

# Teilhard de Chardin e Wolfram: modelli di universo computazionale ed emergenza del foglietto interno delle cose

Tommaso Bolognesi (t.bolognesi@isti.cnr.it)

*CNR/ISTI, Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo", Pisa, Italy*

April 22, 2014

## 1 Introduzione

Una delle caratteristiche che rendono *Il Fenomeno Umano* di Teilhard de Chardin [9] opera forse unica nel suo genere, e' la armoniosa compenetrazione fra gli elementi eterogenei che la compongono, fra i quali spiccano: una coraggiosa ambizione di argomentazione logica e oggettivita' scientifica, una magnetica attrazione per l'indagine sul trascendente, l'affiorare della fatica della ricerca e della fremente gioia della scoperta, e lampi di vera ispirazione poetica.

Appare infatti assai evidente, nel testo, il desiderio di formulare una cosmologia che fornisca non solo un rigoroso fondamento scientifico al primato dello spirito sulla materia, ma che sia anche compatibile con l'aspirazione dell'uomo a proiettare nel Divino il significato ultimo della propria esistenza. Nelle parti finali del libro, infatti, la trattazione si spinge fino alla previsione di uno sviluppo del fenomeno umano intimamente connesso a un Polo Superiore di massima emersione della coscienza collettiva universale, esso stesso ominizzato, nel quale tutte le coscienze individuali vengono a confluire.

Tuttavia, nelle intenzioni dell'autore, il libro:

*"...non deve essere letto come un'opera di metafisica, e ancora meno come una specie di saggio teologico, ma unicamente ed esclusivamente come una memoria scientifica."* [p. 25]

E, indubbiamente, perseguendo l'obiettivo di collocare il fenomeno umano in una piu' vasta visione cosmologica, la maggior parte del testo e' dedicata alla costruzione di una nuova e originalissima 'fisica' il cui metodo di indagine e' prevalentemente basato su osservazioni empiriche e argomentazioni logiche, e dunque soddisfa *alcuni* importanti requisiti della trattazione scientifica.

In questo breve saggio ci concentreremo sugli aspetti del *Fenomeno Umano* che piu' direttamente coinvolgono gli interessi e le competenze dell'uomo di scienza, piu' che la sensibilita' dell'uomo di fede, senza implicare, ovviamente, alcuna incompatibilita' fra i due punti di vista, e, anzi, sperando di offrire un contributo, seppur minimo, al loro convergere.

E ci chiediamo subito: in quale misura possiamo considerare l'opera di Teilhard de Chardin un testo scientifico? Da quasi quattro secoli Galileo ha affermato che il libro della Natura è scritto nel linguaggio della matematica, i cui caratteri sono i triangoli, i cerchi, ed altre figure geometriche: senza utilizzare questo linguaggio, la scienza brancola "vanamente per un oscuro labirinto" (Galileo Galilei, *Il Saggiatore*). Oltre a formulare leggi matematiche, una teoria scientifica moderna deve indicare esperimenti ripetibili che ne confermino numericamente le previsioni e siano anche in grado di falsificarla. In tal senso, l'opera di Teilhard non potrebbe essere propriamente ritenuta una teoria scientifica.

Tuttavia, nessuna delle teorie valide di cui oggi dispone la scienza avrebbe potuto vedere la luce senza il contributo determinante di fervide immaginazioni, di esperimenti puramente mentali, e di forti intuizioni 'pre-scientifiche'.

Si consideri poi la differenza fra teorie fisiche e teorie biologiche: mentre per le prime l'oggetto di studio è un sistema caratterizzato da variabili (come pressione, temperatura) la cui misurabilità, e dunque trattabilità matematica, appaiono scontate, nelle seconde si ha a che fare con sistemi la cui complessità rende tale trattamento più difficile, se non impossibile: si pensi, ad esempio, alla teoria Darwiniana sull'origine delle specie, i cui principi cardine non necessitano certo di precisa formulazione matematica. Sembra dunque ragionevole sollevare qualche dubbio sulla reale possibilità di rispettare appieno i dettami galileiani sulla centralità del linguaggio matematico e dell'esperimento, quando si voglia concepire una teoria che descriva il Cosmo intero nella sua struttura e nella sua evoluzione, o anche solo in grado di compendere e conciliare le dinamiche dell'inerte e quelle del vivente.

E, infine, disponendo di una teoria dell'intero universo, la necessita' di sottoporla al vaglio di esperimenti *ripetibili*, come quelli sulla caduta dei gravi, cozza con la nostra radicata convinzione che l'oggetto della teoria, cioè il solo universo che possiamo osservare, sia fenomeno unico e *irripetibile*.

Se la mancanza di esplicite formulazioni matematiche è, nel *Fenomeno Umano*, un dato di fatto, è altrettanto vero che in molti passaggi il testo sembra suggerire tali formulazioni in modo assai stringente. Ciò accade, ad esempio, per la trattazione del problema delle due energie, la tangenziale e la radiale - fisica e psichica. In questo passaggio Teilhard sembra avvicinarsi progressivamente ad una equazione che esprima le relazioni dinamiche fra di esse, e che rappresenti una generalizzazione del noto principio fisico di conservazione. Le due energie:

*"...sono costantemente associate e passano in qualche modo l'una nell'altra. Ma sembra impossibile far corrispondersi semplicemente le loro curve. Da una parte, solo una frazione infima di energia "fisica" viene utilizzata dagli sviluppi più elevati dell'energia spirituale. E dall'altra parte, questa frazione minima, una volta assorbita, si manifesta sul quadro interiore con le oscillazioni più inattese." [p. 73]*

Va dunque scartata l'idea semplicistica di una conversione diretta, in favore di un "simbolismo complesso in cui figurano termini di ordini differenti" [p. 74].

Un altro interessante esempio consiste nella ricorrente sottintesa analogia fra curvatura dello spazio-tempo fisico, concetto matematico cardine della Relatività Generale, e la 'curvatura psichica' associata all'avvolgimento su se stessa

della stoffa delle cose. Si potrebbe dire che il testo assuma, in questi come in diversi altri casi, uno stile 'pre-matematico', o 'meta-matematico', come a invitare il matematico, il fisico, o l'ingegnere a cimentarsi in un tentativo di formalizzazione.

Ma possiamo davvero pensare di formalizzare questa particolarissima fisica teilhardiana usando esclusivamente l'apparato di equazioni differenziali della matematica continua, come accade per la Termodinamica o la Relativita' Generale? Per quanto ogni sforzo in tal senso sia degno della piu' alta considerazione, in questo saggio noi non imbroccheremo questa strada. Proporremo, invece, un approccio piu' articolato che, allontanandosi dalla matematica continua, trova in altri rami della scienza, in particolare nella matematica discreta, nelle teorie del calcolo e dell'informazione, in certe congetture di 'cosmologia computazionale', e nella biologia teorica, strumenti in grado di fornire accresciuta solidita' scientifica alla monumentale cosmologia del *Fenomeno Umano*.

L'articolo e' organizzato come segue.

Nella prossima sezione riassumeremo gli aspetti della visione teilhardiana piu' direttamente rilevanti per la nostra ricerca, con i quali assumiamo una certa familiarita' da parte del lettore.

Nelle tre sezioni successive prenderemo in considerazione alcuni elementi dei settori scientifici cui abbiamo appena accennato, evitando di appesantire la trattazione con eccessivi tecnicismi, e ponendoli in relazione con gli aspetti discussi nella sezione precedente.

Nella sezione conclusiva riassumeremo i punti di contatto fra la visione teilhardiana e gli elementi formali presentati, cercando di collocarli per quanto possibile in un quadro uniforme, e mettendo in luce alcuni dei molti problemi ancora aperti.

## 2 Aspetti del *Fenomeno Umano*

### 2.1 La stoffa dell'universo

La 'stoffa dell'universo' viene descritta da Teilhard come "*particellare - eppure essenzialmente correlata, ed infine prodigiosamente attiva*" [p. 40]. Polvere, pulviscolo, sciame. L'atomicita' non si manifesta soltanto nella sfera degli atomi, ma anche "*nelle gocce di pioggia e nella sabbia dei lidi*" per prolungarsi "*nella moltitudine dei viventi e degli astri*" [pp. 40-41]. Tuttavia, spingendo lo sguardo verso le sfere piu' basse (molecole, atomi, elettroni, e oltre...), i membri della moltitudine manifestano "*unita' di omogeneita'*", e cioe' perdono qualunque proprieta' distintiva, "*come se la stoffa di ogni stoffa si riducesse a una semplice e unica forma di sostanza*" [p. 42].

In piena coerenza con una concezione moderna del progresso scientifico, Teilhard attribuisce un valore transitorio alle teorie fisiche sull'atomo a lui contemporanee, che definisce "*architetture complicate e fragili*" [p. 40]; e infatti, per fare un esempio, nel 1964, a soli 9 anni dalla sua morte, il mondo delle particelle elementari venne nuovamente rivoluzionato dalla scoperta dei quark. Prudentemente, egli dunque non identifica con precisione gli 'atomi' ultimi della sua costruzione, suggerendo anzi una riduzione indefinita: "*Vertiginoso in numero e piccolezza, il substrato dell'universo tangibile si disgrega a poco a poco, senza limiti, verso il basso*" [p. 41].

Tuttavia, diverse teorie di fisica fondamentale, e, in particolare, di gravita' quantistica, propongono una visione discreta dell'universo e un limite inferiore alla possibilita' di suddividere spazio e tempo. E', questa, la scala di Plank, con le sue unita' ultime e indivisibili di  $10^{-44}$  secondi e  $10^{-35}$  metri, e i suoi *atomi di spaziotempo*. Inoltre, a ben vedere, l'ipotesi di un regresso discendente all'infinito non e' strettamente necessaria alla cosmologia teilhardiana: cio' che serve, come punto di partenza del processo di 'complessificazione' verso l'alto, e' soltanto una moltitudine di entita' elementari indistinguibili, prive di attributi individuali, che realizzino la unita' di omogeneita' sopra ricordata. Gli atomi di spaziotempo, ad esempio, appaiono gia' adeguati a questo scopo.

Oltre all'unita' di omogeneita', le particelle di pulviscolo cosmico mostrano anche "unita' collettiva": la sfera di influenza di ciascuno di essi "e' coestensiva, almeno virtualmente, a quella di un qualsiasi altro atomo" [p. 42]. "Qualcosa li collega gli uni agli altri e li rende solidali" [pp. 42]. "...la loro pluralita' si organizza" [p. 43].

## 2.2 Energia, auto-organizzazione, emergenza

L'energia e' vista da Teilhard come "una capacita' di azione o piu' esattamente d'interazione" [p. 43], ed e' cio' che consente agli elementi della moltitudine di aggregarsi e organizzarsi in forme sempre piu' complesse.

Esistono due forme di energia. L'*energia tangenziale* e' quella studiata dalla fisica tradizionale: riguarda l'*esterno delle cose*, dunque la materia e le quattro forze fondamentali della Natura. L'*energia radiale* e' invece associata all'*interno delle cose*, e determina la crescita della componente psichica. E' pero' soltanto attraverso il gioco combinato delle due energie che il Cosmo puo' evolvere verso livelli sempre piu' alti di complessita'. Grazie all'energia tangenziale gli elementi dello sciame si aggregano e organizzano in strutture piu' complesse, o 'centrate', ma cio' comporta un corrispondente accrescimento della componente interna, o psichica, delle nuove entita'. Nuovamente l'energia tangenziale anima la moltitudine appena emersa, e il ciclo si ripete, dando origine a una nuova 'sfera'.

Ad ogni nuovo livello si manifestano nuove entita' *emergenti*, la cui natura e i cui comportamenti, per definizione del concetto stesso di *emergenza*, appaiono nuovi e non direttamente derivabili dalla conoscenza del livello sottostante. Il tutto e' piu' della somma delle parti.

L'azione combinata delle due energie comporta il progressivo emergere della componente psichica interna, che risulta chiaramente osservabile nella biosfera, e che culmina nell'uomo. Ma secondo Teilhard dobbiamo attribuire al meccanismo combinato tangenziale-radiale, e alla dinamica che ne deriva, una portata universale, in senso letterale: esso deve caratterizzare l'evoluzione del Cosmo a tutti i livelli, e dunque anche a quelli piu' bassi dello spaziotempo e della materia primordiale.

## 2.3 Coscienza e creativita'

Il rapporto di forza fra l'interno e l'esterno delle cose non rimane costante, al procedere dell'evoluzione cosmica. "Alle origini della vita, sembra che, in ogni elemento individuale, il focolaio di organizzazione (F1) generi e controlli il connesso focolaio di coscienza (F2)". Dunque, l'esterno che controlla l'interno.

*"Ma verso l'alto, l'equilibrio si capovolge. ...F2 comincia a prendere in mano (per "invenzione") i progressi di F1. Poi, salendo ancora, e cioè' nelle vicinanze (ipotizzate) della riflessione collettiva, F2 mostra di voler dissociarsi dal suo quadro tempo-spaziale per congiungersi con il Focolaio universale e supremo Omega. ...non soltanto la coscienza diventa coestensiva all'universo, ma l'universo acquista equilibrio e consistenza, sotto forma di pensiero, in un Polo d'interiorizzazione supremo" [pp. 422-423].*

In questo modo, la cosmologia di Teilhard mira a fornire una *"base sperimentale per fondare metafisicamente il primato dello spirito"* sulla materia [p. 423].

In questo saggio, tuttavia, non ci occuperemo dell'esito finale del processo evolutivo - il punto Omega - che lo stesso Teilhard pone al di là di un punto critico - l'ominizzazione collettiva - oltre il quale non possiamo attualmente vedere. Terremo invece in grande considerazione due concetti che riguardano la coscienza e la sua evoluzione:

- *"...la "coscienza" si presenta, e deve essere trattata, non già' come una specie di entità' particolare e autosussistente, ma come un "effetto", anzi come l'"effetto specifico" della complessità"* [p. 422].
- La crescita di complessità' del focolaio di coscienza F2 si manifesta come crescita di autocontrollo, autonomia, iniziativa, spontaneità', creatività'.

### **3 Previtia - Universi computazionali di Wolfram e spaziotempo algoritmico**

La *congettura dell'universo computazionale* e' basata sull'idea che la complessità' osservabile in Natura sia la manifestazione di proprietà' emergenti di un processo di calcolo che si svolgerebbe alla scala spaziotemporale di Plank. L'origine della congettura viene comunemente fatta risalire al lavoro 'Rechnender Raum' (Lo spazio che calcola) di Konrad Zuse [18, 19], ma importanti contributi sono stati forniti da Fredkin [11], Lloyd [13], Wolfram [17] e altri. Sia Zuse che Fredkin associano lo spazio e le sue leggi di evoluzione al semplice modello degli automi cellulari, o a sue varianti. Secondo Lloyd, invece, la computazione universale e' di tipo quanto-meccanico, e l'universo puo' essere assimilato ad un gigantesco computer (o automa cellulare) quantistico.

L'idea di un universo a struttura discreta, animato essenzialmente da un algoritmo, e' stata ripresa e divulgata da Stephen Wolfram, il fisico e informatico britannico che, con la sua monumentale quanto controversa opera *A New Kind of Science*, ha diffusamente studiato e classificato i comportamenti di svariati tipi di automa cellulare e di altri semplici modelli di calcolo, illustrando le complesse strutture che essi sono in grado di produrre. Alcune di queste strutture sembrano imitare quelle osservabili in Natura, come illustrato in Figura 1.

La validità' della congettura non e' a tutt'oggi suffragata da stringenti conferme sperimentali e numeriche, e poggia dunque soltanto sulla osservazione del vasto repertorio di proprietà' emergenti ottenibili con l'approccio algoritmico, che comprendono strutture regolari, autosimili, pseudo-casuali, particellari, e fenomeni di auto-organizzazione e auto-riproduzione. E' interessante notare che alcuni di questi 'ingredienti' risultano essenziali per sostenere i processi evolutivi

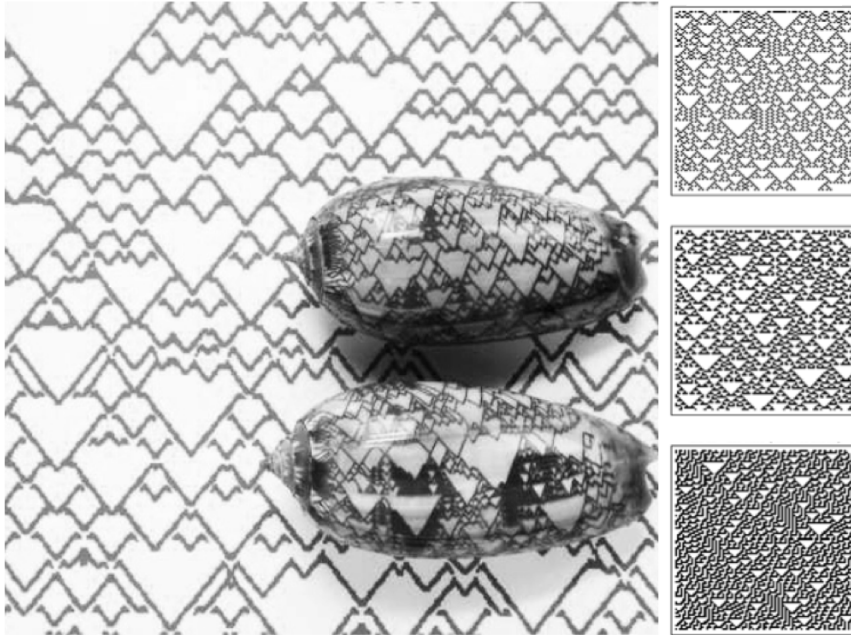


Figure 1: Caratteristico motivo a triangoli di una conchiglia, e sua approssimazione mediante tre diversi automi cellulari elementari

tipici della biosfera. Ma prima di occuparci della vita, vediamo come la congettura dell'universo computazionale di Wolfram concepisce le nozioni di spazio e spaziotempo.

### 3.1 Spazio

Nel volume *A New Kind of Science* [17] gli automi cellulari rivestono indubbiamente un ruolo di primo piano, per il loro immediato impatto visuale e la loro efficacia nell'illustrare la varietà delle proprietà emergenti in processi di calcolo 'spontanei'. Tuttavia questi automi *non* sono ritenuti da Wolfram i più adatti a modellare il Cosmo e la sua evoluzione, per due motivi: (i) la struttura spaziale, concepita come lista o griglia di celle binarie, appare troppo regolare e rigida; (ii) l'ipotesi di evoluzione temporale *simultanea* di tutte le celle appare poco plausibile, presupponendo l'esistenza di un costoso meccanismo globale di sincronizzazione. Nel capitolo 9 di [17], dedicato alla fisica fondamentale, Wolfram propone invece l'utilizzo di grafi.

La struttura matematica più elementare e flessibile per descrivere uno spazio discreto formato da entità indifferenziate è infatti il grafo  $G(N, E)$ , dove  $N$  è un insieme finito di nodi, ed  $E$  è un insieme di archi che li collegano a due a due. La corrispondenza con il modello teilhardiano è evidente: i nodi dell'insieme  $N$ , indistinguibili e privi di attributi individuali, rappresentano il pulviscolo elementare; gli archi  $E$  rappresentano l'interconnessione fra i nodi e il presupposto per una qualunque forma di loro interazione ed auto-organizzazione.

L'importanza attribuita da Wolfram (ed altri) a questa struttura è enorme,

poiche' ci si aspetta che da essa emergano letteralmente tutti i fenomeni del mondo fisico; le entita' che popolano l'universo altro non sarebbero che particolari regioni del grafo dotate di particolari strutture di interconnessione, piu' o meno regolari.

E' importante ribadire che il grafo non va pensato come struttura discreta immersa in uno spazio continuo, come invece accade per il *disegno* del grafo creato su un foglio di carta: il foglio non esiste, o, se preferiamo, e' realizzato dal grafo stesso. Le teorie fisiche che adottano questo punto di vista sono dette *background-independent*: i fenomeni fisici non si svolgono in un teatro pre-esistente, ma sono essi stessi a crearlo.

Anche limitandosi a grafi *trivalenti* - nei quali ogni nodo e' collegato esattamente ad altri tre nodi - e' possibile costruire una ampia varietas di strutture semplici o complesse, e fra queste possiamo trovare anche spazi regolari di dimensione qualsiasi (vedi [17], p. 477 e p. 479). Alcuni esempi sono mostrati in Figura 2.

Se della stoffa dell'universo e' un substrato dinamico i cui elementi devono potere interagire, siamo indotti ad immaginare un grafo nel quale la struttura di interconnessione, rappresentata dall'insieme  $E$  degli archi, e' in continuo mutamento, al pari dell'insieme  $N$  dei nodi. Cio' significa che alcuni nodi possono sparire, e nuovi nodi apparire, secondo un processo di creazione e distruzione incessante. Tutto cio' puo' venir realizzato tramite *sistemi di riscrittura di grafi*. Ampiamente sperimentati e illustrati da Wolfram in [17], questi sistemi consentono di ottenere modelli dinamici dello spazio discreto attraverso l'applicazione di regole locali di manipolazione della topologia del grafo. Un esito assai comune di questi esperimenti e' la formazione di strutture gerarchiche, frattali e autosimili, nelle quali uno stesso motivo spaziale si ripresenta indefinitamente, riprodotto su piu' scale di grandezza.

## 3.2 Spaziotempo

Come insegnato da Einstein e Minkowski, alla visione di uno spazio tri-dimensionale assoluto che evolve lungo una dimensione temporale assoluta e separata da quelle spaziali, dobbiamo sostituire quella di una unica struttura *continua* quadri-dimensionale nella quale misure di spazio e di tempo, concepite separatamente, hanno soltanto valore relativo, e dipendono dallo stato di moto dell'osservatore. Cio' che nello spaziotempo einsteiniano mantiene valore assoluto, invece, e' la relazione causale fra eventi (e la loro distanza di Lorentz, che combina distanza spaziale e temporale).

La scienza contemporanea offre numerosi modelli *discreti* di spaziotempo fisico che potremmo associare alla stoffa teilhardiana dell'universo; quello piu' semplice e' la *rete causale* (*causal network* [17]), o *insieme causale* (*causal set* [6]), la cui forma matematica e', come nel caso dello spazio, il grafo  $G(N, E)$ . In questo caso, pero', il grafo e' *diretto* e aciclico: gli archi  $E$  sono sempre orientati, cioe' hanno un verso, e non e' mai possibile, per alcun cammino, ritornare a un nodo gia' visitato.

Mentre nel grafo spaziale visto in precedenza un nodo corrisponde a una locazione e gli archi identificano le locazioni nelle immediate vicinanze, nel grafo spaziotemporale i nodi corrispondono agli eventi e gli archi diretti descrivono le *relazioni causali* fra di essi, esattamente come la distanza di Lorentz le descrive nel continuo. In [17] Wolfram avanza la congettura che l'intera evoluzione del

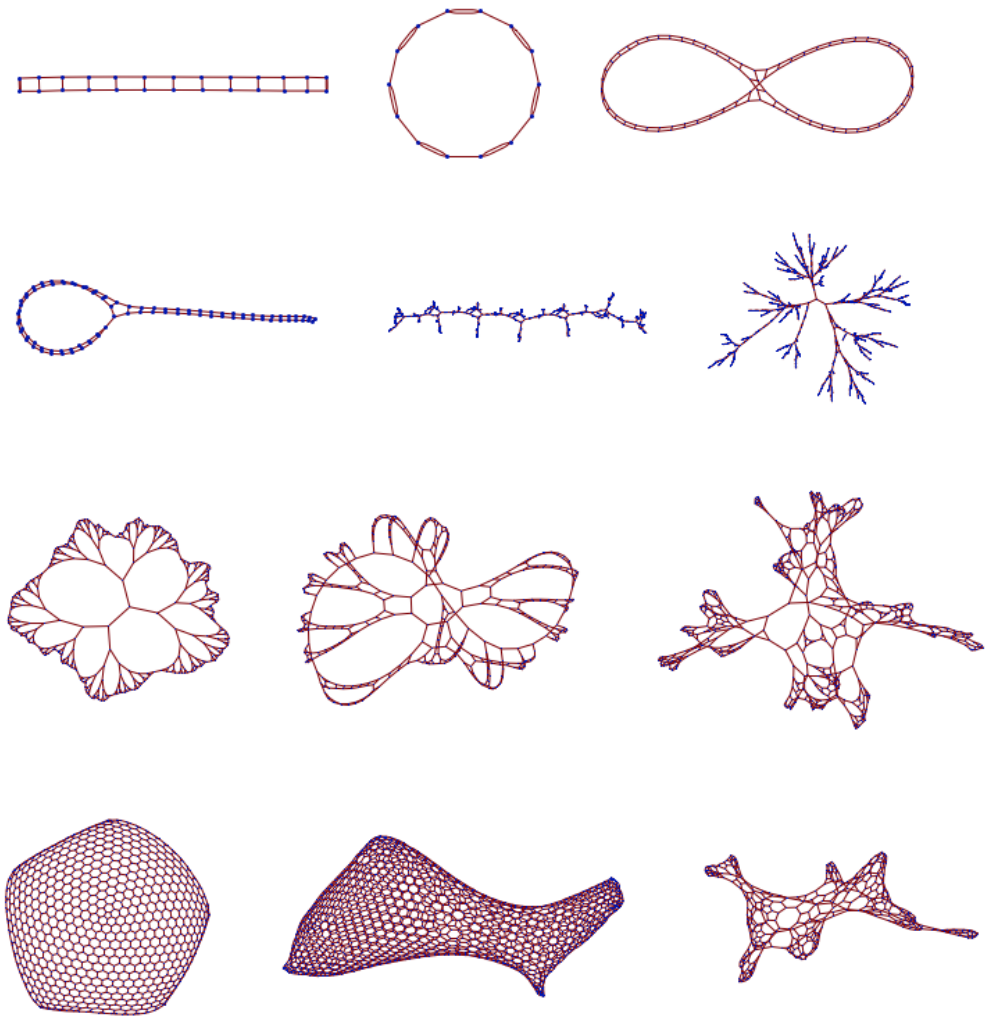


Figure 2: Grafi trivalenti ottenuti da un unico algoritmo, descritto in [2], variando i parametri in input



Cosmo sia rappresentata, come spaziotempo, da una siffatta, gigantesca rete causale.

Esistono svariate tecniche per la costruzione di reti causali (vedi ad esempio [15]). In particolare, Wolfram ha mostrato ([17], cap. 9, sez. 'Time and causal networks') come sia possibile ottenerne a partire dalla esecuzione di algoritmi espressi nei piu' semplici modelli di calcolo. Una indagine teorica e sperimentale in tal senso e' presentata anche in [3, 4].

Non e' questa la sede appropriata per una illustrazione dettagliata di questi modelli e delle loro proprieta' emergenti. Sottolineiamo invece come il fatto di animare e accrescere la rete causale in modo *algoritmico* anziche' *probabilistico* sia gravido di conseguenze: si assiste infatti, in alcuni casi, a un fiorire di proprieta' emergenti - sottostrutture ordinate e localizzate, andamenti periodici, fenomeni di auto-replicazione, strutture frattali o pseudo-casuali - analoghe a quelle ottenibili con gli automi cellulari, e che spesso sembrano imitare forme e fenomeni osservabili nella biosfera.

Il concetto di 'emergenza' ha un ruolo assolutamente fondamentale nel Cosmo di Teilhard. E' sorprendente notare come questa sua intuizione risalga alla prima meta' del XX secolo, e cioe' ad alcuni decenni prima che la scienza si imbattesse e affrontasse con rigore i sistemi dinamici e le reti complesse, i fenomeni di auto-organizzazione, l'effetto farfalla, il caos, i cosiddetti 'attrattori strani'; e oltre mezzo secolo prima degli esperimenti di Wolfram sulla emergenza nei modelli di calcolo.<sup>1</sup>

## 4 Vita - Meta-biologia di Chaitin e Reti Booleane Random di Kauffman

La legittimita' dell'attribuzione di una natura algoritmica alla dinamica dello spaziotempo discreto (la stoffa ultima dell'universo) e' lungi dall'essere unanimemente riconosciuta dalla comunita' scientifica internazionale. Si e' definitivamente appurato come semplici regole di calcolo possano dare origine a universi artificiali di grande complessita', ma alla domanda se fra questi ci sia anche il nostro universo naturale, in assenza di prove sperimentali stringenti appare legittimo lo scetticismo di chi ritiene forse curiose ma scientificamente irrilevanti le somiglianze messe in luce dalle simulazioni.

Il discorso cambia quando rivolgiamo lo sguardo ai livelli piu' alti dell'architettura del Cosmo, e cioe' alla biosfera. Qui la rilevanza dei concetti di calcolo e di software appare piu' evidente e assodata. Vediamolo.

### 4.1 Meta-biologia: vita come software in evoluzione

Il concetto di calcolo non e' recente. L'abaco fu' inventato oltre 4000 anni fa, a Babilonia. Il termine 'algoritmo' risale al matematico persiano Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi, del secolo IX, e il concetto venne poi formalizzato negli

---

<sup>1</sup>Similmente profetiche ci appaiono le visioni teilhardiane sulla Noosfera, la sfera del pensiero e della conoscenza umana: basti pensare al WorldWideWeb, ai motori di ricerca, a Wikipedia, WolframAlpha, alle reti sociali come Facebook e Twitter, e a tutti quegli strumenti tecnologici che offrono, oggi, un potente supporto alla insopprimibile esigenza dell'uomo di 'fare rete'.

anni '30 del secolo XX, da Church, Post e Turing. Le prime macchine calcolatrici programmabili furono concepite nella prima meta' del 1800, da Babbage e Lovelace, ma i primi moderni calcolatori e linguaggi di programmazione non appaiono che negli anni '40-'50 del secolo XX. Parliamo dunque di pochi secoli, o, al piu', *millenni*.

Ma, come osserva in un suo recentissimo libro Gregory Chaitin [7], il matematico argentino-statunitense divenuto celebre per aver concepito la costante Omega [8],<sup>2</sup> la Natura ha inventato il software alcuni *miliardi* di anni prima di noi, quando la vita ha fatto la sua comparsa sulla Terra. E il linguaggio di programmazione e' il DNA: ogni cellula del nostro corpo racchiude tutto il codice necessario per costruire e mantenere in vita una nuova copia dell'intero organismo. Questo codice contiene anche, nelle sue stratificazioni, le tracce 'fossili' della nostra evoluzione, e cioe' quelle *subroutines* che esplicavano le proprie funzioni quando noi eravamo pesci, anfibi o scimmie, e appare curiosamente simile a certi intricati sistemi software, frutto dell'ingegno umano, che evolvono negli anni per accumulo di piccoli incrementi funzionali senza mai venire interamente riscritti.

Le proprieta' che Chaitin [7] attribuisce al software sono le stesse che egli attribuisce al fenomeno della vita: *plasticita'*, *apertura*, *creativita'*. Egli inoltre contrappone queste proprieta' a quelle del mondo 'inanimato' della fisica, che viene descritto come *rigido*, *chiuso*, *meccanico*, e separa le due sfere anche rispetto al tipo di matematica adeguata alla loro descrizione: matematica continua ed equazioni differenziali per la fisica; matematica discreta, calcolo combinatorio e algoritmi (software, appunto) per la biologia.

Come testimoniato dallo splendore del multiforme catalogo della Natura, la biosfera e' certamente creativa, e dunque imprevedibile, nel senso che noi non possiamo prevedere il cammino evolutivo delle specie viventi come invece facciamo, in fisica, con la traiettoria dei pianeti. Ed e' probabilmente altrettanto vero che il software puo' essere ritenuto piu' 'creativo' delle equazioni differenziali. Forse non e' casuale il fatto che, nei suoi studi sul fenomeno naturale della auto-riproduzione, Von Neumann fini' per adottare la matematica discreta e algoritmica degli automi cellulari, dopo aver fallito con le equazioni differenziali.

Ma, alla luce degli esperimenti di Wolfram, che enfatizzano il ruolo cruciale dei processi di calcolo in alcuni ambiti del mondo naturale, ci appare assai attraente, in quanto unificante, ipotizzare di estendere questo ruolo a *tutti* i regni della Natura, a tutti i livelli. Secondo questa visione e' dunque l'intero universo ad essere concepito come creativo - algoritmico e creativo - a partire dal tessuto di fondo, cioe' dallo spaziotempo, e non solo dalla biosfera.

Non possiamo certo dilungarci sul modello e sui risultati di Chaitin, che mirano a fornire fondamenta matematiche alla teoria darwiniana, concependo il fenomeno della vita come *software in evoluzione* ('*Life as evolving software*'), tanto piu' che questa *meta-biologia* e' ancora in una fase iniziale di sviluppo, come riconosce il suo stesso autore.

Risulta invece piu' conveniente accennare a un altro modello algoritmico di notevole rilevanza in campo biologico, le Reti Booleane Random di Kauffman [12], che rappresentano una sorta di generalizzazione degli automi cellulari.

---

<sup>2</sup>Questa costante rappresenta la probabilita' che un algoritmo scelto casualmente esegua un calcolo che giunge a terminazione anziche' calcolare all'infinito.

## 4.2 Reti Booleane Random e metabolismo

Una Rete Booleana Random e' un grafo diretto  $G(N, E)$  nel quale i nodi - corrispondenti alle celle dell'automa cellulare, ma interconnessi in modo libero anziche' regolare - rappresentano funzioni logiche booleane (come AND, OR, e cosi' via) mentre gli archi che puntano a un dato nodo sono i canali che convogliano i bit di informazione in input alla funzione di quel nodo. Le funzioni possono cambiare da nodo a nodo, mentre in un automa cellulare tutte le celle sono associate alla stessa funzione. La rete agisce in maniera sincrona, esattamente come l'automa cellulare: a ogni passo tutte le funzioni esaminano simultaneamente i loro input e calcolano i relativi output, depositandoli sugli archi in uscita dal nodo.

In quanto generalizzazione degli automi cellulari, queste reti possono offrire quanto meno la stessa varieta' di proprieta' emergenti di questi ultimi, compresi i comportamenti caotici. Tuttavia l'aspetto piu' importante del modello sta nei suoi comportamenti inaspettatamente regolari. Kauffman scopre che, sotto condizioni non troppo restrittive, il sistema mostra di sapersi auto-organizzare: in questi casi, la dinamica della rete risulta molto piu' ordinata di quanto si potrebbe prevedere, nel senso che essa finisce per rimanere intrappolata in una regione molto ristretta (un 'attrattore') dello spazio immenso di tutte le configurazioni concepibili a priori, realizzando cosi' cio' che egli chiama '*Order for free*'. Utilizzando esattamente queste reti, e un importante risultato di teoria dei grafi, Kauffman dimostra che una 'zuppa' contenente una varieta' sufficientemente grande di molecole e catalizzatori dovra' quasi necessariamente incanalare il proprio comportamento in un regime ordinato, che corrisponderebbe a una primordiale forma di metabolismo.

In sintesi, le ricerche di Kauffman e di Chaitin concorrono a consolidare l'ipotesi che perlomeno alcuni processi fondamentali della vita, e la creativita' della biosfera, siano riconducibili a semplici meccanismi di tipo algoritmico.

Nella prossima sezione vedremo come l'ipotesi di una dinamica fondamentale algoritmica, riferita a sistemi discreti artificiali in generale (incluse quindi le reti di Kauffman), possa risultare utile per comprendere anche il fenomeno della coscienza, la cui emergenza e' vista da Teilhard come motivo conduttore dell'evoluzione dell'intero Cosmo.

## 5 Pensiero - Tononi e la coscienza come informazione integrata

Se siamo disposti ad accettare che lo spazio fisico calcoli, come suggerito da Zuse [18], che le particelle elementari, nelle loro collisioni, elaborino e si scambino informazione, come suggerito da Lloyd [13], e che la chiave della vita stessa, dagli organismi unicellulari all'uomo, sia un codice software che evolve, come evidenziato da Chaitin [7], saremo a maggior ragione propensi ad accettare l'idea che il comportamento del cervello umano sia assimilabile a quello di un pur sofisticatissimo sistema software.

L'analogia fra la relazione mente/cervello e la relazione software/hardware viene proposta gia' nelle teorie cognitive funzionaliste del filosofo e matematico statunitense Hilary Putnam (1926 -), apparse negli anni '60-'70 del secolo scorso. Secondo questa visione, la coscienza e' assimilabile a un processo di calcolo la

cui esecuzione puo' avvenire indifferentemente in un cervello o in una macchina. Per quanto, dipendentemente delle nostre competenze, convinzioni o sensibilita', questa congettura ci possa apparire riduttiva o totalmente fuorviante, essa ci offre un innegabile vantaggio ai fini dell'indagine scientifica, poiche' apre la strada alla possibilita' di *misurare* concretamente il grado di coscienza associato a un sistema complesso, sia esso naturale (come una cellula o un cervello) o artificiale (come un rete neurale sintetica). Cio' risulterebbe assai utile al fine di rinforzare la consistenza scientifica e formale della prospettiva cosmologica teilhardiana, fortemente basata sulla progressiva emersione e crescita del contenuto di coscienza della materia in via di aggregazione e auto-organizzazione.

Teilhard sostiene che '*la relazione strutturale [...] fra complessita' e coscienza e' sperimentalmente incontestabile e nota da sempre*' (p. 410), come abbiamo anche visto in Sez. 2.3. Questa idea viene pienamente ripresa dallo psichiatra italiano Giulio Tononi, operante negli Stati Uniti e noto per i suoi studi sul sonno e sulla natura della coscienza.

Tononi propone di misurare il grado di coscienza di un sistema dinamico complesso attraverso la quantita' di *informazione integrata* che esso puo' produrre. Il merito della teoria di Tononi, denominata *Integrated Information Theory* [1, 16], e' duplice. Da una parte, essa nasce 'sul campo', e si confronta strettamente con osservazioni sperimentali sui fenomeni di coscienza relativi al cervello umano e ai processi neurali, risultando efficace, ad esempio, nel caratterizzare la riduzione di coscienza durante il sonno privo di sogni, o a seguito di particolari tipi di trauma. D'altra parte, la teoria e' pienamente formale e matematica, essendo in particolare basata su solidi elementi di teoria dell'informazione, sull'entropia di Shannon e su altri strumenti matematici ad essa riconducibili. Il suo alto livello di astrazione consente dunque l'applicazione a sistemi naturali diversi dal cervello umano, e a reti discrete e sistemi artificiali in generale, purché caratterizzati dalla interconnessione e interazione di un largo numero di componenti, e purché ne sia nota l'architettura e la dinamica.

La definizione formale di *informazione integrata* e' concepita da Tononi precisamente in modo da poter misurare quella quantita' di informazione prodotta da un sistema complesso che eccede l'informazione prodotta dalle sue componenti, quando considerate isolatamente. L'informazione integrata si propone quindi di quantificare esattamente la differenza cui si riferisce il concetto olistico di un tutto che e' maggiore della somma delle parti.

La coscienza e' quel filtro fra noi e la realta' che ci permette di accumulare esperienza; senza di essa, infatti, la memoria non si arricchisce di nuovi ricordi, di nuova informazione. E non c'e' accumulo di informazione senza un cambio di stato nel sistema che quella informazione coscientemente riceve. Quando un sistema complesso e discreto  $S$  accede a una propria nuova configurazione  $x$  mediante una transizione di stato, si crea informazione. Questa informazione, che Tononi chiama *effettiva*, scaturisce dal confronto fra la distribuzione equiprobabile di tutti stati possibili di  $S$ , corrispondente a massima incertezza, e la distribuzione desumibile, a posteriori, dalla conoscenza dello stato  $x$  e della legge dinamica del sistema, che riduce quella incertezza. L'informazione e', infatti, riduzione di incertezza, e in questo caso viene quantificata mediante l'entropia relativa (una sorta di differenza) della seconda distribuzione rispetto alla prima. Per quantificare poi l'informazione *integrata*, e dunque il grado di coscienza di  $S$ , e' necessario confrontare, sempre con lo strumento dell'entropia relativa, la somma dei contributi di informazione effettiva relativi alle singole parti isolate,

come se esse non cooperassero fra loro, con l'informazione effettiva dell'intero sistema - quella che abbiamo appena definito.

La rete di Kauffman discussa in Sez. 4.2 appare particolarmente adatta ad esperimenti di misurazione di informazione integrata, essendo un sistema distribuito e parallelo che evolve secondo una legge nota a priori, rappresentata dalle funzioni booleane associate ai nodi. In linea di principio, sembra però plausibile poter estendere la applicabilità della Teoria della Informazione Integrata a tutti i modelli di calcolo *parallelo* che Wolfram ed altri prendono in considerazione nell'ambito della congettura dell'universo computazionale, mentre per i modelli di tipo *sequenziale* (come le macchine di Turing) la cosa appare più ardua.

## 6 Un mosaico ancora incompleto

Abbiamo fin qui osservato come, utilizzando modelli e risultati elaborati in diversi ambiti della scienza contemporanea, sia possibile e anche fecondo ipotizzare l'esistenza di un fattore comune algoritmico-computazionale alla radice di tre distinte componenti del nostro universo: lo spaziotempo, la biosfera, la coscienza. Senza alcuna pretesa di fornire un quadro completo e coerente, ma soltanto alcune tessere di un vasto mosaico ancora largamente incompiuto, abbiamo suggerito come il punto di vista algoritmico, combinato al potente concetto di emergenza nei processi di calcolo, permetta di considerare sotto una nuova luce i tre passi fondamentali della cosmologia teilhardiana - previta, vita, pensiero - e di conferire alla trattazione di alcuni loro aspetti una maggiore solidità formale, venendo incontro a quella aspirazione di rigore scientifico che ben traspare dalle pagine del *Fenomeno Umano*.

Ma l'ambizione più alta della scienza è quella dell'unificazione: spiegare un sempre più vasto insieme di fenomeni con un sempre più ristretto insieme di leggi. Nella sua forma più estrema, quella enunciata da Wolfram [17], la congettura dell'universo computazionale mira a realizzare pienamente questo obiettivo, individuando in un unico, semplice algoritmo - poche righe di codice - la fonte di tutto, l'origine dal Cosmo intero. Non più un *Big Bang*, ma un *Bit Bang* [10].

E quale sarebbero i dati elaborati da questo programma, quale la struttura manipolata da questo algoritmo? Wolfram, come abbiamo visto, propende per la struttura flessibile, astratta, e *particellare*, del grafo, sia nel caso spaziale che in quello spazio-temporale: l'algoritmo animerebbe il grafo aggiungendo e togliendo nodi e archi secondo le proprie semplici regole, e ne determinerebbe così la dinamica, svolgendo quel ruolo che, nel caso dello spazio-tempo continuo, è affidato alle equazioni di campo della Relatività Generale.

Ma come è possibile pensare di coprire il formidabile divario che separa un semplice grafo primordiale dal nostro universo di atomi, galassie ed esseri umani, utilizzando soltanto un semplice processo di calcolo?

Chi scegliesse di non essere completamente pessimista a questo riguardo, potrebbe contare su almeno due argomenti a proprio favore. Il primo deriva dalla potenza del concetto di emergenza, una potenza che definiremmo quasi 'creatrice', dal momento che le entità e le dinamiche che emergono a un dato livello appaiono (o sono?) sempre indipendenti e 'nuove' rispetto a quelle del livello sottostante. Un esempio molto convincente di questa illusione (o realtà?)

e' dato dall'automa cellulare descritto in [14], le cui leggi di base danno origine a particelle di livello superiore in grado di eseguire, con le loro interazioni, un vero e proprio algoritmo distribuito che risolve brillantemente un certo problema chiamato *density classification*.

La seconda ragione di ottimismo deriva dalla considerazione di un'altro grande divario, quello che separa le forme di vita piu' semplici (ad esempio unicellulari) da quelle piu' evolute: oggi sappiamo che la stupefacente creativita' che porta dalle prime alle seconde e' pienamente riconducibile ai semplici processi e meccanismi della evoluzione naturale di Darwin. Si noti, per inciso, che il valore di questo accostamento non e' solo metaforico, visto che stiamo parlando precisamente di un segmento importante dell'intera traiettoria evolutiva del Cosmo di Teilhard.

Concediamoci dunque, in conclusione, la liberta' di tratteggiare almeno i primi passi di un *ipotetico* percorso evolutivo di quel semplice grafo primordiale postulato da Wolfram, e di individuare alcune delle tessere cruciali, ma ancora mancanti, del mosaico sopra menzionato (vedi anche [5]).

Possiamo innanzitutto immaginare una prima fase di rapida espansione del grafo, corrispondente al processo di inflazione cosmica immediatamente successivo al Big Bang, della cui esistenza si e' recentemente avuta conferma sperimentale. Ma in questo tessuto uniforme, proprio a causa del motore algoritmico che lo anima, entrera' presto in gioco il potente fenomeno dell'emergenza, con la comparsa di un secondo livello di nuove entita' e nuove leggi. Cio' che ci possiamo aspettare, in piena sintonia con Teilhard, e' la comparsa di semplici aggregazioni di nodi, e cioe' di strutture localizzate, *ancora particellari*, che si stagliano e si muovono su uno sfondo diffuso, pur essendo, particelle e sfondo, costituite della stessa stoffa. Gli esperimenti di simulazione e di *'universe hunting'* (caccia di universi) condotti da Wolfram ed altri, confermano largamente la realizzabilita' di quanto fin qui descritto.

I passi successivi sono invece piu' ardui. In primo luogo dobbiamo immaginare, seguendo ancora Teilhard, che la dinamica delle particelle piu' semplici le induca a formare composti particellari dagli attributi e dai comportamenti sempre piu' sofisticati, che andranno a popolare livelli emergenti sempre piu' complessi. Possiamo ad esempio immaginare che le particelle si dotino di una sorta di membrana di separazione fra l'ambiente esterno e lo stato interno,<sup>3</sup> e che le loro reazioni agli stimoli ambientali inizino a dipendere da tale stato. O particelle in grado di duplicarsi.

Ma, a nostro avviso, il nodo cruciale che una qualunque teoria ispirata alla congettura dell'universo computazionale deve affrontare e' quello relativo al *foglietto interno delle cose* - quella prerogativa della materia in via di auto-organizzazione che Teilhard identifica con la capacita' di agire spontaneamente, autonomamente, creativamente, e che deve emergere molto presto, seppure in forma rudimentale, gia' negli aggregati del mondo 'minerale', per poi crescere fino ai livelli del pensiero e della coscienza umana. E' possibile che, nel corso dell'ipotizzato processo di calcolo universale, le particelle emergenti acquisiscano una sempre piu' sofisticata capacita' di agire spontaneamente e creativamente? Esempi come quello sopra citato (*density classification*), in cui le particelle si organizzano per eseguire algoritmi che non sono in alcun modo prefigurati nelle

---

<sup>3</sup>Un fenomeno di auto-organizzazione che sembra muovere in questa direzione, e che si manifesta nel contesto di insiemi causali algoritmici, e' descritto in [4], Sez. 2.5).

loro regole di base, appaiono molto incoraggianti. Tuttavia, per quanto e' di nostra conoscenza, a tutt'oggi gli esperimenti per la simulazione di *Bit Bang* computazionali hanno sempre portato, nei casi migliori, alla emergenza di *un solo livello*, al di sopra di quello di base. E' importante pero' sottolineare che lo spazio degli universi computazionali concepibili e' vastissimo, e che molte soluzioni sono ancora in attesa di essere esplorate a fondo.

La comparsa in questi esperimenti di almeno *due* distinti livelli di emergenza, al di sopra del livello zero, rappresenterebbe un risultato di grande rilevanza, e un passo decisivo verso la simulazione di un Cosmo computazionale in grado di implementare i processi base della vita, da Kauffman a Chaitin, e, a seguire, quelli del pensiero e della coscienza. Avremmo cosi' ottenuto una completa riformulazione in chiave computazionale della affascinante cosmologia di Pierre Teilhard de Chardin.

## References

- [1] David Balduzzi and Giulio Tononi. Integrated information in discrete dynamical systems: Motivation and theoretical framework. *PLOS Computational Biology*, 4(6):e1000091, 2008.
- [2] Tommaso Bolognesi. Planar trinet dynamics with two rewrite rules. *Complex Systems*, 18(1):1–41, 2008.
- [3] Tommaso Bolognesi. Causal sets from simple models of computation. *Int. Jour. of Unconventional Computing (IJUC)*, 6(6):489 – 524, 2010.
- [4] Tommaso Bolognesi. Algorithmic causets. In *Space, Time, Matter - current issues in quantum mechanics and beyond - Proceedings of DICE 2010*. IOP, Journal of Physics - Conference Series, 2011.
- [5] Tommaso Bolognesi. Do particles evolve? In Hector Zenil, editor, *Irreducibility and computational equivalence*, pages 135–155, Berlin Heidelberg, 2013. Springer.
- [6] Luca Bombelli, Joochan Lee, David Meyer, and Rafael D. Sorkin. Space-time as a causal set. *Phys. Rev. Lett.*, 59(5):521–524, Aug. 1987.
- [7] Gregory Chaitin. *Proving Darwin - Making Biology Mathematical*. Pantheon Books, New York, 2012.
- [8] Gregory Chaitin. The limits of reason. *Scientific American*, 294(3):74–81, March 2006.
- [9] P. Teilhard de Chardin. *Opere di Teilhard de Chardin - Il Fenomeno Umano*. Il Saggiatore, Milano, 1968. (trad. Fernando Ormea).
- [10] Giuseppe O. Longo e Andrea Vaccaro. *BitBang - La nascita della filosofia digitale*. Apogeo education. Maggioli Editore, 2013.
- [11] E. Fredkin. Five big questions with pretty simple answers. *IBM J. Res. Dev.*, 48(1):31–45, 2004.

- [12] S.A. Kauffman. *At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity*. Oxford paperbacks. Oxford University Press, 1995.
- [13] Seth Lloyd. Universe as quantum computer. *Complexity*, 3(1):32–35, 1997.
- [14] F. Jimenez Morales, J. P. Crutchfield, and M. Mitchell. Evolving two-dimensional cellular automata to perform density classification: A report on work in progress. *Parallel Computing*, 27(5):571–585, April 2001.
- [15] D. P. Rideout and R. D. Sorkin. A classical sequential growth dynamics for causal sets. *Phys.Rev. D*61 (2000) 024002, 1999. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9904062> [gr-qc].
- [16] Giulio Tononi. Consciousness as integrated information: a provisional manifesto. *Biol Bull*, 215(3):216 – 242, 2008.
- [17] Stephen Wolfram. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, Inc., 2002.
- [18] Konrad Zuse. *Rechnender Raum*. Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1969.
- [19] Konrad Zuse. Calculating space. Technical report, Proj, MAC, MIT, Cambridge, Mass., 1970. Technical Translation AZT-70-164-GEMIT. Original title: "Rechnender Raum".