

Sulla causalità e la predittività

Damiano Anselmi

Dipartimento di Fisica “Enrico Fermi”, Università di Pisa

Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

and INFN, Sezione di Pisa,

Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

damiano.anselmi@unipi.it

Abstract

Alcuni approcci alla gravità quantistica, come quello basato sul concetto di particelle puramente virtuali (fakeon), sacrificano la relazione causa-effetto a scale molto piccole per riconciliare la rinormalizzabilità con l’unitarietà. Altri sviluppi hanno parimenti esortato alla cautela riguardo all’idea di causalità come principio fondamentale. In questo articolo, esaminiamo il problema da molteplici prospettive, incluse la località e la predittività, ed estendiamo lo scetticismo esistente in diverse direzioni. Ponendo l’accento sull’impatto di “disturbatori ” fuori controllo, evidenziamo come l’illusoria freccia del tempo associata alla causalità e alla predittività sia intrinsecamente statistica. Ciò rende la relazione causa-effetto una forzatura a livello microscopico. Mostriamo inoltre che la causazione è un concetto limite che richiede di credere in entità capaci di agire sulla natura senza farne parte. In definitiva, non solo la rinuncia alla microcausalità è un prezzo ragionevole da pagare per una teoria della gravità quantistica coerente e predittiva (come quella basata sull’idea dei fakeon), ma la nozione stessa di causalità è fuorviante. Fondandosi com’è su assunzioni metafisiche, essa dovrebbe pertanto essere abbandonata nella fisica fondamentale.

1 Introduzione

Tra i principi fondamentali della Teoria Quantistica dei Campi (QFT) figurano la località, la rinormalizzabilità e l'unitarietà. Mentre l'unitarietà è un requisito di auto-consistenza, essenziale per la conservazione della probabilità, la località e la rinormalizzabilità sono principi più pragmatici che hanno guidato con successo la costruzione di teorie descrittive delle quattro interazioni fondamentali della natura. La microcausalità, spesso strettamente legata alla località e all'analiticità, ha storicamente svolto un ruolo importante, sebbene forse meno esaminato. Tuttavia, per varie ragioni, la necessità di una causalità rigorosa viene sempre più messa in discussione nella fisica fondamentale, in particolare in relazione alla gravità quantistica (QG).

Sebbene si preveda generalmente che la gravità quantistica possa richiedere il sacrificio di certi principi fondamentali, questa necessità non impone automaticamente l'abbandono dell'intero schema della QFT, che si è dimostrato così efficace nel descrivere le altre tre interazioni. Questa posizione si pone in contrasto con le assunzioni alla base di approcci quali la Teoria delle Stringhe, la Gravità Quantistica a Loop e l'Olografia, che richiedono radicali cambiamenti fondamentali. Tali ampi distacchi dalla QFT mancano spesso di potere predittivo e possono riflettere un indebito pessimismo riguardo alla flessibilità dell'approccio standard della QFT.

È chiaro che affrontare la gravità quantistica dall'interno dello schema della QFT presenti uno spazio di manovra ridotto. D'altra parte, è proprio questo potente vincolo sulle opzioni disponibili che può condurre a un risultato predittivo. Se la necessaria rinuncia teorica dovesse rivelarsi minima, l'efficacia dell'approccio sarebbe ancora più convincente.

Tra i principi che possono essere prontamente allentati vi sono la località, la causalità e l'analiticità, a condizione che non vengano abbandonati del tutto ma semplicemente modificati nella misura minima indispensabile. Mentre l'analiticità può essere vista come parzialmente rinunciabile, dato il suo status di requisito pragmatico, la causalità e, in una certa misura, la località, possono rimandare a principi più fondamentali che alcuni potrebbero non essere disposti a sacrificare così rapidamente, nemmeno a livello microscopico.

Che cos'è una "causa"? Questa domanda apparentemente innocua nasconde una complessità maggiore di quanto si assuma abitualmente. Fin da Hume [1], la risposta non dovrebbe essere data per scontata. La causazione è una scorciatoia pratica, come sostiene Hume, o un principio fondamentale della natura? Questo non è un problema minore, poiché elevare una scorciatoia pratica allo status di legge fisica — o persino di principio — comporta il rischio di fuorviarsi, oscurando potenzialmente promettenti soluzioni candidate a problemi aperti esistenti. La meccanica non relativistica e quella relativistica non

sollevano sospetti significativi sulla causalità.

La meccanica quantistica inizia a piantare un seme di dubbio, poiché la sua interpretazione standard include il collasso non causale (probabilistico e istantaneo) della funzione d'onda all'atto della misura, rompendo fundamentalmente l'evoluzione deterministica governata dall'equazione di Schrödinger. La teoria quantistica dei campi solleva ulteriori preoccupazioni, poiché manca di una definizione di microcausalità convincente e ampiamente accettata. Nonostante questa ambiguità concettuale, la QFT ha ottenuto successi e potere predittivo straordinari. Dato che si possono compiere progressi sostanziali senza risolvere la questione, la stretta necessità del concetto di causalità è, quantomeno, ridondante per la fisica fondamentale. La gravità quantistica segna un passo avanti. In molti approcci, non ci si aspetta che la causalità rigorosa sia cruciale alla scala di Planck o al di sotto di essa. Alcuni schemi teorici prevedono che la causalità possa essere violata a scale molto più grandi.

Per esempio, nella gravità quantistica con i fakeon [2, 3] (ovvero particelle puramente virtuali, o particelle che non possono mai trovarsi sul guscio di massa [4, 5, 6]), la scala di violazione della causalità è $1/m_\chi$, dove m_χ è la massa del “gravifakeon”, una particella puramente virtuale di spin 2 che appartiene al tripletto fondamentale della teoria (gravitone, inflatone e fakeon), necessaria per garantire la coerenza attraverso l'unitarietà e la rinormalizzabilità. Su basi cosmologiche [7], m_χ è vincolata a essere maggiore di $m_\phi/4$, dove m_ϕ denota la massa dell'inflatone (circa 10^{13}GeV secondo i risultati sugli spettri primordiali delle fluttuazioni scalari [8]). In definitiva, l'approccio dei fakeon consente violazioni della causalità che si estendono fino a sei ordini di grandezza sopra la lunghezza di Planck.

Un altro approccio per costruire modelli di QG che siano sia rinormalizzabili che unitari si basa sulla rimozione dei ghost delle teorie locali a derivate superiori inserendo appropriati fattori di forma non polinomiali nei propagatori [9]. Le teorie risultanti sono non locali e violano la microcausalità, sebbene in modi diversi.

La QFT non locale ha attirato l'attenzione per lungo tempo, a partire dai lavori pionieristici di Pais e Uhlenbeck [10] ed Efimov [11]. L'interesse in quest'area è stato ravvivato più recentemente da molti autori [9, 12]. Il problema principale di un approccio puramente non locale è che esso comporta un grado infinito di arbitrarietà, e non è attualmente noto alcun principio fisico per isolare una teoria unica. Ciò contrasta nettamente con lo schema dei fakeon, che produce un unico modello di QG strettamente rinormalizzabile [2]. È stato argomentato [13] che se una teoria unitaria non locale possiede un limite locale regolare, tale limite deve essere un modello contenente fakeon. Allora il limite locale fornisce il criterio mancante per selezionare la “giusta teoria” all'interno dello spazio infinito delle teorie non locali. Comportamenti acausali e fenomeni correlati si incontrano in diversi altri

contesti. Tra questi, menzioniamo i modelli di Lee-Wick [14], in cui le “particelle anormali” decadono rapidamente. Ulteriori esempi sono gli approcci basati su propagatori con poli complessi [15], analogie con la QCD [16], simmetrie antilineari [17] e ghost instabili [18]. Vale la pena notare che non ci si aspetta una violazione della causalità nella teoria di Stelle [19], che è una gravità quadratica con un ghost massivo di spin 2. Il problema principale di quella teoria, tuttavia, è la sua mancanza di unitarietà.

In questo articolo, esaminiamo criticamente il concetto di causalità all’interno di schemi sia deterministici che non deterministici. Sosteniamo che la nozione di causa sia sostenibile solo quando si riferisce a entità genuinamente esterne al sistema sotto osservazione. Crucialmente, queste entità esterne non devono essere soggette alle leggi della fisica. Altrimenti, esse costituirebbero semplicemente componenti interne di sistemi più ampi, perdendo così la loro essenza di cause. Poiché l’universo non contiene alcuna entità veramente esterna capace di agire sull’universo stesso, concludiamo che non esistono vere cause all’interno della natura.

L’idea di causa è, pertanto, un concetto limite. In primo luogo, appartiene alla nostra descrizione della natura piuttosto che essere una caratteristica intrinseca della natura stessa. Tuttavia, proprio come le leggi della fisica sono invarianti sotto cambiamenti di coordinate e sistemi di riferimento, è evidente che la natura non dipende dai nostri modi di formularla. In secondo luogo, descrivere la natura in termini di cause sconfina nella metafisica, o nel “soprannaturale”, poiché coinvolge entità che sono esterne alla natura, ma che possono agire su di essa.

La relazione causa-effetto ci offre l’illusione di avere il controllo sul futuro cambiando il corso degli eventi. Una volta accettato che questa sia, di fatto, un’illusione, potremmo accontentarci semplicemente di *predire* il futuro. Motivati da questa considerazione, esaminiamo criticamente la questione della predittività e sosteniamo che anche le vere predizioni sono impossibili in linea di principio. Invece, possiamo solo fare affermazioni che possono essere verificate retrospettivamente (prepostdizioni). Questa limitazione deriva dal fatto che i sistemi fisici non possono mai essere perfettamente isolati, né le loro condizioni iniziali possono essere fissate completamente. La possibilità che “disturbatori ” fuori controllo possano emergere da regioni dello spaziotempo al di fuori del nostro controllo e alterare il risultato finale in modi imprevisi non può mai essere rigorosamente esclusa, sebbene possa essere praticamente scartata su basi statistiche. Questo fatto stesso, tuttavia, conferma che l’illusoria freccia del tempo attribuita alla causalità è un effetto della statistica, che emerge a scale macroscopiche. Ciò rende la microcausalità superflua, anche in presenza di forze esterne.

Nelle teorie con i fakeon il massimo che possiamo ottenere sono prepostdizioni ritardate.

Tuttavia, il ritardo previsto nella gravità quantistica è così breve ($1/m_\chi \lesssim 10^{-37}$ secondi) da non peggiorare significativamente i limiti fondamentali delle nostre capacità predittive.

Si potrebbe obiettare che, per scopi quotidiani e in effetti per molte applicazioni scientifiche consolidate, queste siano distinzioni prive di un impatto pratico, nel senso che possiamo ancora capirci parlando di cause, effetti e predizioni. I problemi che discutiamo qui acquistano significato quando la causalità viene elevata a principio fondamentale. Se vogliamo decifrare la gravità quantistica, o comunque esplorare l'ignoto, ciò che è sufficiente per l'utilità pratica può benissimo essere insufficiente per l'indagine fondamentale. Questa cautela non dovrebbe sorprendere, poiché la teoria quantistica ci ha già insegnato a diffidare dal dare qualsiasi cosa per scontata.

La causalità spesso si sovrappone alla non-superluminalità, la proprietà per cui i segnali non possono propagarsi più velocemente della luce nella Relatività Speciale. Eppure la non-superluminalità non è inerente alla nozione di causalità. Se si assume che esistano relazioni di causa ed effetto, allora la non-superluminalità si limita a restringerle agli eventi che giacciono all'interno dei coni di luce passati e futuri. D'altra parte, se accettiamo, come dimostriamo in questo articolo, che le relazioni di causa ed effetto manchino di un significato fondamentale, non siamo per questo costretti ad accettare la propagazione superluminale.

Le argomentazioni avanzate in questo articolo non dovrebbero essere interpretate come controverse, poiché vi è poco bisogno di convincere la maggior parte della comunità dei fisici sull'opportunità di allentare il requisito della microcausalità, specialmente nella gravità quantistica. A parte segmenti specifici, forse dogmatici, all'interno della Teoria delle Stringhe e della Gravità Quantistica a Loop, che sembrano mantenere un impegno a-priori e non esaminato verso una causalità rigorosa, lo scetticismo sulla causazione come principio fondamentale è diffuso. Inoltre, la risposta della vasta comunità è stata incoraggiante, ricettiva e aperta fin dall'introduzione dello schema dei fakeon nel 2017. Il presente lavoro, pertanto, non mira a una persuasione capillare, ma piuttosto a perfezionare l'articolazione di punti che molti sono già ben disposti ad accettare, sottolineando che se il prezzo per ottenere una teoria della gravità quantistica coerente e, soprattutto, sperimentalmente testabile è allentare il vincolo della rigorosa microcausalità, come richiesto dalla teoria dei fakeon, si tratta di un compromesso che essi sono disposti ad accettare. Allo stesso tempo, avvertiamo fin da subito che non ci fermiamo qui, ma spingiamo la tesi molto oltre, suggerendo che la nozione di causalità sia intrinsecamente fuorviante (in quanto si basa su assunzioni metafisiche) e debba pertanto essere completamente abbandonata nella fisica fondamentale.

L'articolo è organizzato come segue. Nella Sezione 2, dimostriamo che la nozione di causa è insostenibile in una teoria deterministica. Nella Sezione 3, mostriamo come essa al-

luda all'esistenza di entità veramente esterne e sottolineiamo le preoccupazioni concettuali e le contraddizioni implicate da questa necessità. La Sezione 4 esamina la questione della predittività nelle teorie "causali". Questa discussione viene estesa alle teorie che incorporano i fakeon nella Sezione 5. Nella Sezione 6, commentiamo le difficoltà poste dal definire la causalità nella teoria quantistica dei campi e nella gravità quantistica, mentre nella Sezione 7 discutiamo la relazione con la non-località. La Sezione 8 contiene le conclusioni.

2 Determinismo e causalità

Mentre alcuni aspetti della causalità erano stati messi in discussione in precedenza, l'empirista scozzese David Hume fu il primo ad articolare un rigoroso scetticismo filosofico a riguardo. Ecco le sue parole, tratte da *An Enquiry Concerning Human Understanding* [1].

"Tutti gli eventi sembrano interamente sciolti e separati. Un evento segue un altro; ma non possiamo mai osservare alcun legame tra loro. Sembrano *congiunti*, ma mai *connessi*. E poiché non possiamo avere idea di alcunché che non sia mai apparso ai nostri sensi o al nostro sentimento interiore, la conclusione necessaria *sembra* essere che non abbiamo alcuna idea di connessione o potere, e che queste parole siano assolutamente prive di significato, quando impiegate sia nei ragionamenti filosofici che nella vita comune." [Sezione VII, Parte II, p. 76]

"Quando guardiamo gli oggetti esterni intorno a noi e consideriamo l'operazione delle cause, non siamo mai in grado, in un singolo caso, di scoprire alcun potere o connessione necessaria; alcuna qualità che leghi l'effetto alla causa e renda l'uno una conseguenza infallibile dell'altra. Troviamo solo che l'uno segue effettivamente, di fatto, l'altro." [Sezione VII, Parte I, p. 64]

"Appare, dunque, che questa idea di connessione necessaria tra gli eventi derivi da un certo numero di casi simili in cui si verifica la costante congiunzione di tali eventi; né tale idea può mai essere suggerita da uno solo di questi casi, esaminato in tutte le possibili luci e posizioni. Ma non c'è nulla in un numero di casi che sia diverso da ogni singolo caso, che si suppone sia esattamente simile; eccetto solo che, dopo una ripetizione di casi simili, la mente è portata dall'abitudine, all'apparire di un evento, ad attendersi il suo consueto accompagnatore e a credere che esso esisterà. Questa connessione, dunque, che *sentiamo* nella mente, questo passaggio consuetudinario dell'immaginazione da un oggetto al suo consueto accompagnatore, è il sentimento o l'impressione da cui formiamo l'idea di potere o di connessione necessaria." [Sezione VII, Parte II, p. 77]

"In conformità a questa esperienza, possiamo dunque definire una causa come *un oggetto, seguito da un altro, e dove tutti gli oggetti simili al primo sono seguiti da oggetti*

simili al secondo. O in altre parole dove, se il primo oggetto non fosse stato, il secondo non sarebbe mai esistito. L'apparizione di una causa trasporta sempre la mente, mediante un passaggio consuetudinario, all'idea dell'effetto" [Sezione VII, Parte II, p. 79]

"Tutte le inferenze dall'esperienza, dunque, sono effetti dell'abitudine, non del ragionamento. L'abitudine, quindi, è la grande guida della vita umana. è solo quel principio che rende la nostra esperienza utile per noi e ci fa aspettare, per il futuro, un treno di eventi simile a quelli apparsi nel passato." [Sezione V, Parte I, pp. 44-45]

In altre parole, Hume ipotizzò che la causazione sia un'abitudine psicologica, non una caratteristica intrinseca della realtà. Come egli sostenne, non vi sono cause né effetti, ma solo "treni di eventi in successione". La prima osservazione che viene in mente è che questo "treno di eventi" descrive più precisamente il determinismo, piuttosto che la causalità. La distinzione tra i due concetti è cruciale per la nostra analisi.

In un mondo deterministico il presente è univocamente determinato sia dal passato che dal futuro. Pertanto, è ridondante affermare che il presente sia "causato" dal passato, dato che non era disponibile alcuna alternativa. Gli eventi sono semplicemente parti di una catena fissa, e noi li interpretiamo come cause solo a causa del modo in cui percepiamo il tempo. Diciamo, ad esempio: "esporsi all'aria fresca oggi causa il fatto di ammalarsi domani". Ma potremmo altrettanto bene dire: "sarai malato domani, perché è già scritto, e per tale ragione oggi ti sei esposto all'aria fresca." La direzione della relazione causa-effetto è dunque arbitraria, contrariamente a ciò che la causazione dovrebbe essere: un ordinamento cronologico dotato di una freccia che indica un legame necessario dal passato, attraverso il presente, verso il futuro. è la nostra narrazione dell'universo che dota il flusso degli eventi di una freccia apparente.

Le leggi fondamentali della fisica (a parte la violazione di T prevista dal Modello Standard delle particelle elementari) sono simmetriche per inversione temporale. Nell'elettrodinamica classica, le condizioni al contorno standard all'infinito impongono l'uso dei potenziali ritardati rispetto a quelli avanzati. Questa scelta, tuttavia, non ha alcun legame intrinseco con la causazione. In altre situazioni, come all'interno di una cavità con pareti riflettenti, o nel descrivere come gli smartphone emettono e ricevono, abbiamo bisogno di combinazioni di potenziali sia ritardati che avanzati. Queste combinazioni non hanno anch'esse alcuna relazione con la causalità, né ne implicano la violazione. Esse riflettono semplicemente il fatto che il campo elettromagnetico è descritto matematicamente come una sovrapposizione di onde entranti e uscenti.

Per precisione, si consideri un dipolo oscillante puntiforme \mathbf{d} posto nell'origine. La

“sorgente”

$$J^\mu(t, \mathbf{r}) = -(\cos(\omega t) \mathbf{d} \cdot \nabla \delta^{(3)}(\mathbf{r}), \omega \mathbf{d} \sin(\omega t) \delta^{(3)}(\mathbf{r})), \quad \partial_\mu J^\mu = 0, \quad (2.1)$$

fornisce il potenziale vettore

$$A_-^\mu(t, \mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \left(\nabla \cdot \frac{\mathbf{d} \cos(\omega(t-r))}{r}, \frac{\omega \mathbf{d} \sin(\omega(t-r))}{r} \right), \quad (2.2)$$

risolvendo $\square A^\mu = J^\mu$ nel gauge di Lorenz $\partial_\mu A^\mu = 0$, dove $r = |\mathbf{r}|$. Tuttavia, la stessa corrente (2.1) fornisce anche la soluzione¹

$$A_+^\mu(t, \mathbf{r}) = -\frac{1}{4\pi} \left(\nabla \cdot \frac{\mathbf{d} \cos(\omega(t+r))}{r}, \frac{\omega \mathbf{d} \sin(\omega(t+r))}{r} \right), \quad (2.3)$$

nel qual caso non è una “sorgente”, ma un “pozzo”.

Dunque, la (2.1) è la “causa” o il “fine”, l’emettitore o il ricevitore? Se la (2.1) fosse la causa, essa basterebbe a causare il campo elettromagnetico codificato nel potenziale vettore (2.2). Invece, la scelta tra (2.2) e (2.3) riposa sulle condizioni al contorno all’infinito. Pertanto, la corrente (2.1) *di per sé* non è una causa.

Osservazioni di questo tenore, inclusa l’irrelevanza della causalità per la fisica, furono articolate più di un secolo fa da filosofi come Bertrand Russell e i suoi seguaci. Ecco alcuni estratti dal saggio di Russell “On the notion of cause” [20]. 1) “Nei moti di corpi mutualmente gravitanti, non c’è nulla che possa essere chiamato causa, e nulla che possa essere chiamato effetto; c’è meramente una formula. Si possono trovare certe equazioni differenziali che valgono in ogni istante per ogni particella del sistema e che, data la configurazione e le velocità in un istante, o le configurazioni in due istanti, rendono la configurazione in ogni altro istante precedente o successivo teoricamente calcolabile. Vale a dire che la configurazione in ogni istante è una funzione di quell’istante e delle configurazioni in due istanti dati. Questa affermazione vale in tutta la fisica, e non solo nel caso speciale della gravitazione.” 2) “Tutti i filosofi, di ogni scuola, immaginano che la causazione sia uno degli assiomi o postulati fondamentali della scienza, eppure, stranamente, nelle scienze avanzate come l’astronomia gravitazionale, la parola causa non appare mai.” 3) “La ragione per cui la fisica ha smesso di cercare cause è che, in effetti, non esistono cose del genere. La legge di causalità, credo, come molto di ciò che passa per buono tra i filosofi, è un relitto di un’epoca passata, che sopravvive, come la monarchia, solo perché si suppone erroneamente che non faccia danni.” 4) “La parola causa è così inestricabilmente legata ad associazioni fuorvianti da rendere desiderabile la sua completa estrusione dal vocabolario filosofico.”

¹La trasformazione $t \rightarrow -t$, $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$, $\mathbf{d} \rightarrow -\mathbf{d}$ implica $J^\mu \rightarrow J^\mu$, $\partial_\mu \rightarrow -\partial_\mu$, $\square \rightarrow \square$, $A_\pm^\mu \rightarrow A_\mp^\mu$.

Sfortunatamente, gli argomenti di Russell non sono riusciti ad aprire una breccia nella metodologia della fisica. Questo fallimento ha portato alla continua adozione di definizioni *ad hoc* al fine di preservare la nozione di causa, piuttosto che metterne in discussione il concetto stesso alla base. Crediamo che sia giunto il momento di chiudere la questione ed eliminare la causalità dai fondamenti delle scienze fisiche.

Come notato, l'essenza del determinismo è la mancanza di alternative. E se fossero disponibili delle alternative? Allora forse si potrebbe dare un senso a concetti come causa ed effetto, perché sarebbe possibile “cambiare il corso degli eventi”. Nondimeno, l'unico ambito in cui più risultati possono seguire dalle stesse condizioni iniziali in fisica è la teoria quantistica. Lì, la selezione tra diverse possibilità è determinata dal caso, cioè avviene senza causa. Sebbene il corso degli eventi non sia scritto in anticipo, non è possibile controllarlo o guidarlo. Dobbiamo quindi ammettere che la teoria quantistica non è un candidato promettente per risuscitare la nozione di causalità.

Vale la pena sottolineare che il tempo non possiede una freccia nemmeno nella meccanica quantistica. È vero che la scelta di un particolare futuro tra molte opzioni (ad esempio, la scelta tra destra e sinistra nell'esperimento di Stern-Gerlach) è creata *ex nihilo*. A prima vista, questa selezione acausale può sembrare dotare il tempo di una direzione. Tuttavia, ciò non è vero, perché possiamo specchiare l'affermazione guardando all'indietro nel tempo: il presente può originarsi da diversi passati, ed è impossibile rintracciare univocamente il passato che ha condotto a un particolare presente.

Si consideri un elettrone preparato con spin $+1/2$ lungo la direzione z . Se poi intendiamo misurare il suo spin lungo la direzione x , non possiamo predire se il risultato sarà $+1/2$ o $-1/2$. Questa imprevedibilità è dovuta al fatto che lo stato è una sovrapposizione di autostati dello spin lungo x . Simmetricamente, se troviamo che lo spin è, diciamo, $-1/2$ lungo la direzione x , tale conoscenza da sola non ci permette di inferire univocamente il suo stato precedente: è impossibile determinare se la particella sia stata preceduta da uno spin $+1/2$ o $-1/2$ lungo la direzione z . Questa perfetta simmetria nell'incertezza della determinazione – sia in avanti nel tempo (predizione) che all'indietro nel tempo (retrodizione) – evidenzia la natura acausale della misura quantistica senza una freccia del tempo inerente.

3 Le cause come entità veramente esterne

Un po' di luce sulle nostre riflessioni viene gettata notando che parlare di cause ed effetti può avere senso solo se esiste una chiara distinzione tra il sistema sotto osservazione e qualcosa di *esterno* al sistema, come una sorgente o una forza. Per spiegare meglio questo punto, consideriamo due sistemi che comportano modifiche al secondo principio della di-

namica, $ma = F$, e che si suppone violino la causalità. Uno è il metodo di Dirac per rimuovere le soluzioni divergenti (runaway solutions) nell'elettrodinamica classica [24, 21]. L'altro è il caso dei fakeon, o particelle puramente virtuali, che si propongono come strumenti promettenti per una varietà di applicazioni.

è utile confrontare questi due sistemi faccia a faccia per evidenziarne differenze e comuni. Mentre i fakeon sono considerati entità fondamentali, la teoria di Dirac è una descrizione efficace dell'attrito e della perdita di energia dovuti all'emissione di radiazione da parte di una particella carica accelerata. Inoltre, nel caso di Dirac il tempo possiede una freccia (un dettaglio irrilevante per il nostro argomento principale, ma che potrebbe altrimenti introdurre confusione nella discussione), mentre i fakeon sono invarianti per inversione temporale. Altre differenze (ad esempio, il trattamento di Dirac è puramente classico, mentre i fakeon, che derivano dall'unitarietà nella teoria quantistica dei campi, non hanno un equivalente classico, pur influenzando indirettamente le particelle ordinarie) non sono cruciali per la discussione di questo articolo: entrambi i sistemi sono preziosi per illustrare i punti concettuali che desideriamo esporre.

Partiamo da $ma(t) = F(t)$, dove $F(t)$ è una forza esterna. Possiamo affermare che F sia la causa e l'accelerazione $a = \ddot{x}$ l'effetto. L'equazione è considerata causale perché la traiettoria, data da

$$x(t) = \frac{1}{m} \int_0^t (t - t') F(t') dt' + v_0 t + x_0,$$

dimostra chiaramente che $x(t)$ ad ogni istante $t > 0$ è determinata esclusivamente dalla forza $F(t')$ a tempi precedenti o uguali $t' \leq t$. Per determinare la traiettoria $x(t)$ nel futuro fino a un tempo $t_+ > t$, dobbiamo controllare, o comunque conoscere in anticipo, la forza $F(t)$ fino a quel momento. Poiché questo requisito non sembra sollevare obiezioni, almeno in linea di principio, concludiamo che il sistema è causale.

Invece di $ma = F$, nel caso di Dirac [24, 21] incontriamo l'equazione

$$m\ddot{x}(t) = \frac{1}{\tau} \int_t^\infty dt' e^{\frac{t-t'}{\tau}} F(t'), \quad (3.1)$$

dove τ è una costante con le dimensioni del tempo. Questa formula è generata dall'equazione locale madre a derivate superiori

$$m\ddot{x}(t) - m\tau \ddot{x}(t) = F(t), \quad (3.2)$$

previa inversione dell'operatore $1 - \tau(d/dt)$ attraverso la “prescrizione di Dirac”, che richiede la perturbatività in τ . La correzione che appare nel membro di sinistra della (3.2) è la forza di Abraham-Lorentz, responsabile della famigerata soluzione divergente,

che risolve la (3.2) ma non la (3.1). Pertanto, l'equazione di Dirac (3.1) rimuove la soluzione divergente della (3.2).

Potremmo affermare che l'equazione (3.1) violi la causalità. In effetti, la soluzione

$$x(t) = \frac{1}{m\tau} \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} dt_2 \int_{t_2}^\infty dt_3 e^{\frac{t_2-t_3}{\tau}} F(t_3) + v_0 t + x_0$$

mostra che, per predire $x(t)$, non è sufficiente conoscere $F(t')$ ai tempi $t' \leq t$. A causa del fattore di smorzamento $e^{(t_2-t_3)/\tau}$, per predire accuratamente la traiettoria fino al tempo t , è necessaria la conoscenza di $F(t_3)$ fino a tempi $t_3 \simeq t_2 + \tau$, con $t \geq t_1 \geq t_2$. In definitiva, ciò implica che abbiamo bisogno di $F(t')$ fino a tempi $t' \simeq t + \tau$.

In altre parole, se vogliamo predire il futuro, dobbiamo anticipare la forza esterna in un futuro leggermente *più* lontano. Crucialmente, ciò che accade entro un intervallo di tempo dell'ordine di τ è *fuori dal nostro controllo predittivo*.

Ora evidenziamo il punto cruciale della nostra tesi: la nozione di causalità, così come la sua violazione, ha significato solo perché etichettiamo F come una forza *esterna*. Non possiamo applicare lo stesso ragionamento se la forza è interna, come quella derivante da auto-interazioni.

Per illustrare ciò che intendiamo, si consideri una forza elastica $F = -m\omega^2 x$. Allora l'equazione (3.1) diventa

$$\ddot{x}(t) = -\frac{\omega^2}{\tau} \int_t^\infty dt' e^{\frac{t-t'}{\tau}} x(t'), \quad (3.3)$$

e la soluzione è data dalle oscillazioni smorzate [21]

$$x(t) = ce^{\lambda t} + c^* e^{\lambda^* t}, \quad (3.4)$$

dove c è una costante complessa, mentre

$$\lambda = \frac{1}{3\tau} \left[1 - \frac{1}{(-1)^{1/3} W} - (-1)^{1/3} W \right],$$

$$W = \left(1 + \frac{27}{2} \omega^2 \tau^2 - \frac{\Upsilon}{2} \right)^{1/3}, \quad \Upsilon = 3\sqrt{3} \omega \tau \sqrt{4 + 27 \omega^2 \tau^2}.$$

Prestiamo attenzione al seguente fatto: la forza al membro di destra della (3.3) a un tempo t è determinata dalla traiettoria $x(t')$ a tempi successivi $t' > t$. Questo potrebbe suggerire che la causalità sia ancora violata, perché “è impossibile conoscere il futuro in anticipo”. Tuttavia, il sistema è deterministico, quindi il futuro è, di fatto, noto in anticipo. Più precisamente, è predeterminato ad ogni istante! In definitiva, la soluzione dipende da due condizioni iniziali, come la posizione $x_0 = c + c^*$ e la velocità $v_0 = c\lambda + c^*\lambda^*$ a $t = 0$.

Di conseguenza, il modello non presenta alcuna violazione della causalità quando F è interna al sistema. Non potremmo dire lo stesso se F fosse esterna. La difficoltà suggerita dalla forma insolita (3.3) dell'equazione del moto è solo apparente, un'illusione di acausalità infondata.

Spesso pensiamo che la natura sia descritta dalle equazioni del moto (o dalle “leggi fisiche”) piuttosto che dalle loro soluzioni. Invece, le equazioni appartengono alla nostra descrizione della natura. Pertanto, ha poca importanza che traiettorie perfettamente valide come la (3.4) siano generate da equazioni, come la (3.3), che ci appaiono acausali. A questo riguardo, non c'è una differenza cruciale tra l'equazione (3.3) e una “causale”. Per usare le parole di Hume, entrambe portano a coerenti “treni di eventi”.

Ciò conferma in definitiva che la nozione di causalità perde il suo significato in un sistema deterministico. Essa può mantenere una certa rilevanza quando F è esterna, e solo finché tale F è considerata esente dai vincoli del determinismo. Avendo notato che la teoria quantistica non può venire in soccorso in questo caso, dovremmo postulare una F che non sia tenuta a obbedire alle leggi della fisica! La domanda allora diventa: che cos'è una siffatta F ?

Raggiungiamo conclusioni simili nel caso dei fakeon. La differenza principale è che le equazioni dei fakeon dovrebbero descrivere proprietà fondamentali della natura, il che significa che la sfida che esse pongono alla nostra comprensione è robusta, mentre la sfida posta da una teoria efficace, come quella di Dirac, può essere più facilmente liquidata come meramente apparente. Un'ulteriore distinzione chiave è che le equazioni dei fakeon sono simmetriche per inversione temporale, evitando così di gravare il nostro discorso con una freccia del tempo irrilevante.

Un'equazione tipica per i fakeon [21] è

$$m\ddot{x}(t) = \frac{1}{2\tau} \int_{-\infty}^{\infty} dt' \sin\left(\frac{|t-t'|}{\tau}\right) F(t'). \quad (3.5)$$

Per risolverla, è necessaria la conoscenza della forza esterna $F(t')$ a tutti i tempi t' . Tuttavia, a causa del comportamento oscillante della funzione seno, a livello pratico è sufficiente conoscere $F(t')$ solo in un intorno $|t-t'| \lesssim \tau$ del tempo t di interesse. Poiché questo intervallo coinvolge una parte di futuro, diciamo che la (3.5) è acausale.

L'equazione locale madre a derivate superiori è

$$m\ddot{x}(t) + m\tau^2 \ddot{\ddot{x}}(t) = F(t), \quad (3.6)$$

che fornisce la (3.5) previa inversione dell'operatore $1 + \tau^2(d^2/dt^2)$ attraverso la prescrizione dei fakeon [21]. L'equazione (3.6) ha quattro soluzioni, di cui solo due soddisfano la (3.5).

Se sostituiamo la forza esterna con una interna, come la forza elastica $F = -m\omega^2 x$, l'equazione dei fakeon (3.5) diventa

$$\ddot{x} = -\frac{\omega^2}{2\tau} \int_{-\infty}^{\infty} dt' \sin\left(\frac{|t-t'|}{\tau}\right) x(t'), \quad (3.7)$$

che ha la soluzione [21]

$$x(t) = ce^{i\Omega t} + c^* e^{-i\Omega t}, \quad \Omega = \frac{1}{\tau\sqrt{2}} \sqrt{1 - \sqrt{1 - 4\omega^2\tau^2}}, \quad (3.8)$$

per $\omega < 1/(2\tau)$, univocamente fissata dalla posizione e velocità iniziali. La corretta riduzione dell'insieme dei gradi di libertà a quelli fisici può essere dimostrata nelle equazioni dei fakeon con auto-interazioni generiche [21].

Di nuovo, vediamo che il membro di destra dell'equazione (3.7) può suggerire acausalità, poiché implica che la forza che “causa” l'accelerazione al membro di sinistra debba essere nota a tutti i tempi. Tuttavia, la forza in questione non è esterna, ma un'auto-interazione. Di conseguenza, è nota a tutti i tempi “gratuitamente” risolvendo l'equazione (3.7) in modo auto-consistente. Concludiamo quindi che in questo sistema non è presente alcuna effettiva violazione della causazione.

Impariamo che se vogliamo introdurre una nozione significativa di causalità, il sistema non può essere indipendente dal suo esterno. L'idea di causa non ha dunque senso in un sistema isolato. Essa richiede strettamente la presenza di qualche entità veramente esterna. Poiché, tuttavia, tale entità è necessariamente interna a un sistema più grande, concludiamo che la causazione non ha alcun significato fondamentale in natura.

Una definizione popolare di causalità è il requisito che le curve spaziotemporali chiuse di tipo tempo (CTC) siano proibite [25], sulla base del fatto che tali curve permetterebbero a una persona di tornare nel proprio passato muovendosi in avanti nel tempo, acquisendo così la capacità di cambiare la storia. Tuttavia, come stabilito in precedenza, se il sistema è deterministico, cambiare il passato è impossibile, e una CTC non fornisce alcun aiuto a questo riguardo [26]. Come detto, si può legittimamente affermare che il futuro causi il passato, indipendentemente dal fatto che esistano o meno delle CTC. Inoltre, l'asserzione che “si possa cambiare il proprio passato” presuppone necessariamente un potere trascendentale capace di interferire con la natura. In tal caso, però, non è necessario tornare al passato per alterarlo: è sufficiente cambiare il futuro, poiché ciò influenza deterministicamente il passato. Di nuovo, non c'è bisogno di CTC per questo.

è dunque evidente che le CTC non violano la causalità. Sfortunatamente, il dibattito sulla causalità è spesso gravato da definizioni ad hoc e si sovrappone a concetti collaterali, portando ad affermazioni di violazione della causalità basate esclusivamente sull'infrazione di tali definizioni.

In definitiva, il concetto di causa è il risultato di una sequenza di errori concettuali e incomprensioni. In primo luogo, si deve erroneamente assumere che il mondo non sia né deterministico né quantistico, ovvero che siano disponibili risultati alternativi, ma che la loro selezione non sia governata dal caso quantistico. In secondo luogo, si deve postulare qualcosa di esterno alla natura e dotarlo del “superpotere” di compiere scelte riguardanti la natura. Tale entità, che verrebbe allora designata come la “causa”, sarebbe ritenuta “responsabile” degli effetti, in un chiaro riflesso delle nozioni sociali di colpa e responsabilità. In terzo luogo, quell’entità che agisce sulla natura dovrebbe, per definizione (perché si suppone che “esista”), far parte della natura stessa. Cesserebbe allora immediatamente di essere una causa, perché non sarebbe esterna alla natura.

Ancora una volta, osserviamo che l’idea di causazione è l’effetto collaterale (!) della nostra narrazione sulla natura, ma fondamentale non appartiene alla natura. Ancor peggio: appartiene al soprannaturale, perché postula l’esistenza di qualcosa di esterno alla natura, non soggetto alle leggi della natura, che può nondimeno agire sulla natura!

Si potrebbe ribattere con la seguente affermazione: “Non so se domani avrò il raffreddore, eppure posso espormi all’aria fresca, se decido di farlo (o se sono abbastanza sciocco): il raffreddore è l’effetto, e la mia azione è la causa”. Il punto debole di questa narrazione è l’assunzione nascosta che l’“Io” sia un’entità non soggetta alle leggi della fisica, dotata del misterioso superpotere di agire sulla natura senza farne parte, come il potere spesso indicato come *libero arbitrio*. Una volta che l’“Io” viene incluso in un sistema più grande con il resto della natura (siamo fatti di atomi...), l’idea di causa perde il suo significato, sia a livello classico che quantistico, per le ragioni spiegate in precedenza.

4 Prepostdittività

Si crede comunemente che la causalità ci conferisca il potere di controllare e plasmare il futuro. Avendo dimostrato che questo è un mito, potremmo ancora coltivare l’illusione di possedere la capacità, meno potente, di almeno predire il futuro. Declassando la pretesa di causalità a quella di predittività, evitiamo la necessità di introdurre entità soprannaturali che siano “esterne alla natura ma capaci di agire su di essa”, e quindi esenti dall’obbedire alle leggi della fisica. La pretesa di poter predire la natura è meno facile da liquidare. Tuttavia, come mostriamo in questa sezione, anche quella è un’illusione. Per il momento, aderiamo a equazioni del moto “causali” $ma = F$ (con F esterna, qualunque cosa ciò possa implicare). Allenteremo questa assunzione in seguito.

La domanda rilevante per un fisico, dunque, è: possiamo fare predizioni sul futuro, basandoci solo sul presente e sul passato?

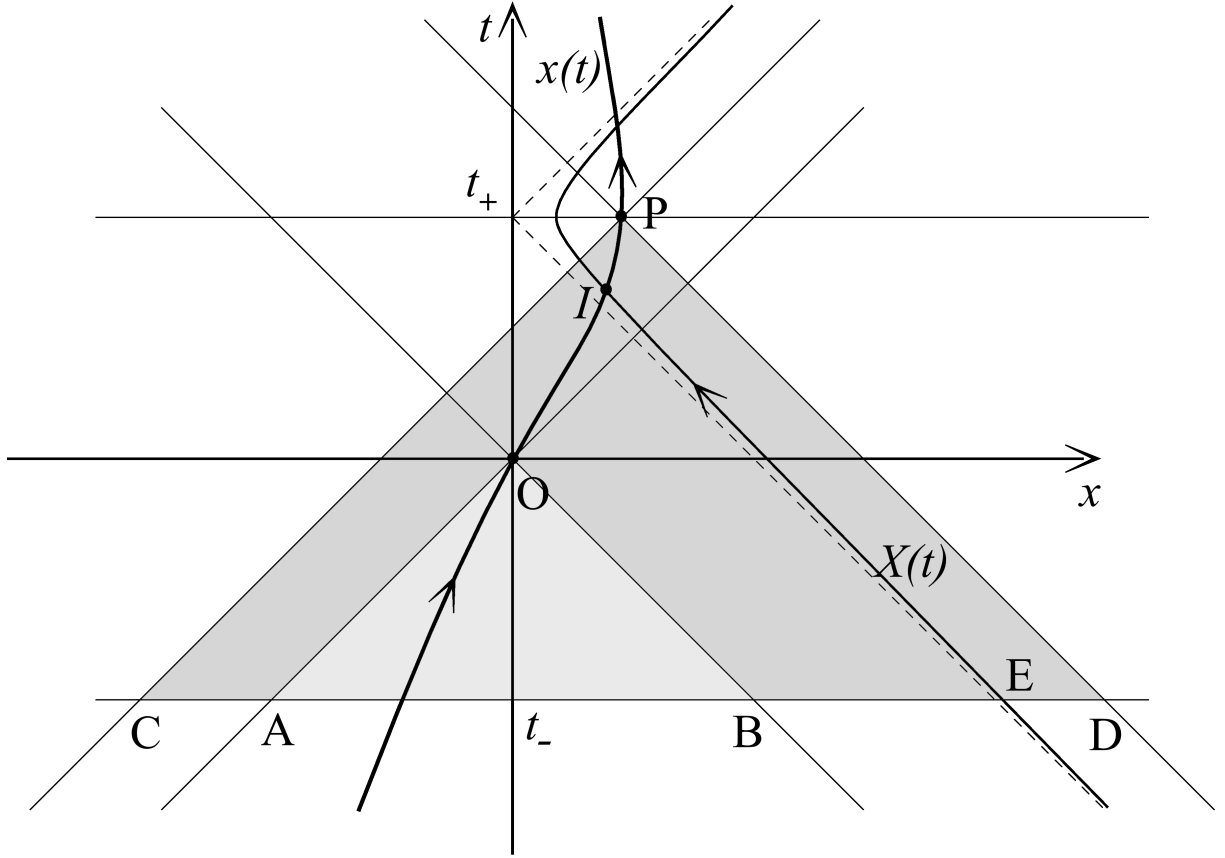


Figure 1: Prepostdizioni

Il nostro obiettivo è dimostrare che non esiste alcuna situazione fisica in cui possiamo veramente fare predizioni, vale a dire anticipare in modo definitivo il futuro all'interno di una regione specificata dello spazio. Conduciamo prima la nostra analisi nell'ambito della Relatività Speciale (SR) e successivamente la estendiamo alla Relatività Galileiana (GaR). Per semplicità, limitiamo la nostra discussione a sistemi unidimensionali.

Consideriamo “noi stessi” come una particella puntiforme con traiettoria $x(t)$, illustrata in Fig. 1. Al tempo $t = 0$ ci troviamo nel punto O e desideriamo fare una predizione riguardante il punto P al tempo $t_+ > 0$.

La massima conoscenza che possiamo possedere in O è concentrata nel cono di luce passato con vertice in O , che denotiamo con \hat{O} . È importante sottolineare che possiamo avere conoscenza solo di oggetti che abbiamo visto o rilevato in qualche modo. Non possiamo sapere molto sugli oggetti oscuri (entità che non emettono radiazione elettromagnetica), né sugli oggetti che sono stati oscurati da altri. Inoltre, non abbiamo conoscenza di oggetti che non hanno mai attraversato \hat{O} nelle loro storie passate, ma che attraversano il cono di luce passato di un evento della nostra traiettoria futura, un esempio essendo \hat{P} , il cono di

luce passato con vertice in P.

Si consideri un corpo che si muove lungo il moto iperbolico definito dalla traiettoria $X(t)$ mostrata in figura:

$$x^2 - (t - t_+)^2 = r^2, \quad x \geq r.$$

Il suo passato ($t < 0$) non interseca \hat{O} (il nostro cono di luce passato a $t = 0$). Il suo futuro ($t > 0$) attraversa \hat{P} (il cono di luce passato dell'ipotetico evento futuro P). Da O non possiamo avere alcuna conoscenza dell'oggetto in questione. Eppure, esso può disturbare il futuro del nostro sistema in I , il punto di intersezione tra $x(t)$ e $X(t)$.

Chiamiamo tale oggetto un “disturbatore”. Quando vogliamo sottolineare che esso non ha alcuna intersezione con il cono di luce passato \hat{O} , lo chiamiamo un “extradisturbatore”.

Concludiamo che, anche assumendo di vivere in un universo deterministico, al tempo $t = 0$ non possiamo essere certi che finiremo in un punto P al tempo t_+ . Questa incertezza esiste nonostante la traiettoria predetta dalle equazioni del moto in assenza di disturbatori. La possibilità di extradisturbatori, oggetti sconosciuti dal nostro cono di luce passato \hat{O} , ma capaci di influenzare la nostra traiettoria futura, implica fondamentalmente che non possiamo fare predizioni definitive sul futuro.

Supponiamo di aver iniziato a raccogliere dati a un certo tempo $t_- < 0$. La nostra massima conoscenza a $t = 0$ si basa su ciò che ha intersecato \hat{O} . Gli extradisturbatori sono, per definizione, fuori portata, per principio. In pratica non possiamo nemmeno escludere gli “intradisturbatori”, come oggetti oscuri o in ombra che hanno intersecato \hat{O} ma non hanno inviato alcun segnale (o segnali sufficienti) verso di noi.

Pertanto, come possiamo fissare le condizioni iniziali a, diciamo, il tempo t_- ? Il cono di luce passato \hat{O} è un sottoinsieme proprio di \hat{P} . Di conseguenza, la sua intersezione con la fetta orizzontale a tempo costante $t = t_-$ copre un segmento più piccolo (AB) rispetto all'intersezione di \hat{P} con la stessa fetta, che copre un segmento più ampio (CD). Potremmo avere conoscenza di oggetti che hanno intersecato \hat{O} , ci hanno inviato segnali, poi sono usciti da \hat{O} e successivamente hanno raggiunto il segmento AB o CD. Tuttavia, poiché manchiamo di qualsiasi conoscenza dei disturbatori, non abbiamo modo di fissare condizioni iniziali complete in CA e BD ai tempi $t \leq 0$. La conclusione è che non possiamo predire cosa accadrà a “noi”, o al nostro sistema, a un tempo successivo t_+ .

Per completezza, consideriamo il limite $t_- \rightarrow -\infty$. Abbiamo il seguente paradosso: ogni x sembra essere in \hat{O} , perché per ogni x esiste un tempo remoto prima del quale x appartiene a \hat{O} . Nondimeno, gli extradisturbatori non hanno intersezione con \hat{O} , il che significa che devono esistere punti x esterni a \hat{O} (cioè appartenenti al complemento di \hat{O} all'interno di \hat{P}). Ciò che è importante qui è che nemmeno assumere $t_- = -\infty$ ci permette di raccogliere abbastanza condizioni iniziali per predire il futuro oltre O. Anche nello scenario

migliore, gli extradisturbatori non possono essere esclusi.

Esaminiamo i potenziali modi per aggirare questa difficoltà. Un'opzione è assumere che il sistema sia isolato. Per quanto comune sia questa assunzione, non è realistica, poiché non possiamo costruire pareti o schermi sufficientemente robusti da garantire che nessun oggetto esterno, come quello con traiettoria $X(t)$, possa disturbare l'esperimento. Un'altra possibilità è assumere che nient'altro esista nell'universo oltre alla particella puntiforme con traiettoria $x(t)$. Questa, tuttavia, è un'idealizzazione ingiustificata e una forzatura metafisica, poiché equivale a fare assunzioni su regioni dello spaziotempo che sono fondamentalmente inaccessibili per noi senza invocare la superluminalità.

In definitiva, il meglio che possiamo fare è formulare la nostra “predizione”, sperare che nel frattempo non si verifichino disturbi come quelli precedentemente descritti, e verificare a posteriori che il risultato in P sia quello previsto. Allora, e solo allora, possiamo affermare che *siamo stati in grado* di predire l'evento. Tuttavia, questo processo di verifica retrospettiva è fondamentalmente una postdizione, motivo per cui la nostra affermazione iniziale non era una predizione, bensì una “prepostdizione”.

Inizialmente, si potrebbe supporre che le limitazioni appena descritte siano inerenti alla Relatività Speciale, sperando che siano assenti nella meccanica non relativistica. Questo è errato, poiché analoghe difficoltà persistono nel limite $c \rightarrow \infty$, dove la SR si riduce alla Relatività Galileiana. In questo limite, i coni di luce passati raffigurati nella figura diventano semipiani, eppure la conoscenza disponibile in O è ancora insufficiente per determinare il futuro in P . Nella GaR, i corpi macroscopici possono muoversi a velocità arbitrariamente elevate, rendendo impossibile escludere che un oggetto pesante possa attraversare una distanza molto grande durante l'intervallo di tempo tra $t = 0$ e t_+ , disturbando così il risultato in P , indipendentemente dalla robustezza di qualsiasi parete costruita per isolare presumibilmente il sistema. Per escludere totalmente tale possibilità, dovremmo specificare le condizioni iniziali di ogni oggetto nell'universo, il che è palesemente impossibile. Ancora una volta, non ci resta che sperare per il meglio, scommettere che nel frattempo non avvenga alcun disturbo, e verificare a posteriori in P se l'abbiamo fatta franca o meno. Dunque, anche nel limite non relativistico, possiamo solo fare prepostdizioni.

4.1 Disturbatori, onde entranti e statistica

Si potrebbe sollevare un'obiezione: perché nessuna situazione sfortunata come quelle temute qui ha mai disturbato alcun esperimento²? Se i disturbi sono così statisticamente sfavoriti,

²Uno scenario fisico che può illustrare il fallimento della predizione è il fenomeno delle onde anomale (che possono essere viste come intradisturbatori) e forse gli tsunami (extradisturbatori) in un mare in

perché dovremmo preoccuparcene? Scartare tali occorrenze non equivale forse ad assumere condizioni al contorno standard all'infinito nell'elettrodinamica classica (ovvero, postulare che non vi siano sorgenti all'infinito che inviano segnali verso di noi)? Altrimenti non saremmo in grado di fidarci delle soluzioni che si basano esclusivamente sui potenziali ritardati. Non è paranoico sospettare che la natura stia cospirando da lontano per danneggiarci disturbando i nostri esperimenti “di proposito”?

Il punto centrale è che qui stiamo mettendo in discussione un candidato *principio fisico*: la capacità di predire realmente in fisica. Se un'affermazione è vera solo escludendo situazioni estremamente rare e improbabili, essa non può essere elevata al rango di principio fondamentale. Sebbene le scorciatoie concettuali siano più che sufficienti per la vita quotidiana e per molte situazioni fisiche comuni, non è garantito che siano adeguate quando si indaga sulla gravità quantistica, sul mondo microscopico o, più in generale, sull'ignoto. Questa distinzione costituisce la logica della nostra indagine. Stiamo mettendo in discussione se la metodologia solitamente adottata sia strategicamente valida per la ricerca sulle interazioni fondamentali. Il nostro suggerimento è che non lo sia.

Tornando alla comune, e apparentemente innocua, assunzione di “nessuna radiazione entrante dall'infinito”, che detta l'uso dei potenziali ritardati nell'elettrodinamica classica, questa scelta riguarda regioni dello spaziotempo che ci sono inaccessibili, anche in teoria. Di conseguenza, l'adozione della soluzione ritardata, come la (2.2), rispetto a quella avanzata, come la (2.3), si basa su un'assunzione indimostrabile: in effetti, una scommessa sull'assenza di disturbatori e una forzatura metafisica.

Ogni segnale luminoso percepito dai nostri occhi è un potenziale disturbatore. Infatti, 1) esso ha origine da regioni dello spaziotempo che ci erano inaccessibili prima del momento della percezione; e 2) la sua sorgente può essere rimasta fuori dal nostro cono di luce passato fino a quel preciso momento. È possibile raccogliere abbastanza conoscenza da predire con assoluta certezza, almeno in teoria, ciò che vedremo tra un minuto da ora? La risposta è no, e non meramente per ragioni pratiche, ma per principio. Tutto ciò che possiamo fare è aspettare e vedere.

In circostanze “normali”, la scelta ritardata è naturale a livello macroscopico. È statisticamente implausibile che, una volta acceso un dipolo oscillante come (2.1), un afflusso coerente di onde provenienti dall'infinito cospiri per trasformarlo in un “pozzo”. Questo è il punto chiave della nostra tesi: la scelta tra (2.2) e (2.3) è dettata dalla statistica; non è una questione di causa ed effetto.

Scaviamo più a fondo. Nel nostro universo, la coppia ritardata (2.1)-(2.2) descrive l'emissione, mentre la coppia avanzata (2.1)-(2.3) descrive la ricezione. In seguito a un

tempesta.

nostro input, uno smartphone genera un moto di particelle cariche, come in (2.1), per codificare, per esempio, una voce che parla. Ciò produce un campo come (2.2), cioè l'emissione di un segnale per la comunicazione. Al contrario, un campo entrante come (2.3) raggiunge lo smartphone da una sorgente esterna, indipendente da qualsiasi nostro input, e induce un moto come (2.1) di particelle cariche all'interno dell'antenna. Il dispositivo traduce poi questo segnale in dati, una voce o un messaggio. La chiamata è un potenziale disturbatore, poiché ha origine da una regione dello spaziotempo rimasta inaccessibile fino al momento stesso in cui il telefono ha iniziato a squillare.

Ora, si consideri un universo “specchio” caratterizzato da condizioni al contorno invertite all'infinito e da un quadro statistico interamente reciproco al nostro, dove eventi altamente improbabili si manifestano costantemente, coincidenza dopo coincidenza, su scale temporali vaste³. Ad esempio, un campo entrante come (2.3) sarebbe accoppiato con un'azione deliberata, come l'oscillazione (2.1) di particelle cariche innescata dal nostro comando; in particolare, questo processo risulterebbe in un guadagno netto di energia piuttosto che in un dispendio. Al contrario, ogni volta che si verifica un campo uscente come (2.2), esso corrisponderebbe a un'improvvisa oscillazione non pianificata come (2.1), innescata dal rumore termico.

Dovremmo concludere che (2.3) sia la causa di (2.1)? Se così fosse, ciò implicherebbe che la nostra volontà sia determinata dal campo entrante. In questa visione, il *libero* arbitrio non esisterebbe: gli esseri umani sarebbero governati dalla natura come automi⁴. In alternativa, si potrebbe insistere sul fatto che “(2.1) sia la causa di (2.3)”, ovvero che non solo possediamo il libero arbitrio, ma che esso sia così potente da alterare deterministicamente il passato. Da un punto di vista puramente fisico, la scelta della narrazione è indifferente.

Va sottolineato che questo argomento cardine riposa sulla presenza di un “soggetto”. Altrimenti saremmo incapaci di distinguere azioni “pianificate” o “volute” da quelle “non pianificate”, rendendo il discorso ancora più tenue. Pertanto, la conclusione rimane che

³Lo scenario specchio che stiamo descrivendo potrebbe essere solo una straordinaria fluttuazione statistica all'interno del nostro stesso universo.

⁴Si noti che non avremmo alcuna possibilità di “cambiare idea” dopo aver acquisito conoscenza di un'onda entrante. Nello specifico, si assuma che Bob sia posizionato a $r > 0$ e percepisca un'onda entrante al tempo $t - r$ convergente verso l'origine. Bob sa allora che qualcuno lì, ad esempio Alice, attiverà J^μ al tempo t (data la nostra assunzione di leggi statistiche invertite). Tuttavia, Bob non può raggiungere Alice in tempo per intervenire, poiché l'informazione cruciale dovrebbe viaggiare più veloce della luce per arrivare a lei prima che ella attui la sua intenzione. In altre parole, l'onda entrante funge da extradisturbatore per Alice. Alice e Bob possono solo incontrarsi più tardi e condividere la loro storia, a quel punto Alice scoprirebbe di non avere libero arbitrio, poiché Bob conosceva i suoi piani in anticipo.

nozioni come causa, o libero arbitrio, non possono essere sostenute a meno di non invocare o la metafisica (il soggetto) o la statistica (la legge dei grandi numeri, o le condizioni al contorno all'infinito).

Il punto importante è che (nel nostro universo), la scelta ritardata (così come quella avanzata, quando applicabile) è guidata da proprietà statistiche, inerenti al mondo macroscopico. Non è una proprietà fondamentale della natura. Quindi, estendere quella scelta, o una equivalente, al mondo microscopico è ingiustificato. Non c'è motivo per cui l'universo a scale infinitesimali debba somigliare all'universo a grandi scale (il che significa: una distesa desertica, dove le assunzioni di nessuna radiazione entrante e nessun disturbatore sembrano naturali), invece di, ad esempio, un mare turbolento e in tempesta. Per esempio, i fakeon, attraverso equazioni come la (3.5), contemplano una sovrapposizione di onde entranti e uscenti a livello microscopico, richiamando proprio un mare in tempesta.

La conclusione è che la freccia del tempo risultante dalla causalità (eventualmente declassata a predittività) somiglia alla freccia del tempo termodinamica, nel senso che entrambe si basano sulla legge dei grandi numeri. Allo stesso modo in cui l'irreversibilità statistica non regge a livello microscopico (dato che la legge dei grandi numeri viene meno con piccoli numeri), la causazione e la predittività perdono significato a piccole distanze (anche in presenza di forze esterne), perché le assunzioni che escludono disturbatori o onde entranti, le quali si basano sulla statistica, non possono essere ritenute affidabili lì. Questi argomenti indicano la causazione e la predittività come proprietà emergenti della (nostra descrizione della) natura piuttosto che proprietà fondamentali, rendendo così l'abbandono della microcausalità e della micropredittività non solo accettabile, ma anche necessario.

In subordine, è interessante notare che le teorie dei fakeon implicano che l'universo sia dotato di una “freccia radiale” che punta dal “mare in tempesta” microscopico alla “distesa desertica” macroscopica. Se i modelli dei fakeon descrivono la realtà, questa è una freccia rigorosa, non solo approssimativa.

4.2 Osservazioni

Concludiamo questa sezione affrontando altre questioni minori sulla prepostdittività. I disturbatori fanno parte delle “forze esterne” F che entrano nelle equazioni del moto $ma = F$. Pertanto, si potrebbe obiettare che possiamo ancora descrivere i disturbi, ogni volta che si verificano, per mezzo delle leggi fisiche ordinarie. Il punto chiave è che possiamo descriverli solo a posteriori, ma non possiamo anticiparli a priori. Forze esterne come queste non possono essere disposte come desideriamo, controllate o predette. Non era forse la capacità di controllare la natura la ragion d'essere per postulare cause e forze

“esterne” fin dall’inizio?

Una possibilità è quella di declassare le predizioni a predizioni statistiche, nel seguente senso. Se lo stesso esperimento viene ripetuto più volte, i disturbi non saranno gli stessi, il che ci permette di filtrare i loro effetti, per così dire. Tuttavia, come possiamo mediare correttamente su di essi? Cosa costituisce esattamente una “prepostdizione media”? Come possiamo quantificare la statistica dei disturbi senza fare assunzioni su regioni inaccessibili dello spaziotempo? Inoltre, quando ricorriamo alle predizioni statistiche, come facciamo nella meccanica quantistica, è proprio perché non possiamo predire l’esito di un singolo esperimento.

In sintesi, quando declassiamo la causazione a mero ordinamento cronologico, stiamo essenzialmente riducendo l’obiettivo primario di controllare, o plasmare, l’evoluzione futura di un sistema al più modesto obiettivo di predirla. Tuttavia, come dimostrato, è ingiustificato elevare la predittività a principio fondamentale o estenderla al mondo microscopico. A fortiori, la stessa conclusione si applica alla causalità.

L’impossibilità di predire il futuro non può essere interamente rispecchiata nell’impossibilità di rintracciare il passato. È vero che se iniziamo a raccogliere dati a un certo istante $t = t_+$ nel punto P, non possiamo sapere se degli intradisturbatori abbiano cambiato il corso degli eventi a $t < t_+$. Tuttavia, non possiamo specchiare gli extradisturbatori, poiché essi intersecano sempre i coni di luce passati che si trovano nel futuro. Ciò significa che possiamo avere conoscenza di essi quando rintracciamo il passato, almeno in linea di principio. In una certa misura, ciò introduce una sorta di freccia che punta dal presente al futuro. Tuttavia, questa non è ancora una proprietà fondamentale dell’universo. Riflette semplicemente la nostra capacità di conservare memoria degli eventi, una possibilità che sorge quando sono coinvolti sistemi macroscopici o non isolati. A livello microscopico abbiamo una perfetta simmetria, come mostrato nell’esempio della Sezione 2 riguardante le misure di spin lungo le direzioni x e z . Inoltre, se vogliamo che il sistema sia visibile per noi, esso non può essere isolato, poiché deve irradiare verso di noi.

5 Prepostdittività ritardata

Nella sezione precedente abbiamo argomentato nell’ambito di equazioni del moto “causali” $ma = F$. Che dire della prepostdittività nelle equazioni dei fakeon come la (3.5), o nell’equazione di Dirac, (3.1)?

Nella prepostdittività “semplice” (quella associata a $ma = F$), dobbiamo conoscere la forza esterna F fino al momento t_+ della nostra “predizione”. Abbiamo stabilito che, poiché F è al di fuori del nostro controllo per le ragioni spiegate in precedenza, non possiamo

realmente predire. Possiamo al massimo incrociare le dita e formulare una prepostdizione. Tuttavia, non abbiamo bisogno di conoscere F *oltre* il tempo t_+ .

D'altra parte, nei sistemi governati da equazioni non locali come la (3.5) e la (3.1), dobbiamo conoscere F in un futuro leggermente più lontano, che è approssimativamente $t_+ + \tau$, dove τ è la scala caratteristica della non-località. Quindi, al tempo t_+ non possiamo fare una postdizione di ciò che è accaduto fino ad allora. Possiamo al massimo fare una postdizione di ciò che è accaduto fino a $t_+ - \tau$. Per fare una postdizione fino a t_+ , dobbiamo essere più pazienti e aspettare fino a $t_+ + \tau$. Ciò significa che se stiamo facendo un'affermazione al tempo $t = 0$ che mira a spingersi fino a t_+ , non è sufficiente incrociare le dita fino a t_+ . Dobbiamo incrociare le dita fino a $t_+ + \tau$.

Il risultato è che nei sistemi con fakeon, così come in quello di Dirac, non abbiamo una prepostdittività semplice, bensì una prepostdittività *ritardata*, dove il ritardo è definito quantitativamente dalla scala temporale caratteristica τ .

Possiamo illustrare questo fatto in modo più esplicito assumendo che τ sia piccolo. Allora le equazioni (3.1) e (3.5) possono essere scritte rispettivamente come

$$\begin{aligned} \text{Dirac:} \quad & m\ddot{x}(t) = F(t + \tau) + \mathcal{O}(\tau^2) = F(t) + \Delta_\tau F(t) + \mathcal{O}(\tau^2), \\ \text{fakeon:} \quad & m\ddot{x}(t) = F(t) - \Delta_\tau^2 F(t) + \mathcal{O}(\tau^4), \end{aligned}$$

dove $\Delta_\tau F(t) = F(t + \tau) - F(t)$ è la differenza in avanti, mentre $\Delta_\tau^2 F(t) = F(t + \tau) - 2F(t) + F(t - \tau)$ denota la seconda differenza centrale. Vediamo che i membri di destra coinvolgono esplicitamente la forza al tempo futuro $t + \tau$.

In subordine, notiamo che un'equazione troncata come $\ddot{x}(t) = -\omega^2 x(t + \tau)$ (un oscillatore armonico con una forza elastica ritardata) ammette infinite soluzioni, come ci si aspetta generalmente dalle formulazioni non locali. Invece, le equazioni di Dirac e dei fakeon, pur essendo non locali, sono di tipo speciale, essendo derivate da equazioni locali madri. Il loro spazio delle soluzioni è proprio quello fisicamente atteso [21].

Tornando al nostro problema, una possibile via d'uscita è interpretare τ come la risoluzione temporale minima, vale a dire postulare che non possiamo distinguere sperimentalmente eventi separati da intervalli di tempo più brevi di τ . Il “presente” è quindi definito come “presente entro un intervallo di tempo dell'ordine di τ ”. In questo scenario, t e $t + \tau$ possono essere considerati come “lo stesso istante”, e le equazioni possono essere considerate causali.

Anche quando postuliamo una forza veramente esterna F , la violazione della causalità svanisce non appena interpretiamo τ come la risoluzione temporale minima. Ciò significa che, a rigor di termini, non possiamo affermare con certezza che le equazioni di Dirac e dei fakeon implicino la violazione della causalità, nemmeno in presenza di entità esterne:

esse possono semplicemente implicare l'esistenza di un limite fondamentale alla risoluzione temporale.

La differenza cruciale è che l'equazione di Dirac è efficace, quindi la risoluzione temporale minima τ che contiene non può alludere a una proprietà fondamentale della natura. Nel caso dei fakeon, τ potrebbe suggerire un'impossibilità fondamentale di distinguere eventi separati da intervalli di tempo più brevi di τ . Tuttavia, come dimostriamo ora, nemmeno questo è vero.

Si noti che l'interpretazione di τ come risoluzione temporale minima ha senso solo se la forza F è veramente esterna. Se F è un'auto-interazione, non c'è alcun problema nell'interpretare soluzioni come la (3.4) e la (3.8) per intervalli di tempo arbitrariamente brevi. Dato che ogni forza esterna è interna a un sistema più grande, i modelli dei fakeon non prevedono una risoluzione temporale *fondamentale* τ nell'universo. Nemmeno il sistema di Dirac lo fa, perché è intrinsecamente un modello efficace.

Quindi, anche se aderiamo alla premessa che esistano entità esterne alla natura capaci di agire su di essa, non è comunque vero che le teorie dei fakeon violino la causalità, a meno di non assumere di poter misurare sperimentalmente (e quindi dare senso fisico a) intervalli di tempo arbitrariamente brevi. Infatti, non appena accettiamo la possibilità che il tempo in natura sia dotato di una risoluzione temporale minima τ (applicabile solo a quelle entità esterne), discutere di violazioni della causalità al di sotto di τ perde di significato.

In definitiva, giungiamo a una situazione in cui le limitazioni rappresentate da τ riguardano la forza esterna, e non la natura stessa. Anche se ipotizzassimo l'esistenza di entità esterne alla natura ma dotate del superpotere di agire su di essa, la gravità quantistica con i fakeon ci costringe ad accettare limitazioni al loro potere (che si tratti di un ritardo della prepostdittività o di una risoluzione temporale minima). In altre parole, la natura, cioè un "infrapotere", è in grado di porre limiti a un presunto "superpotere" che trascende la natura stessa. Una limitazione fisica su qualcosa che non esiste nemmeno fisicamente, ma che codifica semplicemente la nostra pretesa di controllare la natura, non è un prezzo troppo alto da pagare, specialmente se la ricompensa è una teoria della gravità quantistica testabile.

6 La causalità nella teoria quantistica dei campi

Le due definizioni principali di causalità nella teoria quantistica dei campi (QFT) sono la condizione di Bogoliubov e la formulazione di Lehmann-Simanzik-Zimmermann (LSZ) [27].

La condizione di Bogoliubov [28] si applica ai diagrammi e alle funzioni di correlazione

off-shell. In termini semplificati, essa richiede che se un punto spaziotemporale x_1 si trova nel futuro di tipo tempo di x_2 , i diagrammi che coinvolgono sia x_1 che x_2 possono essere disposti in modo che l'energia fluisca solo in avanti nel tempo, da x_2 a x_1 .

Il problema di questa definizione è che non si possono assegnare con precisione punti spaziotemporali a particelle on-shell, poiché i pacchetti d'onda relativistici si diffondono, oscurando così la nozione di una posizione definita della particella. Pertanto, la causalità di Bogoliubov non può essere formulata come un vincolo sulla matrice S stessa, ma si applica meramente alle funzioni di correlazione off-shell. Queste sono, in generale, dipendenti dalla gauge. Sebbene possano essere rese invarianti di gauge (anche per inserzioni di campi elementari, lavorando solo con gradi di libertà fisici), ciò può comportare il prezzo di introdurre non-località (si veda la sezione successiva), che oscurano un quadro diretto di causa \rightarrow effetto nello spaziotempo.

La definizione LSZ [29] di causalità è imposta tramite i commutatori di campo, ai quali è richiesto di annullarsi per separazioni di tipo spazio. Quando i campi sono espressi in termini di diagrammi, questa condizione si riduce esattamente alla condizione di flusso di energia di Bogoliubov. Dal nostro punto di vista, lavorare con i campi non è diverso dal lavorare con funzioni di correlazione off-shell. Di conseguenza, le difficoltà concettuali associate alla dipendenza dalla gauge e all'oscurità di un quadro diretto causa \rightarrow effetto rimangono pienamente rilevanti anche sotto il formalismo LSZ.

La debolezza principale di queste condizioni, e delle alternative proposte in letteratura, è che esse appaiono meramente tecniche, o persino artificiali. È difficile metterle in relazione con una nozione intuitiva di causazione, che è essa stessa problematica per le ragioni spiegate nelle sezioni precedenti. Oltre al rischio di sovrapporre la causalità con la non-superluminalità, le nozioni proposte spesso si intrecciano con la località e l'analiticità, laddove occorrerebbe mantenere tali proprietà distinte l'una dall'altra, specialmente perché l'analiticità non è un principio fisico e la località è per lo più un requisito di convenienza. Non c'è dubbio che le condizioni di Bogoliubov e LSZ implicino vincoli sulle quantità fisiche, ma esse non offrono una motivazione chiara del perché la natura dovrebbe conformarsi ad esse. In definitiva, la causalità nella QFT sembra una condizione sull'impalcatura matematica, non sulle predizioni fisiche.

Nella gravità quantistica con i fakeon, ci si aspetta che le condizioni di Bogoliubov e LSZ siano violate a livello microscopico. Queste violazioni sono le controparti quantistiche del requisito che la forza esterna $F(t)$ sia nota in un futuro leggermente più lontano, secondo l'equazione classicizzata (3.5), come discusso nella sezione precedente. Il risultato, che ribadiamo qui, è che se i fakeon partecipano in qualche modo alla descrizione della natura, essi pongono limiti all'illusorio superpotere di controllare, o anche solo predire, la natura.

L'apparente paradosso che un "infrapotere" possa vincolare un "superpotere" evapora non appena accettiamo l'ovvio fatto che nulla può agire sulla natura senza farne parte, facendo così crollare l'illusione platonica di un mondo di idee esistente "al di sopra" o anche solo "al di fuori" della natura, eppure capace di agire su di essa (come le "anime", ad esempio).

Si potrebbe dire che la gravità quantistica vada dritta al punto e suoni il rintocco funebre per la causazione, ma si potrebbe anche argomentare che il quadro della QFT del Modello Standard della fisica delle particelle avesse già piantato il seme del dubbio così profondamente che la gravità quantistica non aggiunga in realtà molto. Entrambe le posizioni appaiono ben motivate, con l'avvertenza che i fakeon possono avere un impatto più forte nello spingere a fermarsi e ad approfondire la questione abbastanza da risolverla una volta per tutte.

7 Non-località nelle teorie di gauge, nella gravità e nei modelli di fakeon

L'altra caratteristica insolita di equazioni come la (3.1) e la (3.5) è la loro non-località, che può motivare alcune critiche da parte di chi crede in qualche forma di località come principio fondamentale.

Va notato che, più che un principio, il requisito che la Lagrangiana classica debba essere locale nella teoria quantistica dei campi è meramente una ricetta che ha funzionato con successo finora, specialmente in congiunzione con la rinormalizzabilità. Piccoli aggiustamenti a questa assunzione non si prevede che pongano rischi drammatici.

Distinguiamo tra non-località "forte" (hard) e non-località "debole" (soft). La non-località forte si riferisce a teorie, come quelle perseguite da Krasnikov, Kuz'min, Tomboulis, Modesto e altri [9], dove la Lagrangiana classica è genuinamente non locale. La non-località debole si riferisce alla non-località riscontrata nelle teorie dei fakeon. Crucialmente, in entrambi i casi, la non-località è sufficientemente limitata da garantire che le equazioni del moto non siano gravate dalla necessità di specificare infiniti dati iniziali: le condizioni iniziali fisiche standard sono sufficienti [21].

I modelli di fakeon non possiedono una vera Lagrangiana classica. Si può derivare una Lagrangiana "classicizzata" (che è non locale) da una Lagrangiana madre locale integrando via i campi dei fakeon con la prescrizione appropriata. Un esempio di Lagrangiana classicizzata è la (7.2) riportata sotto, derivata dalla (7.1).

Il passaggio è una proiezione che richiama (con le dovute differenze) la proiezione della Lagrangiana nelle teorie di gauge e di gravità, ottenuta eliminando i gradi di libertà non

fisici (che sono: i modi temporali e longitudinali dei campi di gauge; quelli della fluttuazione della metrica attorno allo spazio piatto; la traccia della fluttuazione della metrica spaziale; e i fantasmi di Faddeev-Popov). Il risultato è non locale anche in quei casi familiari, persino nel limite classico, sebbene questo fatto passi per lo più inosservato.

Consideriamo, ad esempio, l'elettrodinamica classica. La Lagrangiana

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}[i\gamma^\mu(\partial_\mu + ieA_\mu) - m]\psi$$

è locale, ma contiene campi che non corrispondono a gradi di libertà fisici. Se scegliamo una gauge semplice come $A_L = 0$, per qualche componente longitudinale A_L , otteniamo

$$\begin{aligned} \mathcal{L}'_{\text{QED}} = & \frac{1}{2}(\partial_\mu \mathbf{A}_\perp)(\partial^\mu \mathbf{A}_\perp) + \frac{1}{2}(\partial_\perp \cdot \mathbf{A}_\perp)^2 + \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi + \mathbf{J}_\perp \cdot \mathbf{A}_\perp \\ & - \frac{1}{2}A_0 \Delta A_0 - (\partial_\perp \cdot \mathbf{A}_\perp)(\partial_0 A_0) - \rho A_0, \end{aligned}$$

che è ancora locale (almeno in un sistema di riferimento adatto, come $A_L = A_3$), ma contiene esplicitamente la componente non fisica (non propagante) A_0 del potenziale vettore, oltre alle componenti trasverse \mathbf{A}_\perp . Qui $\rho = e\psi^\dagger\psi$ è la densità di carica e $\mathbf{J}_\perp = e\bar{\psi}\gamma_\perp\psi$ è la corrente trasversale.

L'integrazione di A_0 fornisce la Lagrangiana classica, veramente non locale,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}''_{\text{QED}} = & \frac{1}{2}(\partial_\mu \mathbf{A}_\perp)(\partial^\mu \mathbf{A}_\perp) + \frac{1}{2}(\partial_\perp \cdot \mathbf{A}_\perp)^2 + \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi + \mathbf{J}_\perp \cdot \mathbf{A}_\perp \\ & + \frac{1}{2}(\partial_\perp \cdot \dot{\mathbf{A}}_\perp - \rho) \frac{1}{\Delta} (\partial_\perp \cdot \dot{\mathbf{A}}_\perp - \rho), \end{aligned}$$

che contiene solo i gradi di libertà fisici e dimostra la necessità di termini non locali a livello classico quando i modi non fisici vengono eliminati.

Allo stesso modo, nelle teorie con fakeon la Lagrangiana classicizzata non locale è la proiezione di una locale madre mediante la prescrizione dei fakeon. Per esempio, si consideri un modello semplice con la Lagrangiana locale madre [21]

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{m^2}{2}\varphi^2 - \frac{1}{2M^2}\phi [(\square + m^2)^2 + M^4] \phi - \frac{g}{2}\phi\varphi^2, \quad (7.1)$$

dove φ è un campo fisico e ϕ è un campo extra che vogliamo quantizzare come fakeon. Integrando via ϕ nel modo appropriato, otteniamo la Lagrangiana classicizzata non locale

$$\mathcal{L}_{\text{cl}} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{m^2}{2}\varphi^2 + \frac{g^2}{8}\varphi^2 \frac{M^2}{(\square + m^2)^2 + M^4} \Big|_{\text{f}} \varphi^2, \quad (7.2)$$

dove il pedice “f” sta per la funzione di Green del fakeon (si veda [21]).

Questa parte del discorso non si estende *verbatim* al caso di Dirac, dove non è disponibile una Lagrangiana locale per la (3.2). Tuttavia, le manipolazioni descritte in precedenza a livello di equazioni del moto (3.1) e (3.2) sono sufficienti a trasmettere l'idea intesa.

L'altro punto è che, sebbene esistano osservabili locali e invarianti di gauge nelle teorie di gauge e di gravità, esse non formano una base. Una base deve includere osservabili non locali. Per esempio, nella QED abbiamo osservabili locali come $F_{\mu\nu}$, $\bar{\psi}\psi$, $F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$, ecc., ma nessuna “osservabile dell'elettrone” locale. Eppure, sappiamo di poter osservare l'elettrone. Per spiegare questo, dobbiamo passare a osservabili non locali, come

$$\exp\left(-ie\frac{1}{\Delta}(\nabla\cdot\mathbf{A})\right)\psi, \quad (7.3)$$

un trucco suggerito ancora una volta da Dirac [22]. Più in generale (come discusso nei rif. [23]), possiamo considerare espressioni come

$$\exp\left(ie\frac{1}{\square}\Big|_f(\partial^\mu A_\mu)\right)\psi, \quad (7.4)$$

dove la prescrizione del fakeon è usata per invertire il d'alambertiano. La ragione per preferire la (7.4) alla (7.3) è che la (7.3) rompe esplicitamente l'invarianza di Lorentz. Allo stesso tempo, sostituire semplicemente il laplaciano Δ con meno il d'alambertiano \square (e $\nabla\cdot\mathbf{A}$ con $\partial^\mu A_\mu$) introdurrebbe gradi di libertà non fisici se venisse usata una prescrizione diversa per l'operatore \square^{-1} . L'approccio dei fakeon alle osservabili invarianti di gauge può essere generalizzato alle teorie non abeliane e alla gravità (si veda ancora [23]).

Dunque, possiamo affermare che le teorie di gauge e di gravità sono intrinsecamente non locali. Questa consapevolezza rende più difficile liquidare la non-località extra introdotta dai fakeon. I due tipi di non-località appartengono in realtà alla stessa classe, poiché entrambi discendono da una località madre attraverso una proiezione.

Ricordiamo che, mentre l'unitarietà nelle teorie di gauge e di gravità è garantita dalle identità di Ward-Takahashi-Slavnov-Taylor che seguono dalle simmetrie locali, l'unitarietà nei modelli di fakeon segue da una diagrammatica modificata [5], basata su funzioni di correlazione non ordinate temporalmente [6]. La mancanza di ordinamento temporale ad alte energie è un altro aspetto (previsto) delle questioni qui discusse.

8 Conclusioni

Il dibattito sulla causalità in fisica è un tipico esempio di “falsa partenza”: si dà il concetto per scontato senza averlo prima indagato adeguatamente, facendo ruotare la discussione

intorno ad esso all'infinito. In questo articolo abbiamo esteso considerevolmente lo scetticismo diffuso che circonda la nozione di causa, spinti dagli sviluppi portati dalla gravità quantistica.

La domanda chiave è: cosa costituisce una “causa”? Abbiamo sostenuto che la causazione può avere significato solo quando si riferisce a entità esterne al sistema fisico sotto osservazione. Con questo intendiamo esterne in senso estremo: “esterne alla fisica”, poiché non è loro permesso obbedire alle leggi fisiche, altrimenti sarebbero interne a un sistema più grande e perderebbero di conseguenza la loro essenza di “cause”. Ne sono esempio concetti come il libero arbitrio o l'anima. Spingendo oltre questo argomento, appare chiaro che l'idea di causa appartiene alla metafisica, o al trascendentale, proprio come le nozioni di libero arbitrio e di anima; pertanto, essa dovrebbe essere abbandonata nella scienza fondamentale.

Prima la meccanica quantistica, poi la teoria quantistica dei campi e, più recentemente, la gravità quantistica, hanno alimentato la necessità di porre la nozione di causa sotto stretto esame. La teoria quantistica dei campi pone sfide non banali alla definizione di causazione in modo soddisfacente, e la gravità quantistica, nello specifico il quadro dei fakeon, va dritta al punto smantellando le nozioni di “evento” e di ordinamento cronologico per intervalli di tempo sufficientemente brevi, anche in presenza di ipotetiche forze veramente esterne.

Se controllare la natura e farle fare ciò che vogliamo è chiedere troppo, accontentiamoci di predirla. O dovremmo? Hume sosteneva che (riportando il suo argomento centrale, sebbene non con le sue esatte parole) la mera osservazione che un corpo in caduta libera sia sempre caduto al suolo fino ad oggi non fornisce la certezza logica che lo farà anche domani. In altre parole, le leggi della fisica non sono vere “leggi”, ma piuttosto postdizioni (se viste dal futuro verso il passato) e scommesse (se viste dal passato verso il futuro). Scommettiamo che domani un corpo libero cadrà ancora al suolo. Se non lo farà, modificheremo (opportunisticamente) la “legge” fisica aggiungendo una correzione per rendere conto del nuovo effetto, qualunque esso sia. Da quel momento in poi, faremo scommesse più raffinate incorporando la correzione. Non c'è nulla in questo modo di procedere – che è, di fatto, come procediamo – che ci permetta di elevare le nostre scoperte a “principi” o “leggi” fisiche e di essere fiduciosi che la natura si conformerà alle “nostre” leggi domani nello stesso modo in cui ha fatto finora.

Anche in questo contesto, abbiamo esteso significativamente lo scetticismo di Hume. Supponiamo che le leggi fisiche così come le conosciamo siano effettivamente leggi che vincolano la natura domani e per sempre. Abbiamo argomentato che, anche in quel caso, non possiamo fare predizioni sul futuro. Non solo, ma abbiamo mostrato che ciò segue

dalle stesse presunte “leggi”! Non possiamo mai escludere che dei disturbatori appaiano “dal nulla”, per così dire, e cambino il risultato finale. I sistemi non possono essere sufficientemente isolati, né le condizioni iniziali possono essere completamente fissate. Queste limitazioni valgono anche senza mettere in discussione la validità futura delle cosiddette leggi fisiche.

Di conseguenza, i fisici possono solo fare prepostdittività (che richiedono una verifica retrospettiva) a grandi scale, affidandosi alla legge dei grandi numeri per scartare potenziali disturbi. Ciò conferma che l’illusoria freccia del tempo associata alla causalità è intrinsecamente statistica ed emerge esclusivamente a livello macroscopico, rendendo così la microcausalità ingiustificata e forzata.

Non molto cambia quando viene inclusa la gravità quantistica, dove possiamo al massimo fare prepostdizioni *ritardate*. Nelle teorie con i fakeon, il ritardo è il reciproco della massa del fakeon m_χ . Se questo intervallo di tempo è abbastanza breve (circa 10^{-37} secondi per il gravifakeon), rimane coerente con le osservazioni [30]. In definitiva, l’ulteriore rinuncia comportata dalla gravità quantistica con i fakeon non è eccessivamente impegnativa.

Dalla nascita della scienza, i fisici hanno vissuto sotto il miraggio di poter predire *qualcosa*. Questa è un’illusione che non ha mai retto davvero. La verità è che ci limitiamo a piazzare scommesse e a incrociare le dita: a posteriori, possiamo verificare che gli eventi si sono svolti come previsto, ma non abbiamo modo di garantire *a priori* che sarà effettivamente così.

Ad alcuni queste potrebbero sembrare questioni di lana caprina, ma affrontare il problema della gravità quantistica è precisamente il tipo di sfida in cui spaccare il capello in quattro può davvero fare la differenza. Altri potrebbero pensare che le posizioni qui espresse siano “estreme”, ma abbiamo sottolineato che ciò che è veramente estremo è postulare l’esistenza di entità trascendentali (come le cosiddette “cause”) che sono al di fuori della natura, eppure dotate del superpotere di agire sulla natura (lasciando da parte l’assurdità di assumere l’“esistenza” di tali entità, dato che ciò che “esiste” fa parte della natura per definizione). Mettere da parte questi problemi e continuare la ricerca come prima comporta il rischio di trascurare profonde opportunità. È meglio accettare che la gravità quantistica possa richiedere di camminare su ghiaccio sottile, e fare i conti con il fatto che esplorare l’ignoto può benissimo richiedere di mettere in discussione anche i principi più elementari che abbiamo a lungo dato per scontati.

La teoria delle stringhe, ad esempio, è dichiarata strettamente causale. Uno dei suoi molti difetti è che, per riprodurre tutti i suoi modi vibrazionali, contiene effettivamente una torre infinita di stati particellari. Un altro è che la sua formulazione standard è intrinsecamente limitata al calcolo di ampiezze di scattering on-shell tra stati asintotici.

Dopo decenni, non è disponibile alcun formalismo accettato per descrivere quantità off-shell. Un terzo difetto è la sua mancanza di predittività. Questi sono prezzi enormi da pagare per perpetuare un “principio” controverso (forse persino uno stereotipo) come la causalità. E perché dovremmo essere disposti a pagare quel prezzo? Per mantenere l’illusione di essere esterni alla natura e possedere il potere soprannaturale di controllarla? Questa non è un’assunzione fisicamente giustificata. La morale della storia è che assumere una causalità rigorosa è afisico e limita la gamma di teorie che ci permettiamo di esplorare. Possibilmente, esclude la soluzione corretta al problema della gravità quantistica – per esempio, la teoria della gravità quantistica con i fakeon, che è predittiva e contiene solo un tripletto (il gravitone, lo “Starobinskion” e il gravifakeon).

Questi e altri fatti che abbiamo esaminato espongono la nozione di causazione per quello che è veramente: un miraggio concettuale, una soluzione inesistente a un problema inesistente, un camuffamento delle “idee” di Platone (che possono agire sulla natura senza farne parte). Non solo la nozione di causa è incompatibile con il determinismo e la teoria quantistica, ma trasgredisce palesemente nella metafisica.

Detto questo, abbiamo mostrato che concetti come le particelle puramente virtuali, o fakeon, non sono così rivoluzionari come potrebbero sembrare a prima vista, nel senso che non rappresentano un allontanamento drammatico dalla comprensione precedente. Una volta che la causalità viene correttamente valutata, appare chiaro che i fakeon non portano una vera rottura concettuale. L’esistenza di una risoluzione temporale minima τ (in presenza di forze esterne) non è difficile da accettare, ed è coerente con i dati se τ è sufficientemente piccolo. La pre(post)dittività è solo ritardata. Infine, una forma di non-località è sempre stata presente nelle teorie di gauge e gravitazionali senza causare indebita preoccupazione. La non-località aggiuntiva introdotta dai fakeon è solo una modesta estensione di quella caratteristica familiare, poiché entrambi i tipi di non-località derivano da teorie locali madri attraverso una proiezione.

Ringraziamenti

Siamo grati a U. Aglietti, F. Briscese, L. Buoninfante, L. Modesto e ai partecipanti alla conferenza “*From Puzzles to New Insights in Fundamental Physics*”, Campagna (SA), Italia, 23-27 giugno 2025, per le stimolanti discussioni su questi argomenti.

References

- [1] D. Hume, *An Enquiry Concerning Human Understanding*, Chicago, The Open court publishing co., 1900, available at this link.

- [2] D. Anselmi, On the quantum field theory of the gravitational interactions, J. High Energy Phys. 06 (2017) 086, 17A3 Renorm and arXiv: 1704.07728 [hep-th].
- [3] D. Anselmi and M. Piva, Quantum gravity, fakeons and microcausality, J. High Energy Phys. 11 (2018) 21, 18A3 Renorm and arXiv:1806.03605 [hep-th].
- [4] D. Anselmi and M. Piva, A new formulation of Lee-Wick quantum field theory, J. High Energy Phys. 06 (2017) 066, 17A1 Renorm and arXiv:1703.04584 [hep-th];
D. Anselmi, Fakeons and Lee-Wick models, J. High Energy Phys. 02 (2018) 141, 18A1 Renorm and arXiv:1801.00915 [hep-th].
- [5] D. Anselmi, Diagrammar of physical and fake particles and spectral optical theorem, J. High Energy Phys. 11 (2021) 030, 21A5 Renorm and arXiv: 2109.06889 [hep-th].
- [6] D. Anselmi, A new quantization principle from a minimally non time-ordered product, J. High Energy Phys. 12 (2022) 088, 22A5 Renorm and arXiv:2210.14240 [hep-th].
- [7] D. Anselmi, E. Bianchi and M. Piva, Predictions of quantum gravity in inflationary cosmology: effects of the Weyl-squared term, J. High Energy Phys. 07 (2020) 211, 20A2 Renorm and arXiv:2005.10293 [hep-th].
- [8] Planck collaboration, Planck 2018 results. X. Constraints on inflation, arXiv:1807.06211 [astro-ph.CO];
BICEP/Keck XIII: Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck Observations through the 2018 Observing Season, arXiv:2110.00483 [astro-ph.CO];
BICEP/Keck Collaboration: The Latest Constraints on Inflationary B-modes from the BICEP/Keck Telescopes, arXiv:2203.16556 [astro-ph.CO].
- [9] N.V. Krasnikov, Nonlocal gauge theories, Theor. Math. Phys. 73 (1987) 1184 [Teor. Mat. Fiz. 73 (1987) 235];
Yu.V. Kuz'min, The convergent nonlocal gravitation, Sov. J. Nucl. Phys. 50, 1011 (1989) [Yad. Fiz. 50, 1630 (1989)];
E.T. Tomboulis, Super-renormalizable gauge and gravitational theories, arXiv:hep-th/9702146;
L. Modesto, Super-renormalizable quantum gravity, Phys. Rev. D 86 (2012) 044005 and arXiv:1107.2403 [hep-th];

- L. Modesto, Finite quantum gravity, arXiv:1305.6741 [hep-th];
- F. Brischese, L. Modesto and S. Tsujikawa, Super-renormalizable or finite completion of the Starobinsky theory, Phys. Rev. D89 (2014) 024029 and arXiv:1308.1413 [hep-th].
- L. Modesto and L. Rachwał, Universally finite gravitational and gauge theories, Nucl. Phys. B 900 (2015) 147 and arXiv:1503.00261 [hep-th]
- L. Modesto and L. Rachwał, Super-renormalizable and finite gravitational theories, Nucl. Phys. B 889 (2014) 228 and arXiv:1407.8036 [hep-th];
- L. Modesto, Multidimensional finite quantum gravity, arXiv:1402.6795 [hep-th];
- G. Calcagni, B.L. Giacchini, L. Modesto, T. de Paula Netto and L. Rachwał, Renormalizability of nonlocal quantum gravity coupled to matter, arXiv:2306.09416 [hep-th].
- [10] A. Pais and G.E. Uhlenbeck, On field theories with non-localized action, Phys. Rev. 79 (1950) 145.
- [11] G.V. Efimov, Non-local quantum theory of the scalar field, Commun. Math. Phys. 5 (1967) 42;
- G.V. Efimov, Quantization of non-local field theory, Int. J. Theor. Phys. 10 (1974) 19;
- G.V. Efimov, Nonlocal interactions of quantized fields, Nauka, Moscow (1977).
- [12] T. Biswas, E. Gerwick, T. Koivisto and A. Mazumdar, Towards singularity and ghost free theories of gravity, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 031101 and arXiv:1110.5249 [gr-qc];
- T. Biswas, A. Conroy, A. S. Koshelev and A. Mazumdar, Generalized ghost-free quadratic curvature gravity, Class. Quantum Grav. 31 (2014) 015022 and arXiv:1308.2319 [hep-th];
- L. Buoninfante, A.S. Koshelev, G. Lambiase and A. Mazumdar, Classical properties of non-local, ghost- and singularity-free gravity, J. Cosmol. Astropart. Phys. 09 (2018) 034 and arXiv:1802.00399 [gr-qc];
- A.S. Koshelev and A. Tokareva, Unitarity of Minkowski nonlocal theories made explicit, Phys. Rev. D 104 (2021) 025016 and arXiv:2103.01945 [hep-th];
- G. Calcagni, Classical and quantum gravity with fractional operators Class. Quant. Grav. 38 (2021) 165005 (E 169601) and arXiv:2106.15430 [gr-qc];

- G. Calcagni and L. Rachwał, Ultraviolet-complete quantum field theories with fractional operators, J. Cosmol. Astropart. Phys. 09 (2023) 003 and arXiv:2210.04914 [hep-th];
- F. Brischese, G. Calcagni, L. Modesto and G. Nardelli, Form factors, spectral and Källén-Lehmann representation in nonlocal quantum gravity, J. High Energy Phys. 08 (2024) 204 and arXiv:2405.14056 [hep-th].
- [13] D. Anselmi, Quantum gravity with purely virtual particles from asymptotically local quantum field theory, Eur. Phys. J. C 85 (2025) 999, 24A2 Renorm and arXiv:2410.21599 [hep-th].
- [14] T.D. Lee and G.C. Wick, Negative metric and the unitarity of the S -matrix, Nucl. Phys. B 9 (1969) 209;
- T.D. Lee and G.C. Wick, Finite theory of quantum electrodynamics, Phys. Rev. D 2 (1970) 1033;
- T.D. Lee, Complex pole model with indefinite metric, in *Quanta*, P.G.O. Freund, C.J. Giebel and Y. Nambu (eds.), Chicago University Press, Chicago, U.S.A. (1970), p. 260;
- R.E. Cutkosky, P.V. Landshoff, D.I. Olive and J.C. Polkinghorne, A non-analytic S -matrix, Nucl. Phys. B 12 (1969) 281;
- N. Nakanishi, Lorentz noninvariance of the complex-ghost relativistic field theory, Phys. Rev. D 3 (814) 811 1971.
- [15] M.J.G. Veltman, Unitarity and causality in a renormalizable field theory with unstable particles, Physica 29 (1963) 186;
- H. Yamamoto, Convergent field theory with complex masse, Prog. Theor. Phys. 42 (1969) 707;
- H. Yamamoto, Quantum field theory of complex mass, Prog. Theor. Phys. 44 (1970) 272;
- N. Nakanishi, Indefinite metric quantum field theory, Prog. Theor. Phys. Suppl. 51 (1972) 1;
- P.D. Mannheim, Unitarity of loop diagrams for the ghostlike $1/(k^2 - M_1^2) - 1/(k^2 - M_2^2)$ propagator, Phys. Rev. D 98 (2018) 045014 [arXiv:1801.03220];
- L. Buoninfante, Remarks on ghost resonances, JHEP 02 (2025) 186 [arXiv:2501.04097];

- J. Liu, L. Modesto and G. Calcagni, Quantum field theory with ghost pairs, JHEP 02 (2023) 140 [arXiv:2208.13536];
- A. Tokareva, Background-induced complex mass states of graviton: quantization and tensor power spectrum, arXiv:2405.09527;
- M. Asorey, G. Krein and I.L. Shapiro, Normal bound states out of massive complex ghosts degrees of freedom in superrenormalizable quantum gravity theories, arXiv:2408.16514;
- D. Anselmi, F. Brischese and G. Calcagni, *Perturbative unitarity of fractional field theories and gravity*, work in progress.
- [16] B. Holdom and J. Ren, QCD analogy for quantum gravity, Phys. Rev. D 93 (2016) 124030 [arXiv:1512.05305];
- G.P. de Brito, Quadratic gravity in analogy to quantum chromodynamics: Light fermions in its landscape, Phys. Rev. D 109 (2024) 086005 [arXiv:2309.03838].
- [17] P.D. Mannheim, Ghost problems from Pauli–Villars to fourth-order quantum gravity and their resolution, Int. J. Mod. Phys. D 29 (2020) 2043009 [arXiv:2004.00376].
- [18] J.F. Donoghue and G. Menezes, Unitarity, stability and loops of unstable ghosts, Phys. Rev. D 100 (2019) 105006 [arXiv:1908.02416].
- [19] K.S. Stelle, Renormalization of higher derivative quantum gravity, Phys. Rev. D 16 (1977) 953.
- [20] B. Russell, On the Notion of Cause, Proceedings of the Aristotelian Society, 13 (1913) 1 .
- [21] D. Anselmi and G. Calcagni, Classicized dynamics and initial conditions in field theories with fakeons, J. High Energy Phys. (to appear), 25A2 Renorm and arXiv:2510.05276 [hep-th].
- [22] P. A. M. Dirac, Gauge invariant formulation of quantum electrodynamics, Can. J. Phys. 33 (1955) 650.
- [23] D. Anselmi, Quantum field theory of physical and purely virtual particles in a finite time interval on a compact space manifold: diagrams, amplitudes and unitarity, J. High Energy Phys. 07 (2023) 209, 23A1 Renorm and arXiv:2304.07642 [hep-th];

- D. Anselmi, Gauge theories and quantum gravity in a finite interval of time, on a compact space manifold, Phys. Rev. D 109 (2024) 025003, 23A3 Renorm and arXiv:2306.07333 [hep-th].
- [24] P.A.M. Dirac, Classical theory of radiating electrons, Proc. Roy. Soc. London A 167 (1938) 148;
J.D. Jackson, *Classical electrodynamics*, Wiley, New York, U.S.A. (1975), chap. 17;
D. Anselmi, Renormalization and causality violations in classical gravity coupled with quantum matter, JHEP 07 01 (2007) 062, 06A1 Renorm and arXiv:hep-th/0605205.
- [25] S.W. Hawking, Chronology Protection Conjecture, Phys. Rev. D 46 (1992) 603.
- [26] J.R. Friedman, M.S. Morris, I.D. Novikov, K.S. Thorne and U. Yurtsever, Cauchy problem in spacetimes with closed timelike curves, Phys. Rev. D 42 (1990) 1915.
- [27] G. 't Hooft and M.J.G. Veltman, *Diagrammar*, CERN report CERN-73-09.
- [28] N.N. Bogoliubov and D.V. Shirkov, *Introduction to the Theory of Quantized Fields*, Interscience Publishers, 1959, New York, § 20.
- [29] H. Lehmann, K. Symanzik and W. Zimmermann, Zur Formulierung quantisierter Feldtheorien, Il Nuovo Cimento 1 (1955) 205.
- [30] D. Anselmi and A. Marino, Fakeons and microcausality: light cones, gravitational waves and the Hubble constant, Class. Quantum Gravity 37 (2020) 095003, 19A3 Renorm and arXiv:1909.12873 [gr-qc].