticati o non apprezzati a dovere quando vengono pubblicati per la prima volta, e quindi devono essere nuovamente portati all'attenzione della comunità scientifica. Un esempio è l'importante analisi contenuta nella tesi di dottorato di Diederik, sull'incompletezza strutturale del formalismo standard della meccanica quantistica, incapace di descrivere correttamente dei sistemi separati[19].

A questo proposito, dato che il *problema della misura quantistica* interessava anche le persone attive negli studi sulla coscienza, in particolare in relazione al *problema mente-corpo* e alla possibilità di spiegare i controversi "effetti parapsicologici", e dato che ero abbastanza attivo in questo campo (più dal punto di vista della ricerca personale – autoricerca – che da quello accademico), ritenni interessante cercare di comunicare alcuni dei risultati di Diederik anche a quel pubblico specifico, utilizzando a tal fine la nozione di "effetto osservatore" e sottolineando che un'osservazione è molto di più di un semplice atto di scoperta, poiché comporta anche un atto di creazione di ciò che viene osservato. Questo era già molto chiaro nella visione di Diederik della creazione-scoperta, ma aveva usato nei suoi scritti la nozione di osservazione più come sinonimo di *scoperta*, mentre io ritenevo più interessante intenderla in senso più ampio (si veda la mia osservazione precedente, nella seconda lettera che scrissi a Diederik).

---

[18] Sassoli de Bianchi, M. (2013). Using simple elastic bands to explain quantum mechanics: a conceptual review of two of Aerts' machine-models. *Central European Journal of Physics 11*, pp. 147–161.

[19] Sassoli de Bianchi, M. (2019). On Aerts' overlooked solution to the EPR paradox. In: *Probing the Meaning of Quantum Mechanics. Information, Contextuality, Relationalism and Entanglement*. D. Aerts, M. L. Dalla Chiara, C. de Ronde & D. Krause (eds.) World Scientific, pp. 185–201.

Così, scrissi alcuni articoli sottolineando che l'*effetto osservatore* è un effetto reale, anche in fisica, ma cercando di demistificare il fatto che una mente umana sarebbe necessariamente implicata in esso[20]. La "mente" dell'apparato di misura era infatti più che sufficiente per questo, e quindi non c'era bisogno di scomodare la coscienza per spiegare una misura quantistica, come ipotizzato da fisici come *Eugene Wigner* e più recentemente *Henry Stapp*.

Ora, ricordando il consiglio datomi da quel precedente recensore, circa la stesura di un libro divulgativo, decisi in quel periodo di scrivere un nuovo testo (si veda la Figura 4), questa volta sia in italiano che in inglese, dal titolo *Effetto osservatore*[21], in cui affrontavo in modo pedestre sia il problema della misura che la nozione di non-spazialità. Da quel testo emerse poi un nuovo articolo, che era la continuazione naturale delle mie precedenti riflessioni pubblicate sull'effetto osservatore[22].

Come è facile immaginare, il fatto di essere sempre più coinvolto nella lettura, nello studio e nella ricerca sui lavori della Brussels school, scrivendo articoli su di essa e persino un libretto, mi permise di interagire e discutere con Diederik con più frequenza e in modo più approfondito, con lui che si è sempre mostrato molto supportivo nei miei confronti. Ero affascinato da ogni sorta di idee e congetture speculative che aveva pubblicato nel corso degli anni, sulle quali naturalmente era necessario riflettere ulteriormente, per capire se oltre a essere delle belle idee erano anche delle idee fondate.

---

[20] Sassoli de Bianchi, M. (2013). The Observer Effect. *Foundations of Science 18*, pp. 213–243. Sassoli de Bianchi, M. (2013). Quantum measurements are physical processes. Comment on "Consciousness and the double-slit interference pattern: Six experiments," By Dean Radin et al. *Physics Essays 26*, pp. 15–20.

[21] Questo saggio è stato pubblicato nel 2013 da Adea Edizioni. Una seconda edizione, arricchita nei contenuti, è stata successivamente pubblicata in *AutoRicerca 19* (2019).

[22] Sassoli de Bianchi, M. (2015). God may not play dice, but human observers surely do. *Foundations of Science 20*, pp. 77–105.

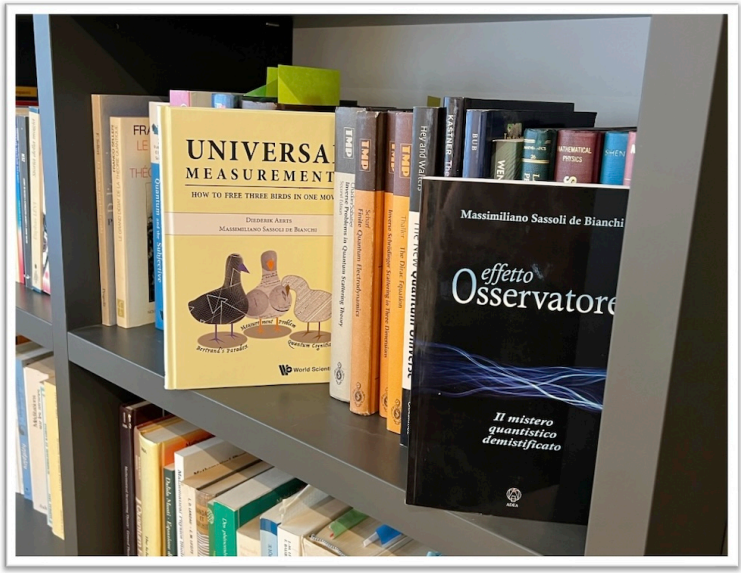

Figura 4 La copertina del libro italiano sull'effetto osservatore, che scrissi nel 2013, e la copertina del libro sulle misure universali, scritto successivamente con Diederik Aerts, nel 2017 (pubblicato anche in italiano, nel 2019).

In particolare, mi affascinava, e mi lasciava estremamente perplesso, la sua ipotesi che le *misure quantistiche* potessero essere intese come delle *misure universali*, dove queste ultime erano definite come la condizione più generale possibile di non conoscenza, cioè come una condizione di non conoscenza su tutte le possibili forme di fluttuazioni non uniformi che sono in linea di principio attualizzabili in un dato contesto sperimentale.

La discussione sulle misure universali fu davvero l'inizio della nostra collaborazione scientifica. Raccontiamo un po' come è iniziata nella prefazione del libro *Universal Measurements – How to free three birds with one move* (World Scientific), che ho avuto il piacere di scrivere con Diederik nel 2017 (si veda la Figura 4)[23]. Sorprendentemente, all'inizio ero molto critico sulla validità della

[23] Il libro è disponibile anche in italiano, con il titolo*: Misure universali – Come prendere tre piccioni con una fava* (Aracne editrice, 2019).

sua ipotesi, e da questa contrapposizione iniziale nacque un interessante e lungo scambio di scritti, in cui io cercavo di dimostrare che l'ipotesi era sbagliata – quindi all'inizio cercavo anche di trovare un controesempio – e Diederik ogni volta offriva riflessioni precise e profonde in risposta alle mie obiezioni.

Quello che ricordo è che a un certo punto, in una lunga risposta a una mia altrettanto lunga e-mail, verso la fine del messaggio Diederik mi scrisse quanto segue (il messaggio è datato 10 agosto 2013):

> Nel caso in cui questo ti interessasse, potremmo scrivere insieme un articolo che contenga specificamente gli elementi della nostra discussione sulla nozione di misura universale [...]. Come vedi, non ho mai trovato l'energia per scrivere un vero e proprio articolo su tutto questo, nel quale le cose verrebbero ben specificate e spiegate. È sempre stato parte di articoli che si concentravano principalmente su altre cose. Tuttavia, non sentirti affatto obbligato a prendere in considerazione quanto sopra. Quindi, solo se lo trovi interessante, possiamo prenderlo in considerazione.

La mia risposta entusiasta (e allo stesso tempo un po' preoccupata), il giorno dopo, fu la seguente:

> Non solo mi interesserebbe scrivere un articolo con te su questi argomenti, ma lo considererei anche un grande onore. La mia unica preoccupazione è quella di riuscire a contribuire sufficientemente al nostro scambio, considerando quanto poco conosco questi temi rispetto a te.

Da quel momento in poi, la nostra discussione divenne sempre più ricca e, nonostante le mie insicurezze nell'essere all'altezza dello scambio, si concluse con me che, miracolosamente, trovai un modo per dimostrare ciò che inizialmente volevo confutare. Ma questo fu in gran parte dovuto al fatto che Diederik aveva sempre guidato saggiamente i miei processi di pensiero, incoraggiandomi ad andare più a fondo e mettendomi, intellettualmente parlando, delicatamente all'angolo, dove avrei potuto meglio contemplare quella "nuda materia" che stavamo cercando di elucidare.

Per farla breve, da quando abbiamo pubblicato il nostro primo articolo insieme, nel 2014, ad oggi, siamo stati coautori di quasi cinquanta articoli (molti dei quali in collaborazione con altri membri della famiglia scientifica di Bruxelles), oltre che del libro di cui ho accennato prima. Questo per sottolineare la fecondità dei nostri scambi, come nel caso di tutte le numerose collaborazioni che Diederik ha coltivato negli anni e coltiva ancora a tutt'oggi. Infatti, è uno di quei rari scienziati che riescono sempre a massimizzare le risorse intellettuali e umane potenzialmente disponibili in un lavoro di squadra, e questo senza mai forzare nessuno ma trovando sempre, magicamente, il modo di far sì che tutti mettano sul tavolo il meglio di loro stessi. Per definire questa sua qualità, mi viene in mente la parola *carisma*.

Non cercherò di calcolare il numero di persone che finora hanno interagito scientificamente con Diederik, sono troppe. Mi limito però a ricordare che provengono da tutti i campi di indagine: matematici, fisici, filosofi, psicologi, informatici, medici, solo per citarne alcuni. Questo perché il suo approccio alla realtà è sempre stato estremamente ampio, come ampie sono le idee che ha elaborato e sviluppato nel corso del tempo. Per questo motivo, definirlo solo un fisico sarebbe troppo riduttivo, anche se la fisica è certamente la disciplina che è al centro dei suoi interessi, e anche quella che gli sta più a cuore.

Qualche anno fa, è stato eletto vincitore della *Medaglia Prigogine 2020*, istituita nel 2004 dall'Università di Siena e dal Wessex Institute per onorare la memoria di *Ilya Prigogine*, Premio Nobel per la Chimica (si veda la Figura 5). Si tratta di un meritato riconoscimento per il suo eccezionale lavoro, che si estende ben oltre gli stretti confini della fisica.

Quando chiesi a Diederik di cosa avrebbe parlato alla conferenza prevista a Siviglia, per la Cerimonia di consegna del premio, mi disse che voleva cercare di delineare i punti salienti del percorso di ricerca che lo aveva portato, in tempi più recenti, alla formulazione di una nuova interpretazione della meccanica quantistica, detta *interpretazione concettualistica*, secondo la quale le entità

quantistiche sarebbero meglio caratterizzate come delle entità concettuali (sebbene distinte dai concetti umani), anziché come delle entità oggettuali (si veda la Figura 6).

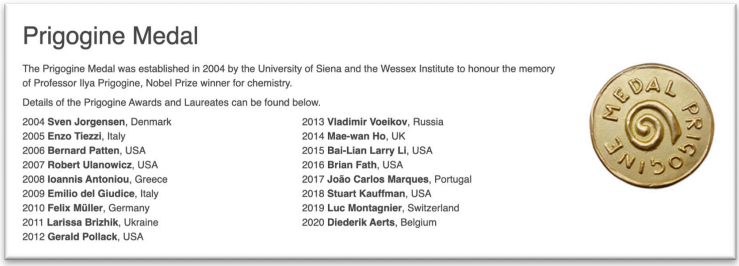

Figura 5 La medaglia Prigogine viene assegnata ogni anno a uno scienziato leader nel campo dei sistemi ecologici. Tutti i premiati sono stati profondamente influenzati dal lavoro di Prigogine, che ha gettato le basi della ricerca su tali sistemi.

Quando lessi per la prima volta di questa interpretazione, nel primo articolo scritto da Diederik nel 2009 (si veda l'elenco di articoli riportato qui di seguito), ricordo di essere rimasto davvero colpito e affascinato. Infatti, nessuno degli innumerevoli tentativi di interpretazione della meccanica quantistica che avevo letto nel corso degli anni era riuscito, a mio avviso, a dare un senso al comportamento apparentemente incomprensibile, e indubbiamente paradossale, delle entità quantistiche. L'approccio di Diederik, invece, rendeva per la prima volta intelligibile il loro comportamento e, nella mia mente, ebbe l'effetto di un raggio di luce nell'oscurità. Il suo è senza dubbio un approccio radicale che, se si dimostrasse vero, cambierebbe radicalmente il modo in cui comprendiamo la realtà fisica.

Nel corso degli anni, partecipai anch'io al suo sforzo di esplorare e chiarire questa sorprendente interpretazione, insieme ad altri colleghi del *Brussels group*. Di seguito elenco alcuni degli articoli più importanti frutto di questo lavoro congiunto, partendo dagli articoli fondatori scritti da Diederik.

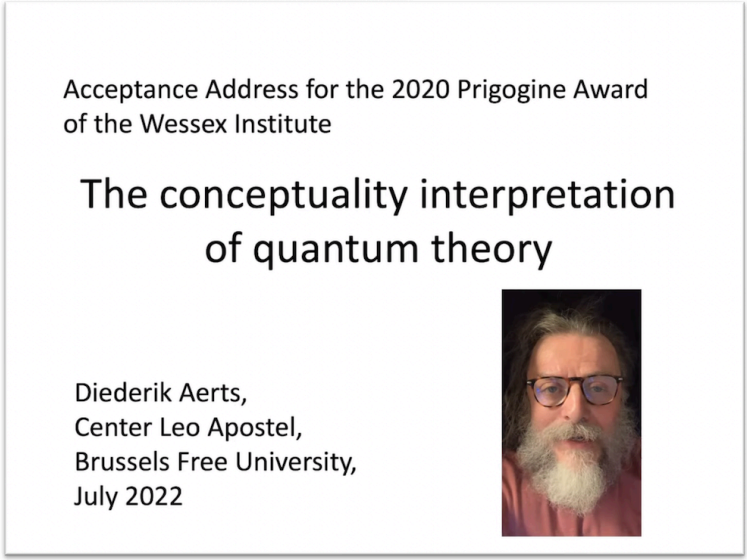

Figura 6 La cerimonia per la Medaglia Prigogine 2020 fu posticipata al 2022 e si svolse esclusivamente online. Il titolo completo della presentazione di Diederik era: *A Quantum Quest. From operational quantum axiomatics to quantum conceptuality, or how to unveil meaning in reality.* Una possibile traduzione potrebbe essere: "Un Viaggio Quantistico. Dall'assiomatica quantistica operazionale alla concettualità quantistica, o come svelare il significato presente nel reale.

Aerts, D. (2009). Quantum particles as conceptual entities: A possible explanatory framework for quantum theory. *Foundations of Science 14*, pp. 361–411.

Aerts, D. (2010a). Interpreting quantum particles as conceptual entities, *Int. J. Theor. Phys. 49*, pp. 2950–2970.

Aerts, D. (2010b). A potentiality and conceptuality interpretation of quantum physics, *Philosophica 83*, pp. 15–52.

Aerts, D. (2013). La mecánica cuántica y la conceptualidad: Sobre materia, historias, semántica y espacio-tiempo, Scientiae Studia 11, pp. 75–100. Translated from: Aerts, D. (2011). Quantum theory and conceptuality: Matter, stories, semantics and space-time, *arXiv:1110.4766 [quant-ph].*

Aerts, D. (2014). Quantum theory and human perception of the macro-world, *Front. Psychol. 5*, Article 554.

Aerts, D. and Sassoli de Bianchi, M. (2018). Quantum Perspectives on Evolution. In Shyam Wuppuluri, Francisco Antonio Doria (Eds.), *The Map and the Territory: Exploring the Foundations of Science*, Thought and Reality. Springer: The Frontiers collection, pp. 571–595.

Sassoli de Bianchi, M. (2015). Taking quantum physics and consciousness seriously: what does it mean and what are the consequences? *Journal of Consciousness 18*, Special edition, pp. 203-268. Tradotto anche in italiano in *AutoRicerca 10*, 2015, e successivamente ripubblicato in *AutoRicerca 21*, 2020.

Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M. (2017). Multiplex realism. *Journal of Consciousness – Proceedings of the 2nd International Congress of Consciousness*, held in Miami (USA) from May 19th to 21st, 2017. Pubblicato anche in *AutoRicerca 21*, 2020.

Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. and Veloz, T. (2019). From Quantum Axiomatics to Quantum Conceptuality. *Act. Nerv. Super. 61*, pp. 76–82.

Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. and Veloz, T. (2020). On the conceptuality interpretation of quantum and relativity theories. *Foundations of Science 25*, 5–54. Pubblicato anche in *AutoRicerca 21*, 2020, e tradotto in italiano in *AutoRicerca 24*, 2022.

Aerts, D. and Beltran, L. (2020). Quantum structure in cognition: Human language as a Boson gas of entangled words. *Foundations of Science 25*, pp. 755–802.

Sassoli de Bianchi, M. (2021). A non-spatial reality. *Foundations of Science 26*, pp. 143–170. Pubblicato anche in *AutoRicerca 21*, 2020 e tradotto in italiano in *AutoRicerca 24*, 2022.

Aerts, D. and Sassoli de Bianchi, M. (2022). On the irreversible journey of matter, life and human culture. In: Wuppuluri, S., Stewart, I. (Eds.), *From Electrons to Elephants and Elections*. The Frontiers Collection. Springer, pp. 821-842. Una versione rivista e ampliata di questo articolo, in italiano, è disponibile su *AutoRicerca 27* (2023). Si veda anche il dialogo: *The secret of life*, pubblicato in *AutoRicerca* 18, 2019.

Aerts, D. and Sassoli de Bianchi, M. (2023). La fisica e metafisica dell'interpretazione concettualistica. *arXiv:2310.10684 [quant-ph].* Pubblicato in questo volume: *AutoRicerca 31*, 2025.

L'idea dell'interpretazione concettualistica è emersa da un campo di studi chiamato *cognizione quantistica*, di cui Diederik è stato senza dubbio uno dei pionieri. Recentemente, assieme anche a Sandro Sozzo, abbiamo avuto l'opportunità di raccontare la storia di questo viaggio scientifico, che parte dalla cognizione quantistica e arriva all'interpretazione concettualistica, in due articoli che verranno pubblicati sulla prestigiosa rivista *Philosophical Transactions of the Royal Society* (la più antica rivista scientifica del mondo![24]).

Nel primo articolo, esploriamo il modo in cui la matematica quantistica, inizialmente applicata alla cognizione umana, ha portato all'interpretazione concettualistica.

> Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M. and Sozzo, S. (2024). From Quantum Cognition to Conceptuality Interpretation I: Tracing the Brussels Group's Intellectual Journey. To be published in: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. *arXiv: 2412.06799*.

Questa interpretazione suggerisce che le entità quantistiche operino concettualmente, interagendo con il mondo materiale attraverso processi basati sul significato, simili a quelli del pensiero umano. Nel secondo articolo, mostriamo come l'interpretazione concettualistica getti luce sui fenomeni quantistici, tra cui il principio di indeterminazione di Heisenberg, l'entanglement e persino gli effetti relativistici come la dilatazione temporale.

> Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M. and Sozzo, S. (2024). From Quantum Cognition to Conceptuality Interpretation II: Unraveling the Quantum Mysteries. To be published in: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. *arXiv: 2412.19809*.

A tutt'oggi, la mia collaborazione scientifica con Diederik continua, spinta dal desiderio condiviso di esplorare argomenti spesso

[24] Il primo numero delle Philosophical Transactions apparve nel marzo 1665 e conteneva la corrispondenza di Oldenburg con i principali scienziati europei. Nei suoi primi anni di attività, *Isaac Newton* pubblicò diciassette articoli sulla rivista, tra cui il suo primo scritto – New Theory about Light and Colours – che di fatto avviò la sua carriera scientifica nel 1672. La rivista ha pubblicato anche i lavori di *Charles Darwin, Michael Faraday, William Herschel* e molti altri nomi celebri della scienza.

trascurati dai nostri colleghi, ma potenzialmente fondamentali per approfondire la nostra comprensione del reale. Provo a illustrare questo punto con un esempio, che concluderà questo mio breve racconto autobiografico del mio incontro con Diederik.

La nozione di *libera scelta* (e la nozione collegata di *libero arbitrio*) occupa un posto centrale nella maggior parte delle tradizioni spirituali. È profondamente intrecciata con i concetti di bene e male nel pensiero occidentale e di karma nella filosofia orientale. Tuttavia, la scienza contemporanea e filosofi molto influenti spesso ne sminuiscono il significato, suggerendo che la vera libertà metafisica, o il vero indeterminismo, non esistono veramente, riducendo così la libera scelta a una mera illusione molto persistente.

Tuttavia, a partire dagli anni Settanta, inizialmente a Ginevra e successivamente a Bruxelles, è stato sviluppato un approccio fondazionale, operazionale e realista alla meccanica quantistica che aveva l'ambizione di ricostruire la teoria su basi assiomatiche. Questo sforzo è giunto a compimento nel 2000, con la ricostruzione completa del formalismo hilbertiano standard. Abbiamo recentemente riraccontato la storia di questo programma di ricostruzione in un articolo che verrà anch'esso pubblicato nelle *Philosophical Transactions of the Royal Society*:

> Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Sassoli de Bianchi, M. and Sozzo, S. (2024). The Separability Problem in Quantum Mechanics: Insights from Research on Axiomatics and Human Language. To be published in: *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. See also: *arXiv: 2409.15942*.

Tuttavia, un punto essenziale rimane ancora non sufficientemente sottolineato: il principio della libera scelta non è una mera speculazione filosofica, ma un requisito scientifico cruciale, senza il quale le fondamenta stesse delle nostre teorie quantistiche e relativistiche crollerebbero. Per esempio, la relatività, senza questo principio, finisce col descrivere un *universo a blocchi*, cioè una realtà statica e del tutto incomprensibile.

Il significato scientifico della libera scelta diventa più chiaro quando si esaminano quei modelli di cognizione umana che hanno rivelato delle profonde somiglianze strutturali tra processi cognitivi e quantistici, dando origine al già citato campo della cognizione quantistica. In particolare, l'indeterminazione quantistica è l'equivalente dell'imprevedibilità intrinseca del processo decisionale umano, e paralleli di questo tipo hanno contribuito alla formulazione dell'interpretazione concettualistica, che postula l'esistenza di un universo fondamentalmente *pancognitivista*, dove la cultura umana rappresenta solo uno dei diversi strati in cui possono emergere delle strutture cognitive.

Anche la teoria dell'evoluzione potrebbe trovare un rinnovamento all'interno di questo quadro operazionale e realista più ampio, in cui l'indeterminismo e il libero arbitrio assumono un ruolo prevalente. Infatti, se i processi quantistici e cognitivi si manifestano a diversi livelli organizzativi – dalla materia inerte agli organismi viventi, fino ad arrivare agli artefatti culturali – diventa possibile immaginare meccanismi di selezione alternativi al tradizionale modello darwiniano, meccanismi che operano sul livello delle *potenzialità* piuttosto che su quello delle *attualità*.

Questa prospettiva delinea un quadro teorico ricco e sfaccettato che richiede ancora di consolidarsi in diverse direzioni di indagine, alla ricerca di un'integrazione tra visioni del mondo precedentemente considerate inconciliabili. La scienza moderna, che ha scartato prematuramente la libera scelta, e la spiritualità, che riconosce invece la coscienza e la libertà ma fatica a identificarne la manifestazione nel mondo materiale, potranno forse trovare un terreno d'intesa comune attraverso questo approccio.

Quindi, sempreché la vita, con tutti i suoi obblighi e impegni, lo permetta, Diederik e io abbiamo sicuramente molte strade promettenti per proseguire la nostra collaborazione. Spero che il nostro lavoro possa favorire nuove alleanze, fornendo in particolare un linguaggio comune tra scienza e spiritualità. Questo permetterà

sicuramente agli esseri umani di diventare degli attori più maturi e responsabili su questo nostro pianeta.

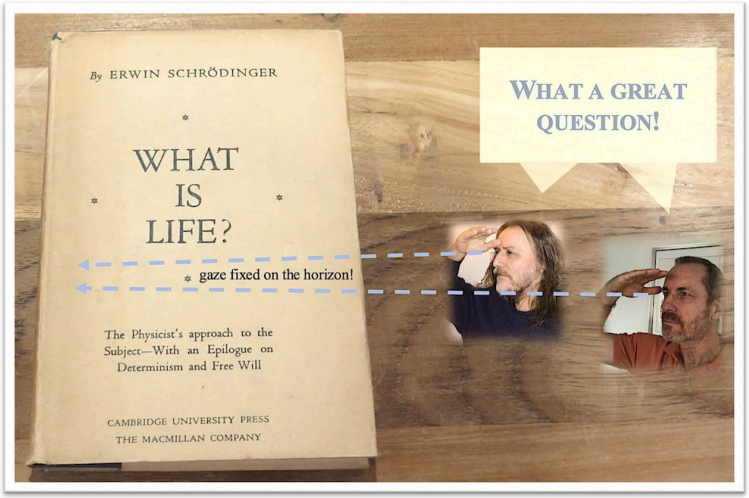

Figura 7 Diederik (a sinistra) e Massimiliano (a destra) scrutano simbolicamente l'orizzonte nel tentativo di fornire nuove risposte alla domanda cruciale posta da Schrödinger: *Che cos'è la vita?*