

# L'emergenza dello spazio-tempo nella gravità quantistica e nella cosmologia quantistica\*

Karen Crowther

Our best description of spacetime is provided by general relativity – yet, this theory is not thought to be fundamental. Instead, it is expected to be replaced by a theory of quantum gravity, which may not feature spacetime fundamentally. Models of quantum cosmology use quantum gravity to describe the ‘beginning’ of spacetime from the ‘big bang’ state, as well as the evolution of the universe at the level of quantum gravity. In this essay, I discuss (I) the conditions under which spacetime might be said to emerge from the physics of quantum gravity and models of quantum cosmology, (II) the challenges that the case-study of spacetime emergence poses for our usual understanding of emergence in philosophy, and (III) the appropriate conceptions of emergence for characterising the examples of emergent spacetime from quantum gravity and quantum cosmology.

\*Traduzione dall'inglese a cura di Erica Onnis. L'articolo originale, inedito, (*The Emergence of Spacetime in Quantum Gravity and Quantum Cosmology*) è stato presentato alla conferenza “The Meanings of Emergence in Philosophy and Science” (Torino, 11-12 marzo 2019). Un ringraziamento a Simone Iadanza per la consulenza scientifica in fase di traduzione.

COSMOLOGIA QUANTISTICA

GRAVITÀ QUANTISTICA

SPAZIOTEMPO

BIG BANG

EMERGENZA

## I. Introduzione

La migliore descrizione dello spaziotempo attualmente a nostra disposizione è quella fornita dalla relatività generale, ossia dalla teoria della gravità di Albert Einstein che sostiene che la gravità corrisponde alla curvatura dello spaziotempo dovuta alla presenza di energia di massa. La teoria della relatività <sup>1</sup> è una teoria ben testata in tutti i domini accessibili ed è considerata una delle teorie scientifiche di maggior successo di sempre. Tuttavia, i fisici non ritengono che essa, così come la sua descrizione dello spaziotempo, sia una teoria fondamentale, ma suppongono che essa fallisca su scale di lunghezza minime (corrispondenti ad alte energie) e in regioni con curvatura estremamente elevata, dove gli effetti quantistici diventano rilevanti. La corretta descrizione della fisica di questi domini dovrebbe essere fornita, perciò, da una *teoria della gravità quantistica* e, sebbene nessuna teoria di questo tipo sia stata ancora uniformemente accettata, esistono diversi programmi di ricerca che hanno l'obiettivo di individuarla. Molti di essi descrivono una fisica radicalmente diversa da quella della relatività generale, ossia una fisica discutibilmente *non spaziotemporale*, il che significa una fisica mancante di alcune caratteristiche di spaziotempo, spazio e/o tempo (Huggett & Wüthrich 2013).

<sup>1</sup> Con "relatività" si intenderà sempre "relatività generale" [N.d.T.].

La gravità quantistica ha quindi lo scopo di descrivere la fisica fondamentale che "sottende" la relatività generale. Una sua possibile interpretazione è che essa debba catturare la fisica non spaziotemporale responsabile della comparsa dei fenomeni gravitazionali nei domini accessibili (quelli in cui la relatività generale è ben testata). Dato che si suppone che questa fisica sia, in qualche modo, una fisica quantistica (anche se potrebbe richiedere la riformulazione della teoria quantistica dei campi), la gravità quantistica potrebbe descrivere *quanti* o *atomi* discreti di spaziotempo non esistenti, a loro volta, *nello* spaziotempo. Ora, se questa teoria presenta delle differenze così radicali rispetto alla teoria della relatività generale, considerato il ragguardevole successo e la stabilità su tutte le scale di energia accessibili <sup>2</sup> di quest'ultima teoria (ad esempio, il trattamento della relatività generale come una teoria campo efficace (*effective field theory*) mostra che le correzioni quantistiche sono trascurabili in questi domini (vedi, per esempio, Burgess 2004), è ragionevole aspettarsi che la relatività generale – così come la sua descrizione dello spaziotempo – emerga dalla gravità quantistica nel dominio appropriato, cioè su scale a bassa energia (Crowther 2018).

<sup>2</sup> Ignoriamo qui il problema della materia oscura, che potrebbe indicare un problema per la relatività a *larghe* scale di lunghezza.

Questa idea – una teoria *meno* fondamentale che emerge da una *più* fondamentale – è un esempio di ciò che normalmente si chiamerebbe emergenza *sincronica*: le due teorie si applicano agli stessi sistemi allo stesso tempo, o comunque alle stesse condizioni, ma a diversi *livelli*: ad esempio, a scale di lunghezza o energia diverse. Il termine *sincronico*, in questo caso particolare, è tuttavia inadatto poiché la gravità quantistica potrebbe non avere una concezione temporale a essa associata o potrebbe implicare una nozione di tempo che differisce dal tempo globale della relatività generale. Sembra perciò necessaria una caratterizzazione più generale di questa emergenza basata su livelli, o potremo dire *gerarchica*, ed essa è ciò che fornirò nel paragrafo 4, prima di considerare se e come questo modello possa essere applicato a diversi casi e approcci alla gravità quantistica.

Esiste, in secondo luogo, un altro senso in cui lo spaziotempo potrebbe emergere dalla fisica non spaziotemporale descritta dalla gravità quantistica e, in questo secondo

caso, il modello di emergenza in oggetto corrisponde a quello solitamente definito *diacronico*. In questo caso, la gravità quantistica descriverebbe la fisica che sta alla base della singolarità del Big Bang, momento in cui la relatività generale (insieme alla sua concezione dello spaziotempo) fallisce. Qui, di nuovo, la gravità quantistica può descrivere la fisica non spaziotemporale presente *durante* o *antecedentemente* l'inizio dell'universo spaziotemporale. In questo senso, sia essa definita diacronica o “piatta”, l'emergenza dovrebbe corrispondere a una relazione tra due modelli (di una singola teoria) che descrivono il sistema in esame allo stesso livello, ma in momenti diversi (Guay & Sartenaer 2016). Per catturare l'emergenza dello spaziotempo da uno stato antecedente non spaziotemporale è quindi necessario delineare un modello più generale di emergenza diacronica, ed è quanto tenterò di fare nel paragrafo 5, prima di esplorare come questo modello possa essere applicato a diversi esempi di modelli cosmologici di gravità quantistica.

Inizierò (paragrafo 2) discutendo, da un lato, i modi in cui la gravità quantistica (e la fisica che essa descrive) possono essere considerati più fondamentali della relatività e, dall'altro, analizzerò il requisito per cui quest'ultima dev'essere riducibile alla gravità quantistica nel dominio pertinente. Successivamente (paragrafo 3), presenterò un modello generale di emergenza applicabile alla gravità quantistica illustrando il suo rapporto con le interpretazioni emergentiste più diffuse della letteratura filosofica. Successivamente (paragrafo 4), discuterò in che senso sia possibile affermare che lo spaziotempo emerge “gerarchicamente” dalla fisica descritta dalla gravità quantistica ricorrendo a esempi di modelli analoghi di spaziotempo e alla gravità quantistica a loop (*loop quantum gravity*). Infine (paragrafo 5), esplorerò in che senso si può affermare che lo spaziotempo emerge “in modo piatto” dalla fisica descritta dalla gravità quantistica ricorrendo a esempi di suoi approcci pregeometrici e alla cosmologia quantistica a loop (*loop quantum cosmology*).

È tuttavia di primaria importanza sottolineare fin dall'inizio che questi modelli di cosmologia elaborati nella cornice della gravità quantistica sono lungi dall'essere completamente sviluppati o compresi. Al momento qualsiasi interpretazione corrisponde a una speculazione ed è altamente incerta. Non è chiaro, in altre parole, se questi modelli siano fisicamente significativi.

## II. Riduzione inter-teorica e fundamentalità relativa nella gravità quantistica

Si dice che la teoria  $L$  sia riducibile alla teoria  $M$  se  $L$  è approssimativamente *deducibile* da  $M$  nel dominio appropriato (dove  $L$  è nota per essere una teoria efficace). Questa idea di riduzione inter-teorica dimostra che il dominio di  $M$  è più ampio del dominio di  $L$ , il che significa che  $M$  è in grado di descrivere, approssimativamente, tutti i fenomeni descritti con successo  $L$ , più ulteriori fenomeni.<sup>3</sup> È dunque in questi termini che va inteso il requisito per cui la relatività generale deve essere riducibile a una qualsiasi teoria accettabile della gravità quantistica: fa parte cioè della definizione della seconda che la prima sia approssimativamente derivabile da essa nel dominio in cui ha successo (Crowther 2018a). Ciò significa che se anche la gravità quantistica non descrivesse fundamentalmente lo spaziotempo, la concezione dello spaziotempo descritta dalla relatività dovrebbe essere approssimativamente recuperabile (cioè derivabile) da essa nei regimi in cui lo spaziotempo è noto per essere un concetto efficace.

Si consideri, quindi, la fundamentalità relativa: dato un particolare sistema

<sup>3</sup> Questo è soltanto uno dei numerosi ruoli che la riduzione gioca in fisica. Vedi Crowther (2018b).

$S$ , o fenomeno  $F$ , una teoria  $M$  è più fondamentale di un'altra teoria  $L$  se fornisce una descrizione più basilare di  $S$  o  $F$  rispetto alla descrizione fornita da  $L$  (che è quindi meno fondamentale). C'è una sola condizione per la fundamentalità relativa, ossia che le leggi di  $L$  dipendano (almeno parzialmente) dalla fisica descritta da  $M$  e non viceversa. La fundamentalità relativa è quindi una dipendenza asimmetrica <sup>4</sup> e questo senso di fundamentalità è corroborato dal fatto che  $L$  è riducibile a  $M$  mentre  $M$  non è riducibile a  $L$ :  $L$  è approssimativamente e appropriatamente derivabile da  $M$ , ma non viceversa.

<sup>4</sup> Seguo qui quanto sostenuto in Crowther (2018b).

È bene tenere a mente che, dal punto di vista della gravità quantistica, una teoria dovrebbe fornire sia una *micro*-descrizione dello spaziotempo (perché il dominio di necessità della gravità quantistica comprende scale di lunghezza minima) <sup>5</sup> sia una sua descrizione *quantistica* (è importante notare che gli effetti quantistici non sono limitati alle scale di breve lunghezza!). Ognuna di queste descrizioni è sufficiente per affermare che la gravità quantistica è più fondamentale della relatività generale, intendendo la fundamentalità relativa come *dipendenza asimmetrica*. La gravità quantistica può essere considerata più fondamentale della relatività in due sensi: in primo luogo, la prima sarebbe più fondamentale della seconda in modo analogo a come la descrizione atomica della materia è considerata più fondamentale della descrizione continua della materia. In secondo luogo, la prima sarebbe più fondamentale della seconda nel senso in cui la descrizione quantistica della materia è più fondamentale di quella classica.

<sup>5</sup> Qui il termine "*micro*" è usato in senso puramente figurativo per distinguere i gradi di libertà descritti dalla relatività quantistica e quelli descritti dalla fisica attuale (gradi di libertà "*macro*"). Le espressioni "scale ad alta energia" e "scale di breve lunghezza" sono usate in modo interscambiabile per indicare il dominio che si prevede descritto dalla gravità quantistica. Le virgolette indicano che questo potrebbe non essere letteralmente vero, perché l'idea di lunghezza (e, di conseguenza, di energia) potrebbe perdere significato a certe scale e non è detto che la gravità quantistica non descriva esattamente questo regime.

Come è stato chiaramente notato in letteratura, è possibile che il recupero della relatività a partire dalla gravità quantistica sia un processo che avviene in due fasi, dove la prima coinvolge la riproduzione dell'aspetto classico e la seconda riproduce il limite a bassa energia della teoria (che ci riporta a scale familiari di energia): nel primo caso si parla di transizione quantistico/classica, nel secondo di transizione micro/macro. Sebbene entrambi i casi affrontino la questione del perché la gravità quantistica non sia necessaria per descrivere gran parte dei fenomeni gravitazionali osservabili, essi sono distinti e possono essere correlati tra loro con maggiore o minore successo. Entrambe le transizioni, inoltre, rappresentano questioni comunemente discusse nella fisica e nella filosofia della fisica ed entrambi svolgono un ruolo significativo nella comprensione delle relazioni di emergenza e riduzione.

La transizione micro/macro non è una reale trasformazione del sistema, ma è un cambiamento a livello di descrizione, ossia è il procedimento per cui un fenomeno viene re-inquadrato in una teoria semplificata ("a grana-grossa"). La transizione micro/macro può consistere quindi in una procedura di approssimazione, in un processo limite (come il limite termodinamico o il "limite continuo"), da un flusso del gruppo di rinormalizzazione e dagli altri metodi della teoria campo efficace (*effective field theory*). Quest'ultimo quadro viene sfruttato per produrre una teoria valida a una certa scala di energia partendo da un'altra teoria valida a una scala energetica diversa. La teoria campo efficace stabilisce, ad esempio, una procedura per la creazione di una teoria a bassa energia (macroscopica) da una teoria ad alta energia (microscopica) che descrive lo stesso sistema in termini di diversi gradi di libertà. Essa fornisce inoltre una spiegazione di come possiamo sfruttare le teorie macroscopiche

senza la necessità di conoscerne i dettagli a livello micro-fisico. <sup>6</sup> I vari approcci alla gravità quantistica sfruttano tutte queste tecniche nel tentativo di ricollegare questa teoria alla relatività. <sup>7</sup>

Nel caso della transizione quantistico/classica ci sono due ordini di problemi, poiché la comunità scientifica si aspetta che le teorie quantistiche siano universalmente applicabili, e questo fatto rappresenta una delle principali motivazioni per ricercare una gravità quantistica. In primo luogo, quindi, vi è la questione del perché, nella pratica, le teorie quantistiche siano necessarie unicamente alla descrizione di piccoli sistemi. In secondo luogo, c'è il problema della misurazione: non è chiaro perché ogni misurazione di un sistema quantistico rilevi il sistema in uno stato definito, nonostante esso si evolva come sovrapposizione di stati diversi. Per quanto riguarda il primo problema, va citato il processo di *decoerenza* che spiega come gli effetti di interferenza associati alle sovrapposizioni vengano soppressi attraverso le interazioni del sistema con il suo ambiente, con la conseguenza che la natura quantistica del sistema non è più manifesta. Dato che i sistemi più grandi si accoppiano in modo più robusto con i loro ambienti, la decoerenza fornisce una prima spiegazione del perché la teoria quantistica sia di solito necessaria per descrivere soltanto i micro-sistemi. Come tale, essa ci dà quindi una visione della “transizione” che un sistema subisce e che ci spinge a passare da una sua descrizione quantistica a una descrizione classica (sebbene il sistema rimanga intrinsecamente quantistico, come tutto il resto dell'universo). La decoerenza non fornisce tuttavia una risposta al problema della misurazione.

Ciò che i fisici si aspettano è che gli stati generici delle entità descritte dalla gravità quantistica siano sovrapposizioni. Tuttavia, la natura quantistica dello spazio-tempo non è manifesta e si ritiene pertanto necessaria una decifrazione della transizione quantistico/classica nel quadro della gravità quantistica per comprendere l'aspetto classico dello spaziotempo. Le procedure di limitazione e approssimazione (usate per descrivere la transizione micro/macro) non possono infatti risolvere, da sole, la sovrapposizione (vedi Wüthrich 2017). Ovviamente, questo è un compito incredibilmente impegnativo dato che la transizione quantistico/classica non è ben intesa in generale. Sembra quindi probabile che una soluzione al problema della misurazione sia necessaria per una piena comprensione della relazione tra lo spaziotempo e i gradi quantistici di libertà che ne sono in qualche modo la base (se non, addirittura, i costituenti); alternativamente, la soluzione sarà fornita dalla teoria stessa. <sup>8</sup> La maggior parte di coloro che lavorano nel campo della gravità quantistica, tuttavia, hanno obiettivi più modesti (almeno per il momento) e cercano di comprendere al meglio la relazione tra la gravità quantistica e la relatività generale con lo scopo di contribuire allo sviluppo, alla verifica e alla giustificazione della teoria quantistica. Per questi scopi, in effetti, una rigorosa comprensione filosofica della transizione quantistico/classica potrebbe non essere necessaria.

### III. Emergenza nella gravità quantistica

L'emergenza è una relazione empirica che sussiste fra due *relata* dello stesso tipo: un emergente *E* e la sua base di emergenza *B*. A seconda del caso di interesse e del

<sup>6</sup> Vedi Batterman (2005) e (2011), Crowther (2015) e Hartmann (2001).

<sup>7</sup> Per una discussione sui ruoli dell'approssimazione e delle procedure che sfruttano i limiti vedi Butterfield e Isham (1999) e Wüthrich (2017). Sulla teoria campo efficace e sulla gravità quantistica vedi Crowther (2016).

<sup>8</sup> Penrose è un fermo sostenitore di questa seconda idea. Vedi Penrose (1999) e (2002).

modello di emergenza preso in considerazione,  $E$  e  $B$  possono essere oggetti, proprietà, poteri, leggi, teorie, modelli etc. Il modello più universale di emergenza sostiene che  $E$  è al contempo dipendente da  $B$ , ma anche nuovo ed autonomo rispetto a esso. Ancora una volta, tuttavia, il significato dei termini “dipendenza”, “novità” e “autonomia” deve essere specificato a seconda del contesto.

In questo articolo, sono interessata all'emergenza intesa come relazione tra teorie o parti di teorie (come ad esempio i modelli), e considero la nozione generale di emergenza costituita dai tre seguenti assunti:

#### EMERGENZA: CONCEZIONE GENERALE

- [Dipendenza]:  $E$  dipende da  $B$  e infatti, ad esempio,  $E$  è approssimativamente derivabile da  $B$ , e/o *sopravveniente* su  $B$  (dove con “sopravvenienza” si intende la circostanza per cui non si dà cambiamento in  $E$  senza cambiamento in  $B$ , mentre l'inverso è possibile);
- [Novità]:  $E$  è, sorprendentemente, qualitativamente diverso da  $B$ ;
- [Autonomia]:  $E$  è robusto rispetto ai cambiamenti in  $B$ ; o  $E$  è lo stesso per varie scelte o ipotesi sulla classe di confronto  $B$ .

Questa è una concezione *positiva* dell'emergenza poiché non richiede che la novità corrisponda al fallimento di riduzione, deduzione, spiegazione o derivazione. Una tale concezione è ormai familiare nella filosofia della fisica in generale e in particolare nella filosofia della gravità quantistica.<sup>9</sup> La concezione positiva dell'emergenza è, inoltre, la più appropriata per comprendere il caso dell'emergere dello spazio-tempo dalla gravità quantistica, e questo per due ragioni. In primo luogo, come spiegato sopra, la relatività deve essere riducibile alla gravità quantistica: che la prima sia cioè approssimativamente e appropriatamente derivabile dalla seconda è un requisito per qualsiasi teoria che abbia quest'ultima come suo oggetto.<sup>10</sup> Questa circostanza è in grado di soddisfare il primo fra i criteri dell'emergenza sopra elencati, ossia [Dipendenza], e, per questa ragione, è necessario un modello di emergenza che sia compatibile con la riduzione, almeno in questo senso. In secondo luogo, nessuno degli approcci alla gravità quantistica è completo, perciò affermare che si dà emergenza nel momento in cui non si dà la possibilità di spiegare, derivare o prevedere particolari aspetti dello spaziotempo teorizzato dalla relatività è rischioso, dato che l'obiettivo centrale di ciascuno degli approcci disponibili è esattamente quello di sviluppare una teoria quantistica in grado di recuperare (derivare e spiegare) approssimativamente e appropriatamente lo spaziotempo della relatività.

Naturalmente, lo stato incompleto di tutti gli approcci implica che qualsiasi filosofia della gravità quantistica che cerchi di interpretare queste teorie frammentarie si trova nell'incertezza e i suoi risultati potrebbero non essere rilevanti una volta nota la teoria completa. Un programma di ricerca e un progetto di interpretazione ottimistico è tuttavia più interessante e utile di uno pessimistico, dato lo scopo di ogni approccio alla gravità quantistica, ossia tentare fattivamente di sviluppare una teoria capace di recuperare lo spaziotempo della relatività. Possiamo quindi avanzare delle ipotesi sul successo di questi approcci e iniziare a speculare su quali idee positive essi possano suggerire a proposito dell'emergenza, tenendo in considerazione, ovviamente,

<sup>9</sup> Vedi, fra gli altri, Butterfield (2011a) e (2011b), Crowther (2015) e (2016), de Haro (2017), Dieks et al. (2015), Linnemann & Visser (2018) e Oriti (2014).

<sup>10</sup> Per un approfondimento, vedi Crowther (2018a) e (2018b).

il loro stato attuale e il loro sviluppo incompleto. Questa è la strategia che adotterò quando prenderò in considerazione l'emergenza negli esempi oggetto dei paragrafi quarto e quinto. <sup>11</sup>

Come già menzionato, considero *E* e *B* due teorie o due parti di teorie (ad esempio due modelli) a seconda dei casi specifici (vedi oltre). Questa mia scelta teorica può suggerire che mi stia impegnando in una interpretazione puramente epistemologica dell'emergenza, ma il mio obiettivo è semplicemente rimanere neutrale rispetto a ogni considerazione su come queste strutture si relazionano con il mondo. Al lettore interessato all'emergenza ontologica posso offrire il mio impegno nei confronti di una metafisica naturalizzata, per cui l'ontologia va intesa come l'insieme delle possibili entità descritte dalle teorie (per esempio: entità come gli elementi discreti degli approcci pregeometrici alla gravità quantistica oppure i quanti di area e volume descritti dalla gravità quantistica a loop, o ancora lo spaziotempo descritto da un particolare modello di relatività). Il modello di emergenza che condivido è perciò destinato a essere un modello neutrale e potrebbe essere interpretato sia in termini epistemologici, sia in termini ontologici (se il lettore è però convinto che l'emergenza ontologica comporti il fallimento della riduzione, è meglio considerare il modello di emergenza qui presentato in termini versione epistemologici; consiglio quindi di non guardare all'emergenza dello spaziotempo come a un esempio di emergenza ontologica, dati i miei precedenti commenti).

Mentre è richiesto che la gravità quantistica sia più fondamentale della relatività generale e che lo spaziotempo della relatività sia approssimativamente e appropriatamente derivabile dalla gravità quantistica, non è invece necessario che questo spaziotempo emerga dalla fisica descritta dalla gravità quantistica. In effetti, ci sono esempi di approcci che probabilmente non soddisferebbero le condizioni per lo spaziotempo emergente (ad esempio, alcuni approcci utilizzano il concetto di spaziotempo non fornendo una base solida per il secondo criterio dell'emergenza, [Novità]). Ciononostante, ci sono esempi di approcci che possono essere plausibilmente interpretati come candidati per lo spaziotempo emergente e alcuni di essi saranno presentati nei prossimi due paragrafi.

Come abbiamo visto, ci sono due diverse concezioni possibili di spaziotempo emergente dalla gravità quantistica: da un lato, l'emergenza gerarchica; dall'altro, l'emergenza piatta. Questi due modelli sono intesi come versioni più generali di concezioni sincroniche e diacroniche dell'emergenza. Nella concezione sincronica, *B* ed *E* rappresentano descrizioni di diverso livello: si dice che *B* descriva il sistema a un livello inferiore e che *E* lo descriva a un livello superiore. In fisica, *B* ed *E* possono essere teorie che si applicano a diversi intervalli di scale di lunghezza o di energia, dove, in genere, *B* descrive il sistema a scale di energia più elevate (scale di lunghezza più corta), mentre *E* si applica a scale di energia relativamente basse (a scale di grandi dimensioni). Queste teorie si applicano al sistema contemporaneamente, o comunque nelle stesse condizioni, e non viene preso in considerazione nessun cambiamento del sistema; ciò che è rilevante è solo il livello al quale esso viene analizzato.

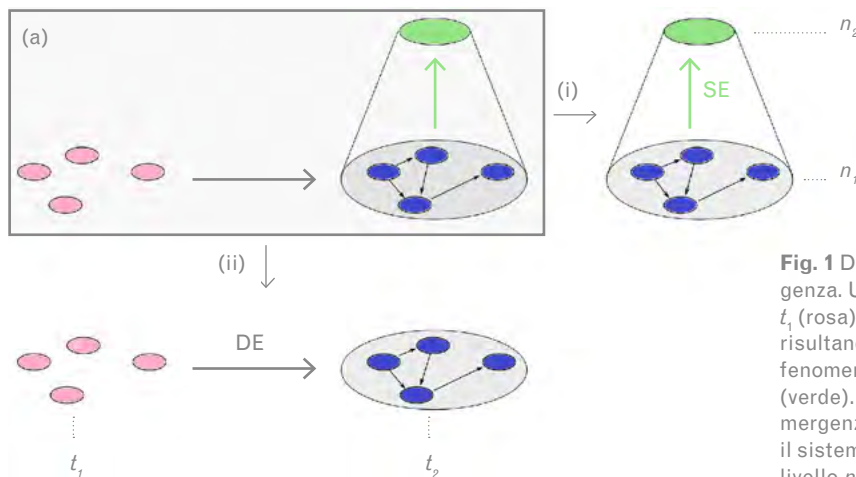
Nella concezione diacronica dell'emergenza, *E* e *B* rappresentano invece il sistema allo stesso livello di descrizione. Queste teorie (o modelli) si applicano però al sistema in momenti diversi, o comunque in condizioni diverse. L'idea è che il sistema subisce qualche cambiamento e mentre *B* lo descrive in un momento antecedente, *E*

<sup>11</sup> Mentre argomenterò a favore dell'idea che questi esempi possano plausibilmente essere candidati per l'emergenza dello spaziotempo, è anche appropriata l'idea che non sia *necessario* considerarli emergenze, essendo possibile adottare un'interpretazione metafisica diversa della relazione fra lo spaziotempo e le strutture descritte dalla gravità quantistica (vedi Le Bihan 2018).

lo descrive in un momento successivo. Questa concezione dell'emergenza non è associata a una nozione di fundamentalità.

La differenza tra queste due versioni di emergenza è illustrata nella Fig. 1.

Nei prossimi paragrafi verranno presentati modelli specifici di emergenza sincronica e diacronica nonché degli esempi a essi relativi.



**Fig. 1** Due concezioni di emergenza. Un sistema (a) al tempo  $t_1$  (rosa) cambia al tempo  $t_2$  (blu), risultando in un qualche nuovo fenomeno di livello superiore (verde). (i) Se si è interessati all'emergenza sincronica (freccia SE), il sistema va considerato prima al livello  $n_1$  e comparato poi al livello  $n_2$ , allo stesso tempo che in questo caso è  $t_2$ . (ii) Se si è interessati all'emergenza diacronica, (freccia DE), il sistema va considerate prima al tempo  $t_1$  e poi al tempo  $t_2$ , tenendo in conto un unico livello che in questo caso è  $n_1$ . (Immagine adattata da Guay & Sartenaer 2016).

#### IV. L'Emergenza gerarchica dello spaziotempo

La sfida principale che la visione gerarchica (sincronica) dell'emergenza si trova ad affrontare quando applicata al caso dello spaziotempo è quella di definire la nozione di livelli senza fare riferimento alle scale di lunghezza. Se il modo più diffuso di eludere questa preoccupazione è riferirsi alternativamente alle scale di energia, questa mossa non fa altro che nascondere il problema sotto il tappeto, dato che le scale di energia sono definibili in termini di scale di lunghezza. Un approccio più efficace è quello di distinguere i livelli in termini di "raffinatezza" (*size of grain*): una teoria di livello inferiore fornisce una descrizione a grana fine della fisica, mentre una teoria di livello superiore fornisce una descrizione a grana grossa dei fenomeni. Tipicamente (specialmente nella fisica delle particelle), queste nozioni si correlano alle scale di energia a cui si applicano le teorie, mentre queste ultime tendono a loro volta a correlarsi alla gerarchia di fundamentalità relativa (sebbene queste nozioni non siano necessariamente legate). Pertanto, e anche per una comodità di notazione, manterrò la distinzione fra la fisica di livello inferiore descritta da  $B$  – la fisica *microscopica* – e la fisica di livello emergente descritta da  $E$  – la fisica *macroscopica*.

Un modello utile di emergenza gerarchica è quello che si sviluppa considerando il summenzionato quadro della teoria campo efficace. Essa va considerata una "cassetta degli attrezzi" utile per costruire teorie del campo valide su scale a bassa energia rispetto a un dato limite di massa pesante, all'approssimarsi del quale la teoria inizia a presentare difetti formali tali per cui non può più essere considerata una rappresentazione affidabile del sistema in oggetto (più in generale, una teoria viene definita "efficace" se è considerata affidabile *soltanto* in un dominio ristretto, il che vale a dire che le teorie efficaci non sono universalmente valide e non sono solitamente considerate fondamentali).

Un semplice esempio di quanto detto è rappresentato dai i modelli analoghi



di spaziotempo nei fluidi. Questi modelli possono essere materialmente costruiti all'interno di un laboratorio di fisica sfruttando liquidi comuni come l'acqua o superfluidi più esotici come i condensati di Bose-Einstein. Un'euristica per comprendere tali modelli consiste nell'immaginare che quando il sistema viene sondato a basse energie, le particelle nel fluido vibrano, producendo onde sonore, i cui quanti sono detti *fononi* ("particelle sonore"), un tipo di quasiparticella. Queste quasiparticelle sono soggette a una metrica efficace dello spaziotempo curvo, il che significa che si comportano come se esistessero all'interno di uno spaziotempo curvo, "ignari" della sottostante superficie (piana) del fluido stesso.<sup>12</sup> All'aumentare dell'energia, tuttavia, la lunghezza d'onda delle quasiparticelle diventa sufficientemente corta da permettere loro di "rilevare" le particelle discrete del fluido (questo avviene quando le quasiparticelle hanno lunghezza d'onda paragonabile alla distanza tra le particelle): a questo punto, la teoria efficace utilizzata per descrivere le quasiparticelle cessa di essere valida.

<sup>12</sup> Per una rassegna vedi Barceló et al. (2011); per una formulazione indirizzata ai filosofi vedi Bain (2008) e (2013).

Molto semplicemente, consideriamo un condensato di Bose-Einstein con densità numerica delle particelle  $\rho$  e fase di coerenza. Nel costruirne il modello analogico, queste variabili vengono espanse linearmente attorno ai valori del loro stato fondamentale,  $\rho_0$  and  $\theta_0$ , così che  $\rho = \rho_0 + \delta\rho$  e  $\theta = \theta_0 + \delta\theta$ , dove  $\delta\rho$  e  $\delta\theta$  rappresentano fluttuazioni di densità e di fase. Queste variabili sono quindi sostituite nella lagrangiana che descrive il condensato e le fluttuazioni ad alta energia vengono identificate e "integrate" in modo che soltanto le interazioni a bassa energia vengano incluse nella teoria. Il risultato, schematicamente, è la somma di due termini:  $L = L_0[\rho, \theta] + L_{eff}[\delta\theta]$ , dove  $L_0$  è la lagrangiana che descrive lo stato fondamentale del condensato e  $L_{eff}$  è la Lagrangiana efficace che descrive le fluttuazioni a bassa energia sopra lo stato fondamentale.  $L_{eff}$  è formalmente identico alla lagrangiana di un campo scalare privo di massa in uno spaziotempo in 3+1 dimensioni e la metrica curva efficace dipende esplicitamente dalla velocità del fluido sottostante.

Come sottolinea Bain (2013), data la sostanziale differenza tra  $L_0$  e  $L_{eff}$  e considerate nello specifico le diverse simmetrie che esemplificano, essendo  $L_0$  non relativistica (Galileian invariant) ed  $L_{eff}$  relativista (Lorentz invariant), possiamo trattare la lagrangiana originale e quella efficace come se descrivessero due diverse teorie. I modelli analogici ci mostrano che la metrica dello spaziotempo curvo è incredibilmente facile da ottenere a partire da una varietà di sistemi diversi. Formalmente, l'emergenza di un'invarianza di Lorentz è una caratteristica generica della procedura di linearizzazione utilizzata per costruire questi modelli. Pertanto, data la fisica delle basse energie, la teoria delle alte energie è fortemente sottodeterminata, e questo è un segno distintivo del programma della teoria campo efficace.

Lo **spaziotempo relativistico analogico** può essere considerato un fenomeno emergente perché si adatta allo schema generale di emergenza descritto nel paragrafo 3, dove la teoria  $E$  che descrive le quasiparticelle  $L_{eff}$  emerge dalla teoria di base  $B$  che descrive lo stato fondamentale del fluido  $L_0$ . La prima condizione, [Dipendenza], è soddisfatta poiché la teoria efficace  $E$  è costruita a partire dalla teoria microscopica  $B$ , e le quasiparticelle descritte da  $E$  sono fenomeni collettivi: eccitazioni a bassa energia delle particelle sottostanti del fluido (non hanno perciò esistenza indipendente o fondamentale). Il criterio [Novità] è anch'esso soddisfatto perché  $E$  e  $B$  sono caratterizzati da diverse simmetrie:  $E$  rispetta il principio di relatività galileiana, (Galileian invariant) mentre  $B$  rispetta la covarianza di Lorentz (Lorentz invariant). Infine, anche l'ultimo criterio, [Autonomia], è soddisfatto perché lo spaziotempo curvo efficace è molto facilmente ottenibile a partire da una

varietà di sistemi diversi con diverse costituzioni microscopiche. Se si considera solo la fisica delle basse energie, in altre parole, la teoria delle alte energie è fortemente sottodeterminata.

In termini generali, questo esempio suggerisce il seguente modello di emergenza gerarchica:

#### EMERGENZA: CONCEZIONE GERARCHICA

- [Dipendenza]: la teoria (così come il modello o la struttura) a grana grossa  $E$  è costruita (ossia derivata) dalla teoria a grana fine  $B$ . Si può affermare che la fisica descritta dalle leggi di  $E$  *sopravvenga* su quella descritta dalle leggi di  $B$  (laddove con “sopravvenienza” si intende la circostanza per cui non si da cambiamento in  $E$  senza cambiamento in  $B$ , mentre l'inverso è possibile);
- [Novità]: la fisica descritta dalla (macro)teoria a grana fine, o a bassa energia  $E$  è sensibilmente diversa da quella della (micro)teoria a grana fine, o a energia più alta  $B$ ;
- [Autonomia]: la fisica descritta da  $E$  è robusta rispetto ai cambiamenti nella micro-fisica;  $B$  è *sottodeterminato* rispetto a  $E$ .

Sono necessari a questo punto alcuni commenti. Per quanto riguarda [Novità], si noti che essa non deve essere una relazione asimmetrica; questo criterio cattura solo i modi in cui le due teorie differiscono l'una dall'altra. Per quanto riguarda [Autonomia], ci sono due sensi in cui è significativo affermare che una teoria è sottodeterminata <sup>13</sup> ed essi sono dovuti all'*universalità* (realizzabilità multipla) della fisica di  $E$ . Innanzitutto, diversi micro-stati descritti da  $B$ , o che possono essere considerati modelli di  $B$ , possono corrispondere a un singolo macro-stato/modello di  $E$ . Un esempio di ciò è come un certo numero di stati microscopici diversi descritti dalla meccanica statistica possano corrispondere a un singolo macro-stato in termodinamica. In secondo luogo, diverse micro-teorie possono corrispondere alla stessa macro-teoria. In questo caso si possono considerare fluidi di diversa micro-costituzione (costituiti cioè da cellule, molecole, atomi o particelle di diverso tipo) che possono dare origine allo stesso comportamento idrodinamico se descritti da una prospettiva a grana più grossa.

<sup>13</sup> Vedi Franklin (2018), che distingue due sensi diversi di autonomia relativi alla teoria campo efficace e alla naturalezza teoretica.

Questa concezione dell'emergenza può essere utilizzata per comprendere l'emergenza gerarchica così come è concepita in diversi approcci alla gravità quantistica. <sup>14</sup> Presenterò ora brevemente uno di questi modelli, noto come gravità quantistica a loop.

<sup>14</sup> Crowther (2016).

### IV.1. L'Emergenza dello spaziotempo dalla gravità quantistica a loop

La gravità quantistica a loop è il tentativo di costruire una teoria della gravità quantistica quantizzando la relatività generale. Secondo questa teoria, lo spaziotempo è fondamentalmente composto da strutture quantistiche discrete note come reti di spin (*spin networks*) le cui controparti dinamiche sono note come schiume di spin (*spin foams*). Le reti di spin sono diagrammi astratti i cui nodi simboleggiano i volumi quantistici e i cui link rappresentano la superficie quantizzata delle regioni che delimitano i volumi. I volumi si fanno corrispondere a “blocchi” discreti di spazio tridimensionale

che sono adiacenti l'uno all'altro se collegati da link. Si ritiene quindi che lo spazio fisico sia una sovrapposizione quantistica di stati delle reti di spin, caratterizzata da proprietà geometriche soddisfacenti (*well-behaved*).<sup>15</sup>

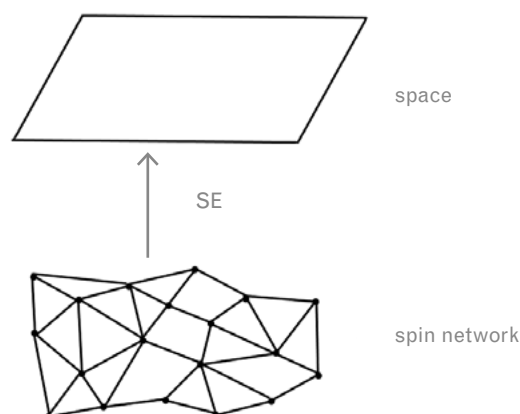
La gravità quantistica a loop è una teoria ancora incompleta (in particolar modo per quanto riguarda la sua dinamica) e non è ancora chiaro come lo spaziotempo debba essere recuperato dalle strutture fondamentali da essa descritte. Provvisoriamente, supporremo che l'aspetto cinematico della gravità quantistica a loop appena descritto sia approssimativamente corretto, il che significa supporre che lo spazio (non lo spaziotempo) sia costituito, fondamentalmente, da reti di spin. Ipotizzeremo inoltre che la gravità quantistica a loop sia un serio contendente per la gravità quantistica e che la relatività sia approssimativamente e appropriatamente derivabile da esso. Assumiamo, insomma, che il criterio [Dipendenza] per l'emergenza gerarchica sia soddisfatto.

<sup>15</sup> Per un approfondimento sulla gravità quantistica a loop vedi Rovelli (2004) e Rovelli & Vidotto (2014). Si noti che quest'ultimo riferimento è molto più aggiornato del breve schizzo dell'aspetto cinematico della teoria che presento qui, soprattutto sulla dinamica della teoria, per la quale usa l'approccio covariante.

Il criterio [Novità] è plausibilmente soddisfatto perché gli stati delle reti di spin differiscono dallo spazio in molti sensi. Mi limito a citarne due: in primo luogo, come sottolineato da Huggett & Wüthrich (2013, §2.3) esiste una forma particolare di “non località” per cui è possibile per due “regioni di spazio” adiacenti all'interno della rete di spin non risultare vicine nello spaziotempo corrispondente (questa non località, tuttavia, dovrebbe essere fortemente cassata o altrimenti la rete di spin in questione corrisponderebbe a un altro spaziotempo, in grado di rifletterne meglio la struttura fondamentale). In secondo luogo, si suppone che lo spazio sia una sovrapposizione quantistica di reti di spin, quindi non c'è una chiara nozione di geometria a livello fondamentale.

Il criterio [Autonomia] è plausibilmente soddisfatto perché molti stati diversi della rete di spin possono corrispondere alla stessa geometria (semi-classica), a dimostrazione della robustezza dello spaziotempo emergente. Inoltre, dato che lo spazio corrisponde a una sovrapposizione di reti di spin, esso è autonomo rispetto a ogni particolare stato di rete di spin definito (ossia non sovrapposto).

In conclusione, è ragionevole affermare che lo spaziotempo della relatività emerga dalle strutture fondamentali della gravità quantistica a loop. Quanto detto è rappresentato in Fig. 2, dove viene raffigurata l'emergenza dello spazio da uno stato di rete di spin definito.



**Fig. 2** Emergenza gerarchica (“sincronica”) dello spazio da una rete di spin.

## V. L'Emergenza piatta dello spaziotempo

La concezione *diacronica* o *piatta* dell'emergenza dello spaziotempo descrive uno stato spaziotemporale che emerge da uno stato non spaziotemporale “precedente” e appartenente allo stesso livello. Questo modello è conveniente perché uno dei domini in cui la relatività è ritenuta scorretta – ed è qui che è richiesta la sua sostituzione con la gravità quantistica – è proprio quello dell'origine dell'universo. Grazie alla relatività generale e alle osservazioni effettuate sulla struttura a larga scala dell'universo, i cosmologi, andando a ritroso nel tempo, lavorano per produrre una descrizione dell'evoluzione passata dell'universo. L'immagine risultante è quella del Big Bang o modello standard della cosmologia, che descrive un universo in espansione a partire da uno stato di temperatura e densità estremamente elevate risalente a circa 13 miliardi di anni fa. Prima di questo stato, tuttavia, vi è la *singolarità* del Big Bang.

Un'interpretazione del comportamento singolare del modello è che la relatività, in questo dominio, non sia corretta a causa della sua incapacità di tener conto degli effetti quantistici che a densità e temperatura estreme sono rilevanti (nel qual caso, la relatività generale diventa probabilmente errata in un momento definito vicino alla singolarità). Da questo punto di vista, la singolarità è dunque un artefatto non fisico, un *segnale* dell'inapplicabilità della relatività generale in questo contesto. La gravità quantistica, di conseguenza, dovrebbe fornire una descrizione corretta della fisica di questo dominio senza implicare singolarità.

Secondo il modello dell'emergenza piatta,  $E$  e  $B$  sono stati diversi dello stesso sistema interpretati allo stesso livello, ma in tempi diversi, e dovrebbero essere descritti da diversi modelli della stessa teoria. Un modello caratteristico dell'emergenza piatta (diacronica) è contenuto in Guay & Sartenaer (2016) e Sartenaer (2018). Nei loro modelli, il criterio [Dipendenza] consiste nel fatto che  $E$  è il prodotto di un processo spaziotemporalmente continuo che parte da  $B$  ed è inoltre (o in alternativa) causato da  $B$ . Il criterio [Novità] afferma che  $E$  presenta nuove entità, proprietà o poteri che non esistono in  $B$ . Il criterio [Autonomia], infine, stabilisce che a queste nuove entità, proprietà o poteri è vietato esistere in  $B$  secondo le sue leggi.

Questo resoconto non è generalmente applicabile al caso dello spaziotempo, poiché si basa su nozioni spaziotemporali come quelle di causalità, posizione e processi continui. Se uno stato spaziotemporale deve emergere da uno stato non spaziotemporale (o, meglio, non totalmente spaziotemporale), non è infatti possibile assumere che questo processo si svolga nello spazio e nel tempo (è vero che alcuni approcci alla gravità quantistica utilizzano una nozione di tempo, ma questa nozione non è identificabile con la nostra concezione familiare di temporalità). Se vogliamo spiegare in questi termini l'emergenza dello spaziotempo dallo stato del “Big Bang”, è perciò necessaria una concezione più generale dell'emergenza piatta (metto “Big Bang” tra virgolette perché questo termine si riferisce strettamente alla singolarità descritta dalla relatività generale, ma nella cosmologia quantistica questo stato potrebbe non corrispondere a una singolarità). Inoltre, il modello di emergenza delineato da Guay & Sartenaer (2016) ha un ulteriore difetto: esso è negativo e richiede che  $E$  manifesti entità, proprietà o poteri proibiti. Come spiegato sopra (paragrafo 3), una concezione negativa dell'emergenza non è adatta al caso della gravità quantistica, mentre a essa dev'essere preferita una concezione positiva.

Questa concezione più generale e positiva che propongo è più adatta per comprendere l'emergenza piatta (diacronica) del nostro universo spaziotemporale da uno stato non spaziotemporale, ed è analoga alla concezione gerarchica dell'emergenza presentata nella sezione precedente (paragrafo 4).

## EMERGENZA: CONCEZIONE PIATTA

- [Dipendenza]:  $E$  *p(iatto)-sopravviene* su  $B$ . (con “p-sopravvenienza” si intende che nessun cambiamento nello stato  $E$  è dato senza un cambiamento nello stato  $B$ , mentre l'inverso è possibile);
- [Novità]:  $E$  differisce sensibilmente da  $B$ ;
- [Autonomia]: la fisica descritta da  $E$  è robusta rispetto ai cambiamenti che occorrono in  $B$ . Lo stato  $B$  “anteriore” è *sottodeterminato* rispetto a  $E$  (in questo contesto la sottodeterminazione può essere intesa come una forma non temporale di *indeterminismo*, nel senso che molti diversi stati “iniziali” di  $B$  potrebbero dare origine allo stesso stato  $E$ ). Infine, se abbiamo una conoscenza dello stato  $E$ , essa non è sufficiente per determinare lo stato anteriore  $B$  da cui  $E$  “si è evoluto”.

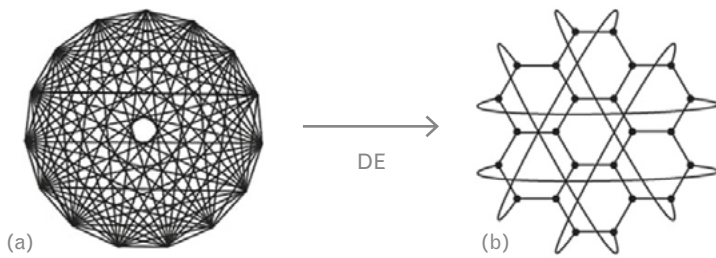
Questo modello di emergenza è molto permissivo, eppure, come dimostrerò in seguito, non è ancora automaticamente soddisfatto nel caso della cosmologia quantistica.

### V.1. Emergenza dello spaziotempo negli approcci pregeometrici alla gravità quantistica

L'idea che sottende gli approcci pre-geometrici alla gravità quantistica è quella di trattare lo spaziotempo come entità emergente durante una transizione di fase. Un esempio sono le *storie causali quantistiche*, che descrivono delle entità discrete simili a punti e le relazioni che intercorrono tra di esse. Queste strutture sono rappresentate come diagrammi i cui nodi (punti) rappresentano gli “eventi” e i cui link rappresentano le relazioni causali che sussistono fra essi. Gli eventi sono elevati a operatori di evoluzione quantistica e gli spazi di Hilbert sono correlati ai link per rendere i diagrammi quantistico-meccanici. Le storie causali quantistiche sono in grado di modellare altri approcci pre-geometrici, inclusa la *gravità quantistica*.<sup>16</sup> In questo modello, la dinamica consiste in un cambiamento delle connessioni tra i punti (ossia un cambiamento delle relazioni causali tra gli eventi). Le connessioni, rappresentate dai link del diagramma, hanno due stati possibili: *on*, quando i due eventi sono causalmente correlati, oppure *off*, quando i due eventi non lo sono. Gli stati generici, infine, essendo quantistico-meccanici, sono sovrapposizioni di *on* e *off*.

<sup>16</sup> Per un approfondimento sulle storie causali quantistiche vedi Markopoulou (2009), per la *gravità quantistica* [con cui traduco *quantum graphity* N.d.T.] vedere Konopka et al. (2008).

La micro-descrizione dell'universo primordiale (pre-geometrico) è dunque intesa come un diagramma *completo* (come mostrato nella Fig. 5.a): uno stato ad alta energia connesso al massimo. In tale stato, la dinamica è invariante rispetto alla permutazione degli eventi e, poiché l'intero universo è adiacente (legato con un link) a qualsiasi evento, non vi è alcuna nozione di geometria e località (ogni evento è causalmente correlato a ogni altro evento). Man mano che l'universo si raffredda e si condensa, in seguito, esso subisce una transizione di fase in cui molte delle connessioni si disattivano. Il sistema a bassa energia (cioè al suo stato fondamentale) è quindi un diagramma con molti meno bordi (Fig. 5.b) dove si rompe l'invarianza di permutazione mentre sorge, al contrario, invarianza di traslazione. È in questa fase che la località diventa definibile e la geometria relazionale acquisisce un senso. L'idea di fondo è perciò che la geometria emerga in questa transizione di fase, nota come *geometrogenesi*<sup>17</sup> (vedi la Figura 3).



17 La geometrogenesi è anche significativamente descritta da un altro approccio alla gravità quantistica noto come *group field theory*. Su questo vedi Oriti (2009).

**Fig. 3** Geometrogenesi come emergenza piatta (diacronica). (a) fase ad alta energia di gravità quantistica. (b) fase a bassa-energia di gravità quantistica. Immagine adattata da Markopoulou (2008).

È importante notare che in questi approcci esiste una nozione fondamentale di tempo che collega le fasi pre- e post-geometriche. Lo spaziotempo viene associato alla fase geometrica, in modo che la fase post-geometrica sia una descrizione a grana fine (di livello inferiore) dello spaziotempo della relatività (essendo essa il fenomeno di livello superiore).

L'emergenza piatta, tuttavia, riguarda un singolo livello e qui considereremo solo il sistema delle strutture discrete (maggiormente fondamentale), piuttosto che lo spaziotempo “fenomenale”. La base di emergenza  $B$ , quindi, rappresenta il modello che descrive la fase pre-geometrica (Fig. 3.a), mentre il modello emergente  $E$  descrive la fase geometrica (Fig. 3.b).

La [Dipendenza] può essere intesa come sopravvenienza piatta o uni-livello, poiché non vi è cambiamento nello stato  $E$  senza un cambiamento nello stato  $B$ , mentre l'inverso è possibile. Ciò è garantito dall'aspetto temporale di questi modelli, in quanto lo stato  $B$  precede causalmente lo stato  $E$  attraverso l'evoluzione Hamiltoniana, e i due stati sono considerati stati dello stesso sistema, essendo esso l'intero universo.

Il criterio [Novità] è inoltre soddisfatto date le diverse simmetrie che caratterizzano i due stati:  $B$  è invariante di permutazione, mentre  $E$  non lo (sebbene sia invariante di traslazione). Infine, la condizione [Autonomia] è plausibilmente soddisfatta poiché  $E$  dipende esclusivamente dalla rottura di simmetria che il sistema produce, piuttosto che dai dettagli di  $B$ . 18

C'è quindi un senso plausibile nell'affermare che lo spaziotempo può emergere in modo piatto da questi modelli (sui quali si applicherebbe anche qualsiasi transizione di fase in grado di rompere la simmetria).

18 Vedi Crowther (2015) e Morrison (2012) per un approfondimento sulla relazione fra la rottura di simmetria e l'emergenza.

## V.2. Emergenza dello spaziotempo dalla cosmologia quantistica a loop

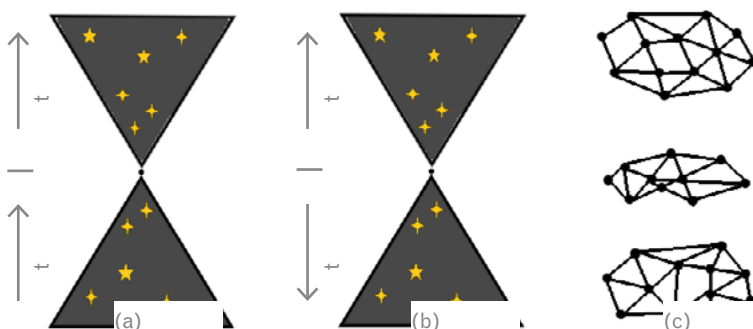
Come illustrato nel paragrafo 4, la dinamica della gravità quantistica *a loop* non è pienamente compresa. La *cosmologia quantistica a loop* tenta di aggirare questa lacuna semplificando il sistema a livello cinematico e presupponendo che lo spazio sia isotropico (lo stesso in tutte le direzioni) e omogeneo (caratterizzato cioè da un'energia di massa uniformemente distribuita). Queste assunzioni semplificanti implicano che la cosmologia quantistica a loop descriva la geometria spaziale tramite un solo grado di libertà, ossia il *fattore di scala*,  $a$  (classicamente, il fattore di scala è la variabile che descrive la “dimensione” relativa dello spazio 19) con l'operatore quantistico corrispondente,  $\hat{a}$ . L'equazione dinamica semplificata che ne risulta può essere interpretata come un'equazione di evoluzione che vede il fattore di scala,  $a$ , come “variabile temporale”. Eseguendo questa

19 Per un approfondimento sulla cosmologia quantistica *a loop* vedi Bojowald (2011).

equazione in senso opposto ad *a*, si evidenzia che l'evoluzione rimane ben definita, anche in prossimità di ciò che altrimenti corrisponderebbe alla singolarità del big bang dove, solitamente, la relatività fallisce.

L'immagine che ne risulta vede l'universo vittima di un grande rimbalzo (*Big Bounce*), o di un grande collasso (*Big Crunch*), che si contrae in uno stato massimamente caldo e denso, prima di ri-espandersi di nuovo, come illustrato in Figura 6.a. Tuttavia, come spiegano Huggett & Wüthrich (2018), questa interpretazione non è effettivamente supportata dalla cosmologia quantistica a loop poiché non esiste una nozione continua di tempo che permane dall'universo del "pre-big-bang" all'universo del "post-big-bang". Esiste piuttosto una struttura intermedia che divide queste due fasi, ma è puramente spaziale, priva di alcuna nozione di tempo a essa connessa. <sup>20</sup> Per questa ragione, Huggett & Wüthrich (2018) sostengono che, poiché in entrambi i casi è più naturale interpretare il tempo come qualcosa che fluisce allontanandosi dal big bang, questo modello potrebbe rappresentare una "nascita gemella di due universi" da un singolo stato non temporale (Fig. 4.b).

<sup>20</sup>Vedi Barrau & Grain (2016).



**Fig. 4** Due interpretazioni della gravità quantistica a loop. (a) L'interpretazione standard è quella di un unico universo in contrazione (triangolo in basso) che si espande (triangolo in alto) con il passare del tempo (freccia rossa). Questa interpretazione è resa problematica dal passaggio intermedio rappresentato dal punto fra i due triangoli che non concede nozione di tempo. (b) L'interpretazione di Huggett e Wüthrich che è quella di due universi in espansione che emergono da quell'unico stato non temporale. (c) Reti di spin a livello microscopico.

Il modello descrive una situazione che può essere interpretata in due modi diversi, come mostrato in Figura 4. Relativamente alla prima interpretazione (a), potremmo domandarci (i) se lo stato non temporale emerge dall'universo in contrazione, o (ii) se l'universo in espansione emerge dallo stato non temporale. Questa prima interpretazione (a) offre quindi (i) la possibilità di una "dissoluzione dello spaziotempo" (l'emergere di uno stato non spaziotemporale da uno stato spaziotemporale), nonché (ii) la possibilità dell'emergenza dello spaziotempo. Nel caso della seconda interpretazione (b), invece, l'unica questione che sorge è se i due universi in espansione emergano dallo stato non temporale.

Brahma (2017) sostiene che la transizione dallo stato puramente spaziale a quello spaziotemporale che si manifesta in questo modello rappresenta "l'emergere del tempo nella gravità quantistica a loop", mentre Huggett e Wüthrich (2018) affermano che questo fenomeno rappresenta l'"emergenza temporale dello spaziotempo". Tuttavia, né il primo né il secondo articolo caratterizzano esplicitamente cosa significhi il termine "emergenza", e il mio tentativo di chiarire questo punto sfrutterà il modello di emergenza piatta sviluppato in precedenza.

Iniziamo considerando il sistema al livello "microscopico" delle reti di spin (vedi Fig. 4c). Qui sono comparate due diverse reti di spin, dove una rappresenta il micro-stato dell'universo pre-big bang (ossia lo stato che corrisponde allo stato microscopico non temporale) e l'altro il macro stato dell'universo post-big bang



(ossia lo stato che corrisponde allo stato macroscopico spaziotemporale). Questi due stati sono collegati dal “parametro di tempo”, a, il che significa che c'è un senso in cui cambiano l'uno rispetto all'altro. Non esiste tuttavia una fonte di asimmetria che possa fondare una nozione di priorità, perciò qualsiasi nozione di dipendenza o direzione sembra artificiale. Non è chiaro, quindi, come la condizione [Dipendenza] possa essere soddisfatta a questo livello. Per questo stesso motivo, non possiamo nemmeno valutare [Autonomia]. Infine, il criterio [Novità] non sembra essere soddisfatto poiché le due reti di spin non sono qualitativamente distinte l'una dall'altra.

Passiamo ora al livello macroscopico (a grana grossa) dello spaziotempo. A questo livello, la condizione [Dipendenza] non può essere immediatamente confermata poiché è difficile affermare quale stato dipenda da quale altro, dato che la stessa fisica supporta due interpretazioni, una in cui si ha l'emergenza dello spaziotempo e una in cui lo spaziotempo “si dissolve”. Per questo motivo, anche la condizione [Autonomia] non può essere valutata. Il criterio [Novità] è invece soddisfatto date le diverse simmetrie che caratterizzano i due stati: lo stato non temporale è euclideo, di carattere galileiano, mentre lo stato spaziotemporale ha carattere lorentziano (Barrau & Grain 2016).

Dato che [Dipendenza] e [Autonomia] sono condizioni essenziali per qualsiasi modello di emergenza in filosofia (anche al di là della concezione generale che ho introdotto all'inizio del mio articolo), sembra che in questa fase non sia possibile determinare se lo spaziotempo sia o meno emergente, a livello macroscopico, da questo modello. Pertanto, contrariamente alle affermazioni sull'emergenza di Brahma (2017) e Huggett e Wüthrich (2018), in questa fase di sviluppo della teoria, non è possibile asserire se lo spaziotempo emerga o meno dal modello. Avventurandoci in un territorio (ancor) più speculativo, tuttavia, è possibile individuare un modo in cui questi modelli potrebbero consentire una concezione emergente dello spaziotempo a livello macroscopico. Questa mossa implica accettare il suggerimento di Huggett e Wüthrich (2018, 1201-1202) relativo a come si possa concepire una regione non temporale che preceda quella spaziotemporale. La loro idea è quella di estrapolare il tempo locale e direzionale oltre il suo dominio di applicabilità. La regione non temporale sarebbe perciò “precedente” alla regione spaziotemporale efficace *se e solo se* le curve di tipo tempo nello spaziotempo efficace possono essere estese alla regione non temporale in direzione efficace passata ma non futura. Anche se la regione del Big Bang è priva di tempo, sostengono questi autori, questo potrebbe essere un limite passato rispetto alla freccia del tempo, e potrebbe quindi, in questo senso, venire “prima”. La regione non temporale non avrebbe alcuna estensione temporale quindi dal punto di vista di una descrizione temporale efficace ci sarebbe una curva spaziotemporale aperta di tipo tempo più un ulteriore “punto” (che è, in realtà, un oggetto complesso e strutturato). Secondo il suggerimento di Huggett & Wüthrich, però, il punto iniziale potrebbe essere considerato un tempo dal quale evolvono gli stati successivi e ciò richiederebbe una dinamica in cui la regione non temporale è uno stato iniziale.

Mentre non si reputa possibile, solitamente, un'evoluzione deterministica attraverso la regione euclidea, il che preclude che uno stato temporale dipenda da essa, se seguiamo il suggerimento di Huggett & Wüthrich, possiamo supporre che la regione spaziotemporale si evolva da quella non temporale, con la conseguenza che la prima dipende dalla seconda, soddisfacendo infine il criterio della [Dipendenza].

A questo punto resta da chiarire quanto sensibile sarebbe questa dipendenza dallo stato iniziale. Presumibilmente, questo stato iniziale deve essere sufficientemente particolare da assicurare le condizioni di omogeneità spaziale e di isotropia, e ciò indicherebbe una dipendenza molto robusta dello stato spaziotemporale sullo



stato iniziale, precludendo quindi qualsiasi autonomia dello stato spaziotemporale. Ciononostante, esistono modelli di inflazione cosmica capaci di garantire il mantenimento di queste condizioni indipendentemente dai dettagli particolari dello stato iniziale. Pertanto, l'aggiunta di un meccanismo di inflazione potrebbe garantire una ragionevole robustezza dello stato successivo – lo stato di un universo spazialmente isotropico e omogeneo in espansione – rispetto ai dettagli dello stato iniziale – il punto – così che il criterio [Autonomia] risulti plausibilmente soddisfatto.

Va sottolineato che, in questa fase, non è noto se la proposta di Huggett & Wüthrich, che trattano lo stato non temporale come precedente rispetto a quello spaziotemporale, sia supportata da modelli, né se i modelli della cosmologia quantistica *a loop* possano accomodare l'inflazione menzionata. <sup>21</sup>

Se supponiamo, tuttavia, che questi suggerimenti siano giustificati, potremo allora plausibilmente affermare che secondo questi modelli esiste un modo per concepire un'emergenza di tipo piatto dello spaziotempo al livello macroscopico dello spaziotempo efficace. Nel caso in cui queste speculazioni risultassero invece non supportate, non sarebbe chiaro se abbia senso affermare se, in questi modelli, lo spaziotempo emerga in modo piatto a livello macroscopico.

<sup>21</sup> Esistono comunque opinioni favorevoli, relativamente a questa possibilità, vedi Bojowald (2011).

## VI. Conclusioni

La filosofia della gravità quantistica è un'impresa speculativa e delicata, ma è anche eccitante e gratificante esplorare come concetti più familiari alla filosofia della scienza potrebbero essere sfruttati anche alle frontiere della fisica, dove la chiarezza e la legittimità delle nozioni spaziotemporali sono minacciate. Ho proposto alcune modifiche concettuali a due modelli standard di emergenza rinvenibili in filosofia della scienza che potrebbero essere potenzialmente utili per comprendere l'emergenza dello spaziotempo dalla gravità quantistica. Le due concezioni di emergenza che ho sfruttato sono molto permissive e generali, ma nonostante questo, come ho dimostrato, non sono banalmente soddisfatte nei diversi esempi di modelli di gravità quantistica. L'articolo ha comunque dimostrato che esistono diversi casi in cui, plausibilmente, lo spaziotempo può essere inteso in termini di emergenza.

## Bibliografia

- Bain, J. (2008). Condensed Matter Physics and the Nature of Spacetime. In D. Dieks (Ed.), *The Ontology of Spacetime II* (301–329). Oxford: Elsevier.
- Id. (2013). Effective field theories. In B. Batterman (Ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics* (224–254). Oxford: Oxford University Press.
- Barceló, C., Liberati, S. & Visser, M. (2011). Analogue Gravity. *Living Reviews in Relativity*, 14(3).
- Barrau, A. & Grain, J. (2016). Cosmology without time: What to do with a possible signature change from quantum gravitational origin? <https://arxiv.org/abs/1607.07589v1>
- Bojowald, M. (2011). *Quantum Cosmology: A Fundamental Description of the Universe*. New York: Springer.
- Brahma, S. (2017). Emergence of time in loop quantum gravity. <http://philsci-archieve.pitt.edu/13158/>
- Burgess, C.P. (2004). Quantum gravity in everyday life: General relativity as an effective field theory. *Living Reviews in Relativity*, 7(5).
- Butterfield, J. (2011a). Emergence, reduction and supervenience: A varied landscape. *Foundations of Physics*, 41(6), 920–959.
- Id. (2011b). Less is different: Emergence and reduction reconciled. *Foundations of Physics*, 41, 1065–1135.
- Crowther, K. (2015). Decoupling emergence and reduction in physics. *European Journal for Philosophy of Science*, 5(3), 419–445.
- Id. (2016). *Effective Spacetime: Understanding Emergence in Effective Field Theory and Quantum Gravity*. Heidelberg: Springer.
- Id. (2018a). Inter-theory relations in quantum gravity: Correspondence, Reduction, and Emergence, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 63, 74–85.
- Id. (2018b). What is the point of reduction in science?, *Erkenntnis*, <https://doi.org/10.1007/s10670-018-0085-6>.
- de Haro, S. (2017). Dualities and emergent gravity: Gauge/gravity duality. *Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 59, 109–125.
- Dieks, D., van Dongen, J., & de Haro, S. (2015). Emergence in holographic scenarios for gravity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 52, 203–216.
- Dowker, F. (2005). Causal sets and the deep structure of spacetime. In A. Ashtekar (Ed.), *100 Years of Relativity: Space-time Structure* (445–467). Singapore: World Scientific.
- Freidel, L. (2005). Group field theory: An overview. *International Journal of Theoretical Physics*, 44(10), 1769–1783.
- Franklin, A. (2018) Whence the Effectiveness of Effective Field Theories?, *The British Journal for the Philosophy of Science*, <https://doi.org/10.1093/bjps/axy050>
- Guay, A. & Sartenaer, O. (2016). A new look at emergence. or when after is different. *European Journal for Philosophy of Science*, 6(2), 297–322.
- Hawking, S., King, A. & McCarthy, P. (1976). A new topology for curved space-time which incorporates the causal, differential, and conformal structures. *Journal of Mathematical Physics*, 17(2), 174–181.
- Henson, J. (2009). The causal set approach to quantum gravity. In D. Oriti (Ed.), *Approaches to Quantum Gravity: Toward a New Understanding of Space, Time and Matter* (393–413). Cambridge: Cambridge University Press.
- Huggett, N. & Wüthrich, C. (2013). Emergent spacetime and empirical (in)coherence.

- Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 44 (3), 276–285.
- Id. (2018). The (a)temporal emergence of spacetime. *Philosophy of Science*, 85(5), 1190–1203.
- Konopka, T., Markopoulou, F. & Severini, S. (2008). Quantum graphity: A model of emergent locality. *Physical Review D*, 77(10).
- Le Bihan, B. (2018). Space Emergence in Contemporary Physics: Why We Do Not Need Fundamentality, *Layers of Reality and Emergence*, *Disputatio*, 49(10), 71–95.
- Levichev, V. (1987). Prescribing the conformal geometry of a Lorentz manifold by means of its causal structure. *Soviet Mathematics Doklady*, 35, 452–455.
- Linnemann, N. S. & Visser, M. R. (2018). Hints towards the emergent nature of gravity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 64, 1–13.
- Malament, D. (1977). The class of continuous timelike curves determines the topology of spacetime. *Journal of Mathematical Physics*, 18(7), 1399–1404.
- Markopoulou, F. (2009). Space does not exist, so time can. <https://arxiv.org/abs/0909.1861>
- Id. (2009). New directions in background independent quantum gravity. In D. Oriti (Ed.), *Approaches to Quantum Gravity: Toward a New Understanding of Space Time and Matter* (129–149). Cambridge: Cambridge University Press.
- Morrison, M. (2012). Emergent physics and micro-ontology. *Philosophy of Science*, 79, 141–166.
- Oriti, D. (2009). The group field theory approach to quantum gravity. In *Approaches to Quantum Gravity: Toward a New Understanding of Space Time and Matter* (pp. 310–331). Cambridge: Cambridge University Press.
- Id. (2014). Disappearance and emergence of space and time in quantum gravity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 6, 186–199.
- Id. (2018). Levels of spacetime emergence in quantum gravity. <https://arxiv.org/abs/1807.04875>
- Rideout, D. & Sorkin, R. (1999). Classical sequential growth model for causal sets. *Journal of Physics Conference Series*, 174, 024002.
- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rovelli, C. & Vidotto, F. (2014). *Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sartenaer, O. (2018). Flat emergence. *Pacific Philosophical Quarterly*, 99(S1), 225–250.
- Sorkin, R.D. (2005). Causal sets: Discrete gravity (notes for the Valdivia summer school). In D. M. A. Gomberoff (Ed.), *Lectures on Quantum Gravity, Proceedings of the Valdivia Summer School*, Valdivia, Chile, January 2002. Plenum. <https://arxiv.org/abs/gr-qc/0309009>
- Id. (2000). Indications of causal set cosmology. *International Journal of Theoretical Physics*, 39(7), 1731–1736.
- Surya, S. (2019). The causal set approach to quantum gravity. <https://arxiv.org/abs/1903.11544>
- Wüthrich, C. (2019). The emergence of space and time. In S. Gibb, R. Finlay Hendry and T. Lancaster (Eds.), *Routledge Handbook of Emergence* (315–326), London: Routledge.
- Wüthrich, C. & Callender, C. (2017). What becomes of a causal set? *The British Journal for the Philosophy of Science*, 68(3), 907–925.