



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

School of Science
Department of Physics and Astronomy

Master Degree in Physics

**La scienza dei sistemi complessi e
le sue strutture temporali per un'educazione
STEAM orientata al futuro**

Supervisor:

Prof. Olivia Levrini

Co-supervisors:

Dr. Francesco De Zuani Cassina

Dr. Paola Fantini

Submitted by:

Veronica Ilari

Academic Year 2023 - 2024

A mia nonna,

che non ha mai smesso di abitare il mio cuore

Abstract

Questo lavoro di tesi in Didattica della Fisica è stato sviluppato nell'ambito del progetto FEDORA, finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea e guidato dal Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna. La tesi riprende la struttura epistemologica della scienza della complessità, esplorando in particolare la dimensione temporale. Gli obiettivi principali sono indagare le concezioni di tempo degli studenti di scuola secondaria superiore e analizzare se e come la scienza dei sistemi complessi possa rappresentare una fonte di conoscenze e competenze per riflettere sul concetto di tempo. A tal fine, sono stati analizzati scritti di studenti di liceo riguardanti le loro idee di tempo. Successivamente, sono stati approfonditi alcuni concetti di base della scienza dei sistemi complessi e studiato il loro impatto culturale oltre la fisica. L'interdisciplinarietà ha permesso di approfondire il contributo che la scienza dei sistemi complessi può offrire per la formazione di *competenze di tempo*. I risultati ottenuti hanno guidato la progettazione di attività didattiche incentrate su esperimenti che mostrano strutture temporali significative.

Indice

<i>Introduzione</i>	5
<i>Capitolo 1 - Valorizzazione delle strutture temporali della scienza dei sistemi complessi</i>	9
1.1 Due modi di relazionarsi al tempo	9
1.1.1 Descrizione delle attività	9
1.1.2 Metodo di analisi dei due campioni di dati	11
1.2 Le strutture temporali della fisica come lenti di analisi	27
1.2.1 <i>Tempo esterno</i> e <i>tempo interno</i> di Ilya Prigogine	29
1.2.2 La temporalità nella scienza classica - <i>tempo esterno</i>	31
1.2.3 La temporalità nella scienza della complessità - <i>tempo interno</i>	34
1.2.4 I “tempi” della fisica per caratterizzare le strutture temporali nelle narrazioni degli studenti	37
1.3 Domande di ricerca della tesi	46
<i>Capitolo 2 - Esplorazione dinamico-evolutiva dei principali concetti della Fisica dei Sistemi Complessi</i>	47
Introduzione	47
2.1 Evoluzione dei sistemi complessi	50
2.1.1 Dalla visione statica alla visione dinamica del mondo: nascita della complessità in fisica	51
2.2 La complessità nei sistemi dinamici, caotici e non	54
2.2.1 Sistemi dinamici caotici: il “caos” nella scienza della complessità	58
2.2.2 L’insorgenza della complessità nei sistemi dinamici dissipativi (non caotici)	62
2.2.3 Vincoli di non-equilibrio e instabilità	64
2.2.4 Biforcazioni e rotture di simmetria	68
2.2.5 Due esempi di biforcazione: a forcone (o pitchfork) e di Hopf	69
2.2.6 Cenni alla descrizione probabilistica dei sistemi dinamici complessi	76

Capitolo 3 - <i>La scienza della complessità: concetti di base e loro "fortuna" nell'attraversamento di diversi ambiti della conoscenza</i>	83
Introduzione	83
3.1 Il <i>VUCA</i> nella gestione strategica delle organizzazioni.....	85
3.2 La metafora dell' <i>Effetto farfalla</i> nella cultura popolare	89
3.3 La <i>Teoria degli equilibri punteggiati</i> e la <i>Contingenza</i> nella biologia evolutiva.....	93
3.4 Il <i>Tempo aperto</i> e la tecnica del <i>Sideshadowing</i> nella critica letteraria	100
Capitolo 4 - <i>Dalle strutture temporali della complessità alla progettazione didattica</i>	109
Introduzione	109
4.1 Fenomeni di auto-organizzazione in fisica e in chimica	110
4.2 La convezione di Bénard.....	111
4.3 La reazione chimica oscillante di Belousov-Zhabotinsky	122
4.4 Realizzazione degli esperimenti: un episodio significativo	133
<i>Conclusione</i>	135
<i>Bibliografia</i>	137
<i>Ringraziamenti</i>	145

Introduzione

Il presente lavoro di tesi in Didattica della Fisica si sviluppa nell'ambito del progetto FEDORA¹, finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea e guidato dal DIFA dell'Università di Bologna. FEDORA - Future-oriented Science Education to enhance Responsibility and Engagement in the society of acceleration and uncertainty - ha svolto le sue attività per un periodo di tre anni, da settembre 2020 fino ad agosto 2023, riunendo sei istituzioni di cinque paesi: Università di Bologna, Università di Tecnologia di Kaunas, Università di Helsinki, Università di Oxford, Teach the Future, Formicablu.

In un presente in rapida evoluzione, dove i vecchi schemi utilizzati per concettualizzare il mondo risultano sempre più spesso inadeguati, il progetto FEDORA propone percorsi e metodi didattici innovativi per rigenerare l'insegnamento delle scienze nella scuola secondaria di secondo grado. Nello specifico, il progetto si basa sul riconoscimento di tre forme di disallineamento principali:

1. Disallineamento tra, da un lato, l'organizzazione verticale e iper-specializzata dell'insegnamento delle discipline e, dall'altro, il carattere inter-multi-transdisciplinare dell'innovazione e gli sforzi per rendere la ricerca e la scienza uno spazio aperto e collaborativo.
2. Disallineamento tra il linguaggio formale ed esclusivo utilizzato a scuola e la necessità di nuovi linguaggi che potenzino l'immaginazione e la capacità di discutere delle sfide contemporanee.
3. Disallineamento tra gli approcci didattici a-temporali o storicamente orientati e la necessità di supportare i giovani nella costruzione di visioni del futuro che diano forza alle azioni nel presente.

Il progetto è organizzato in sette Work Packages, che suddividono gli obiettivi da perseguire fra i diversi partner:

- **WP 1: Allineare l'insegnamento/apprendimento delle scienze in contesti formali con il modus operandi della ricerca e innovazione (R&I)** - guidato dall'Università di Tecnologia di Kaunas, LT.
- **WP 2: Esplorare nuovi linguaggi, narrazioni e arti nell'educazione scientifica** - guidato da Formicablu, IT.
- **WP 3: "Futurizzare" l'educazione scientifica** - guidato dall'Università di Helsinki, FI.
- **WP 4: Verso un modello di educazione scientifica per la società dell'accelerazione e dell'incertezza** - guidato dall'Università di Bologna, IT.

¹ <https://www.fedora-project.eu/>

- **WP 5: Raccomandazioni per una politica proattiva e anticipatrice** - guidato dall'Università di Oxford, UK.
- **WP 6: Dietro le quinte: comunicare e diffondere FEDORA nella sua realizzazione** - guidato da Formicablu, IT.
- **WP 7: Coordinamento e gestione del progetto** - guidato dall'Università di Bologna, IT.

FEDORA ha, tra i suoi obiettivi, l'elaborazione di modelli educativi nelle discipline STEM che promuovano lo sviluppo di competenze di sostenibilità, come l'immaginazione del futuro e la gestione della complessità, previste nel GreenComp². Il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Bologna è particolarmente interessato, all'interno di FEDORA, alla percezione del futuro degli studenti di scuola secondaria di secondo grado e al ruolo della fisica dei sistemi complessi come "boundary object" per l'interdisciplinarietà (studio già avviato con i progetti I SEE³ e IDENTITIES⁴) e come contesto per l'educazione al futuro (Levrini, Tasquier, et al., 2021).

Per quanto riguarda la percezione del futuro in relazione alla scienza, alla tecnologia e all'agency, nell'ambito del progetto I SEE è stato analizzato un campione di quasi 220 saggi scritti da studenti tra i 17 e i 19 anni. I risultati hanno portato alla definizione di atteggiamenti di "polarizzazione" e "complessificazione", rappresentando i modi in cui le narrazioni si posizionano rispetto alle dicotomie emergenti nell'immaginario sul futuro degli studenti (Barelli et al., 2022). In FEDORA, gli studi sulla percezione del futuro sono stati condotti in collaborazione con l'Università di Helsinki e Teach the Future.

Per quanto riguarda, invece, il ruolo della fisica dei sistemi complessi come "boundary object" per l'interdisciplinarietà e come contesto per l'educazione al futuro, sono state svolte due attività principali in FEDORA. La prima attività ha coinvolto studenti tra i 16 e i 18 anni in un corso extra-curricolare offerto dal Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, incentrato sulle simulazioni di sistemi complessi basate su agenti. Dopo aver appreso le caratteristiche concettuali delle simulazioni, gli studenti hanno costruito scenari futuri probabili, possibili e desiderabili su un argomento di loro interesse. L'analisi dei dati ha rivelato che gli studenti hanno sviluppato ed esibito competenze di future-scaffolding, come evidenziato dalla letteratura sull'educazione scientifica orientata al futuro (Levrini, Tasquier, et al., 2021; Tasquier et al., 2019), pur non avendo ancora la capacità di verbalizzare queste abilità (Barelli, 2022).

Nella seconda attività, denominata "Fisica delle nuvole", una classe prima di liceo scientifico ha partecipato a un corso extra-curricolare che intrecciava il laboratorio di scrittura creativa con la fisica dei sistemi complessi. La scrittura, in questo contesto, fungeva da *nuovo linguaggio* per "tradurre" i concetti della complessità dal contesto scientifico a un ambito completamente diverso, arricchendone così il significato. L'analisi dei dati ha mostrato che i contenuti della fisica dei sistemi complessi hanno svolto il ruolo di "impalcatura", consentendo

² https://joint-research-centre.ec.europa.eu/greencomp-european-sustainability-competence-framework_en

³ <https://iseeproject.eu/>

⁴ <https://identitiesproject.eu/it/>

agli studenti di riformulare domande urgenti legate alla ricerca della propria identità in un rapporto dinamico tra “io” e “noi”, ovvero tra individuo e collettività (De Zuani Cassina & Levrini, 2024).

Il presente studio riprende la struttura epistemologica della scienza della complessità, esplorando in particolare la dimensione temporale. Gli obiettivi della tesi sono indagare le concezioni di tempo degli studenti di scuola secondaria superiore e analizzare se e come la scienza dei sistemi complessi possa rappresentare una fonte di conoscenze e competenze per riflettere sul concetto di tempo. A tal fine, dopo aver analizzato scritti di studenti di liceo sulla loro idea di tempo, sono stati approfonditi alcuni concetti di base della scienza dei sistemi complessi e studiato il loro impatto culturale oltre la fisica. L'interdisciplinarietà ha permesso di approfondire il contributo che la scienza dei sistemi complessi può offrire per la formazione di *competenze di tempo*. Questi risultati hanno guidato la progettazione di attività didattiche, incentrate su esperimenti significativi per le strutture temporali che mostrano.

Quanto anticipato si articola in particolare in quattro capitoli.

- Nel Capitolo 1, partendo dal costrutto sociologico di alienazione, vengono caratterizzate le immagini di tempo emergenti da due campioni di dati costituiti da scritti di studenti di liceo. Successivamente, ispirandosi alle definizioni di *tempo interno* e *tempo esterno* di Ilya Prigogine, vengono elaborati criteri per confrontare le strutture temporali della scienza dei sistemi complessi con quelle della fisica classica.
- Nel Capitolo 2 si presentano i principali aspetti concettuali relativi all'approccio dinamico-evolutivo dei sistemi complessi che, in base ai criteri elaborati nel Capitolo 1, permettono di evidenziare la struttura temporale della scienza della complessità.
- Nel Capitolo 3 si analizza la “fortuna” del *pensiero della complessità* nell'attraversamento di vari ambiti della conoscenza. In particolare, vengono esaminati quattro contesti distinti e indipendenti tra loro (management, cultura popolare, biologia evolutiva e critica letteraria) per esplorare il processo dinamico e “circolare” in cui i concetti della scienza della complessità *entrano* in diversi settori del sapere, arricchendoli, e ne *escono* a loro volta arricchiti da nuove parole e immagini.
- Nel Capitolo 4 si descrivono due fenomeni di auto-organizzazione, uno in fisica e uno in chimica, particolarmente significativi per illustrare le peculiarità delle strutture temporali relative all'evoluzione e alle proprietà emergenti dei sistemi complessi. Questi esperimenti sono stati il punto di partenza per la progettazione di attività di laboratorio realizzate in una classe seconda di Liceo scientifico.

Capitolo 1

Valorizzazione delle strutture temporali della scienza dei sistemi complessi

*Esco dal mio appartamento alle 7.45, molto fiera di aver rispettato la mia abitudinaria routine quotidiana, entro nel grattacielo dell'ATS (Azienda Trasporti Sopraelevati) e al settantaseiesimo piano prendo il treno che viaggia sopra i palazzi. Come al solito mi ritrovo schiacciata tra una folla occupata a parlare al telefono ma penso che, in fondo, devo solo resistere 3 minuti e 46 secondi. Alle 8 in punto mi ritrovo nella sala riunioni con il caffè fumante che mi aspetta accanto al portatile nella mia postazione ... poi la riunione comincia. Anzi, LE riunioni. Nel caso in cui vi stiate chiedendo la mia professione, ebbene ho il piacere di comunicarvi che **sono un'affermata manager** nel settore della moda e del design, da poco quarantenne, **che ha dato la priorità al lavoro** e che, a un'età avanzata, si è ritrovata con un pugno di soldi in una mano e nell'altra assolutamente nulla, **per questo, si pente ogni giorno della sua scelta.***

(Tratto da un saggio individuale del campione di dati "Una giornata nel 2040" descritto nel capitolo)

*Wow, sarebbe una meraviglia **staccarmi da tutto**, potermi sentire libero dal gruppo di cui faccio parte. È la mia famiglia, sono i miei amici ma, **vorrei passare del tempo per riflettere su me stesso e su cosa voglio.** Vorrei avere del tempo per viziarmi, viaggiare, fermarmi in un luogo con la consapevolezza di **non essere di fretta** o dover badare al gruppo. Il MIO gruppo, la MIA casa. Sono cresciuto con loro, le mie prime emozioni le ho vissute lì con i miei amici, **mi piacerebbe darci un taglio, ma poi? Ne sarei capace?***

(Tratto da un racconto di gruppo del campione di dati "La fisica delle nuvole" descritto nel capitolo)

1.1 Due modi di relazionarsi al tempo

1.1.1 Descrizione delle attività

Il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna ha svolto, all'interno del progetto FEDORA, numerose attività incentrate sulla percezione del futuro dei giovani e sul ruolo della scienza della complessità, sia come *boundary object* nell'interdisciplinarietà STEM sia come contesto per sviluppare un'alfabetizzazione al futuro. In particolare, alcune attività progettate per studenti delle scuole secondarie superiori hanno prodotto complessivamente due campioni di dati. Il

confronto tra questi campioni ha rivelato peculiarità nella “dimensione temporale”, risultando quindi di grande interesse per uno studio approfondito.

Il primo set di dati consiste in 27 saggi scritti individualmente da studenti di età compresa tra i 17 e i 19 anni, raccolti durante i corsi di orientamento all’università organizzati dal Dipartimento di Fisica e Astronomia “A. Righi” dell’Università di Bologna, tra il 2018 e il 2021, all’interno del progetto MIUR Piano Lauree Scientifiche (PLS). Gli argomenti trattati in questi corsi erano di carattere scientifico, ovvero *Cambiamenti climatici*, *Simulazioni di sistemi complessi*, *Artificial Intelligence*, *Rischio sismico* e *Quantum Computing*. Nei saggi, gli studenti erano invitati a immaginare il proprio futuro e a descrivere una giornata ideale a distanza di vent'anni. La struttura generale del compito può essere riassunta come segue:

Immagina una giornata invernale nel 2040 e prova a pensare al posto in cui ti piacerebbe vivere. Descrivi in poche righe (circa mezza pagina):

(i) il luogo dove immagini di vivere;

(ii) il tipo di vita che stai conducendo;

(iii) i tipi di problemi che tu, nella tua vita quotidiana, nella tua comunità di persone e, in generale, nella tua società stai discutendo e/o affrontando;

(iv) le possibilità e le nuove opportunità che puoi cogliere;

(v) le tecnologie, gli oggetti, la casa, la città e l'ambiente che ti circondano;

(vi) il tipo di vita sociale che conduci.

Completa le seguenti frasi:

(i) Un mio sogno che ho è...

(ii) La mia città ideale include...

(iii) Il mio mondo ideale include...

(iv) Le mie principali paure e preoccupazioni sono...

Di seguito ci riferiremo a questo campione di dati con “Una giornata nel 2040”.

Il secondo set di dati consiste in 6 racconti scritti a gruppi di quattro alunni ciascuno, appartenenti a una classe prima del Liceo Scientifico “A. Einstein” di Rimini, nell’anno scolastico 2020-2021. La classe ha partecipato a un’attività curricolare interdisciplinare sulla fisica dei sistemi complessi e sulla scrittura creativa, co-progettata da tre insegnanti di scuola secondaria (una docente di fisica e due docenti di lettere), ispirata ai temi e ai principi di FEDORA. L’attività, denominata “Fisica delle nuvole”, mirava a creare uno spazio a scuola per riflettere su sé stessi e sulla propria identità come membri di una società *complessa*. Il cuore del progetto si basava sull’idea di avvicinare gli studenti, fin dalla giovane età, ai concetti base della scienza della complessità, incoraggiandoli a costruire una lente attraverso cui guardare in modo consapevole *il mondo là fuori*, sviluppando competenze di cittadinanza scientifica. Durante la realizzazione dei racconti, ciascuno dei sei gruppi di alunni si è concentrato su un particolare sistema complesso (un nido, un formicaio, una nuvola, ecc.), rispettando opportuni vincoli narratologici assegnati da una delle docenti di italiano. I vincoli consistevano nella suddivisione dei racconti in sequenze di tipo narrativo, descrittivo, dialogico o riflessivo, e nella

caratterizzazione dei personaggi come protagonisti, antagonisti o secondari. Di seguito ci riferiremo a questo campione di dati con “Fisica delle Nuvole”.

Dopo diverse letture dei campioni di dati, ci siamo resi conto che gli studenti manifestavano diversi modi di concepire il tempo e di relazionarsi a esso. Nella seconda parte di questa sezione descriveremo le fasi che hanno portato al riconoscimento e alla caratterizzazione delle *immagini temporali* uscenti dai saggi “Una giornata nel 2040” e dai racconti “Fisica delle Nuvole”.

1.1.2 Metodo di analisi dei due campioni di dati

La procedura seguita per delineare le immagini di tempo uscenti dai due campioni di dati si compone di quattro fasi che descriviamo qui di seguito.

1° fase: immersione nei dati per individuare, con un processo bottom-top, una prospettiva di analisi

Prima di tutto, abbiamo esaminato attentamente i due campioni di dati per avere un quadro generale della loro specificità e della loro comparabilità. Man mano che procedevamo nella lettura dei saggi “Una giornata nel 2040” e dei racconti “Fisica delle Nuvole”, siamo rimasti sempre più colpiti dall’attenzione dedicata dagli studenti alla percezione e alla dimensione emotiva associata alle concezioni di tempo espresse negli scritti.

In particolare, l’immersione nei dati ha evidenziato che il modo in cui i personaggi descritti dagli studenti si relazionavano al tempo risuonava con la dicotomia “alienazione dal tempo” e “appropriazione del tempo”, concetti delineati dalla sociologia del tempo per interpretare aspetti fondativi della cultura occidentale (Rosa, 2015). La nostra sensazione era che i protagonisti dei saggi e dei racconti si relazionavano al tempo, alienandosi da esso in alcuni casi e appropriandosi di esso in altri.

Il costrutto sociologico di alienazione è fondamentale per comprendere i vari modi in cui le persone si rapportano al tempo nelle società contemporanee. Dopo la seconda guerra mondiale, abbiamo assistito a una crescente accelerazione dei tempi sociali, dove l’atteggiamento verso il futuro è diventato sempre più difensivo (Leccardi, 2009). I sociologi concordano sul fatto che siamo immersi in una fase di compressione temporale in cui il futuro, incerto e imprevedibile, tende a ripiegarsi sul presente, che diviene in tal modo “assoluto” e appare come la sola dimensione temporale disponibile per la definizione delle scelte. L’accelerazione dei cambiamenti sociali e dei ritmi di vita in un contesto globalizzato (Rosa, 2003) contribuisce ulteriormente a contrarre la dimensione temporale del presente. Il tempo presente diventa frammentato in una pluralità di segmenti senza relazione reciproca. In questo senso si dice che quella contemporanea è l’epoca degli istanti in successione che prendono il posto dell’*esperienza autentica del tempo*.

Il processo di accelerazione (Rosa, 2003) sta trasformando le società occidentali contemporanee nella loro temporalità ridefinendo in modo nuovo le relazioni fra passato, presente e futuro. Come sottolinea Leccardi (2009), riprendendo a sua volta Rosa, nel contesto dell'accelerazione sociale, occorre distinguere tre piani analitici diversi: l'accelerazione tecnologica, l'accelerazione dei processi di trasformazione sociale e l'accelerazione dei ritmi di vita (in base alla quale la quantità di azioni che una data quota di tempo può contenere tende a lievitare). Rosa evidenzia che l'accelerazione sociale implica scavalcare certi confini al di là dei quali gli esseri umani divengono alienati non solo dal loro agire, dagli oggetti con cui lavorano e vivono, dalla natura, dal mondo sociale e da sé stessi, ma anche dallo spazio e dal tempo. Il sociologo scrive che:

il cuore del concetto di alienazione ... poggia nella relazione tra il sé e il mondo: l'alienazione indica una distorsione strutturale profonda delle relazioni tra il sé e il mondo, dei modi in cui il soggetto è posto o 'collocato' nel mondo (2015, "Alienazione dallo spazio").

In particolare, nel contesto delle azioni quotidiane:

l'alienazione è il sentimento di 'non volere realmente ciò che stiamo facendo', anche se il nostro atto dipende solo da noi, da una nostra libera decisione e volontà. ... La 'retorica del dovere' esprime con grande chiarezza questo sentimento diffuso di alienazione: tendiamo a giustificare qualsiasi cosa facciamo con scuse come 'dovevo proprio farlo adesso' ... e questo dimostra che sentiamo tali attività come eteronome. Ciò corrisponde statisticamente al lamento che i ricercatori sentono fare da persone di qualsiasi gruppo sociale in praticamente tutti i paesi sviluppati: 'non ho mai trovato davvero il tempo per fare le cose che mi piacciono di più'. ... Alla fine, però, tendiamo a dimenticare quel che 'davvero' volevamo fare e chi davvero volevamo diventare: ... perdiamo il senso delle cose che sono per noi 'autentiche' e care (2015, "Alienazione dal nostro agire").

L'alienazione dal tempo si ha quando ci ritroviamo immersi in attività che:

non hanno nulla a che fare con quello che siamo, come ci sentiamo e con il resto della nostra vita. Non 'rispondono' in modo sensato ai nostri stati d'animo e alle nostre esperienze. Perciò, durante quelle attività, prendiamo parte a 'episodi isolati' di azione e di esperienza ... che non si legano tra loro in modo integrato e dotato di senso (2015, "Alienazione dal tempo").

Riassumendo, dal punto di vista del sociologo, gli episodi di esperienza (anche quotidiana) ci risultano *alieni*, e quindi il *tempo* a essi dedicato è *alienato*, quando questi non sono rilevanti per la nostra vita e la nostra identità nel suo complesso, quando non aggiungono nulla alla nostra storia e, di conseguenza, non lasciano in noi, nella nostra memoria, una *traccia*, un *segno*. In altri termini, non cambiano chi siamo.

Al contrario, l'appropriazione del tempo avviene quando facciamo nostro il tempo delle nostre esperienze, quando gli episodi si connettono alla nostra identità e lasciano una *traccia* nella nostra storia personale. A questo proposito, Rosa ricorda il filosofo Walter Benjamin che, un

secolo fa, nella sua teoria dell'esperienza distingueva il termine tedesco *Erlebnis* dal termine *Erfahrung*, entrambi tradotti in italiano con "esperienza". Volendo rendere in italiano la differenza tra i due concetti, il termine *Erlebnis* può essere tradotto con "esperienza vissuta", ossia l'esperienza intesa come "vivida percezione attuale, puntuale" (Adorno & Canadè, 2007, p. 21). L'*Erlebnis* non è il "vissuto" nel senso della profondità dei significati e delle risonanze di un evento nel soggetto ma, al contrario, è il vivere un evento esclusivamente a livello dell'attenzione consapevole. Il termine *Erfahrung* può essere tradotto come "esperienza accumulata", cioè l'esperienza come *Erfahrung* "ha bisogno di tempo, di una durata, non è l'esperienza puntuale ... , ma piuttosto il sedimentare di contenuti nella memoria e il loro ritornare come autocoscienza" (Adorno & Canadè, 2007, p. 22). Il punto per Benjamin è che l'esperienza comprende necessariamente un momento di estraneità del soggetto e una capacità di ritornare a se stesso e comprendersi. L'esperienza per il filosofo non è il mero vissuto, ma "il nome di quel processo ... attraverso cui il soggetto *esce da sé e ritorna a se stesso*" (Adorno & Canadè, 2007, p. 18). Nel processo dell'esperienza, il soggetto ripercorre e fa proprio il suo vissuto. In questo senso, poiché l'"esperienza accumulata" lascia una traccia negli individui, il tempo dell'*Erfahrung* è un *tempo appropriato*.

L'appropriazione è un costrutto studiato nell'ambito delle scienze dell'apprendimento a partire dalla definizione di Bakhtin ed è stato reso operativo da uno studio sull'insegnamento-apprendimento della termodinamica dal gruppo di Bologna (Levrini et al., 2015). Questo costrutto è stato poi utilizzato per indagare come studenti di 18-19 anni gestivano il loro tempo durante il lockdown e riconoscere eventuali rituali di appropriazione del tempo in una particolare situazione di "present shock", ovvero in una situazione di sospensione dal tempo quale quella che si era creata durante la pandemia (Levrini, Fantini, et al., 2021).

La prima fase di analisi si è conclusa con l'individuazione dei costrutti di alienazione e appropriazione come chiave interpretativa per i saggi "Una giornata nel 2040" e i racconti "Fisica delle Nuvole". Tale chiave di lettura era giustificata dal riconoscimento, nei dati, di un senso di "alienazione dal tempo" nei saggi, contrapposto a un senso di "appropriazione del tempo" evidente nei racconti.

2° fase: Ricerca dell'*idea sensibilizzante* e costruzione di una lente di analisi

A questo punto, siamo ritornati agli studi sulla sociologia del tempo nel tentativo di formulare una chiave di accesso e analisi dei dati. Nella letteratura, abbiamo trovato particolarmente illuminanti le riflessioni del sociologo John Urry (2009) sul "tempo dell'orologio". Urry osserva che, poiché il tempo è invisibile ai sensi, siamo costretti a *vederlo* attraverso degli indicatori, come l'orologio o il calendario. Egli sottolinea che il "tempo dell'orologio" ha avuto un ruolo potente nelle società occidentali:

The spread of clock time into almost all aspects of social life has been extraordinary. It has meant the general replacement of kairological time, which is the sense of time in which it is said that now is the time to do something irrespective of what any clock indicates.

Kairological time is based upon using the experience of the past in order to develop the sense of when a particular event should take place in the future, of just when it is the right time for something to occur (2009, p. 184).⁵

Urry mette in relazione il “tempo dell’orologio” delle scienze sociali con il tempo newtoniano delle scienze naturali. Il tempo fisico newtoniano è assoluto, cioè *per sua natura scorre uniformemente senza relazione ad alcunché di esterno*. È un tempo invariante, infinitamente divisibile in unità simili allo spazio, misurabile in lunghezza, esprimibile come numero e reversibile. In altri termini è un tempo *spazializzato*. Come il tempo fisico newtoniano, il tempo dell’orologio è, per Urry, “an independent, decontextualized, rationalized time” (p. 185).⁶

La sociologa Carmen Leccardi (2005) osserva che la concezione temporale moderna ha spinto a esteriorizzare e oggettivare il tempo, a considerarlo un oggetto separato da chi lo percepisce, una dimensione che scorre in modo autonomo e sovrasta gli individui con la propria potenza scandita dal movimento inarrestabile degli strumenti che lo misurano. In altri termini, possiamo pensare il tempo dell’orologio come una sorta di sovrastruttura.

Inoltre, Urry aggiunge che l’uso diffuso degli orologi nella società occidentale ha contribuito a trasformare il tempo in una *risorsa* da ottimizzare e gestire al meglio (2009, p. 185).

Il tempo dell’orologio si è affermato ed è diventato dominante nell’era moderna, soppiantando il *tempo dell’esperienza*, sperimentato nella e attraverso la natura, che invece aveva caratterizzato il mondo premoderno. Infatti, riprendendo ancora Urry, nelle società moderne:

Time is no longer something visible and inscribed within space. It has been replaced by measuring instruments, clocks, that are separate from natural and social space. ... [I]n modern societies time is absorbed into the city such that lived time is invisible or reduced to its methods of measurement. Lived time ‘has been murdered by society’ (2009, p. 185).⁷

Il quadro teorico sociologico ci ha permesso di formare l’*idea sensibilizzante* (Glaser & Strauss, 1967) che ha aperto la strada all’analisi dei dati. Ispirati da Urry, abbiamo costruito una *lente temporale* con cui leggere gli scritti degli studenti. Dopo aver distinto il “tempo dell’orologio” dal “tempo della natura/esperienza”, le riflessioni del sociologo ci hanno guidato verso la caratterizzazione delle due strutture temporali. Per ciascuna delle due strutture temporali sono state formulate cinque categorie che abbiamo organizzato a coppie per rendere il

⁵ “La diffusione dell’orologio in quasi tutti gli aspetti della vita sociale è stata straordinaria. Ha significato la sostituzione generale del tempo kairologico, che è il senso del tempo in cui si dice che ora è il momento di fare qualcosa indipendentemente da ciò che indica qualsiasi orologio. Il tempo kairologico si basa sull’uso dell’esperienza del passato per sviluppare il senso di quando un particolare evento dovrebbe aver luogo nel futuro, di quando è il momento giusto perché qualcosa accada.”

⁶ “un tempo autonomo, decontestualizzato e razionalizzato”

⁷ “Il tempo non è più qualcosa di visibile e inscritto nello spazio. È stato sostituito da strumenti di misura, orologi, che sono separati dallo spazio naturale. ... [I]l tempo è assorbito nella città in modo tale che il tempo vissuto è invisibile o ridotto ai suoi metodi di misurazione. Il tempo vissuto ‘è stato assassinato dalla società’.”

“tempo dell’orologio” e il “tempo della natura/esperienza” confrontabili tra loro. In particolare:

- la prima coppia di categorie, o proprietà, delle strutture “tempo dell’orologio” e “tempo della natura/esperienza” risponde alla domanda “*Che cosa struttura il tempo?*”: nel primo caso, i ritmi della società, mentre nel secondo caso, i cicli della natura;
- la seconda coppia di categorie mira a rispondere alla domanda “*Quando avviene un evento?*”: nella struttura del “tempo dell’orologio”, il tempo di fare qualcosa è sempre e solo indicato dall’orologio, mentre nella struttura del “tempo della natura/esperienza”, è determinato dalla sensazione che sia il “momento giusto” relativamente all’esperienza vissuta dai personaggi degli scritti;
- la terza coppia di proprietà risponde alla domanda “*Cos’è che dà valore al tempo?*”: nel primo caso, è la quantità del tempo stesso, concepito come una risorsa, mentre nel secondo caso, è la qualità del tempo che, se vissuto profondamente, lascia una traccia nella memoria dei personaggi;
- la quarta e la quinta coppia di categorie rispondono alla domanda “*È un tempo statico/invariante o dinamico/trasformativo?*”. Il “tempo dell’orologio” è un *tempo statico* o invariante, mentre il “tempo della natura/esperienza” è un *tempo dinamico* o trasformativo: se nel primo caso i personaggi degli scritti si “rifugiano” in situazioni (relazioni e luoghi) che riaffermano e rafforzano la loro identità, nel secondo caso adottano un atteggiamento di apertura nei confronti dell’alterità e della complessità del mondo, che si rivela un’occasione di crescita personale e di cambiamento profondo.

Di seguito riportiamo le categorie che caratterizzano le strutture del “tempo dell’orologio” e del “tempo della natura/esperienza”. Successivamente, illustreremo queste proprietà con esempi tratti o dai saggi “Una giornata nel 2040” (tipicamente per il “tempo dell’orologio”) o dai racconti “Fisica delle Nuvole” (tipicamente per il tempo della natura/esperienza).

	<i>Tempo dell'orologio</i>	<i>Tempo dell'esperienza/natura</i>
1	Il tempo si struttura intorno a routine (anche quotidiane) elaborate sui ritmi veloci della società	Il tempo si struttura intorno ai ritmi della natura
2	Il tempo è quantificato dall'orologio e suddiviso in blocchi di attività "slegate", cioè indipendenti, tra loro (come lavoro e tempo libero) e distribuite in momenti diversi della giornata o in giorni distinti della settimana	Il tempo non è quello indicato dall'orologio, ma il momento di fare qualcosa è legato alle esperienze vissute dai personaggi
3	Il tempo è pensato come una <i>risorsa</i> da gestire al meglio e ottimizzare	Il tempo prezioso è quello delle esperienze vissute, che lasciano una traccia nella memoria e guidano il presente e il futuro
4	Le relazioni con gli altri, regolate e modellate dalle routine temporali, riflettono dinamiche di <i>comfort zone</i> e <i>echo chamber</i>	Il tempo delle relazioni con l'alterità diventa un'occasione per guardarsi con occhi altri, scoprendo nuovi aspetti di sé
5	La natura è il luogo del rifugio dai ritmi incalzanti della società	La <i>complessità</i> del mondo di cui si è parte invita a mettersi in gioco e ad esplorare nuove strade che conducono a nuove consapevolezze

Passiamo ora a descrivere ciascuna categoria, cominciando dalla struttura del "tempo dell'orologio".

La prima proprietà ("Il tempo si struttura intorno a routine (anche quotidiane) elaborate sui ritmi veloci della società") evidenzia lo svolgimento di attività di routine nell'arco della giornata o della settimana e i ritmi incalzanti della società. Riportiamo alcuni esempi selezionati dai saggi "Una giornata nel 2040".

Per quanto riguarda la routine, due esempi sono i seguenti:

"La vita che condurrò immagino sia simile a quella che ho sempre condotto, certo magari non sarò più a scuola e avrò un lavoro: **mi dovrò svegliare la mattina, fare colazione, andare al lavoro, tornare a casa e così via.**"

"Mi piacerebbe diventare una persona energica, con la propria **routine da rispettare**: sveglia al mattino presto, portare i cani a passeggio e i figli a scuola, poi a lavoro fino al pomeriggio-sera, portare i bambini al parco o portarli a fare sport e poi tornare a casa e stare insieme a tutta la famiglia"

Per quanto riguarda i riferimenti ai ritmi incalzanti della società, evidenziamo i seguenti esempi:

“Sveglio mia moglie e i miei due figli, **vorrei preservarli il più possibile dalla frenesia che avvolge il mondo di oggi**. Ci provo, **ma so che non sarà possibile.**”

“Vorrei riuscire ad avere il lavoro dei miei sogni e ... riuscire a conciliare il mio desiderio di avere una famiglia mia. ... se nella migliore delle ipotesi io riuscissi a realizzarmi completamente, **penso che sarà un po' frenetico** perché portare avanti una famiglia e una carriera contemporaneamente non credo sia semplice.”

La seconda categoria (“Il tempo è quantificato dall’orologio e suddiviso in blocchi di attività “slegate”, cioè indipendenti, tra loro (come lavoro e tempo libero) e distribuite in momenti diversi della giornata o in giorni distinti della settimana”) coglie l’aspetto della modularizzazione del tempo. In particolare, la suddivisione della giornata in “moduli” mette in evidenza il ruolo dell’orologio nell’indicare il tempo di fare qualcosa. Due esempi tratti dai saggi di futuro, in cui si descrive una giornata strutturata in blocchi di attività delimitati da orari precisi, sono i seguenti:

“... la **colazione** è pronta ... questa mattina ... mi concederò una **sauna** purificante ... Ad aspettarmi c’è il taxi... Riferisco al pilota automatico la mia destinazione: l’ufficio nel quale **lavoro**. La mattinata solitamente è intensa e non mi concedo molte pause. Alle 14 però sono già nel mio **appartamento** per **pranzare** e per ... concedermi un’ora di **palestra**. Nel pomeriggio ho anche alcuni appuntamenti di **lavoro**, mi preparo e vado presso le loro aziende. Alle 17 solitamente ho finito, chiamo la mia compagna ... solitamente andiamo in qualche ristorante italiano perché mi ricorda casa mia. Di solito ci troviamo per un **aperitivo** con un gruppo di amici ... Alcuni di loro ci seguono al **ristorante** ... Questa sera ... vogliamo andare a vedere un **film** ... Al nostro rientro ... Guardiamo un attimo le luci della città ... New York è sempre bella di notte: uno spettacolo vero e proprio.”

“Mi alzo presto per preparare la **colazione** per me e la mia famiglia, e per le 07.30 di mattina esco per andare al **lavoro**. Mi dirigo in ospedale, chirurgo ortopedico, la mia giornata lavorativa finisce per le 16, torno a casa ...
Il pomeriggio lo dedico all’**attività fisica** ... **con amici** che condividono la mia passione dello sport.
La sera torno a casa per lavarmi e uscire a cena con la mia **famiglia e amici**, passiamo la serata in un bel **ristorante** ...”

I due esempi mostrano anche la netta separazione tra il *tempo del quotidiano* dedicato al lavoro e quello riservato al tempo libero, una caratteristica molto frequente nei saggi. Questa distinzione mette in luce come il tempo libero sia associato a un ritmo più *lento* rispetto al tempo dedicato al lavoro. Nei saggi che suddividono la settimana in “giorni di lavoro” e “giorni di tempo libero”, troviamo indicazioni di ritmi temporali diversi: veloci nei giorni lavorativi e lenti nei giorni di riposo. Riportiamo di seguito un esempio tratto da un saggio che mette in

evidenza il ritmo lento del fine settimana, a differenza della “frenesia” tipica dei giorni lavorativi. Questo ritmo più lento offre uno spazio per riflessioni personali e per inseguire i propri pensieri:

“È un tipico pomeriggio del caldo gennaio 2040. Bevendo **lentamente** la mia tazza di tè bollente, mi siedo sulla mia poltrona bordeaux di fronte alla finestra del salotto ed inizio a riflettere. ... tra gli impegni extra scolastici dei bambini, le faccende di casa e della mia scuola, gli infiniti turni in sala operatoria di mio marito, **incastrare gli orari o avere un po' di relax è praticamente impossibile**. Fortunatamente è **domenica**, i bimbi dormono e John sta già preparando la sua tipica cena domenicale. Così avendo appunto il **tempo di pensare un po'...**”

La terza proprietà (*Il tempo è pensato come una risorsa da gestire al meglio e ottimizzare*) descrive il tempo come una risorsa limitata e preziosa da non sprecare, ma da “sfruttare” al massimo. Un paio di esempi tratti dai saggi di futuro sono i seguenti:

“Nel 2040 credo che le mie difficoltà nella vita di tutti i giorni **saranno il tempo, non è mai abbastanza per fare tutto**, e la ricerca della serenità, mi immagino che quando si diventa adulti la testa si riempia di preoccupazioni e che queste in un qualche modo tolgano la serenità.”

“É un mondo triste e sofferente quello del 2040, segnato da un'assenza di azione. Ormai le macchine svolgono tutti i compiti al nostro posto: abbiamo fatto un enorme passo avanti nella ricerca scientifica, ma un altrettanto passo indietro nella gestione della nostra vita. Ora, amaramente, ce ne rendiamo tutti conto, ma **continuiamo a sprecare TEMPO.**”

La quarta categoria (“Le relazioni con gli altri, regolate e modellate dalle routine temporali, riflettono dinamiche di *comfort zone* e *echo chamber*”) evidenzia che le routine influenzano non solo il modo di vivere il proprio tempo, ma anche le relazioni e le interazioni con gli altri. Nei saggi di futuro, i personaggi si relazionano esclusivamente con i propri familiari o con amici di vecchia data, ossia con individui simili a loro, originando echo chambers in cui le prospettive condivise all'interno del proprio gruppo si amplificano, mentre sono esclusi punti di vista alternativi. Alcuni esempi sono i seguenti:

“Per quanto riguarda la vita sociale, io e mio marito **frequentiamo le stesse persone** poiché ci conosciamo dall'università. Usciamo ogni sabato sera per riunirci con **il nostro gruppo del tempo.**”

“La mia vita sociale sarà forse un po' spenta, penso che **mi saprò accontentare di una chiacchierata con gli amici di infanzia** davanti ad una pizza il sabato sera a casa di qualcuno di questi e talvolta anche a casa mia, del resto non penso che sarò troppo coinvolto nelle festuciole organizzate tra colleghi e men che meno in quelle organizzate tra il vicinato in quanto già ora le vedo come ridicole.”

“Anni fa parlavamo molto della socialità in relazione alla tecnologia; da questo punto di vista mi ritengo soddisfatto, almeno tra **le persone che frequento**, le quali **si dimostrano in grado di comprendere cosa sia la tecnologia e di usarla in modo opportuno**. È tuttavia innegabile il fatto che, come anni fa **d'altronde, molte persone si lascino catturare in modo non conscio dai nuovi prodotti ...**”

In alcuni casi si osserva un atteggiamento di chiusura relazionale evidente, come in questo saggio:

“Non so perché, ma **non riesco ad immaginare nessun amico al mio fianco in futuro**, per me in realtà non è così importante, l'unica persona che però **vorrei rimanesse sempre accanto a me è mio fratello.**”

L'ultima categoria del “tempo dell'orologio” (La natura è il luogo del rifugio dai ritmi incalzanti della società) mostra che, in risposta alla frenesia della vita urbana, i personaggi cercano un “rifugio” nella natura. Questa categoria è molto frequente nei saggi. Di seguito, riportiamo alcuni esempi:

“Nel 2040 mi immagino di **vivere** a Bologna, magari in una villa sui colli, quindi **immersa nella natura ...**”

“Spero di poter vivere ... in periferia della città **immersa nella natura ...** Abitando in periferia sicuramente **non mi immagino “intrappolata” nel traffico ...**”

“**La mia casa si trova in una radura, circondata da alberi** e un vialetto di una settantina di metri la collega alla strada, che si fa spazio nel mezzo del boschetto fuori dalle porte della città. Ampie finestre garantiscono visuale, e dal secondo piano **mi piace osservare la natura che** così poeticamente **mi avvolge.**”

“Se fossi nel 2040, vorrei vivere in un **luogo che mi renda felice, che mi trasmetta calma e non stress**. Mi piacerebbe vivere **nel verde**, ma non in un posto isolato, lontano dalla città principale, ma situato un po' fuori.”

Descriviamo ora le categorie relative alla struttura del “tempo della natura/esperienza”.

La prima proprietà (“Il tempo si struttura intorno ai ritmi della natura”) evidenzia che i ritmi di vita sono segnati dai cicli della natura e che è il cielo, con i suoi colori ed “elementi” (sole, luna e stelle), a indicare lo scorrere del tempo.

Nel racconto di complessità “Battito”, un personaggio, la nuvola, confessa a un altro personaggio, l'uccellino, di sentirsi diversa dal punto di vista temporale rispetto alle altre nuvole di cui è circondata. Le nuvole, infatti, secondo quanto scritto nel racconto, si formano e scompaiono nell'arco di un giorno “come un ciclo che si ripete all'infinito”:

“- Sì, sono diversa... Lo sono sempre stata e sempre lo sarò. **Ogni giorno le mie simili nascono, viaggiano, stanno insieme e muoiono** tutte nello stesso modo, **come un ciclo che si ripete all'infinito**. E io no.”

Nel racconto “Pensieri in volo”, il tempo è “radicato” nei fenomeni ciclici stagionali come le migrazioni degli uccelli e la costruzione dei nidi:

“- Da dove vengo io, beh, ci sono molte piante, alte, **ogni autunno ci costruiamo dei nuovi nidi** che **ogni primavera** vengono distrutti; **ci prepariamo per un lungo viaggio**. ... [N]on ci fermiamo mai, per settimane, neanche per bere: ci caliamo vicino verso l’acqua, la sfioriamo con il becco, beviamo quanto più riusciamo e poi di nuovo su, verso il cielo.”

Per quanto riguarda lo scorrere del tempo scandito dai ritmi della natura, riportiamo un esempio tratto dal racconto “Gli occhi della luna”:

“Il figlio si girò ed esclamò - Dicevo che non saresti più tornata. **È quasi sera!** **Il cielo si stava colorando di sfumature sempre più scure e profonde**, attraverso la folta chioma della quercia **si scorgevano le dolci tonalità di rosso che coloravano quell’immensa distesa di un azzurro limpido**; sottili raggi di luce attraversavano il fitto fogliame, colpendo alcuni punti di quel complesso intreccio su cui i due uccelli si trovavano. ...
Joy era talmente concentrato che **non si accorse dello scorrere del tempo; quando alzò gli occhi** da quel fitto intreccio che aveva creato, **notò che il sole era ormai scomparso, lasciando il posto ad una densa distesa di stelle, tra le quali spiccava un’enorme sfera color avorio.**”

La seconda categoria (“Il tempo non è quello indicato dall’orologio, ma il momento di fare qualcosa è legato alle esperienze vissute dai personaggi”) evidenzia la percezione del “momento giusto” per agire o prendere una decisione in base alle esperienze che si stanno vivendo. Per esempio, nel racconto “Gli occhi della luna”, l’uccellino Joy ha la possibilità di ampliare la visione della sua realtà cambiando prospettiva di osservazione e sa qual è il momento giusto per ritornare al suo nido:

“Joy però decise di non lasciarsi trasportare dal suo malumore; scelse anzi di sfruttare quel momento al massimo, per scorgere tutto ciò che non sarebbe più stato in grado di vedere una volta ritornato a casa. Si concentrò su ogni dettaglio, piccolezza, rifinitura, cercando di cogliere più particolari possibili. Dopo poco, però, sbuffò: non riusciva comunque a vedere tutto, non riusciva a registrare nella sua mente ogni piccola sfaccettatura di ciò che stava osservando; ogni volta notava di essersi fatto sfuggire qualcosa, una foglia in più, un piccolo ramo nascosto... **Decise quindi che era arrivato per lui il momento di fare ritorno** e lentamente ripercorse i suoi passi, arrivando al proprio amato nido.”

Analogamente, nel racconto “Conoscenza ignorante”, la formichina protagonista decide di ritornare al suo formicaio solo quando è sicura di aver colto pienamente il significato profondo dell’esperienza appena vissuta:

“- Sei proprio una formica strana, sai? Rischi la vita inutilmente per vedere un formicaio... Bah, che sciocchezza!

- Non è sciocco e neppure inutile! - rispose Scott - Vivere senza provare curiosità ... limitarsi a restare nel conforto della propria casa senza mai mettersi alla prova, senza scoprire quale possa essere il proprio potenziale, quello è inutile! Nella vita forse non c'è nulla da temere veramente, solo da capire. **Ed ora credo sia arrivato il momento di fare ritorno.**"

La terza categoria ("Il tempo prezioso è quello delle esperienze vissute, che lasciano una traccia nella memoria e guidano il presente e il futuro") mette in risalto la preziosità delle esperienze passate e la loro influenza sul presente e sul futuro. Nel racconto di complessità "Battito", l'uccellino, che ha perso il suo stormo, si affida alla sua memoria per ritrovare la famiglia:

"... sto cercando il mio stormo da tanto e **penso di aver ormai capito dove si trova**. Da piccolino **mi ricordo che in questo periodo volavamo sempre su campi pieni di fiori e mi sembra di ricordare la strada**"

Nel racconto "Gli occhi della luna", invece, la mamma dell'uccellino Joy fa tesoro degli insegnamenti ricevuti da giovane per trasmettere, a sua volta, le conoscenze acquisite al figlio:

"Joy osservò la madre con ammirazione, felice di poter aiutare nella difficile costruzione della loro casa; iniziò così ad intrecciare i piccoli rami con il proprio becco, sotto l'attenta supervisione di Lily.

Osservò con sguardo sognante il figlio e il suo entusiasmo nel compiere quella semplice operazione, ricordando il periodo durante il quale anche lei aveva provato quel sentimento di curiosità: **ricordò come sua madre le avesse insegnato quell'arte tramandata di generazione in generazione**, quanto fosse euforica e impaziente, vogliosa di conoscere più cose possibili di quell'immenso mondo. **Ricordò con un dolce sorriso anche come tendesse a compiere numerosi errori che la costringevano a ripetere più e più volte il lavoro. Il suo obiettivo perciò era** quello di insegnare al figlio a non farsi trasportare dalle emozioni, ma ad agire razionalmente, prestando molta attenzione ad ogni particolare di quel procedimento, in modo da riuscire a creare un riparo e un rifugio stabile per la propria famiglia."

La quarta categoria ("Il tempo delle relazioni con l'alterità diventa un'occasione per guardarsi con occhi altri, scoprendo nuovi aspetti di sé") evidenzia le situazioni in cui l'apertura alle relazioni al di fuori dalla propria comfort zone offre nuove prospettive e favorisce una riflessione personale. Nel racconto "L'altra metà del mondo", l'incontro con l'altro rappresenta un'opportunità per guardarsi sotto una luce nuova:

"... **le cose non hanno natura unica, ma cambiano a seconda degli occhi, della luce sotto cui vengono guardate ...**"

Nel racconto “Gli occhi della luna”, adottare una prospettiva diversa aiuta a riconoscere e valorizzare le proprie capacità:

“Tutte le notti ... vedeva [la luna], là in alto, imperturbabile, la ammirava, incantato dalla sua bellezza ... Quanto potrà essere in alto? Fin dove si spinge? Cosa si potrà vedere da lassù?

Rimase a contemplarla per diversi secondi, rapito da quella presenza; poi, d’un tratto, gli passò nella mente un’idea, una domanda che lo stava tormentando: **come dovrà essere l’opera a cui stava lavorando vista da là in alto?** L’uccellino cercò di non pensarci, ma quella domanda continuava a perseguirlo, **la sua curiosità doveva essere soddisfatta; non vedeva l’ora di poter osservare il suo nido dall’alto** ... voleva poter scorgere ogni particolare di ciò che stava creando, **voleva vedere come la sua compagna che ogni notte emergeva in quel mare di stelle vedesse il prodotto del suo duro lavoro, voleva vederlo attraverso i suoi occhi.**”

Nel racconto “Pensieri in volo”, l’interazione della rondine con un uccello diverso, la gazza ladra, si trasforma in un’opportunità che le permette di esaminare i vincoli del vivere in gruppo (un aspetto che la contraddistingue dalla gazza ladra) e di riflettere sui propri bisogni:

“**[La rondine sta] vedendo, forse per la prima volta, un suo simile da solo, indipendente.** ... Sono entrambi curiosi per quanto riguarda la **conoscenza di una specie diversa dalla propria** ...

Wow, sarebbe una meraviglia **staccarmi da tutto**, potermi sentire libero dal gruppo di cui faccio parte. È la mia famiglia, sono i miei amici ma, **vorrei passare del tempo per riflettere su me stesso** e su cosa voglio. **Vorrei** avere del tempo per viziarmi, viaggiare, fermarmi in un luogo con la consapevolezza di **non essere di fretta** o dover badare al gruppo. Il MIO gruppo, la MIA casa. Sono cresciuto con loro, le mie emozioni le ho vissute lì con i miei amici, **mi piacerebbe darci un taglio**, ma poi? Ne sarei capace?”.

Come avrebbe potuto la rondine, abituata a vivere in “società”, abbandonare tutto e andare via, sola? Le rondini si sono sempre ritrovate negli stormi, in un gruppo, forse è questo il loro destino, ciò che la natura ha riservato per loro. ...

Si è accorta della sua unicità, consapevole di non essere più solamente un uccello dello stormo.”

L’ultima categoria del “tempo della natura/esperienza” (“La *complessità* del mondo di cui si è parte invita a mettersi in gioco e a esplorare nuove strade che conducono a nuove consapevolezze”) cattura la scelta di affrontare le sfide e la complessità del mondo per crescere e imparare, esplorando nuovi percorsi. Riportiamo come esempio un frammento del racconto “Conoscenza ignorante”:

“Era deriso e preso in giro da tutti. Non perché fosse in conflitto con la società in cui viveva, bensì perché era nato con una irrefrenabile, insaziabile voglia di conoscere. Un problema?

- Torna presto figlio mio!... Torna presto!... - ripete la madre.

- Tranquilla mamma, tornerò e ti racconterò la mia avventura con le parole più belle che tu abbia mai sentito.

E fu così che nel dodicesimo anno dalla fondazione della colonia, il piccolo (o grande in base al punto di vista) **Scott partì, lasciandosi alle spalle non solo la famiglia, ma anche le prese in giro dei suoi compagni.**

Percorse molti, moltissimi chilometri in solitudine, rischiando parecchie volte la vita e incontrando le creature più svariate e simpatiche, per questo però si era allontanato dalla sua numerosissima famiglia, non ascoltando i consigli dei suoi eguali. Nonostante ciò, **alimentato dalla voglia di conoscere e capire**, Scott attraversò strade e città, passando per mari e deserti, vedendo paesaggi che parevano plasmati dalle sapienti pennellate del più talentuoso degli artisti, cieli fermi come fossero plastica e tempeste provocate dal più irato degli dei.

Dopo tanto tempo finalmente arrivò a destinazione: un palazzo che definirlo enorme sarebbe stato riduttivo, affascinante, meraviglioso. Sentì parlare di quest'ultimo da suo nonno che ci era stato ancor prima di lui e, prima di morire, glielo descrisse nei minimi dettagli, in maniera breve, concisa, ma assolutamente precisa:

- È grande, molto grande ... **dalla complessità e struttura ineguagliabili!**

... Lasciandosi alle spalle quell'uomo cupo, Scott uscì dal palazzo e **tornò a casa**, pensando a quanto sarebbe stato bello poter raccontare tutte le sue nuove scoperte alla madre e a tutti coloro che lo sminuivano sempre prima che pensasse, agisse, partisse. Era fiero di poter tornare a testa alta, senza la paura di esser deriso, perché aveva capito di non essere inferiore a nessuno e **aveva anche capito che** la complessità deve rimanere ignota, sconosciuta, perché **la vita in fondo è tanto semplice quando si è grandi, ma complessa quando si è piccoli e si cerca un senso.** Forse senza la complessità saremmo tutti grandi annoiati e depressi, proprio come il vecchio del meraviglioso palazzo, grande, molto grande, di un unico, triste e spento colore.”

3° fase: applicazione top-down delle categorie ai dati

Una volta individuata la chiave di accesso ai dati (la nostra *idea sensibilizzante*), abbiamo applicato le categorie del “tempo dell’orologio” e del “tempo della natura/esperienza” ai due campioni “Una giornata nel 2040” e “Fisica delle Nuvole”. Le *immagini di tempo* uscenti dagli scritti degli studenti mostrano una compatibilità e un’armonia con le due strutture identificate nella seconda fase di analisi. In particolare, emerge che nei saggi di futuro prevale la struttura del “tempo dell’orologio”, mentre nei racconti di complessità spicca la struttura del “tempo della natura/esperienza”. Pertanto, questa fase si è conclusa evidenziando la presenza di queste due strutture temporali negli scritti degli studenti, esplicitate attraverso le categorie del “tempo dell’orologio” e del “tempo della natura/esperienza”.

4° fase: interpretazione del senso di alienazione dal tempo e appropriazione del tempo emerso nella fase iniziale di analisi

In questa fase successiva, ci siamo nuovamente immersi nei due campioni di dati con l’obiettivo di esplorare la relazione tra le strutture del “tempo dell’orologio” e del “tempo

della natura/esperienza” e il senso di alienazione e appropriazione del tempo che era emerso nella fase iniziale di analisi.

In generale, abbiamo osservato che nei saggi di futuro degli studenti, “Una giornata nel 2040”, il riferimento al “tempo dell’orologio” e le sue categorie tendono a esprimere un senso di alienazione. I personaggi degli scritti appaiono spesso in uno stato di sofferenza e manifestano un distacco nei confronti di questa struttura temporale. Al contrario, nei racconti di complessità, il “tempo della natura/esperienza” e le sue categorie riflettevano un senso di appropriazione. Qui i personaggi utilizzano questa struttura temporale per ritrovare serenità e connettersi profondamente con sé stessi e il mondo esterno.

In uno dei racconti di complessità, “Pensieri in volo”, si fa menzione dei ritmi veloci della “vita in società”; tuttavia, non si tratta di un caso di alienazione dal tempo, poiché il protagonista (la rondine) non manifesta un senso di distanza o estraneità dall’esperienza temporale complessiva. Nel racconto, prevalente è invece il ruolo dell’*alterità*, nel favorire la maturazione di nuove consapevolezza: l’incontro con la gazza ladra diventa un’occasione per la rondine di guardarsi con occhi *altri*, riflettendo sul delicato equilibrio tra i suoi bisogni personali e le necessità del gruppo di cui fa parte.

D’altra parte, un saggio di futuro evidenzia come le prime due categorie del tempo dell’orologio (“Il tempo si struttura intorno a routine (anche quotidiane) elaborate sui ritmi veloci della società” e “Il tempo è quantificato dall’orologio e suddiviso in blocchi di attività “slegate” tra loro”) si armonizzano con la terza e la quinta categoria di del tempo dell’esperienza/natura (“Il tempo prezioso è quello delle esperienze vissute che lasciano una traccia nella memoria e guidano il presente e il futuro” e “La complessità del mondo di cui si è parte invita a mettersi in gioco e a esplorare nuove strade che conducono a nuove consapevolezza”), restituendo complessivamente un senso di appropriazione. Rispetto ad altri saggi, qui le routine quotidiane non “intrappolano” il protagonista, che finisce per estraniarsi da sé stesso, ma lo aiutano a sentirsi personalmente coinvolto nelle varie attività giornaliere e a trasformare i momenti quotidiani “slegati” in opportunità significative. Inoltre, dal saggio emergono sia il valore delle esperienze passate che influenzano il presente e le decisioni future, sia l’atteggiamento di apertura verso la complessità del mondo, vista come un’opportunità di crescita personale. Riportiamo di seguito un estratto del saggio per dare un’idea di quanto appena descritto:

“Il sole splende e attraversa la finestra di camera mia, intravedo la sua luce con ancora gli occhi socchiusi, ma poi guardo l’orologio: sono già le 6.00. Mi alzo di scatto sorridendo e pensando che finalmente è arrivato un nuovo giorno a braccetto con nuove opportunità e occasioni ...

Per svegliarmi nulla è meglio di un po’ di esercizio, una doccia e un cappuccino ...

Finalmente arrivo a lavoro (al pelo, però arrivo), tengo una magnifica conferenza insieme ad un paio di miei colleghi ...

Arrivo [a casa] nel giro di una ventina di minuti, proprio in tempo per il pranzo ... e per una puntata della mia serie tv preferita. Dopo di che metto un po’ di musica e inizio a portarmi

avanti col lavoro, consapevole che i prossimi giorni li passerò a casa dei miei genitori senza fare niente dal punto di vista lavorativo dato che non li vedo da un po'.

Dopo 3 ore ininterrotte [di lavoro] ... accendo il telefono e una notifica attira la mia attenzione: il mio più caro amico, praticamente un fratello, ha deciso di fare scalo qua a Dublino in modo da potermi salutare prima di ripartire per il Sudan per lavoro. Lo chiamo e ... lo invito per un aperitivo prima di andare a cena con i miei colleghi.

Appena mezz'ora dopo siamo nel mio bar preferito... mi era mancato davvero tantissimo, ma soprattutto **mi era mancato parlare con lui**: si può passare dalla politica alle papere nel giro di pochissimo tempo, e non perdendo mai di significato. In particolare, ci mettiamo a parlare della situazione politica attuale in Italia, il nostro paese d'origine, la quale è più fragile che mai in questo periodo... **probabilmente è stata una fortuna trovare lavoro così presto qua a Dublino, anche se ogni giorno sento la mancanza dei miei vecchi amici e della mia famiglia. Ma bisogna fare delle scelte nella propria vita, e io ho scelto il mio futuro... e poi non è che non li veda mai: spesso durante le vacanze scendo a Bologna per avere l'occasione di salutare tutti, come farò questo fine settimana, d'altronde.**

Purtroppo, il tempo passa velocissimo, e **sia io che lui dobbiamo avviarci per strade diverse un'altra volta, ma ne vale la pena, almeno spero.**

... Mi addormento, finalmente, pensando che **domani** è un nuovo splendido giorno e che **finalmente potrò parlare e passare del tempo con qualcuno che mi conosce davvero**, anche perché **quei pochi minuti passati col mio "quasi fratello" erano riusciti a farmi venire una nostalgia pazzesca...** Ci si vede presto, mia amata, e complicata, Italia."

Dunque, in questo saggio di futuro il protagonista utilizza entrambe le strutture temporali, tempo dell'orologio e tempo della natura/esperienza, per appropriarsi del proprio tempo. Pertanto, anche se a prima vista sembrerebbe che nei campioni di dati il tempo dell'orologio crei alienazione e il tempo della natura/esperienza favorisca un processo di appropriazione, non possiamo generalizzare dicendo che la struttura del tempo dell'orologio corrisponde a un *tempo alienato* e la struttura del tempo della natura/esperienza rappresenta un *tempo appropriato*.

Il tempo alienato si riferisce alla condizione in cui ci si sente distanti o estranei dalla propria esperienza temporale e, di conseguenza, disconnessi da sé stessi e dagli altri. Le cinque categorie del tempo dell'orologio non esprimono in sé un senso di alienazione, lo esprimono però in alcune condizioni, ovvero quando i protagonisti e i personaggi degli scritti sperimentano una frammentazione del tempo (quotidiano e non) e si rapportano a esso in modo per lo più utilitaristico.

Nello specifico, la prima categoria del "tempo dell'orologio" (*Il tempo si struttura intorno a routine (anche quotidiane) elaborate sui ritmi veloci della società*) delinea un tempo alienato quando le routine frenetiche, create per rispondere ai ritmi incalzanti della società, finiscono per intrappolare i personaggi in un ciclo di attività senza fine che non lasciano spazio alla riflessione e alla possibilità di cambiamento. In tal modo, il tempo viene considerato semplicemente uno strumento per completare le attività previste, piuttosto che un'opportunità di vivere esperienze significative.

La seconda proprietà (*Il tempo è quantificato dall'orologio e suddiviso in blocchi di attività "slegate" tra loro*), che descrive la modularizzazione e la mancanza di connessioni significative tra le varie attività quotidiane, esprime un tempo alienato quando i personaggi degli scritti percepiscono una frammentazione del tempo e vivono le giornate come una serie di compiti da svolgere, allontanandosi dalla propria esperienza temporale.

La terza categoria (*Il tempo è pensato come una risorsa da gestire al meglio e ottimizzare*) rappresenta un tempo alienato quando ci si relaziona al tempo in modo utilitaristico. Per esempio, i personaggi di molti saggi di futuro si impegnano a gestire il loro tempo per massimizzare l'efficienza e la produttività. In questo modo si concentrano esclusivamente sulla quantità di tempo dedicato alle attività, trascurando la qualità delle loro esperienze e la connessione con il proprio mondo interno.

La quarta categoria (*"Le relazioni con gli altri, regolate e modellate dalle routine temporali, riflettono dinamiche di comfort zone e echo chamber"*) mette in luce il vincolo esercitato dalle routine temporali sulle relazioni interpersonali, delineando un tempo alienato quando i personaggi degli scritti interagiscono solo con individui simili a loro, creando echo chamber che non permettono l'esplorazione di prospettive diverse da quelle già conosciute.

La quinta e ultima categoria del tempo dell'orologio (*La natura è il luogo del rifugio dai ritmi incalzanti della società*) riflette un tempo alienato quando i personaggi degli scritti percepiscono la vita quotidiana come un ambiente ostile e non sviluppano una relazione armoniosa con il proprio tempo. Il tempo è avvertito come oppressivo e la natura è vista come un rifugio dai ritmi frenetici e dalle pressioni sociali quotidiane.

Il *tempo appropriato*, invece, si riferisce alla condizione in cui ci si relaziona al tempo in modo significativo, connettendosi con sé stessi e con il mondo circostante. Le cinque categorie del tempo della natura/esperienza non esprimono di per sé un senso di appropriazione, lo esprimono però in alcune condizioni, ovvero quando i protagonisti e i personaggi degli scritti attribuiscono un significato e un senso personale al loro tempo relativamente all'armonia con la natura, al valore delle esperienze passate, all'incontro con l'alterità o all'atteggiamento di apertura verso il cambiamento.

Nello specifico, la prima categoria di appropriazione (*Il tempo si struttura intorno ai ritmi della natura*) delinea un tempo appropriato quando i personaggi si sintonizzano con la natura e rispondono ai suoi ritmi.

La seconda categoria (*Il tempo non è quello indicato dall'orologio, ma il momento di fare qualcosa è legato alle esperienze vissute dai personaggi*) esprime un tempo appropriato quando i personaggi degli scritti vivono le proprie esperienze con la consapevolezza che di fronte a situazioni uniche non ci si può comportare seguendo esclusivamente un calendario prestabilito.

La terza categoria (*Il tempo prezioso è quello delle esperienze vissute, che lasciano una traccia nella memoria e guidano il presente e il futuro*) descrive un tempo appropriato quando le esperienze vissute dai personaggi degli scritti risultano significative, o perché lasciano un'impronta nella loro memoria, o perché fungono da guida per le loro scelte e azioni nel presente e nel futuro.

La quarta categoria (*Il tempo delle relazioni con l'alterità diventa un'occasione per guardarsi con occhi altri, scoprendo nuovi aspetti di sé*) riflette un tempo appropriato quando l'apertura dei personaggi verso l'alterità si trasforma in un'opportunità per la crescita personale e permette loro di assumere prospettive diverse da cui guardarsi.

La quinta e ultima categoria del "tempo della natura/esperienza" (*La complessità del mondo di cui si è parte invita a mettersi in gioco e a esplorare nuove strade che conducono a nuove consapevolezze*) delinea un tempo appropriato quando i personaggi degli scritti abbracciano l'incertezza della complessità del mondo, fiduciosi che l'esplorazione di nuovi percorsi possa comunque portare a una maggiore consapevolezza e comprensione di sé e del mondo circostante.

Nei campioni di dati analizzati, gli studenti utilizzano, a seconda dei contesti, una delle due strutture temporali mostrando differenti modi di relazionarsi ad esse: in alcuni casi alienandosi dal tempo, in altri appropriandosi del tempo. Uno studio condotto durante la pandemia ha evidenziato che alcuni studenti sentivano il bisogno di pianificare le proprie giornate attraverso la struttura del "tempo dell'orologio", per appropriarsi del proprio tempo e vivere la quotidianità con serenità (Levrini, Fantini, et al., 2021).

Pertanto, possiamo concludere che il "tempo dell'orologio" non rappresenta necessariamente un tempo alienato, e il "tempo della natura/esperienza" non è sempre un tempo appropriato. I risultati di questa ultima fase di analisi sono coerenti con quanto emerso nella prima fase. L'alienazione dal tempo e l'appropriazione del tempo non sono caratteristiche intrinseche del tempo stesso, ma piuttosto rappresentano i modi personali e soggettivi di percepire e relazionarsi con una struttura temporale piuttosto che un'altra. Pertanto, coinvolgono la percezione del tempo e tengono conto della dimensione emotiva che si attiva nelle relazioni con il tempo dell'orologio e il tempo della natura/esperienza.

1.2 Le strutture temporali della fisica come lenti di analisi

Ripercorriamo brevemente quanto visto nella sezione precedente. Siamo partiti dal senso di alienazione e appropriazione che emergeva negli scritti degli studenti, per poi immergerci nel quadro teorico degli studi sulla sociologia del tempo. Questo ci ha permesso di formare l'*idea sensibilizzante* per analizzare i dati. Ci siamo lasciati ispirare dalle riflessioni del sociologo John Urry per costruire una lente temporale con cui leggere i saggi di futuro e i racconti di complessità. Abbiamo così distinto la struttura del "tempo dell'orologio" da quella del "tempo della natura/esperienza", costruendo cinque coppie di categorie. Le categorie corrispondono a quattro domande generali: "Che cosa struttura il tempo?" (1° coppia di categorie), "Quando avviene un evento?" (2° coppia), "Cos'è che dà valore al tempo?" (3° coppia), "È un tempo statico/invariante o dinamico/trasformativo?" (4° e 5° coppia).

Applicando questi due tipi di categorie ai dati, ci siamo accorti che negli scritti sono presenti due strutture temporali che è possibile "spacchettare" e mettere in evidenza usando le

categorie del “tempo dell’orologio” e del “tempo dell’esperienza”. Nei saggi di futuro prevale la struttura del tempo dell’orologio, mentre nei racconti sulla complessità emerge il tempo della natura/esperienza.

Infine, siamo tornati alla letteratura sociologica, in particolare agli studi di Hartmut Rosa, che hanno messo in luce le problematicità legate ai modi di relazionarsi al tempo nella “società dell’accelerazione”. Rileggendo gli scritti degli studenti con la lente *dell’alienazione dal tempo* e dell’*appropriazione del tempo*, ci siamo accorti che la struttura del “tempo dell’orologio” è tipicamente associata a situazioni che creano sofferenza o rispetto alle quali ci si pone con distacco, mentre la struttura del “tempo della natura/esperienza” viene utilizzata per connettersi profondamente e autenticamente con sé stessi e ritrovare serenità.

Nei campioni di dati sembra dunque che il tempo dell’orologio crei alienazione e il tempo della natura/esperienza favorisca un processo di appropriazione. Tuttavia, questo risultato è contestuale. Il tempo dell’orologio non è un tempo alienato e il tempo della natura/esperienza non è un tempo appropriato, tant’è che in un saggio di futuro è l’armonia tra le due strutture temporali a restituire un senso di appropriazione. Inoltre, in uno studio condotto durante la pandemia, era emerso che alcuni studenti hanno bisogno di una pianificazione, resa possibile dal “tempo dell’orologio”, per appropriarsi del proprio tempo e vivere la quotidianità con serenità (Levrini, Fantini, et al., 2021).

Pertanto, abbiamo concluso dicendo che nei campioni di dati analizzati, gli studenti utilizzano il “tempo dell’orologio” e il “tempo dell’esperienza” a seconda dei contesti. Sebbene tipicamente si relazionino a essi rispettivamente alienandosi e appropriandosi, il primo non è un tempo alienato e il secondo non è un tempo appropriato. In altri termini, l’alienazione e l’appropriazione non rappresentano proprietà intrinseche del tempo, ma riguardano i modi personali e soggettivi di porsi nei confronti di una struttura temporale o dell’altra.

A questo punto, utilizziamo i risultati ottenuti dall’analisi degli scritti degli studenti per avanzare una *congettura*. Ci chiediamo se un lavoro a scuola sulle strutture temporali della fisica possa aiutare gli studenti a esplicitare e riconoscere le loro concezioni temporali e il loro modo di relazionarsi a esse. In altre parole, ci chiediamo se le strutture temporali della fisica, in particolare dei sistemi complessi, possano contribuire alla formazione identitaria degli studenti. Per elaborare questa congettura, procederemo con l’analisi delle strutture temporali della fisica classica e della scienza della complessità, riprendendo i concetti di tempo esterno e tempo interno evidenziati da Ilya Prigogine (I. Prigogine, 1980, 2002). Basandoci sugli studi di Prigogine e sulle riflessioni epistemologiche sulle strutture temporali della fisica, useremo le accezioni greche del tempo, *chronos* e *kairos*, per esplicitare e “tradurre” il *tempo esterno* e il *tempo interno* in proprietà che possano favorire negli studenti una riflessione più profonda e una maggiore consapevolezza sulle diverse concezioni del tempo e su come relazionarsi ad esse.

L’idea guida della tesi è contribuire alla progettazione di percorsi didattici interdisciplinari, fin dai primi anni delle scuole superiori, che mettano in evidenza le strutture temporali della fisica per contribuire alla formazione identitaria degli studenti.

Partiremo dalla distinzione, evidenziata da Prigogine nella fisica, tra il tempo esterno e il tempo interno. Successivamente, descriveremo le *immagini di tempo* nella scienza classica e nella scienza della complessità.

1.2.1 *Tempo esterno e tempo interno* di Ilya Prigogine

Nel tentativo di comprendere lo sviluppo dinamico degli stati di un sistema complesso in termini termodinamici, Ilya Prigogine (1980) affianca il *tempo del movimento meccanico* (“tempo esterno”) della fisica classica a un *secondo tempo* (“tempo interno”), radicato nei processi interni dei fenomeni di auto-organizzazione (o transizione di fase). Mentre il *tempo esterno* è un parametro t che rappresenta una quantità misurabile con l’orologio, il *tempo interno* è definito come un operatore che tiene conto del cambiamento strutturale e irreversibile degli stati di un sistema.

Guardando alla storia della filosofia (Mainzer et al., 2002), i due tempi ricordano la distinzione fatta da Aristotele tra il tempo inteso come “movimento” (*kinesis*) e il tempo concepito come “nascita, crescita e decadimento” (*metabole*). Infatti, Prigogine associa il movimento al tempo reversibile della meccanica e la trasformazione al tempo irreversibile della termodinamica. Il filosofo e scienziato Klaus Mainzer osserva, in particolare, che la distinzione tra un tempo reversibile e un tempo irreversibile può essere fatta risalire ai filosofi naturali presocratici Parmenide ed Eraclito:

How did the story of time begin? When did people first take an interest in time? [...] Pre-Socratic natural philosophers like Parmenides and Heraclitus were the first to formulate the fundamental questions that influence discussions of time to this day. **Is the world, as Heraclitus believed, in a continuous state of creation with time running irreversibly** like the current of a river, **or is every change merely an illusion, as Parmenides argued, and time a reversible parameter of an immutable world of eternal natural laws?** (2002, p. x)⁸

Newton ipotizzò che tutti gli orologi dell'Universo potessero essere sincronizzati su un tempo assoluto. La simmetria temporale delle leggi, che permette agli eventi di procedere dal futuro al passato così come dal passato al futuro, esprime la concezione “atemporale” della fisica classica. Prigogine (1991) ricorda che nei tre secoli successivi alla sintesi newtoniana, il ruolo centrale delle leggi deterministiche e reversibili rispecchiava l’obiettivo della fisica di raggiungere un livello fondamentale della realtà senza tempo. Dal punto di vista della filosofia naturale, ciò ricorda il mondo parmenideo.

⁸ “Come è iniziata la storia del tempo? Quando l'uomo si è interessato per la prima volta al tempo? [...] I filosofi naturali presocratici come Parmenide ed Eraclito furono i primi a formulare le domande fondamentali che influenzano le discussioni sul tempo fino ad oggi. **Il mondo, come credeva Eraclito, è in un continuo stato di creazione con il tempo che scorre irreversibilmente** come la corrente di un fiume, **oppure** ogni cambiamento è solo un'illusione, **come sosteneva Parmenide, e il tempo è un parametro reversibile di un mondo immutabile di leggi naturali eterne?**”

Con la seconda legge della termodinamica, la fisica si confronta per la prima volta con i processi irreversibili della natura, ossia quelli che non manifestano mai un'inversione: una tazza caduta a terra si frantuma, un pendolo con attrito si ferma, una stella emette luce, e così via. Tuttavia, nel periodo della rivoluzione industriale, l'irreversibilità e la dissipazione in fisica erano associate principalmente alla degradazione e all'esaurimento dell'energia disponibile. Fourier e Clausius studiarono in particolare dell'attrito (una forma di dissipazione) nei processi irreversibili. Inoltre, le intuizioni di Ludwig Boltzmann portarono all'interpretazione statistica della seconda legge, secondo la quale è altamente probabile che l'ordine si trasformi in disordine, mentre è improbabile il contrario.

Nel XIX secolo, in altri ambiti del sapere come la biologia evolutiva con Charles Darwin e la sociologia con Herbert Spencer, l'irreversibilità era associata all'idea di evoluzione e riguardava i processi orientati verso un aumento di *complessità*. È solo dagli anni '60 del XX secolo che gli sviluppi paralleli in diverse aree della fisica sono alla fine confluiti in nuovi concetti e strumenti adatti a descrivere una natura caratterizzata anche da processi evolutivi e trasformativi. Due discipline in particolare sembrano aver svolto un ruolo essenziale nel favorire lo sviluppo della scienza della complessità: la termodinamica lontana dall'equilibrio con lo studio dei sistemi aperti (cioè che scambiano energia e/o materia con l'ambiente) e la moderna teoria dei sistemi dinamici, focalizzata sull'insorgere dell'*instabilità* in sistemi stabili e sull'amplificazione di piccole variazioni locali che determinano effetti globali.

Il comportamento complesso dei sistemi fisici riguarda fenomeni di transizione spontanei tra stati alternativi in cui si verificano cambiamenti qualitativi profondi associati ad alcuni eventi. In particolare, i fenomeni studiati da Prigogine sono caratterizzati dall'apparizione di nuove strutture ordinate, spaziali e temporali, di dimensioni macroscopiche. Mantenendo i sistemi in condizioni lontane dall'equilibrio grazie a un flusso sufficiente di energia e materia, le instabilità interne contribuiscono alla formazione di correlazioni a lungo raggio. Prigogine (1961) chiama "strutture dissipative" queste strutture spaziali e temporali emergenti, sottolineando il ruolo centrale della condizione di non-equilibrio nel favorire un'organizzazione spontanea nei sistemi complessi. Riprendendo Mainzer (2002), osserviamo che, dal punto di vista della filosofia naturale, la creazione di strutture dissipative, tipica dei fenomeni di auto-organizzazione, ricorda il mondo eracliteo.

L'ordine emergente in un sistema complesso è accompagnato da una o più *rottture di simmetria* degli stati del sistema precedenti al fenomeno di transizione. In particolare, lontano dall'equilibrio, le instabilità che si generano fanno sì che i sistemi agiscano come un *tutto* e che il comportamento globale emergente "modifies the very meaning of space and time" (I. Prigogine, 1980, p. 104).⁹ Per Prigogine la geometria euclidea e la fisica galileiana si basano su una concezione *semplice* di spazio e tempo, nel senso che:

- il tempo è omogeneo: le traslazioni temporali non hanno alcun effetto sugli eventi fisici;

⁹ "modifichi il significato stesso di spazio e tempo"

- lo spazio è omogeneo e isotropo: traslazioni e rotazioni non alterano la descrizione del mondo fisico.

Tuttavia, questa concezione cessa di essere valida nella complessità, dove la formazione di strutture dissipative comporta dinamiche interne che possono distruggere l'omogeneità del tempo, così come l'omogeneità e l'isotropia dello spazio.

I fenomeni di transizione hanno una natura collettiva, derivando dalle interazioni tra le molte unità costituenti dei sistemi. Le strutture dissipative sono infatti il risultato di una cooperazione collettiva (*sinergia*) tra i componenti dei sistemi che scambiano energia e/o materia con l'ambiente.

Prigogine collega la spontaneità delle rotture di simmetria nei sistemi complessi alla rottura di simmetria temporale (fra passato e presente) intrinseca alla "freccia del tempo" (riprendendo Arthur Eddington) della seconda legge della termodinamica. Lo scienziato riconosce l'inadeguatezza della struttura temporale universale misurata convenzionalmente con l'orologio (il "tempo esterno") nella descrizione dei cambiamenti qualitativi degli stati evolutivi di un sistema complesso. L'operatore temporale introdotto da Prigogine indica il tempo intrinseco (o "tempo interno") di un dato sistema complesso.

1.2.2 La temporalità nella scienza classica - *tempo esterno*

L'*universo-orologio* descritto dalla scienza galileiano-newtoniana è caratterizzato dall'assenza di temporalità poiché gli unici processi a essere presi in considerazione sono solo quelli reversibili. In particolare, la replicabilità sperimentale è stato a lungo sinonimo di eternità per gli scienziati (Valotta, 2017).

Prigogine e Stengers scrivono che attraverso il metodo sperimentale "la fisica classica ha [...] perpetuato, in un mondo sempre più segnato dall'inquietudine della storia, l'ideale di [...] quel movimento immutabilmente ripetitivo che, per i greci, conferiva carattere divino al mondo celeste" (I. Prigogine & Stengers, 1989, p. 165). Per gli scienziati, il dialogo sperimentale avviato da Galileo ha contribuito a ridurre la realtà "allo scorrere omogeneo ed eterno di un tempo unico, *misura* ma anche *ragione* [ritmo] di ogni processo" (I. Prigogine & Stengers, 1981, p. 26). Nella scienza classica il tempo è considerato un accadimento ripetitivo, sempre identico a sé stesso e scandito dai *rintocchi omogenei della lancetta* di un orologio universale. D'altra parte, Prigogine evidenzia che:

Whereas the founders of Western astronomy stressed the **regularity and eternal character** of celestial motions, such a qualification now applies, at best, to very few, limited aspects such as planetary motion. Instead of finding **stability and harmony**, wherever we look, we discover **evolutionary processes leading to diversification and increasing complexity** (I. Prigogine, 1980, p. 2).¹⁰

¹⁰ "Mentre i fondatori dell'astronomia occidentale sottolineavano **la regolarità e il carattere eterno** dei moti celesti, oggi tale qualificazione si applica, nel migliore dei casi, a pochissimi e limitati aspetti come il moto

La scienza moderna rimpiazza il concetto aristotelico di movimento, inteso come cambiamento, con quello di movimento meccanico. Mentre per Aristotele la fisica era la scienza dei processi, dei cambiamenti che avvengono in natura, per Galileo e gli altri fondatori della fisica moderna, l'unico cambiamento esprimibile in precisi termini matematici è l'accelerazione, la variazione dello stato di moto. Questo portò all'equazione fondamentale della meccanica classica che mette in relazione l'accelerazione con la forza:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F \quad (1.1)$$

Il tempo fisico viene così identificato con il parametro t che appare nelle equazioni classiche del moto. La fisica classica rappresenta il mondo come un insieme di traiettorie $x(t)$ che indicano la posizione di un punto materiale in funzione del tempo.

Un osservatore che indaga il moto nel passato ($t' = -t$) noterà esattamente le stesse proprietà del normale osservatore terrestre che compie misure per tempi "positivi". Infatti, essendo $\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{dv}{dt}$ e $v = \frac{dr}{dt}$, si osserva che la trasformazione $t' = -t$ induce la trasformazione $v' = -v$, lasciando inalterata l'accelerazione: i punti materiali vengono mantenuti lungo le stesse traiettorie, ma la direzione che essi seguono è invertita.

Essendo l'equazione fondamentale della meccanica invariante rispetto all'inversione temporale $t \rightarrow -t$ la dinamica non fa distinzione tra futuro e passato, cioè sono possibili sia il moto A, "in avanti" nel tempo, sia il moto B, "indietro" nel tempo. In altre parole, niente nelle equazioni del moto, permette di distinguere il moto diretto da quello inverso. Tuttavia, la descrizione dei processi evolutivi richiede una direzione temporale. A questo proposito, Prigogine (1980) riprende lo storico della scienza Alexandre Koyré, secondo cui il moto della dinamica non è legato al tempo, ma "proceeds in an intemporal time—a notion as paradoxical as that of a change without change" (p. 2).¹¹ Scrive Prigogine:

[O]f the changes that occur in nature, classical physics retained only motion. Consequently, as Henri Bergson ... and others emphasized, everything is given in classical physics: change is nothing but a denial of becoming and **time is only a parameter**, unaffected by the transformation that it describes. **The image of a stable world, a world that escapes the process of becoming**, has remained until now the very ideal of theoretical physics. The dynamics of Isaac Newton, completed by his great successors such as Pierre Laplace, Joseph Lagrange, and Sir Wilham Hamilton, seemed to form a *closed* universal system, capable of yielding the answer to any question asked. [...] **Dynamics thus seemed to give man access to ultimate reality. In this vision, the rest (including man) appeared** only as a kind of illusion, **devoid of fundamental significance** (p. 3).¹²

planetario. Invece di trovare **stabilità e armonia**, ovunque si guardi, si scoprono **processi evolutivi che portano alla diversificazione e alla crescente complessità.**"

¹¹ "procede in un tempo intemporale, una nozione tanto paradossale quanto quella di un cambiamento senza cambiamento"

¹² "Dei cambiamenti che avvengono in natura, la fisica classica ha conservato solo il movimento. Di conseguenza, come hanno sottolineato Henri Bergson ... e altri, nella fisica classica tutto è dato: il cambiamento

Sappiamo che la dinamica newtoniana descrive solo una parte dell'esperienza fisica; si applica a oggetti della scala umana le cui velocità sono molto più piccole di quella della luce, cioè la sua validità è limitata dalle costanti universali h (la costante di Planck) e c (la velocità della luce). Quando la scala degli oggetti è molto piccola (come gli atomi o le particelle "elementari") o le densità sono elevate (come nelle stelle di neutroni o nei buchi neri), si verificano nuovi fenomeni. Per far fronte a tali fenomeni, la dinamica newtoniana viene sostituita dalla meccanica quantistica (che tiene conto del valore finito di h) e dalla dinamica relativistica (che include c). Tuttavia, nonostante il loro carattere rivoluzionario, osserva Prigogine, queste nuove forme di dinamica, ereditano la visione newtoniana di **un universo fisico statico, "un universo dell'essere senza divenire"** (p. 4).

Per quasi tre secoli la dinamica classica è apparsa come una scienza chiusa in grado di calcolare ogni evoluzione a partire da principi primi e dati iniziali ben definiti" (Nicolis & Prigogine, 1991). Riprendendo Mainzer (2002), potremmo dire che la topologia dello sviluppo temporale assegnato al mondo dalla fisica classica è lineare. La concezione lineare del tempo è caratterizzata da una successione lineare di intervalli temporali. Nella Figura 1 ogni cerchio rappresenta lo stato del "mondo" in un determinato istante di tempo. Il cerchio pieno indica lo stato che si sta attuando, mentre i cerchi vuoti che lo seguono rappresentano gli stati del futuro e quelli che lo precedono gli stati del passato. In questa struttura temporale, il futuro è determinato in modo univoco e senza alternative o, come direbbe Prigogine, *il presente implica il futuro*.



Figura 1: Tempo lineare con stati univocamente determinati di passato, presente e futuro. Immagine tratta da (Mainzer et al., 2002, p. 13)

Aggiungiamo un'ultima osservazione più filosofica. L'obiettivo della fisica classica di rendere prevedibili e, di conseguenza, manipolabili i fenomeni si è tradotto nel tempo in una estromissione dell'uomo dall'universo in cui era collocato e agiva. La pretesa di pervenire a una descrizione definitiva del reale ha condotto gli individui a estraniarsi dalla realtà concreta e a identificarsi come semplici "spettatori" del mondo. Edgar Morin scrive che "la semplificazione scientifica aveva creato un Universo meccanico, senza accidente, senza

non è altro che la negazione del divenire e **il tempo è solo un parametro**, non influenzato dalla trasformazione che descrive. **L'immagine di un mondo stabile, un mondo che sfugge al processo del divenire**, è rimasta finora l'ideale stesso della fisica teorica. La dinamica di Isaac Newton, completata dai suoi grandi successori come Pierre Laplace, Joseph Lagrange e Sir Wilham Hamilton, sembrava formare un sistema universale chiuso, capace di dare risposta a qualsiasi domanda posta. [...] **La dinamica sembrava quindi dare all'uomo l'accesso alla realtà ultima. In questa visione, il resto (compreso l'uomo) appariva solo come una sorta di illusione, priva di significato fondamentale.**"

innovazioni, senza individui, senza esseri” (2011, p. 37). In particolare, l’interesse esclusivo della fisica classica ai processi deterministici e reversibili è responsabile di una visione meccanicistica e “robotica” della natura associabile a un atteggiamento passivo dell’uomo nei confronti della realtà circostante (Valotta, 2017).

1.2.3 La temporalità nella scienza della complessità - *tempo interno*

Con l’enunciazione del secondo principio della termodinamica l’irreversibilità temporale fa irruzione nella fisica. Alla comprensione del trasferimento di energia in modalità calore da un corpo più caldo a uno più freddo si accompagna un primo cambiamento nella concezione del tempo, da “vuoto *contenitore* dei fenomeni a *struttura portante* della realtà” (Valotta, 2017, p. 5). Nel discorso scientifico viene inclusa “una teoria fisica, dotata dello stesso rigore matematico che hanno le leggi del moto e completamente estranea al mondo newtoniano” (I. Prigogine & Stengers, 1981, p. 110). La nuova legge universale modifica qualitativamente le proprietà intrinseche della materia. Il fatto che ogni corpo possa ricevere e trasmettere calore lo trasforma, sia dal punto di vista quantitativo, in relazione agli altri corpi e all’ambiente circostante con cui interagisce, sia dal punto di vista qualitativo, come evento che evolve storicamente. Per questo motivo, sostengono Prigogine e Stengers, la termodinamica può essere considerata la prima scienza della complessità.

Il secondo principio è valido per i sistemi in equilibrio termodinamico che non interagiscono con l’ambiente esterno. Pertanto, non può spiegare come si evolvono fenomeni complessi come il tempo meteorologico o il clima al variare delle condizioni sulla Terra. Prigogine (1961) studia approfonditamente l’evoluzione temporale dei sistemi aperti lontani dall’equilibrio, che danno origine a *strutture dissipative* e fenomeni di auto-organizzazione. Questi sistemi possono stabilizzarsi temporaneamente in stati di equilibrio stabili e, in condizioni mutevoli, trasformarsi spontaneamente in nuovi stati, generando strutture ordinate macroscopiche diverse dalle precedenti. I processi evolutivi che portano alla formazione delle strutture dissipative riflettono la visione di Prigogine (1991) secondo cui l’evoluzione dell’universo non segue un percorso di degradazione, ma piuttosto di aumento di complessità. Bocchi e Ceruti scrivono a tal proposito:

Il contributo di Ilya Prigogine allo studio del problema del tempo [...] ha tolto le ragioni di ogni separazione radicale fra scienza e *tempo*. [...] Al *tempo illusione* (secondo un’espressione di Einstein) della meccanica e al *tempo della degradazione* della termodinamica classica, si aggiunge oggi la possibilità di concepire un **tempo della creazione** il cui simbolo sono le **instabilità dei sistemi** che possono passare da una struttura all’altra proprio per il fatto che sono instabili (2007, pp. 13–14).

Un sistema in un regime di non-equilibrio può generare instabilità e, di conseguenza, diventare suscettibile di cambiamenti. Se all'equilibrio piccoli e localizzati tentativi di deviazione dallo stato del sistema vengono repressi da una controazione istantanea, lontano dall'equilibrio le variazioni si amplificano diventando sorgenti di innovazione e diversificazione interna. In particolare, come vedremo più in dettaglio nel capitolo successivo, dal punto di vista matematico, i sistemi instabili sono soggetti a biforcazioni, cioè a transizioni, verso nuovi stati "auto-stabilizzanti", chiamati attrattori, che non posseggono alcuna somiglianza con lo stato di equilibrio. Il termine biforcazione è attribuito a Henri Poincaré e indica il cambiamento qualitativo della "struttura" di un dato sistema che si verifica quando il valore di un dato parametro raggiunge un valore "critico".

In alcuni casi i sistemi subiscono una *cascata di biforcazioni* successive. Alcune transizioni implicano poi la comparsa di stati alternativi e, pertanto, oltre la criticità si assiste alla "scelta" del sistema di uno tra gli stati disponibili. In questi casi, la biforcazione mette in luce il "futuro aperto" dell'evoluzione dei sistemi complessi. Osserviamo che nelle biforcazioni sono coinvolti anche processi stocastici. Infatti, non è possibile stabilire in anticipo lo stato finale del sistema, ma è il caso a decidere, attraverso la dinamica delle fluttuazioni. La descrizione stocastica delle fluttuazioni si rivela necessaria in quanto le equazioni macroscopiche che descrivono i sistemi non giustificano la preferenza per un ramo o l'altro nei punti di biforcazione.

Con il realizzarsi di una particolare fluttuazione, il sistema diventa un *oggetto storico*, nel senso che la sua evoluzione successiva dipenderà da questa "scelta critica". Di conseguenza, è la compresenza nelle biforcazioni di elementi deterministici e processi probabilistici a introdurre la "storia" all'interno della fisica.

L'impulso dato da Prigogine all'avvio della termodinamica non lineare sferra un duro colpo alla concezione meccanicistica del mondo poiché mostra che l'evoluzione di un sistema naturale che interagisce con l'ambiente circostante può non essere prevedibile. Questo risultato si traduce in una nuova visione temporale: se nella scienza classica il tempo è scandito dai rintocchi omogenei della lancetta di un orologio, nella scienza della complessità il tempo diventa *freccia* che una volta scoccata traccia percorsi variabili tra i tanti possibili (Valotta, 2017). Riprendendo Mainzer (2002), potremmo allora dire che la scienza della complessità, ammettendo la possibilità di diversi rami di sviluppo futuri, assegna al mondo una struttura temporale di tipo non lineare, ovvero ad albero o ramificata. La Figura 2 rappresenta una struttura temporale di questo tipo: allo stato che si sta attuando (cerchio pieno) susseguono, a destra, diversi possibili stati (cerchi vuoti) che, a loro volta, sono succeduti da altri diversi possibili stati nell'intervallo di tempo successivo. Le linee tratteggiate, a sinistra, indicano invece i diversi sviluppi temporali che non sono stati realizzati. Pertanto, la concezione ramificata del tempo è caratterizzata da una sequenza lineare che registra gli stati attraversati da un sistema nel passato e da un ventaglio di possibili futuri da percorrere. In altri termini, il futuro dei sistemi complessi è *aperto*.

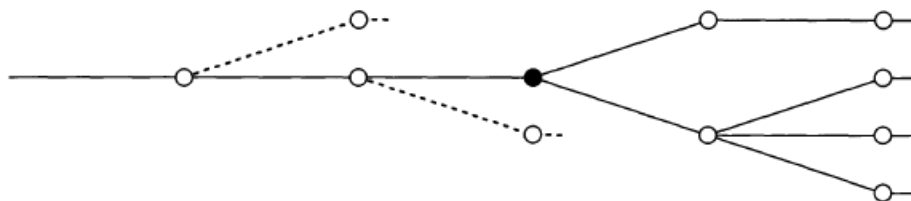


Figura 2: Albero del tempo con possibilità di biforcazione di passato, presente e futuro.
Immagine tratta da (Mainzer et al., 2002, p. 13)

Prigogine sostiene che l'interessarsi della scienza della complessità ai fenomeni irreversibili e probabilistici è associabile a un atteggiamento attivo dell'uomo nei confronti della realtà circostante. Scrive che:

All'inizio del Novecento continuando la tradizione della ricerca secondo il programma classico, i fisici erano quasi unanimi nell'ammettere che le leggi fondamentali dell'universo erano deterministiche e reversibili. I processi che non si adattavano a questo schema erano pensati come delle eccezioni, semplici artefatti dovuti alla complessità, che doveva essere spiegata invocando la nostra ignoranza o la nostra mancanza di controllo delle variabili coinvolte. Ora ... siamo sempre più numerosi nel pensare che **molte processi fondamentali della natura sono irreversibili e stocastici**... Questo fatto porta a una **nuova visione delle cose: non più passiva**, come descritta nella visione meccanicistica del mondo, ma **associata a una spontanea attività**. Questa nuova visione è così profonda che pensiamo di poter parlare di un nuovo dialogo dell'uomo con la natura. [...]

Nella fisica classica, l'**osservatore era fuori dal sistema**. [...] Stiamo allontanandoci sempre più da questa [visione]. Non solo nelle scienze umane ma anche in fisica sappiamo che **siamo sia spettatori che attori**, per usare la ben nota espressione di Niels Bohr. Al posto di una costruzione nella quale il presente implica il futuro, **andiamo verso un mondo nel quale il futuro è aperto**: nel quale il tempo è una costruzione... (1991, pp. 4-5)

Ogni individuo riveste un duplice ruolo di attore e spettatore in quanto membro di un *universo di partecipazione* in cui "tutti gli eventi [...] vengono dallo stesso passato e vanno verso un comune futuro" (I. Prigogine & Stengers, 1981, p. 255). Questo futuro comune non è predeterminato, poiché ogni azione individuale produce conseguenze i cui effetti, a breve e lungo termine, non possono essere previsti né controllati. Maturana e Varela, citati da (Valotta, 2017), osservano: "Tutte le nostre azioni, senza eccezione contribuiscono a formare il mondo in cui esistiamo e a cui diamo valore proprio tramite esse, in un processo che costituisce il nostro divenire".

1.2.4 I “tempi” della fisica per caratterizzare le strutture temporali nelle narrazioni degli studenti

Nella seconda parte del capitolo, abbiamo esaminato le riflessioni di vari studiosi di diverse discipline sulle *immagini di tempo* derivanti dalla scienza classica e dalla scienza della complessità. In questo paragrafo finale, intendiamo “rendere operative” le strutture del tempo esterno e del tempo interno della fisica, formulando alcune “proprietà temporali” *utili* a individuare e riconoscere le concezioni di tempo presenti nelle narrazioni degli studenti quando sono liberi di scrivere. Questa caratterizzazione temporale metterà in luce la ricchezza di riflessioni possibili offerte da uno studio della fisica mirato a far emergere e confrontare le strutture temporali della scienza classica e della complessità. Riteniamo che la progettazione di attività didattiche incentrate sulle strutture temporali della fisica (soprattutto la fisica dei sistemi complessi, data la sua assenza nelle indicazioni nazionali) possa aiutare gli studenti a riconoscere e esplicitare le proprie concezioni del tempo, permettendo loro di utilizzarle consapevolmente nelle loro narrazioni. Inoltre, queste attività possono farli riflettere sulle modalità personali e soggettive con cui si relazionano al tempo, per esempio appropriandosi o alienandosi da esso.

Per *impresiosire* la griglia temporale che utilizzeremo per riconoscere le proprietà generali delle strutture temporali nelle narrazioni degli studenti, ci siamo ispirati al pensiero greco sulla concezione di tempo. I greci utilizzavano termini diversi per indicare le varie accezioni del tempo, e in questo contesto siamo particolarmente interessati a *chronos* e *kairos*. Mentre *chronos* rappresenta il tempo che scorre e scandisce la vita umana e la storia, *kairos* è il momento opportuno, l’“attimo senza spessore” (Tonelli, 2021, p. “Il desiderio di dominare il tempo”). I concetti di *chronos* e *kairos* ci aiutano a “tradurre” le specificità delle strutture temporali della fisica classica e della scienza della complessità (*tempo esterno* e *tempo interno*) in proprietà generali utili per caratterizzare le *strutture temporali* nelle narrazioni degli studenti, come gli scritti dei due campioni di dati analizzati nella prima sezione del capitolo. Nei primi capitoli del suo libro “Tempo, Il sogno di uccidere Chrónos,” il fisico Guido Tonelli ripercorre l’evoluzione del concetto di *chronos* nel corso della storia. Riportiamo qui di seguito alcuni passaggi della sua ricostruzione che riteniamo significativi per i nostri scopi. Dal ragionamento di Tonelli emerge che la concettualizzazione di *chronos* è strettamente legata alla percezione personale e soggettiva dello scorrere del tempo:

Come molti animali e numerosi esseri viventi del pianeta, anche **noi umani avvertiamo nettamente lo scorrere del tempo**. Ci è necessario per collegare gli eventi fra loro, metterli in sequenza e capirne le relazioni causali. Questo ci consente di evitare pericoli e sfruttare opportunità; in una parola, è uno strumento essenziale per la sopravvivenza (2021, p. ‘Il nostro tempo’).

Tuttavia, la necessità di fare previsioni per organizzare e gestire efficacemente la vita sociale nelle comunità urbane si è *materializzata* nei secoli in uno strumento, l’orologio. Questo dispositivo è costruito sull’idea che lo scorrere del tempo sia unico e identico ovunque per tutti. Tonelli scrive:

Nel costruire il senso del tempo negli umani, emozioni e memoria giocano un ruolo importante. Ecco perché il tempo soggettivo può risultare assai diverso da quello misurato con l'orologio. [...]

Il senso del tempo permette alla coscienza di mettere ordine nell'ambiente esterno e di organizzarlo in modo coerente, ma lo fa in maniera leggermente diversa per ciascuno di noi. **Il tempo individuale, soggettivo e personale, differisce dal tempo scandito dagli orologi perché le nostre emozioni possono dilatarlo o comprimerlo a dismisura** (2021, p. 'Il nostro tempo').

Tonelli descrive come *chronos*, dall'indicare un'armonia tra *ciclo naturale esterno* e *clock individuale interno*, si sia progressivamente identificato con la quantificazione esatta dello scorrere di un tempo oggettivo, lineare, uniforme e continuo:

[O]ggi viviamo in una società complessa nella quale il tempo gioca il ruolo di rigido regolatore di tutte le nostre attività e delle nostre stesse vite. Ma non è stato sempre così. [...]

[Nel] lontano passato, l'umanità non aveva bisogno di misurare lo scorrere del tempo. Per migliaia di generazioni i nostri antenati cacciatori e raccoglitori hanno organizzato le loro attività seguendo il ciclo naturale del susseguirsi di giorno e notte e dell'alternarsi delle stagioni. Sole, Luna e pianeti hanno costituito le lancette naturali del grande orologio celeste che scandiva le loro esistenze. [...]

In quelle epoche lontane il tempo non era altro che una successione di giorni scandita da cicli lunari e stagioni che ritornavano con regolarità. Ci si svegliava al sorgere del Sole e ci si nutriva quando si aveva fame [...]; quando sopraggiungeva la notte si riposava. **Ciclo naturale e orologio biologico prodotto dall'evoluzione marciavano in perfetta armonia.** [...]

Per lunghissimo tempo, insomma, gli orologi siamo stati noi. [...]

Le prime gabbie di *Chrónos* furono meridiane e calendari, che precedono gli orologi meccanici di migliaia di anni. La loro diffusione esplose con la rivoluzione agricola, la nascita dei commerci, la formazione delle prime comunità urbane e delle grandi civiltà. ... [Q]uesto comporta la necessità di seguire il ritmo delle stagioni o prevedere le piene periodiche di un grande fiume, per organizzare semine e raccolti. Così le lunazioni, il solstizio, il periodo del ritorno regolare dei prodotti della terra, selvatici o coltivati, sono diventati la base di un nuovo rapporto con il tempo. [...]

Clock, il termine inglese per orologio, deriva dal tedesco *glocke*, campana, e contiene memoria del fatto che per molti secoli, nell'Europa dell'alto Medioevo, era il suono delle campane di chiese e monasteri a scandire la vita delle comunità. I loro rintocchi ritmavano il giorno e la notte, annunciavano feste o adunanze politiche. Erano le campane a risvegliare il borgo perché si iniziasse il lavoro e a preannunciare il tramonto affinché tutti potessero rientrare nelle loro abitazioni. [...]—La necessità di costruire strumenti più sofisticati per la misura del tempo si sviluppa con la rinascita delle città e dell'economia urbana alla fine del Medioevo. Il tempo dei mercanti prende gradualmente il sopravvento sul tempo della Chiesa.

I primissimi orologi erano ... [i]ncastonati nelle torri e nei campanili delle piazze centrali delle città...

La rappresentazione dello scorrere del tempo in un quadrante circolare permette di sfruttare meglio l'andamento ciclico del tempo quotidiano e consente di valutare, con uno sguardo, il tempo che è passato fino a quel momento e quello che manca per concludere una certa attività. La precisione dei movimenti meccanici rende possibile una **suddivisione molto accurata del tempo che risponde alle esigenze di una società nella quale crescono scambi e relazioni**. Le botteghe artigiane diventano le prime grandi manifatture e mettono in moto attività commerciali su scala continentale che richiedono una **gestione più precisa del tempo**.

La lancetta dei minuti fece la sua comparsa negli orologi di fine Seicento e, poco dopo, apparve sui dispositivi più sofisticati la piccola lancetta che segnava i minuti secondi. ... [Gli studi di Galilei] sull'isocronismo delle oscillazioni del pendolo stimoleranno lo sviluppo di nuovi dispositivi sempre più avanzati, che verranno usati per migliorare l'accuratezza delle osservazioni astronomiche e saranno fondamentali per la navigazione. Cronometri più precisi permetteranno una migliore determinazione della longitudine in mare aperto, parametro decisivo per il successo dei traffici marittimi che nasceranno dalle grandi esplorazioni.

L'avvento della Rivoluzione industriale segna il trionfo del tempo, che diventa onnipresente e pervade tutti gli aspetti della vita: scandisce il ritmo delle giornate nei luoghi di lavoro, definisce le pause concesse agli operai e misura il loro salario, regola e stabilisce con precisione anche i periodi dedicati al recupero delle energie o allo svago. Gli umani, che avevano sognato di ingabbiare *Chrónos*, scoprono con orrore che in realtà hanno solo imprigionato se stessi. Migliaia di orologi fanno la loro comparsa nelle fabbriche e nei luoghi pubblici delle città, poi entrano nelle case e diventano accessori personali indispensabili. Iniziano col fare capolino dai taschini dei signori e finiscono per dilagare al polso di tutti. Una moltitudine di cronometri viene inglobata in ogni strumento di lavoro, trasporto o comunicazione. ... **Tutto si muove al ritmo cadenzato prodotto da miliardi di orologi**. Ci alziamo dal letto non quando siamo perfettamente riposati, ma nel momento in cui suona la sveglia; ci nutriamo non perché abbiamo fame, ma se vediamo che è arrivata l'ora del pasto; andiamo a dormire non perché siamo stanchi, ma quando **l'orologio ci autorizza** a prendere sonno.

Il trionfo di *Chrónos* nella società moderna è assoluto. **La nostra concezione del tempo**, quella che siamo soliti utilizzare per ogni incombenza quotidiana, **presuppone una sorta di orologio universale il cui ticchettio procede imperturbabile, preciso e regolare**, sprezzantemente **indifferente a tutto** (2021, p. 'Il nostro tempo').

Il ritmo della vita nella nostra società è scandito da un unico grande *orologio immaginario che dirige, in perfetta sincronia, l'orchestra di tutti gli orologi del mondo*. Tonelli riconduce le basi teoriche di questa idea al concetto di *tempo assoluto* introdotto da Isaac Newton. Newton immaginava lo spazio e il tempo come uno sfondo eterno, immutabile e imperturbabile rispetto al quale si stagliano i movimenti. In altri termini, le vicende dell'universo si svolgono, per lo scienziato, all'interno di questi due *contenitori* eterni e incorruttibili. Il tempo assoluto, in particolare, in quanto totalmente indipendente dalla materia, implica la simultaneità degli eventi, per cui è sempre possibile definire l'istante preciso in cui avvengono due fenomeni simultanei a grande distanza fra loro.

Tonelli sottolinea come l'idea di un *orologio universale* identico per tutti possa essere fatta risalire, teoricamente, alla concezione ontologica del tempo come contenitore. Osserviamo, d'altra parte, che dal punto di vista pratico l'*orologio universale* può ritenersi il completamento del grande progetto di coordinamento del tempo del XIX secolo che aveva tenuto impegnati moltissimi scienziati, compreso lo stesso Albert Einstein. Lo storico della fisica Peter Galison (2004) descrive gli enormi sforzi compiuti all'epoca per sincronizzare gli orologi a distanza al fine di ottenere *l'ora unica mondiale*. Il coordinamento del tempo nell'Europa centrale, ricorda Galison, non solo era solo una questione tecnica rilevante per l'industria orologiera, l'esercito e le ferrovie, ma anche un simbolo del mondo interconnesso e accelerato della modernità:

[I]n the 1890s the establishment of "universal" or "cosmic" time was both practical and more than practical - a boon to communication and transportation but also a "noiseless revolution" that would bring progress in all spheres of cultural and personal life (2000, p. 373).¹³

[T]he network of electrical chronocoordination signified political, cultural, and technical unity all at once (2000, p. 389).¹⁴

Galison sostiene che la coordinazione degli orologi rappresentava un'espressione di democrazia, cittadinanza mondiale e antianarchismo. Ogni orologio simboleggiava l'individuo e la coordinazione tra orologi distanti costituiva il collegamento tra persone e popoli.

In quegli anni Einstein non si occupava ancora di orologi, ma nel 1895, appena sedicenne, era già molto interessato alla natura della radiazione elettromagnetica. Quando nel 1902 si presentò all'ufficio brevetti di Berna, trovò un mondo in cui la coordinazione degli orologi era un problema pratico che richiedeva soluzioni pratiche e brevettabili. Einstein affrontò il problema della sincronizzazione degli orologi a distanza *convenzionalizzando* la simultaneità. Questo permise di sincronizzare le linee ferroviarie e stabilire la longitudine, e successivamente di fissare i fusi orari. Galison scrive:

Einstein seized on this new, conventional simultaneity machine and installed it at the principled beginning of his new physics. In a certain sense he had completed the grand time coordination project of the nineteenth century, but by eliminating the master clock and **raising the conventionally set time to a physical principle**, he had launched a distinctively modern twentieth-century physics of relativity (2000, p. 389).¹⁵

¹³ “[N]egli anni 1890, l'istituzione di un'ora 'universale' o 'cosmica' era sia pratica che oltre il pratico - un vantaggio per la comunicazione e il trasporto, ma anche una 'rivoluzione silenziosa' che avrebbe portato progresso in tutte le sfere della vita culturale e personale.”

¹⁴ “[I]l reticolo di coordinazione cronoelettrica significava unità politica, culturale e tecnica allo stesso tempo.”

¹⁵ “Einstein sfruttò questa nuova macchina di simultaneità convenzionale e la installò come principio fondamentale della sua nuova fisica. In un certo senso, completò il grande progetto di coordinazione del tempo del diciannovesimo secolo, ma eliminando l'orologio maestro e **elevando il tempo convenzionalmente impostato a principio fisico**, lanciò una fisica della relatività distintamente moderna del ventesimo secolo.”

Collegando gli orologi tra loro per mezzo di segnali elettromagnetici, il reticolo di orologi di Einstein riduceva il tempo a una procedura di sincronizzazione. Lo schema einsteiniano di unificazione degli orologi si spinse molto lontano “andando oltre le città, i paesi, gli imperi, i continenti, e lo stesso Globo, sino a raggiungere l'intero Universo infinito, e ormai pseudo-cartesiano” (Galison, 2004, p. 191). Tuttavia, nonostante la sua procedura di coordinazione degli orologi si basasse su decenni di intensi sforzi per l'unificazione elettromagnetica del tempo, Einstein aveva eliminato un elemento cruciale della visione dell'epoca. Nell'infinito sistema einsteiniano non c'era nessun orologio maestro. Si trattava di un sistema coordinato di estensione spaziotemporale infinita, ma tale infinito non aveva centro. Einstein, conclude Galison (2000), aveva aperto la “zona di unificazione” progettando una macchina che metteva in crisi la categoria metafisica di centralità.

Dietro i tentativi di distribuire il tempo coordinato alla società si celava un'immagine del tempo sempre più identificata con la sua misurazione. Chronos diventa quindi il tempo che scorre identicamente per tutti da un luogo all'altro e di cui facciamo esperienza attraverso le letture successive di un orologio (Rämö, 1999). Pensato come progressione lineare del tempo (Roberts, 2003) rappresenta la forma ordinatrice dell'accadere permettendo di costruire una *cronologia* degli eventi che si svolgono in ordine sequenziale.

Tuttavia, limitarsi a considerare i fatti di un processo, a misurare il tempo e a esprimere le relazioni tra gli eventi dell'esperienza, in termini di ordine sequenziale, non va oltre il livello dell'accadimento. Per cogliere il significato degli avvenimenti, è necessario considerare la controparte qualitativa greca del tempo, cioè *kairos*.

Se chronos è un tempo “esterno” che scorre uniformemente, *kairos* indica un “momento critico” o di svolta che apre a nuove opportunità negli individui (Smith, 1969). Kairos sfida la progressione lineare e prevedibile di chronos, offrendo la possibilità di una “nuova creazione”. È il tempo dell'opportunità, l'“occasione” che segna una discontinuità. Kairos rappresenta un momento significativo in cui accade qualcosa di speciale; quell'attimo in cui “le forze dell'uomo si mantengono in un equilibrio instabile, nel quale il giogo della bilancia sta orizzontale” (Philippson, 1949, p. 92). D'altra parte, kairos è anche il “momento giusto” per fare qualcosa, “l'attimo realizzatore, decisivo, per il fiorire di un'azione” (p. 91). Unendo gli aspetti dell'azione e del tempo, kairos è quindi connesso con la phronesis, una delle tre attività dell'uomo, insieme all'episteme e alla techne, messe in luce da Aristotele (Rämö, 1999). Kairos indica il momento giusto per agire con saggezza pratica e giudizio, richiedendo una connessione profonda con il proprio *mondo interno*.

La progressione lineare, continua e uniforme di *chronos* risuona con il *tempo esterno* della fisica classica, poiché sia i rintocchi omogenei dell'orologio che l'ente matematico-parametro temporale *t* ordinano numericamente gli eventi. Tuttavia, come osserva Prigogine, riprendendo Aristotele, il tempo esterno non permette di cogliere la *prospettiva qualitativa del prima e del dopo* un accadimento particolare:

Il tempo si misura attraverso il moto, *ma secondo la prospettiva di un prima e di un dopo*. Il tempo si misura certo con l'orologio, con un movimento periodico qualunque, con uno spostamento, ma a tutte queste misure bisogna aggiungere la prospettiva del prima e del dopo (2007, p. 183).

È infatti il *tempo interno* della scienza della complessità a fornire questa prospettiva. Il tempo interno è un tempo che si storicizza, dove il processo storico rappresenta il singolare cammino evolutivo di un sistema segnato da una successione di biforcazioni (I. Prigogine & Stengers, 1981, p. 276). I punti di biforcazione risuonano con i momenti "giusti" o "critici" di kairòs, poiché entrambi danno luogo a cambiamenti strutturali improvvisi che sfidano la progressione lineare e prevedibile dei fenomeni.

Inoltre, l'ente matematico operatore-tempo interno di Prigogine ha la proprietà di separare passato e futuro con un intervallo di tempo caratteristico, contrariamente alla solita immagine del presente come punto sull'asse del tempo. Prigogine parla quindi di "durata" del presente paragonandolo al concetto di durata di Henri Bergson (Mainzer et al., 2002, p. 105). È possibile scorgere un'analogia tra l'operatore temporale di Prigogine e il tempo vissuto soggettivamente, caratterizzato dai momenti intensi e significativi di kairòs, che creano una profonda *immersione temporale* e una *dilatazione del presente*.

Alla luce di quanto discusso in questa seconda parte del capitolo, siamo ora pronti per caratterizzare le strutture temporali che possono aiutarci a riconoscere le immagini di tempo utilizzate dagli studenti nelle loro narrazioni. Per tenere conto del fatto che queste proprietà sono state formulate a partire dalle strutture temporali proprie della fisica (scienza classica e scienza della complessità) e arricchite dal pensiero greco sui "volti" del tempo, le abbiamo raggruppate in due categorie chiamate "tempo esterno-cronologico" e "tempo interno-kairologico".

	<i>Tempo esterno-cronologico</i>	<i>Tempo interno-kairologico</i>
È una struttura:	<p>esterna agli eventi e identica per tutti i sistemi. In particolare, il tempo esterno può essere:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ontologicamente concepito come un contenitore, oppure - pensato come una struttura coordinata, standardizzata e convenzionalmente costruita (<i>tempo dell'orologio</i>) per organizzare gli eventi <p>(Universalità)</p>	<p>radicata nelle dinamiche interne dei processi. Inoltre, è una struttura caratteristica e intrinseca dei sistemi.</p> <p>(Particolarità)</p>
	<p>caratterizzata da continuità, uniformità, periodicità, prevedibilità e riproducibilità dei fenomeni</p> <p>(Progressione lineare: <i>chronos</i>)</p>	<p>caratterizzata da discontinuità: al variare delle condizioni possono verificarsi cambiamenti bruschi e imprevedibili</p> <p>(Sfida alla progressione lineare di <i>chronos</i>: <i>kairos</i>)</p>
	<p>non suscettibile di cambiamento e imperturbabile dagli eventi</p> <p>(Bassa sensibilità a <i>rumori</i> esterni)</p>	<p>suscettibile di cambiamento e perturbabile dagli eventi esterni e dalle dinamiche interne ai sistemi</p> <p>(Alta sensibilità a <i>rumori</i> esterni e interni)</p>
È espressione di ordine e di regolarità	<p>decisi convenzionalmente dall'“esterno” e che manifestano gli aspetti di standardizzazione basati sulla simmetria (omogeneità e isotropia) dello spazio e del tempo</p> <p>(<i>Custode</i> di un ordine)</p>	<p>emergenti dalle dinamiche interne contingenti ai fenomeni al variare delle condizioni esterne; le strutture ordinate possono essere il risultato della rottura di simmetria spaziale e/o temporale di un dato sistema</p> <p>(<i>Sorgente</i> di un nuovo ordine)</p>

<p>Descrive:</p>	<p>il movimento, inteso come dispiegamento (<i>srotolamento</i>) di una traiettoria nello spazio-tempo caratterizzato da una successione di istanti, tutti della stessa importanza</p> <p>Corollario: - non esiste un momento più significativo degli altri - non c'è un <i>prima</i> e un <i>dopo</i> e, dunque, non c'è una storia (i fenomeni non si storicizzano)</p> <p>(Visione <i>statica</i> del mondo)</p>	<p>il <i>divenire</i>, cioè il cambiamento strutturale <i>qualitativo</i> e <i>irreversibile</i> caratteristico dell'evoluzione di un sistema/fenomeno che diventa così un <i>oggetto storico</i></p> <p>Corollario: Esiste un momento critico (<i>kairos</i>) che segna un <i>prima</i> e un <i>dopo</i> in cui - possono emergere nuove strutture ordinate di complessità "superiore", oppure - si presenta una scelta (<i>futuro aperto</i> dell'evoluzione) che può chiamare in causa il <i>rumore interno</i></p> <p>(Visione <i>dinamica</i> del mondo)</p>
<p>Può essere associata a un individuo che si percepisce come:</p>	<p>uno "spettatore" del mondo dal quale resta separato, non si sente parte di esso e lo guarda da "fuori"</p> <p>(<i>Passività</i>)</p>	<p>un "attore" e uno spettatore" del mondo che agisce localmente e pensa globalmente (assenza di separazione tra individuo e ambiente)</p> <p>(<i>Agency</i>)</p>

Concludiamo il nostro ragionamento mettendo in relazione le strutture del tempo esterno-cronologico e del tempo interno-kairologico con le categorie del *tempo dell'orologio* e del *tempo dell'esperienza/natura*, emerse nella prima parte del capitolo dall'analisi dei due campioni di dati costituiti dai saggi di futuro e dai racconti di complessità.

	<i>Tempo dell'orologio</i>	<i>Tempo dell'esperienza/natura</i>
1	Il tempo si struttura intorno a routine (anche quotidiane) elaborate sui ritmi veloci della società	Il tempo si struttura intorno ai ritmi della natura
2	Il tempo è quantificato dall'orologio e suddiviso in blocchi di attività "slegate", cioè indipendenti, tra loro (come lavoro e tempo libero) e distribuite in momenti diversi della giornata o in giorni distinti della settimana	Il tempo non è quello indicato dall'orologio, ma il momento di fare qualcosa è legato alle esperienze vissute dai personaggi
3	Il tempo è pensato come una <i>risorsa</i> da gestire al meglio e ottimizzare	Il tempo prezioso è quello delle esperienze vissute, che lasciano una traccia nella memoria e guidano il presente e il futuro
4	Le relazioni con gli altri, regolate e modellate dalle routine temporali, riflettono dinamiche di <i>comfort zone</i> e <i>echo chamber</i>	Il tempo delle relazioni con l'alterità diventa un'occasione per guardarsi con occhi altri, scoprendo nuovi aspetti di sé
5	La natura è il luogo del rifugio dai ritmi incalzanti della società	La <i>complessità</i> del mondo di cui si è parte invita a mettersi in gioco e ad esplorare nuove strade che conducono a nuove consapevolezze

Possiamo considerare le prime tre categorie del *tempo dell'orologio* come una specificazione delle proprietà di *universalità* e *progressione lineare* che caratterizzano il tempo esterno-cronologico, mentre la quarta e la quinta categoria rispecchiano l'atteggiamento di *passività* e la *visione statica del mondo* presenti nei saggi di futuro. Analogamente, le prime tre categorie del *tempo dell'esperienza/natura* possono essere viste come un'esplicitazione delle proprietà di *particolarità* e *sfida alla progressione lineare* tipiche del tempo interno-kairologico, mentre la quarta e la quinta categoria esprimono l'*agency* dei protagonisti dei racconti di complessità e la loro *visione dinamica del mondo*.

Le strutture temporali della fisica classica e della complessità ci hanno permesso di formulare proprietà aiutano a orientarsi negli scritti degli studenti e a riconoscere le *immagini di tempo* emergenti. Questo risultato invita a riflettere sull'importanza di progettare attività didattiche interdisciplinari centrate sulle strutture temporali della fisica, in particolare della fisica dei sistemi complessi, che è assente nel curriculum scolastico. Attività di questo tipo possono rivelarsi estremamente preziose nell'aiutare gli studenti a esplicitare le loro concezioni di tempo e ad acquisire una consapevolezza sui modi con cui si rapportano alle strutture temporali. In altri termini, riprendendo Hartmut Rosa, poiché le concezioni personali del tempo riguardano chi siamo e con le relazioni che intrecciamo con gli altri e con il mondo, la fisica può contribuire allo sviluppo dell'identità di ragazze e ragazzi nell'età dell'adolescenza.

1.3 Domande di ricerca della tesi

Arrivati a questo punto, si sviluppa l'idea di "analizzare il sapere", in particolare la scienza della complessità, attraverso le categorie del *tempo interno-kaiologico* per favorire la progettazione di attività didattiche interdisciplinari che, a partire dalle strutture temporali della fisica, possano aiutare gli studenti a esplicitare le loro concezioni di tempo e a riflettere sul loro rapporto con esso. Le domande di ricerca della tesi sono le seguenti:

- Quale approccio matematico alla scienza della complessità si presta meglio a evidenziare la struttura del *tempo interno-kaiologico*?
- In che modo l'interdisciplinarietà nelle STEM, in particolare tra fisica e chimica, può arricchire la riflessione sui concetti e sulle proprietà delle strutture temporali della complessità?

Risponderemo alla prima domanda nel Capitolo 2 e alla seconda domanda nel Capitolo 4. Nel Capitolo 3, invece, esploreremo in che modo la scienza della complessità ha influenzato altri ambiti della conoscenza, con l'idea che nuove prospettive e nuovi linguaggi possano mettere in evidenza l'importanza dei concetti fisici e della struttura del tempo interno sia all'interno sia al di fuori della scienza. Pertanto, la domanda a cui risponderemo nel Capitolo 3 è:

- In che misura e in quali modi diversi ambiti della conoscenza hanno tratto ispirazione, valorizzato, elaborato e ampliato il *pensiero della complessità* della fisica e, più in generale, della scienza?

Capitolo 2

Esplorazione dinamico-evolutiva dei principali concetti della Fisica dei Sistemi Complessi

The concept of complexity thus continues to wander around in limbo between ontology and epistemology. The desire to define it as a property of the real world clashes with the vagueness of the definitions of an empirical nature and with the contradictions to which the formal definitions ... give rise. Furthermore, every time it falls into the purely epistemological sphere it appears as a disillusioned and pessimistic (postmodern) version of the concept of complication.

Giorgio Israel - The Science of Complexity: Epistemological Problems and Perspectives

Introduzione

Parlando della scienza della complessità, il matematico e storico della scienza Giorgio Israel (2005) sostiene che i termini scientifici possono essere grosso modo divisi in due categorie: “those that are introduced by means of a precise and even formal definition ... and those that are drawn from everyday language and which have further to travel before they attain the status of an unequivocal definition” (p. 479).¹⁶ La parola “complessità” (dal latino *complecti*, afferrare, comprendere, abbracciare) appartiene alla seconda categoria ed è particolarmente resistente a una definizione precisa. Anche perché viene spesso confusa con la parola “complicazione” (dal latino *complicare*, piegare, avvolgere), e perché entrambi i termini sono per lo più usati per significare il contrario di “semplice”.

Questa caratterizzazione negativa, afferma Israel, risulta efficace nonostante la sua vaghezza, in quanto coglie uno degli aspetti centrali del ruolo svolto dal concetto di complessità nella scienza contemporanea: “the concept of complexity ... consists of the radical opposition to a central idea of classical science, namely that the structure of the world is fundamentally simple

¹⁶ “quelli che vengono introdotti attraverso una definizione precisa e formale e quelli che sono tratti dal linguaggio quotidiano e che hanno ancora molta strada da fare prima di raggiungere lo status di definizione inequivocabile.”

and that the essence of scientific analysis lies in resolving (dissolving) the apparent complexity of phenomena into its simple constituent elements” (2005, pp. 1–2).¹⁷

La nozione di complessità racchiude l'idea generale che la maggioranza dei fenomeni non può essere affrontata in termini di riduzionismo classico, cioè non può essere concepita come il risultato delle interazioni tra parti separate. La scienza della complessità si basa sulla negazione del principio secondo cui il tutto è la somma delle parti, ovvero “predicates a ‘holistic’ view, the need to consider systems as an integrated whole that cannot be broken down into simple elements. The science of complexity aims at visions of the ‘whole’” (p. 3).¹⁸

L'idea che “il tutto non è la somma delle parti” ha come corollario che in un sistema complesso si verificano (“emergono”) proprietà “nuove” o “inaspettate” non prevedibili analizzando il comportamento dei singoli componenti. In estrema sintesi, afferma il matematico, olistico ed emergenza sono le caratteristiche principali della nozione di complessità.

Il vasto e frammentato campo della scienza della complessità è il risultato dell'intreccio tra numerose correnti storiche. Seguendo Israel, è possibile raggruppare queste correnti in tre filoni principali.

Il primo filone è rappresentato dalle riflessioni teoriche sviluppate in diversi settori scientifici, come la cibernetica e la teoria dell'informazione, e prima ancora lo studio dei fenomeni di omeostasi, più tardi noti come feedback, le cui manifestazioni più note consistono nel lavoro di von Bertalanffy sulla teoria dei sistemi. A queste considerazioni si collegano quelle più recenti sui sistemi auto-organizzanti (Ilya Prigogine) e sull’“autopoiesi” (Humberto Maturana e Francisco Varela).

Il secondo filone è radicato, paradossalmente, nell'ambito più classico e riduzionista, quello dei sistemi dinamici deterministici. Alcuni autori hanno osservato che la teoria dei sistemi dinamici ha concettualizzato molti dei principi fondamentali della scienza della complessità (Goldstein, 2001). Inoltre, Israel osserva che il primo filone - sia che si tratti dell'idea di sistema, dell'analisi degli stati lontani dall'equilibrio alla Prigogine, o dell'idea di feedback che è strettamente connessa a quella di ciclo limite - ha legami molto stretti con questo secondo filone classico.

Il terzo filone, infine, si differenzia nettamente dagli approcci precedenti. Si tratta della teoria dei giochi che prefigura un nuovo tipo di matematica basata su un'analisi di tipo combinatorio, su metodi di punto fisso o di analisi convessa. Comprende anche teorie basate su un approccio strettamente probabilistico o su idee tratte dalla teoria evolutiva di Darwin.

Nel Capitolo 1, partendo dai concetti di *tempo esterno* e *tempo interno* nella fisica, messi in luce da Prigogine, abbiamo costruito una griglia di proprietà temporali che ci ha permesso di interpretare l'idea sensibilizzante che ha costituito la “chiave di accesso e di analisi” dei dati, ossia la distinzione tra il “tempo dell'orologio” e il “tempo della natura/esperienza”.

¹⁷ “il concetto di complessità ... consiste nella radicale opposizione a un'idea centrale della scienza classica, ovvero che la struttura del mondo sia fondamentalmente semplice e che l'essenza dell'analisi scientifica risieda nel risolvere (dissolvere) l'apparente complessità dei fenomeni nei suoi semplici elementi costitutivi.”

¹⁸ “predica una visione ‘olistica’, la necessità di considerare i sistemi come un insieme integrato che non può essere scomposto in elementi semplici. La scienza della complessità mira a visioni del ‘tutto’.”

Lasciandoci ispirare dalle riflessioni del sociologo Urry, abbiamo formulato cinque categorie per ciascuno dei due “tempi” e, successivamente, le abbiamo applicate agli scritti degli studenti, i saggi di futuro e i racconti di complessità. Ci siamo accorti che gli studenti utilizzano strutture temporali diverse a seconda dei contesti. Nello specifico, nei saggi prevale l’immagine del “tempo dell’orologio”, mentre nei racconti emerge il “tempo della natura/esperienza”. Inoltre, abbiamo osservato che le proprietà del “tempo esterno-cronologico” e quelle del “tempo interno-kairologico” possono essere messe in relazione, rispettivamente, con le categorie del “tempo dell’orologio” e del “tempo della natura/esperienza”. In altri termini, in un certo senso, diciamo che il “tempo esterno-cronologico” include il “tempo dell’orologio” e il “tempo interno-kairologico” incorpora il “tempo della natura/esperienza”.

Ricordiamo che i sei racconti di complessità rappresentano l’esito di un’attività interdisciplinare co-progettata da insegnanti di fisica e di lettere che mirava ad avvicinare gli studenti, fin dai primi anni della scuola superiore, ai concetti base della scienza della complessità per attivare una riflessione su sé stessi e sulla loro identità come membri di una *società complessa*. Il fatto che un’attività di questo tipo abbia favorito l’emergere negli scritti degli studenti di un’immagine temporale, il “tempo della natura/esperienza”, che è possibile mettere in relazione alla struttura del *tempo interno-kairologico*, ci ha permesso di formulare la seguente congettura: la progettazione di attività didattiche interdisciplinari, a partire dai concetti fisici della complessità e mirate a far emergere la struttura del *tempo interno-kairologico*, può avere una grande potenzialità e rivelarsi particolarmente significativa in termini di formazione identitaria.

Concentrandosi sulle fondamenta dinamiche dei sistemi complessi, Prigogine (1991) ha fuso la teoria dei sistemi dinamici non lineari e il concetto centrale di attrattore con i costrutti sviluppati nell’ambito della termodinamica lontana dall’equilibrio, che egli stesso aveva inaugurato. Questa integrazione ha dato vita a un approccio dinamico-evolutivo nella scienza della complessità, il quale ha aperto nuove prospettive su una struttura temporale alternativa rispetto alla visione della scienza classica. Nello specifico, mirando a una comprensione approfondita dei meccanismi che conducono alla nascita della complessità, come l’insorgere di comportamenti caotici, la manifestazione di rotture di simmetria in condizioni lontane dall’equilibrio, o la formazione di correlazioni spaziali macroscopiche, lo scienziato si è interrogato sul significato dinamico dell’irreversibilità temporale nei fenomeni naturali.

In questo capitolo, presentiamo i principali aspetti concettuali relativi all’approccio dinamico-evolutivo dei sistemi complessi che permettono di evidenziare la struttura temporale della scienza della complessità, descritta nel capitolo precedente. I concetti selezionati risuonano, infatti, con le seguenti proprietà del tempo interno-kairologico: *Particolarità, Sfida alla progressione lineare di chronos: kairos, Alta sensibilità ai rumori interni ed esterni, Sorgente di un nuovo ordine e Visione dinamica del mondo*.

Per chiarezza espositiva, elenchiamo brevemente i contenuti di questo capitolo. Dopo aver riassunto le principali tappe della fisica che hanno contribuito a passare da una visione statica a una dinamica del mondo, ci addentreremo nel formalismo matematico, presentando gli

elementi della teoria dei sistemi dinamici e della termodinamica lontana dall'equilibrio rilevanti per lo studio della complessità. Discuteremo i principali aspetti del comportamento caotico dei sistemi dinamici non lineari e approfondiremo i fenomeni emergenti delle strutture dissipative che sorgono in condizioni lontane dall'equilibrio. In particolare, descriveremo la formazione di nuove strutture macroscopiche ordinate attraverso i processi di auto-organizzazione, esplorando i concetti di non-equilibrio termodinamico, instabilità, fluttuazione, biforcazione, attrattore e rottura di simmetria. Successivamente, ci concentreremo su due importanti tipologie di biforcazione, che riprenderemo nel Capitolo 4 per descrivere due fenomeni di auto-organizzazione su cui si basano gli esperimenti proposti in una classe seconda di liceo scientifico. Concluderemo con alcuni cenni alla descrizione stocastica dei sistemi dinamici complessi per fornire un'idea intuitiva del “volto probabilistico” del comportamento complesso. Infatti, vedremo che in prossimità dei punti di biforcazione, il rumore interno generato spontaneamente dai sistemi si amplifica, producendo correlazioni spaziali a lungo raggio.

2.1 Evoluzione dei sistemi complessi

Per Prigogine l'essenza della complessità si trova nella capacità che hanno alcuni sistemi di cambiare il loro comportamento e di *trasformarsi* al variare delle condizioni ambientali esterne. Per chiarire la sua idea, lo scienziato propone una metafora esemplificativa. Un centimetro cubo d'acqua contiene un numero enorme di molecole e queste interagiscono fra loro. Tuttavia, non sono solo le interazioni a definire *complesso* il sistema poiché in esso non si verifica alcuna attività coordinata. Esponendo, però, questo centimetro cubo d'acqua alle condizioni di una tempesta invernale, si potrebbe assistere alla formazione di un *complesso* fiocco di neve. Cioè, la complessità, per lo scienziato, ha a che fare con la risposta comportamentale di un sistema al variare di alcune condizioni, piuttosto che con una caratteristica che opera indipendentemente da ciò che avviene nell'ambiente circostante. In altre parole, per parlare di complessità non basta che i sistemi siano costituiti da un elevato numero di elementi che interagiscono fra di loro, ma occorre un'attività coordinata. Per questo sarebbe “più naturale, o meno ambiguo, parlare di *comportamento complesso* piuttosto che di sistemi complessi” (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 9).

Una delle caratteristiche essenziali dei sistemi complessi secondo l'approccio dinamico-evolutivo alla scienza della complessità, che unisce i concetti della teoria dei sistemi dinamici non lineari con quelli della termodinamica di non-equilibrio, è la capacità, sotto certe condizioni, di eseguire transizioni tra stati diversi (I. Prigogine & Stengers, 1981). Come abbiamo già detto nel capitolo precedente, i fenomeni di transizione hanno una natura collettiva, cioè derivano dalle interazioni tra le molte unità costituenti, e danno luogo a cambiamenti qualitativi profondi nei sistemi, come l'apparizione di nuove strutture spaziali e/o temporali ordinate.

Prima di esaminare il formalismo matematico dei sistemi complessi, è opportuno riepilogare i principali sviluppi avvenuti nella fisica che hanno segnato il passaggio dalla *visione statica* alla *visione dinamica* del mondo.

2.1.1 Dalla visione statica alla visione dinamica del mondo: nascita della complessità in fisica

Nella seconda parte del Capitolo 1, abbiamo esaminato come la fisica classica, basata sulla replicabilità del metodo sperimentale, enfatizzi la regolarità e la stabilità dei fenomeni naturali, proponendo così una *visione statica del mondo*. Al contrario, gli studi sulla complessità in fisica hanno rivelato i processi evolutivi e trasformativi che avvengono in molti sistemi, inclusa l'emergenza di nuove strutture ordinate spaziali e/o temporali.

Prigogine (1980) richiama il fatto che d'Alembert considerava il tempo della dinamica come un semplice parametro geometrico, mentre Lagrange, più di cento anni prima dei lavori di Einstein e Minkowski, aveva già delineato la dinamica come una geometria quadridimensionale. In questa concezione geometrica della dinamica, futuro e passato svolgono lo stesso ruolo: le linee di mondo, ossia le traiettorie seguite dalle particelle o dai corpi, possono essere tracciate verso il futuro che verso il passato.

L'origine della visione statica del mondo affonda le sue radici nelle prime fasi del pensiero occidentale (Sambursky & Geymonat, 1959). Talete, uno dei più importanti esponenti della scuola milesiana, concepiva l'esistenza di una sostanza primordiale, l'acqua, alla quale potevano essere ricondotte tutte le varie manifestazioni della natura. Per Talete, i cambiamenti nei fenomeni fisici erano considerati semplici illusioni, mentre l'universo era visto come un *sistema conservativo* nel quale una sostanza fondamentale rimaneva immutata nonostante le apparenti mutazioni (I. Prigogine, 1980). Duemila anni dopo, Newton e Leibniz ampliarono questa visione conservativa, sviluppando leggi quantitative per spiegare il moto dei corpi celesti e degli oggetti soggetti alla forza di gravità terrestre. La meccanica classica diventa così definito il dominio dei sistemi conservativi e reversibili rispetto al tempo. Tuttavia, con il passare del tempo, è diventato evidente che una descrizione della natura in cui passato e futuro hanno lo stesso status non è applicabile a tutti i fenomeni. Scrive Prigogine:

Everybody observes that two liquids put into the same vessel generally diffuse toward some homogeneous mixture. In this experiment, the direction of time is essential. We observe progressive homogenization, and the one-sidedness of time becomes evident in the fact that we do not observe spontaneous phase separation of the two mixed liquids. But for a long time such phenomena were excluded from the fundamental description of physics. All time-oriented processes were considered to be the effect of special, "improbable" initial conditions (I. Prigogine, 1980, p. 12).¹⁹

¹⁹ "Tutti osservano che due liquidi messi nello stesso recipiente diffondono generalmente verso una miscela omogenea. In questo esperimento, la direzione del tempo è essenziale. Osserviamo una progressiva omogeneizzazione e l'unilateralità del tempo diventa evidente nel fatto che non osserviamo una separazione di fase spontanea dei due liquidi miscelati. Ma per molto tempo questi fenomeni sono stati esclusi dalla descrizione

Dall'inizio del XX secolo la comunità scientifica prende gradualmente le distanze dalla visione statica del mondo offerta dalla fisica classica. In quasi tutti i campi della scienza prevale una visione dinamica in cui il tempo gioca un ruolo essenziale. Il concetto di evoluzione diventa centrale per la comprensione del mondo. Come abbiamo già detto, l'idea di evoluzione era stata formulata nel XIX secolo quasi contemporaneamente in fisica, biologia e sociologia, anche se con significati specifici abbastanza diversi. In fisica prende forma con la seconda legge della termodinamica attraverso l'introduzione di una nuova funzione, l'entropia, che aumenta come risultato di processi irreversibili. La seconda legge esprime l'aumento del disordine molecolare all'equilibrio termodinamico, lo stato corrispondente alla massima probabilità. Pertanto, "the law of entropy increase was simply a law of increasing disorganization" (Nicolis & Prigogine, 1977, p. 4).²⁰ D'altra parte, in biologia e in sociologia, il significato di base dell'evoluzione era esattamente l'opposto, descrivendo trasformazioni verso livelli superiori di "complessità".

Seguendo le tracce indicate da Prigogine (1977), ripercorriamo sinteticamente le principali tappe dello sviluppo della termodinamica che hanno portato alla nascita della scienza della complessità.

La seconda legge afferma che un sistema isolato evolve nel tempo verso lo stato di "equilibrio termodinamico", caratterizzato da un aumento dell'entropia fino al valore massimo. Inizialmente formulata per situazioni di equilibrio, questa legge è stata generalizzata per applicarsi anche a sistemi in condizioni di non equilibrio. Tuttavia, nel XIX secolo, la termodinamica classica si concentrava principalmente sugli stati di equilibrio, considerando il non equilibrio come una perturbazione che impediva la formazione di strutture ordinate. Questa visione cambiò radicalmente con le scoperte di Onsager delle relazioni di reciprocità, che estesero il campo della termodinamica alla "termodinamica lineare di non-equilibrio". Un esempio di applicazione di questa teoria è la diffusione termica: quando si applica un gradiente di temperatura a una miscela di due gas diversi, uno si accumula sulla parete calda e l'altro sulla parete fredda, riducendo l'entropia rispetto alla miscela uniforme. Questo fenomeno mostra come il non equilibrio possa effettivamente essere una fonte di ordine, contrariamente alla concezione prevalente. Tuttavia, la termodinamica lineare di non equilibrio non può spiegare completamente l'origine di nuove strutture ordinate, poiché i vincoli imposti da questa teoria impediscono solo il raggiungimento dell'equilibrio.

La nascita della complessità può essere fatta risalire agli anni Sessanta del XX secolo, quando lo studio di sistemi molto lontani dall'equilibrio ha rivelato fenomeni sorprendenti, come l'insorgenza spontanea di strutture spaziali e/o temporali con una simmetria ridotta rispetto agli stati di equilibrio. La termodinamica moderna dei sistemi lontani dall'equilibrio descrive l'emergenza di tali *stati ordinati* utilizzando i concetti matematici della scienza non lineare. Modellizzando le transizioni di un sistema tra stati diversi, la scienza non lineare costituisce un contesto naturale nel quale parlare di complessità. La "teoria delle biforcazioni" in particolare

fondamentale della fisica. Tutti i processi orientati al tempo erano considerati l'effetto di condizioni iniziali speciali e 'improbabili'."

²⁰ "la legge di aumento dell'entropia era semplicemente una legge di crescente disorganizzazione"

studia l'apparizione di nuovi comportamenti nei sistemi che attraversano "momenti critici" (punti di biforcazione). Le soluzioni delle equazioni differenziali non lineari che descrivono lo sviluppo dinamico di questi sistemi mostrano come possano emergere comportamenti complessi in determinate condizioni.

Siamo interessati alle biforcazioni che si verificano quando, dall'esterno, viene aumentato il valore di uno o più parametri caratteristici di un dato sistema che indicano la distanza del sistema dal suo stato di equilibrio. I diagrammi di biforcazione mostrano l'evoluzione temporale dei sistemi oltre i valori di soglia dei parametri, rappresentando le *rottture di simmetria* spaziali e/o temporali che caratterizzano il comportamento complesso. La soluzione corrispondente allo stato di equilibrio dei sistemi è chiamata "ramo termodinamico". Variando i vincoli in modo da forzare un sistema sempre più lontano dall'equilibrio, il ramo termodinamico diventa instabile e il sistema evolve verso un nuovo stato corrispondente a un comportamento spaziale e/o temporale macroscopico *coerente*. Le "strutture dissipative", introdotte da Prigogine, rappresentano un nuovo tipo di organizzazione macroscopica che emerge oltre l'instabilità del ramo termodinamico, mantenute da un flusso costante di energia e/o materia. Queste strutture connettono le dinamiche interne dei sistemi complessi con le strutture spaziali e/o temporali emergenti, fornendo un nuovo paradigma per comprendere l'evoluzione dinamica dei sistemi complessi e l'irreversibilità temporale.

Le biforcazioni implicano la coesistenza di elementi deterministici e processi probabilistici. In particolare, tra due punti di biforcazione, il sistema segue leggi deterministiche, mentre nelle vicinanze dei "punti critici" le fluttuazioni diventano cruciali. Nei sistemi complessi, costituiti da un gran numero di unità (come le molecole in un volume finito di fluido), è impossibile che tutte le unità siano sempre nello stesso stato. Le strutture dissipative dell'auto-organizzazione emergono infatti dall'amplificazione delle fluttuazioni spontanee interne ai sistemi, portando all'*ordine attraverso le fluttuazioni*.

In alcuni casi, i sistemi complessi possono "scegliere" uno dei possibili rami stabili che emergono oltre l'instabilità del ramo termodinamico. Le biforcazioni introducono quindi la *storia* nella fisica, un elemento che, come osserva Prigogine, in passato sembrava riservato alle scienze biologiche, sociali e culturali. La scienza della complessità, studiando i fenomeni emergenti che comportano *rottture di simmetria* nei sistemi e l'apparizione di nuove strutture ordinate, permette alla fisica di abbracciare pienamente il concetto di *evoluzione*. Questo approccio affianca alle descrizioni dei processi di *degradazione* quelle dei processi trasformativi di *creazione*. In particolare, interpretando l'apparizione spontanea di nuove proprietà nei sistemi complessi come una manifestazione dell'irreversibilità temporale, si è ancora l'evoluzione dinamica dei sistemi all'esistenza di una direzione privilegiata del tempo, la cosiddetta "freccia del tempo".

2.2 La complessità nei sistemi dinamici, caotici e non

Nella fisica classica, dominata per lungo tempo dal paradigma newtoniano, la realtà era considerata semplice e riducibile a pochi elementi fondamentali con comportamenti regolari, riproducibili e prevedibili: “a world that could in this sense be qualified as fundamentally simple” (Nicolis & Nicolis, 2007, p. 2).²¹ Per molto tempo è prevalsa la convinzione che l’irregolarità e l’imprevedibilità dei fenomeni non siano autentiche; queste erano infatti considerate come degli inconvenienti temporanei che mascherano alcune regolarità di fondo e riflettono un’informazione incompleta sui sistemi, in relazione alla presenza di un numero di variabili e parametri impossibile da gestire. In particolare, l’irreversibilità su scala macroscopica era ritenuta solo un’apparenza dovuta alla complessità del comportamento collettivo di oggetti intrinsecamente semplici.

Unendo i concetti di *caos* e *irreversibilità*, la ricerca sui sistemi complessi in fisica ha mostrato che *visioni deterministiche* e *probabilistiche* sono sfaccettature diverse di una stessa medaglia. Scrive Prigogine:

Viviamo in un mondo pluralistico. Fenomeni dinamici semplici, come il moto periodico della Terra attorno al Sole ci appaiono come temporalmente reversibili e deterministici. Ma troviamo anche processi irreversibili, come le reazioni chimiche, e processi stocastici come la scelta tra stati di biforcazione. [...] Oggi dobbiamo riconsiderare la situazione. **Il livello fondamentale non è semplice**, neppure nella fisica classica, che per tanto tempo è stata il bastione del determinismo e della reversibilità (1991, p. 249).

I sistemi integrabili come il pendolo senza attrito o il problema dei due corpi sono stati a lungo al centro dell’interesse della fisica classica. La scoperta della varietà di comportamenti esibiti dai sistemi dinamici non integrabili ha segnato un enorme passo in avanti nella fisica e nella matematica contemporanee.

Iniziamo a esplorare il formalismo matematico introducendo gli aspetti della teoria dei sistemi dinamici che sono rilevanti per lo studio della complessità.

L’evoluzione di un sistema dinamico viene rappresentata in uno spazio astratto noto come spazio delle fasi. Supponiamo di specificare le informazioni essenziali sul sistema mediante n variabili funzioni del tempo x_1, x_2, \dots, x_n . Le variabili possono essere pensate come le componenti di un vettore a n dimensioni, pertanto lo stato del sistema al tempo t viene indicato con il vettore $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$.

Se il numero di gradi di libertà n è uguale a uno, allora lo stato del sistema può essere messo in corrispondenza con un punto su una retta, se è uguale a due con un punto su un piano, e così via. In generale, lo stato istantaneo $x(t)$ è rappresentato da un punto P_t nello spazio delle fasi n -dimensionale. Lo spazio delle fasi Γ è infatti generato dalle variabili x_1, x_2, \dots, x_n .

²¹ “un mondo che in questo senso potrebbe essere qualificato come fondamentalmente semplice”

Al passare del tempo, lo stato di un sistema cambia e il *punto rappresentativo* P_t si muove nello spazio delle fasi descrivendo una curva (o orbita) γ detta *traiettoria di fase* del sistema. La tangente a questa curva indica la velocità v del sistema nello spazio delle fasi (Figura 1).

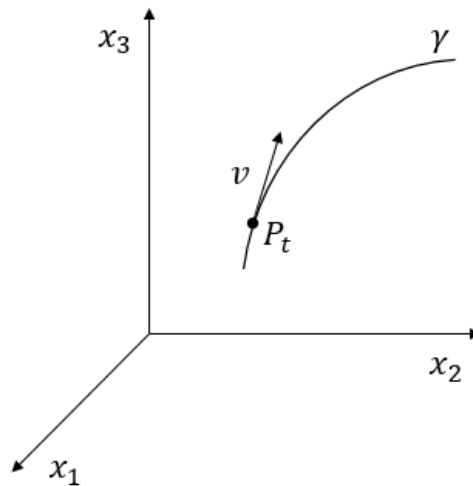


Figura 1: Traiettorie di fase γ di un sistema dinamico in uno spazio delle fasi tridimensionale Γ , generato dalle variabili x_1, x_2 e x_3 .
Immagine adattata da (Nicolis & Nicolis, 2007, p. 6)

Va sottolineato il fatto che non esiste necessariamente alcuna relazione fra lo spazio delle fasi e lo spazio fisico tridimensionale. Pertanto, la traiettoria di fase di un corpo non assomiglia necessariamente alla sua traiettoria nello spazio tridimensionale. In generale, le coordinate dello spazio delle fasi variano secondo il contesto. In un sistema meccanico, per esempio, sono la posizione e la velocità; di conseguenza, lo stato di una particella che si muove su una retta è specificato dalla sua posizione e dalla sua velocità, cioè lo spazio delle fasi è un piano.

Un sistema dinamico è deterministico se, noto il suo stato iniziale x_0 , la legge di evoluzione permette di determinare (anche se non sempre in modo esplicito) lo stato del sistema a ogni istante di tempo successivo x_t , cioè la dipendenza temporale delle variabili è della forma:

$$x_t = F^t(x_0) \quad (2.1)$$

dove F^t indica una funzione regolare tale che per ogni dato x_0 esiste un solo x_t . In particolare, le componenti del vettore F^t descrivono la variazione temporale delle variabili x_i .

Se il parametro temporale t varia in modo continuo, le leggi di evoluzione deterministiche sono equazioni differenziali. Dunque, l'evoluzione temporale di un sistema dinamico è descritta da n equazioni differenziali ordinarie che possono essere rappresentate tramite un operatore f , funzione di x_t nel seguente modo:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = f(x) \quad (2.2)$$

Nei sistemi complessi le equazioni differenziali sono non lineari, cioè la legge f dipende da x in modo non lineare. La non linearità esprime le interazioni tra gli elementi costitutivi dei sistemi.

Una proprietà importante delle traiettorie di fase che partono da punti diversi è quella di non incrociarsi mai e di possedere in ogni loro punto una tangente unica e ben definita. Questa proprietà (chiamata *non-intersezione delle traiettorie nello spazio delle fasi*) deriva dal fatto che gli stati passati e quelli futuri di un sistema deterministico sono univocamente determinati dallo stato del sistema a un dato istante di tempo. Un punto di incontro tra due traiettorie al tempo t introdurrebbe una ambiguità nella determinazione degli stati passati e futuri, pertanto il sistema non sarebbe più deterministico.

La totalità dei processi evolutivi governati da una data legge f è rappresentata dall'insieme delle traiettorie di fase consentite (o *ritratto di fase*). I processi danno origine a due classi di sistemi dinamici, *conservativi* e *dissipativi*. Consideriamo una regione $\Delta\Gamma_0$ dello spazio delle fasi Γ corrispondente agli stati iniziali di un sistema. Durante l'evoluzione, a partire da ciascun punto si sviluppa una traiettoria di fase. Al tempo t i punti raggiunti da queste traiettorie formano una regione $\Delta\Gamma_t$. Si possono verificare due situazioni:

- Un sistema è detto *conservativo* se la regione $\Delta\Gamma_t$ mantiene la stessa area (o, più in generale, misura in uno spazio n -dimensionale) di $\Delta\Gamma_0$ nel corso dell'evoluzione, $|\Delta\Gamma_t| = |\Delta\Gamma_0|$. In particolare, $\Delta\Gamma_t$ può assumere una forma e una posizione molto diversa in Γ rispetto a $\Delta\Gamma_0$.
- Un sistema si dice invece *dissipativo* se la dinamica porta a una contrazione della misura della regione iniziale $\Delta\Gamma_0$ dello spazio delle fasi.

I sistemi dinamici dissipativi hanno la proprietà di possedere stati *attrattori*. Un attrattore è il luogo dei punti a cui tendono le traiettorie di fase, provenienti da una regione attorno all'attrattore, dopo un transiente sufficientemente lungo. Una volta raggiunto l'attrattore, il sistema non evolverà più. Se un sistema dinamico possiede più attrattori, condizioni iniziali diverse possono portare ad attrattori diversi. La regione dello spazio delle fasi in cui le traiettorie convergono a un determinato attrattore è chiamata *bacino di attrazione* dell'attrattore (Figura 2).

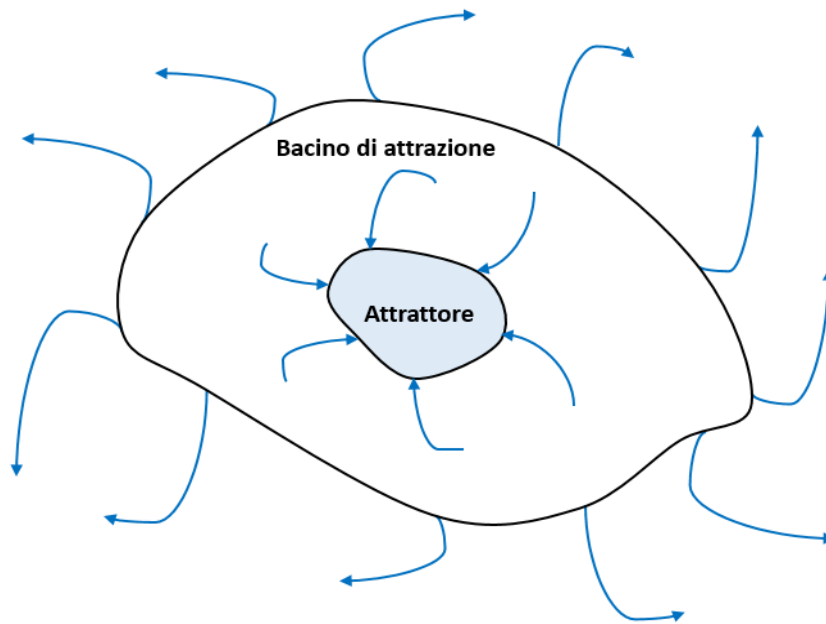


Figura 2: L'insieme dei punti che si evolvono verso un dato attrattore costituisce il bacino di attrazione dell'attrattore

Nella dinamica classica, il problema dei due corpi, ovvero lo studio del moto di due corpi che interagiscono con una forza (per esempio gravitazionale) che dipende solo dal modulo della loro distanza reciproca, appartiene alla classe dei sistemi conservativi. Tra i sistemi dissipativi, invece, troviamo il moto dei corpi in presenza di attrito. L'attrito è una particolare forma di dissipazione poiché rappresenta un modo attraverso cui i sistemi possono scambiare energia con l'ambiente. Al contrario, nei sistemi conservativi gli scambi di energia avvengono solo all'interno dei sistemi stessi. Anche la trasformazione di energia in cinetica e potenziale (come si osserva in un pendolo ideale) può essere considerata uno scambio di energia interno ai sistemi.

La differenza più importante tra sistemi conservativi e dissipativi appare quando si fornisce una *descrizione macroscopica* dei fenomeni; in questo caso, variabili globali come la temperatura, la concentrazione, la pressione, ecc., vengono usate per definire lo stato istantaneo di un sistema. Contrariamente all'equazione fondamentale della meccanica classica, che mette in relazione l'accelerazione con la forza ($m \frac{d^2r}{dt^2} = F$), nei sistemi dissipativi le equazioni di evoluzione delle variabili globali non sono invarianti per inversione temporale. I sistemi dissipativi, quindi, danno luogo a processi irreversibili. Seguendo Prigogine (1991), proponiamo un esempio di questa situazione. In una tipica reazione chimica, una molecola di specie A (per esempio idrossido OH) si combina con una molecola di specie B (per esempio idrogeno H_2) per produrre una molecola di specie C e una molecola di specie D (acqua H_2O e idrogeno atomico H). Questo processo è descritto dall'equazione chimica:



dove k indica la costante di velocità, generalmente una funzione della temperatura e della pressione. A sinistra ci sono i *reagenti* A e B che scompaiono nel corso del tempo, mentre a

destra ci sono i *prodotti* C e D che si formano con il procedere della reazione. La velocità con cui le particelle della specie A si consumano è proporzionale alla frequenza degli incontri tra le molecole A e B . In particolare, se il sistema è diluito, la frequenza degli incontri è proporzionale alla concentrazione delle due specie chimiche:

$$\frac{dc_A}{dt} = -kc_Ac_B \quad (2.4)$$

Si osserva che invertendo il tempo, $t' = -t$, e indicando con c_A' , c_B' i valori delle concentrazioni in funzione di t' , l'equazione diventa:

$$\frac{dc_A'}{dt} = kc_A'c_B' \quad (2.5)$$

che descrive un processo nel quale la specie chimica A viene prodotta anziché consumata. Ciò significa che l'equazione iniziale che descrive il processo chimico non è invariante per inversione temporale.

2.2.1 Sistemi dinamici caotici: il “caos” nella scienza della complessità

Oltre alla formazione di correlazioni spaziali macroscopiche nei sistemi lontani dall'equilibrio e alle di rotture di simmetria che portano alla nascita di nuove strutture ordinate, la complessità include anche i comportamenti caotici. Il fenomeno del “caos” è infatti uno dei cardini della scienza della complessità ed è stato ampiamente studiato nell'ambito della teoria dei sistemi dinamici non lineari. Prigogine sottolinea che la complessità è una componente inseparabile del mondo dei sistemi dinamici. Il matematico francese Henri Poincaré, vissuto a cavallo fra il XIX e il XX secolo, fondò la moderna teoria dei sistemi dinamici con l'obiettivo di esplorare i tipi di comportamento che possono emergere da equazioni non lineari accoppiate (Nicolis & Prigogine, 1991).

Nei sistemi dinamici lineari, la variazione degli effetti è proporzionale alla variazione delle loro cause, mentre nei sistemi non lineari la variazione degli effetti non è proporzionale alla variazione delle cause. La non-linearità è quindi cruciale per la complessità, poiché permette ai sistemi di evolversi verso molteplici risultati possibili, conferendo loro una sorta di “libertà di scelta” nel percorso evolutivo. Inoltre, la non-linearità sfida la distinzione tradizionale tra cause ed effetti, essendo intrinsecamente legata ai cicli di feedback in base ai quali il verificarsi di un processo influisce sul suo stesso sviluppo temporale in modo positivo (amplificandolo) o negativo (reprimendolo).

Lo sviluppo temporale non lineare può portare sia alla formazione di nuove strutture ordinate che alla comparsa del *caos*. In questo paragrafo, esploreremo i principali aspetti del comportamento caotico nei sistemi dinamici non lineari, mentre nei successivi ci concentreremo sull'emergere delle “strutture dissipative” nei sistemi lontani dall'equilibrio. Secondo il paradigma classico, è possibile predire con precisione il comportamento futuro di un sistema dinamico conoscendo le sue condizioni iniziali (posizione e quantità di moto) e le leggi dinamiche che lo governano. Tuttavia, queste previsioni sono valide solo se due condizioni sono rispettate:

- l'assenza di non-linearità, ovvero l'assenza di feedback tra i componenti del sistema;
- l'invarianza per inversione temporale, ovvero la mancanza di un cambiamento irreversibile nel tempo.

Questi principi hanno guidato la fisica newtoniana per oltre duecento anni, limitandosi ai sistemi conservativi e "chiusi" rispetto all'ambiente. Al contrario, i sistemi dinamici *dissipativi* sono "aperti", scambiando materia ed energia con l'ambiente dando luogo a processi irreversibili. Le interazioni non-lineari dei componenti del sistema possono generare effetti sinergici che promuovono l'auto-organizzazione e la formazione di nuove strutture attraverso *transizioni di non equilibrio*.

L'inizio del XX secolo ha visto la scoperta di processi naturali caratterizzati da dinamiche basate su causalità circolari (feedback), sviluppi iterativi e interazioni irreversibili orientate nel tempo, mettendo in crisi il paradigma della fisica classica. Il "problema dei tre corpi" incarna questa crisi mostrando essenzialmente che la stabilità e la regolarità nei moti risultano essere solo eccezioni: una piccola variazione (come la perturbazione dell'orbita di uno dei pianeti da parte di una cometa) può amplificarsi in modo caotico, rendendo il moto imprevedibile e non calcolabile.

Henri Poincaré, scopritore del problema dei tre corpi, ha delineato per primo le preoccupanti implicazioni di questo fenomeno per la scienza classica:

A very small cause which escapes our notice determines a considerable effect that we cannot fail to see, and then we say that the effect is due to chance. If we knew exactly the laws of nature and the situation of the universe at the initial moment, we could predict exactly the situation of that same universe at a succeeding moment. *But* even if it were the case that the natural laws had no longer any secret for us, we could still only know the initial situation *approximately*. If that enabled us to predict the succeeding situation with the *same approximation*, that is all we require, and we should say that the phenomenon has been predicted, that it is governed by laws. But it is not always so; it may happen that **small differences in the initial conditions produce very great ones in the final phenomena. A small error in the former will produce an enormous error in the latter. Prediction becomes impossible**, and we have the fortuitous phenomenon [citato in (Campbell et al., 1985, p. vii)].²²

I sistemi dinamici (non lineari) caotici sono sistemi deterministici il cui comportamento è *intrinsecamente imprevedibile* dopo intervalli di tempo relativamente brevi. Dal punto di vista

²² **"Una causa molto piccola che ci sfugge determina un effetto considerevole** che non possiamo non vedere, e allora diciamo che l'effetto è dovuto al caso. Se conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell'universo al momento iniziale, potremmo prevedere esattamente la situazione di quello stesso universo in un momento successivo. Ma anche se le leggi naturali non avessero più alcun segreto per noi, potremmo comunque conoscere solo approssimativamente la situazione iniziale. Se questo ci permettesse di prevedere con la stessa approssimazione la situazione successiva, non avremmo bisogno di altro e dovremmo dire che il fenomeno è stato previsto, che è governato da leggi. Ma non è sempre così: **può accadere che piccole differenze nelle condizioni iniziali producano differenze molto grandi nei fenomeni finali. Un piccolo errore nelle prime produrrà un enorme errore nei secondi. La previsione diventa impossibile** e si ha il fenomeno fortuito."

matematico, affinché un sistema dinamico mostri un comportamento caotico sono necessarie due condizioni fondamentali:

- l'evoluzione temporale è governata da equazioni differenziali non lineari
- lo spazio degli stati è almeno tridimensionale, cioè il sistema di equazioni differenziali che descrive l'evoluzione temporale deve consistere di almeno tre equazioni autonome del primo ordine (questa condizione deriva dal teorema di Poincaré-Bendixon).

Una caratteristica distintiva dei sistemi caotici è la loro estrema *sensibilità alle condizioni iniziali*. In altre parole, una variazione minima delle condizioni iniziali può provocare evoluzioni temporali notevolmente differenti. Questo fenomeno è noto come *caos deterministico*: "caos" perché l'evoluzione sembra imprevedibile, "deterministico" perché esiste una legge precisa che governa la dinamica dei sistemi caotici.

Consideriamo due condizioni iniziali arbitrariamente vicine, $x_1(0) = x_0$ e $x_2(0) = x_0 + \Delta(0)$. Lasciando evolvere le traiettorie di un sistema dinamico dai due punti iniziali, si otterranno le orbite $x_1(t)$ e $x_2(t)$. Al tempo t , la distanza fra le due orbite sarà $\Delta(t) = x_2(t) - x_1(t)$. Formalmente, si dice che il sistema mostra una dipendenza sensibile alle condizioni iniziali se, nel limite di $\|\Delta(0)\| \rightarrow 0$, e dopo un tempo t (definito come *orizzonte di prevedibilità*, Figura 3), la distanza delle soluzioni $\|\Delta(t)\|$ cresce esponenzialmente.

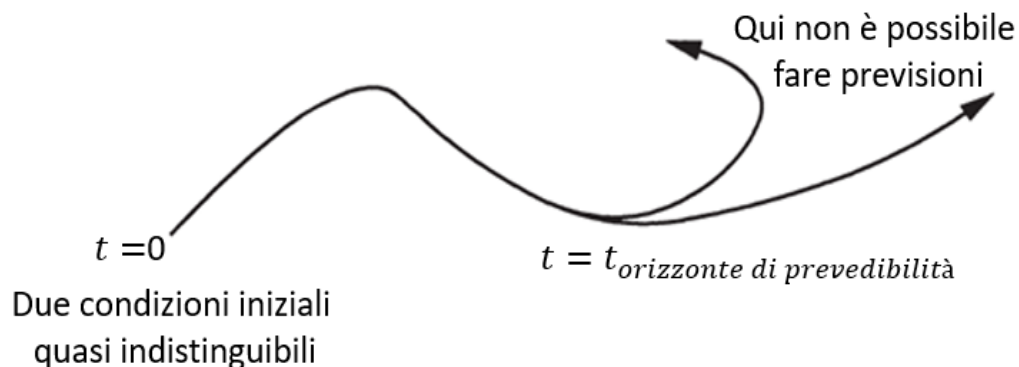


Figura 3: Immagine adattata da (Strogatz, 1994, p. 322)

Un modo per stabilire se un sistema dinamico ha un comportamento caotico consiste nel farlo evolvere partendo da condizioni iniziali vicine nello spazio delle fasi e riportare in un grafico la distanza fra le traiettorie in funzione del tempo. Se le traiettorie si separano esponenzialmente nel tempo, il sistema è caotico.

Siano $x(t)$ e $x^*(t)$ due traiettorie di un sistema dinamico caotico con condizioni iniziali rispettivamente $x(0)$ e $x^*(0)$. La distanza tra loro è approssimativamente data da:

$$\|\Delta x(t)\| = \|x(t) - x^*(t)\| \cong \varepsilon e^{\lambda t} \quad (2.6)$$

dove ε è determinato da $\|x(0) - x^*(0)\|$.

Il parametro λ è chiamato coefficiente di Lyapunov e misura la velocità con cui divergono due traiettorie inizialmente vicine nello spazio delle fasi. Matematicamente, è definito da:

$$\lambda = \frac{1}{t} \frac{\|\Delta x(t)\|}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Il coefficiente di Lyapunov indica la *caoticità* di un sistema dinamico.

In un sistema caotico, il “rumore” nelle situazioni reali o l’arrotondamento dei numeri in un calcolatore possono alterare completamente la soluzione rispetto a quella che si otterrebbe senza questi effetti. Il *caos* limita le previsioni sul comportamento del sistema nel tempo: oltre l’orizzonte di prevedibilità, non è possibile conoscere l’evoluzione di un sistema caotico.

Abbiamo visto che un sistema dinamico dissipativo è caratterizzato da una contrazione della misura della regione dello spazio delle fasi corrispondente agli stati iniziali. Inoltre, i sistemi dinamici dissipativi possiedono attrattori. Nella prossima sezione ci concentreremo sugli attrattori a punto fisso e i cicli limite periodici.

Il meteorologo americano Edward Lorenz (1963) fece una scoperta fondamentale riguardante gli attrattori nei sistemi dinamici. Mentre modellizzava le condizioni meteorologiche, notò un comportamento del tutto inaspettato, non riconducibile agli attrattori conosciuti fino ad allora. Spinto dal desiderio di comprendere l’imprevedibilità del tempo atmosferico, Lorenz semplificò le equazioni differenziali che descrivono il moto di un fluido, riducendole a un sistema di tre equazioni con tre gradi di libertà.

Durante le simulazioni al calcolatore, Lorenz osservò che il sistema mostrava un comportamento aleatorio: piccole perturbazioni locali (come *il battito d’ali di una farfalla*) venivano amplificate in un tempo brevissimo, influenzando il comportamento macroscopico globale del sistema (per esempio, la formazione di fenomeni meteorologici estremi come *tornado*). Questo fenomeno fu descritto metaforicamente come “Effetto Farfalla”, il concetto che *il battito d’ali di una farfalla in Brasile potrebbe provocare un tornado in Texas*. Questa metafora è diventata centrale nella teoria dei sistemi dinamici caotici, esprimendo la sensibilità estrema alle condizioni iniziali.

Rappresentando la traiettoria del sistema in un piano bidimensionale dello spazio delle fasi, si ottiene una struttura che ricorda la forma di una farfalla, con la traiettoria che sembra passare ripetute volte per uno stesso punto. Tuttavia, la visualizzazione nello spazio tridimensionale mostra che la traiettoria non ritorna mai esattamente sullo stesso punto (Figura 4). Questo comportamento è caratteristico di un tipo di attrattore sconosciuto fino ad allora, noto come *l’attrattore di Lorenz*.

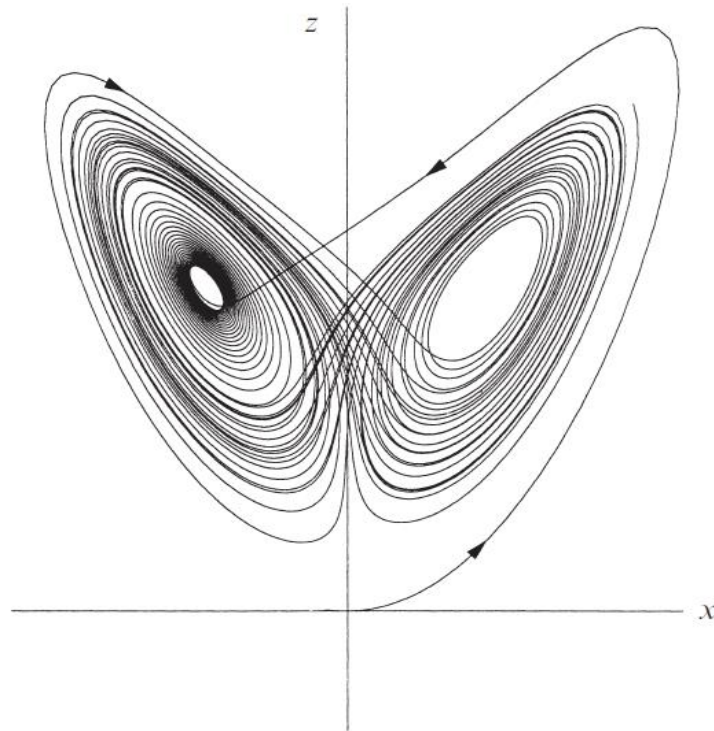


Figura 4: Attrattore di Lorenz
Immagine adattata da (Strogatz, 1994, p. 319)

L'attrattore di Lorenz appartiene alla categoria degli attrattori "strani" o caotici. Come ogni attrattore, esso rappresenta una regione finita dello spazio delle fasi verso cui tutte le traiettorie contenute nel suo bacino di attrazione tendono asintoticamente nel tempo. Ciò che rende l'attrattore strano è la sua peculiare proprietà di dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali: punti che sono inizialmente molto vicini diventano macroscopicamente separati sull'attrattore dopo un certo periodo di tempo.

2.2.2 L'insorgenza della complessità nei sistemi dinamici dissipativi (non caotici)

Nel paragrafo precedente abbiamo discusso della non-linearità dei sistemi dinamici in relazione al comportamento caotico. Nel prosieguo del capitolo descriveremo come uno sviluppo temporale non lineare possa portare, nei sistemi fisici e chimici, alla formazione di *strutture dissipative* attraverso processi di auto-organizzazione. Le strutture dissipative sono strutture macroscopiche spaziali e/o temporali ordinate che emergono dalla cooperazione degli elementi che costituiscono i sistemi, quando gli scambi di energia e/o materia con l'ambiente raggiungono valori critici.

Abbiamo detto che i sistemi dinamici dissipativi possiedono stati particolari chiamati attrattori e vedremo che questi sono dotati di *stabilità asintotica*, una proprietà che può essere messa in relazione alla "freccia del tempo", ovvero all'irreversibilità dei fenomeni a livello macroscopico. Contrariamente ai sistemi conservativi, i sistemi dissipativi non sono invarianti

rispetto all'inversione temporale, quindi, asintoticamente (cioè nel limite $t \rightarrow \infty$) raggiungono una qualche situazione *privilegiata*. A tal proposito, Prigogine scrive:

[I]n tutti i sistemi dissipativi ... [c'è] una direzione privilegiata del tempo. Potremmo immaginare un mondo in cui alcuni sistemi biologici invecchiano, mentre altri diventano più giovani; un mondo in cui alcuni sistemi dissipativi tendono all'equilibrio per $t \rightarrow +\infty$ mentre altri fanno così per $t \rightarrow -\infty$. Ma questo non è ovviamente il nostro mondo, in cui è presente una universale rottura di simmetria temporale. Fortunatamente è così, come notato da Norbert Wiener: in qualsiasi mondo entro il quale possiamo comunicare, la direzione del tempo deve essere uniforme.

Contrariamente [ai] ... sistemi dinamici conservativi, troviamo qui la stabilità asintotica.

... [I]l comportamento dissipativo è associato a una universale rottura di simmetria. ...

[T]utti i processi dissipativi ... portano a una produzione di entropia positiva. La stessa esistenza di sistemi dinamici dissipativi è una manifestazione della seconda legge della termodinamica (1991, pp. 228–229).

I fenomeni di auto-organizzazione sono descritti matematicamente da equazioni differenziali non lineari. Le strutture macroscopiche emergenti sono rappresentate dalle soluzioni di queste equazioni. Al variare delle condizioni esterne, lo stato iniziale di un sistema può diventare instabile e tendere a evolversi verso nuovi stati attrattori, come punti fissi o cicli limite, che esamineremo nel corso del capitolo.

L'evoluzione temporale degli stati di un sistema dinamico dissipativo è influenzata dalla variazione di uno o più parametri che rappresentano i modi attraverso i quali il sistema "comunica" con l'ambiente. Queste quantità relative alle interazioni del sistema con l'ambiente sono chiamate parametri di controllo e vengono indicate con λ . Una classe interessante di parametri di controllo è quella associata a un *vincolo* che allontana il sistema da un qualche stato di equilibrio, per esempio l'equilibrio termodinamico. L'espressione matematica che descrive l'evoluzione temporale di un insieme di variabili X_j che descrivono lo stato di un sistema sottoposto a un determinato vincolo di non-equilibrio è la seguente:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = f_i(\{X_j\}, \lambda), \quad i = 1, \dots, n \quad (2.8)$$

Il vincolo λ indica la distanza del sistema dall'equilibrio e può essere modificato dall'ambiente esterno. L'assenza di un vincolo equivale quindi a una situazione di equilibrio.

Scelto uno stato di equilibrio come riferimento, una volta sottoposto il sistema a dei vincoli (per esempio attraverso un flusso di materia e/o di energia da e verso l'ambiente), si assiste all'insorgenza della complessità: il sistema risponde alle condizioni esterne esibendo proprietà qualitativamente nuove. I fenomeni di transizione tra stati diversi, corrispondenti alla manifestazione della complessità, sono associati alla modellizzazione della *biforcazione* e al concetto correlato di *instabilità*.

Concludiamo questo paragrafo descrivendo qualitativamente il tipico scenario di evoluzione di un sistema complesso. Per ogni valore del parametro di controllo λ , si registra, in un determinato punto, una proprietà caratteristica del sistema X (per esempio la velocità, la

concentrazione di una specie chimica, la densità di popolazione ecc.). Se il parametro λ è inferiore a un certo valore critico λ_c , lo stato del sistema è unico e stabile, cioè il sistema è in grado di smorzare e tenere sotto controllo gli effetti delle fluttuazioni interne e/o delle perturbazioni esterne inflitte dall'ambiente. La situazione cambia radicalmente oltre il valore critico λ_c : lo stato iniziale diventa instabile e il sistema risponde alle fluttuazioni interne e/o alle perturbazioni esterne amplificando gli effetti. In particolare, l'amplificazione di piccole fluttuazioni (generate dal numero enorme di particelle che costituiscono i sistemi) comporta una rottura di simmetria dello stato di equilibrio ed è alla base dei fenomeni di auto-organizzazione. Questa transizione tra stati diversi si manifesta sotto forma di "emergenza" all'interno del sistema di tratti globali "inaspettati". Abbiamo già osservato che in alcuni casi non è possibile determinare in anticipo lo stato verso cui il sistema sarà diretto, ma saranno le fluttuazioni, casuali, a decidere. In altri termini, nella scienza della complessità, gli elementi deterministici e i processi *stocastici* si intrecciano tra loro.

2.2.3 Vincoli di non-equilibrio e instabilità

In meccanica, l'equilibrio è uno stato particolare in cui sia le velocità che le accelerazioni di tutti i punti materiali sono uguali a zero. Pertanto, un corpo è in equilibrio meccanico se la forza risultante che agisce su di esso è uguale a zero in ogni istante. Prigogine osserva che, in alcuni sistemi meccanici familiari, l'equilibrio non si realizza mai: "[L]'orbita della Terra attorno al Sole è una manifestazione di una deviazione permanente dall'equilibrio meccanico. Quest'ultimo può rendersi possibile solo con una separazione infinita fra i due corpi" (1991, p. 64).

La nozione di *equilibrio termodinamico* è nettamente differente. Contrariamente all'equilibrio meccanico, le molecole che costituiscono i sistemi fisici e chimici sono soggette a forze e si muovono di continuo in tutte le possibili direzioni. L'equilibrio termodinamico è relativo a una qualche proprietà collettiva che caratterizza il sistema, come la temperatura, la pressione o la concentrazione di un costituente chimico. Seguiamo la schematizzazione di Prigogine di questo importante concetto. Consideriamo un sistema situato in un certo ambiente (Figura 5).

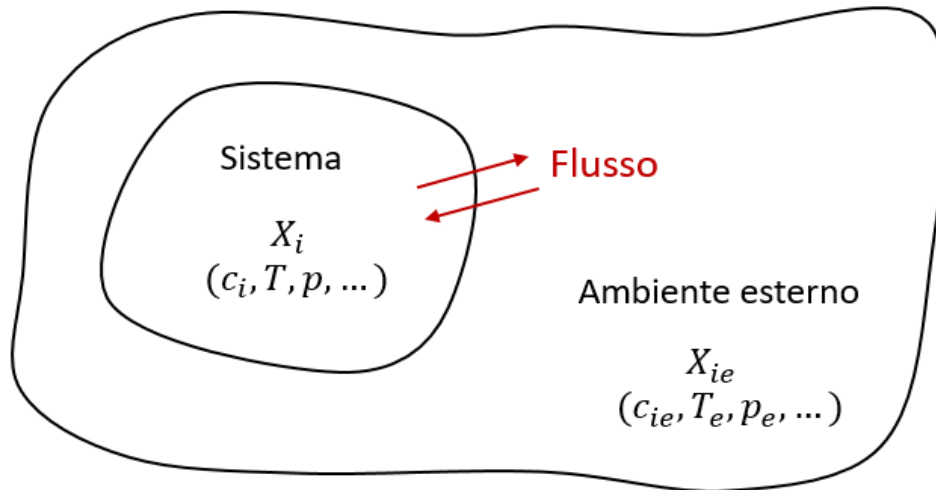


Figura 5: Rappresentazione schematica di un sistema aperto
Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 65)

Caratterizziamo sistema e ambiente attraverso alcune proprietà, X_i e X_{ie} , il cui valore è in relazione agli scambi che avvengono fra di essi. Per esempio se il sistema è contenuto in un recipiente le cui pareti sono perfettamente rigide, X sarà uguale alla temperatura T e controllerà lo scambio di energia in modalità calore fra il sistema e il suo ambiente.

Un sistema è nello stato di equilibrio termodinamico se è completamente identificato con il suo ambiente per quanto riguarda le proprietà X_i e X_{ie} . Nell'esempio precedente, l'equilibrio termodinamico si ha quando $T = T_e$ in ogni istante e in ogni punto dello spazio. Se, però, le pareti del recipiente diventano permeabili alla materia, in particolare a certe sostanze chimiche i , l'equilibrio termodinamico si ha quando il sistema e l'ambiente sono indistinguibili per quanto riguarda la concentrazione di queste sostanze. Ciò equivale a dire che le variabili concentrazione c delle sostanze chimiche soddisfano l'uguaglianza $c_i = c_{ie}$. Analogamente, se le pareti del recipiente non sono rigide, il sistema può scambiare energia in modalità lavoro con l'ambiente. Allora l'equilibrio termodinamico implica anche l'uguaglianza della pressione, $p = p_e$.

In base a quanto appena detto, l'equilibrio termodinamico è rappresentato da uno stato stazionario, $\frac{\partial X_i}{\partial t} = 0$. Si tratta, tuttavia, di uno stato stazionario di tipo particolare, poiché l'uguaglianza tra sistema e ambiente di temperatura, concentrazione chimica o pressione non prevede uno scambio sistematico di materia e/o di energia in modalità calore e lavoro. L'equilibrio è da intendersi in senso dinamico: per ogni processo che produce una piccola variazione nel sistema (per esempio un leggero aumento della temperatura T rispetto a T_e in una regione del sistema), vi è un processo inverso che induce la stessa variazione, ma nella direzione opposta. Questa proprietà (chiamata *bilancio dettagliato*) è una manifestazione della reversibilità temporale dei processi elementari che si attuano nei sistemi all'equilibrio ed è responsabile delle proprietà di unicità e stabilità che caratterizzano questo stato.

Al contrario, un sistema non si trova nello stato di equilibrio termodinamico e quindi non si identifica con l'ambiente (cioè $X_i \neq X_{ie}$) se vi sono scambi sistematici di materia e/o energia.

Come verrà descritto in dettaglio nel Capitolo 4, applicando un gradiente di temperatura tra due lastre orizzontali contenenti un fluido, oppure introducendo un reagente in un sistema chimico mentre si rimuove parzialmente il prodotto di reazione, è possibile creare condizioni di non-equilibrio in cui i sistemi si differenziano dall'ambiente.

A causa dell'azione dei *vincoli*, lontano dall'equilibrio non sussiste il bilancio dettagliato e il sistema diventa suscettibile di cambiamenti. In particolare, i sistemi dinamici lontani dall'equilibrio sono soggetti a biforcazioni verso nuovi stati.

Le funzioni $\{F_i\}$ che compaiono nella legge di evoluzione temporale di un sistema dissipativo, $\frac{\partial X_i}{\partial t} = F_i(\{X_j\}, \lambda)$, dipendono dal tipo di sistema considerato e dai processi attuati. Tuttavia, nonostante la varietà delle F_i , in assenza di vincoli ($\lambda = 0$) l'equazione deve riprodurre lo stato di equilibrio. Essendo quest'ultimo uno stato stazionario, se il sistema è all'equilibrio si deve avere $F_i(\{X_{j,eq}\}, \lambda_{eq}) = 0$.

In generale, anche lontano dall'equilibrio, se un sistema è descritto da uno stato stazionario, vale la relazione:

$$F_i(\{X_{j,s}\}, \lambda) = 0 \quad (2.9)$$

In questa situazione la non-linearità gioca un ruolo cruciale. Oltre una soglia critica, i sistemi dinamici mostrano un cambiamento qualitativo del loro comportamento. Se la legge F_i , che descrive come varia lo stato stazionario X_s in funzione del vincolo λ , è non lineare, esistono più soluzioni in corrispondenza di alcuni valori di λ . È da notare, però, che senza il mantenimento di un'appropriata distanza dall'equilibrio, la sola non-linearità non può originare soluzioni multiple. Prigogine scrive infatti che "il non-equilibrio rivela le potenzialità nascoste nelle non-linearità, che rimangono "assopite" vicino o all'equilibrio" (1991, p. 71). Cioè, la combinazione della proprietà di non-linearità con i vincoli di non-equilibrio è responsabile del comportamento complesso di alcuni sistemi. Inoltre, la possibilità di avere soluzioni multiple solleva la questione della *scelta* di un sistema tra i diversi percorsi evolutivi possibili. In particolare, nelle vicinanze di certi valori "critici" di λ , i sistemi complessi sono *sensibili* a piccole variazioni del loro stato stazionario X_s .

La non invarianza per inversione temporale delle equazioni che descrivono i sistemi dissipativi esprime una deriva evolutiva irreversibile nel tempo. Nello specifico, questi sistemi evolvono verso uno stato finale ordinato corrispondente all'apparizione di nuove strutture (*dissipative*) spaziali e/o temporali macroscopiche.

Consideriamo un sistema dissipativo nello stato stazionario X_s che descrive l'equilibrio termodinamico o una situazione di non-equilibrio. Osserviamo che i sistemi non rimangono mai nello stesso preciso stato al variare del tempo, poiché l'ambiente interagisce con essi "comunicando" piccole quantità di materia, momento e/o energia. Di conseguenza, è praticamente impossibile controllare una variabile di stato con una precisione infinita. Pertanto, anche il sistema che stiamo considerando devia continuamente dallo *stato di riferimento* X_s . Questo fatto si esprime dicendo che lo stato istantaneo del sistema non è esattamente X_s , ma vicino a esso: $X(t) = X_s + x(t)$, dove la quantità x è chiamata *perturbazione*.

Inoltre, poiché molti sistemi sono composti da un grande numero di entità interagenti, le variabili di stato possono essere interpretate statisticamente. Lo stato istantaneo di un sistema mostra continue deviazioni dai valori delle variabili macroscopiche. Queste deviazioni intrinseche, chiamate *fluttuazioni*, sono generate spontaneamente dal sistema, indipendentemente dall'ambiente. Il loro effetto si esprime ancora con l'equazione $X(t) = X_S + x(t)$, dove $x(t)$ rappresenta la dinamica interna del sistema considerato. Tipicamente, si ha una fluttuazione sotto forma di evento localizzato e di piccola scala. Per esempio, in un certo istante, la velocità termica di alcune particelle di un sistema è maggiore rispetto a quella delle loro vicine, oppure la densità di particelle relativa a un elemento di volume è inferiore al valore delle zone limitrofe. Tali eventi sono casuali e per indicare le fluttuazioni spesso si parla di "rumore interno" ai sistemi.

Esploriamo le possibili risposte di un sistema dissipativo a queste deviazioni dallo *stato di riferimento* X_S :

- 1) **Stabilità asintotica:** Se lo stato $X(t)$ del sistema tende allo stato di riferimento X_S nel limite $t \rightarrow \infty$, cioè la perturbazione $x(t)$ si annulla nel tempo, allora lo stato X_S è detto *asintoticamente stabile* e costituisce uno stato *attrattore* del sistema. Secondo Prigogine, la stabilità asintotica "è una delle manifestazioni più sorprendenti del ruolo costruttivo dell'irreversibilità in natura" (1991, p. 81). I sistemi dissipativi sono in grado di eliminare l'effetto delle perturbazioni che agiscono su di essi ristabilendo lo stato di riferimento. Esempi di attrattori di sistemi dinamici complessi sono le strutture esagonali della convezione di Bénard, la periodicità delle reazioni chimiche oscillanti, l'equilibrio termodinamico in un sistema isolato, ecc.
- 2) **Instabilità:** Se lo stato $X(t)$ non tende allo stato di riferimento X_S , cioè la perturbazione $x(t)$ non rimane inferiore a un dato valore $\varepsilon > 0$ per ogni istante successivo al tempo iniziale t_0 , allora lo stato di riferimento X_S è detto instabile. Questo caso si manifesta con una rapida crescita (spesso esponenziale) della perturbazione. Un esempio di stato instabile si può osservare nel sistema fisico di Bénard oltre la soglia di convezione.
- 3) **Stabilità locale e globale:** Se lo stato $X(t)$ rimane nelle vicinanze dello stato di riferimento X_S per valori delle perturbazioni iniziali inferiori a una certa soglia, ma se ne allontana per perturbazioni oltre questa soglia, allora X_S è detto *localmente stabile* e *globalmente instabile*. In altri termini, lo stato X_S è un attrattore locale. Se, d'altra parte, la stabilità prevale per ogni valore della perturbazione iniziale, la *stabilità* è *globale* e lo stato X_S è un attrattore globale. Per esempio, l'equilibrio termodinamico in un sistema isolato è un *attrattore globale*, mentre lo stato convettivo nel sistema di Bénard, nel quale una particolare cella è destrorotante, è un *attrattore locale* rispetto a una perturbazione che produce una rotazione levogira nella stessa cella.

Nei sistemi isolati, l'equilibrio termodinamico è descritto da uno stato asintoticamente stabile che funge da *attrattore globale*: qualsiasi sia la preparazione iniziale dei sistemi, questi raggiungeranno primo o poi lo stato di equilibrio. Il *problema della stabilità* degli stati stazionari di riferimento si solleva nei sistemi aperti lontani dall'equilibrio. In particolare, la perdita di stabilità, sotto certe condizioni, apre la via a fenomeni di transizione responsabili delle *differenziazioni* dei sistemi e, dunque, del comportamento complesso.

2.2.4 Biforcazioni e rotture di simmetria

Le transizioni osservate sperimentalmente avvengono quando il vincolo che porta il sistema lontano dall'equilibrio viene modificato dall'esterno. Di seguito, descriviamo qualitativamente alcuni aspetti generali dei fenomeni di auto-organizzazione che coinvolgono molti sistemi fisici e chimici complessi. A tal proposito, consideriamo il *diagramma di biforcazione* che mostra come la variabile di stato X di un sistema sia influenzata dal parametro di controllo λ (Figura 6).

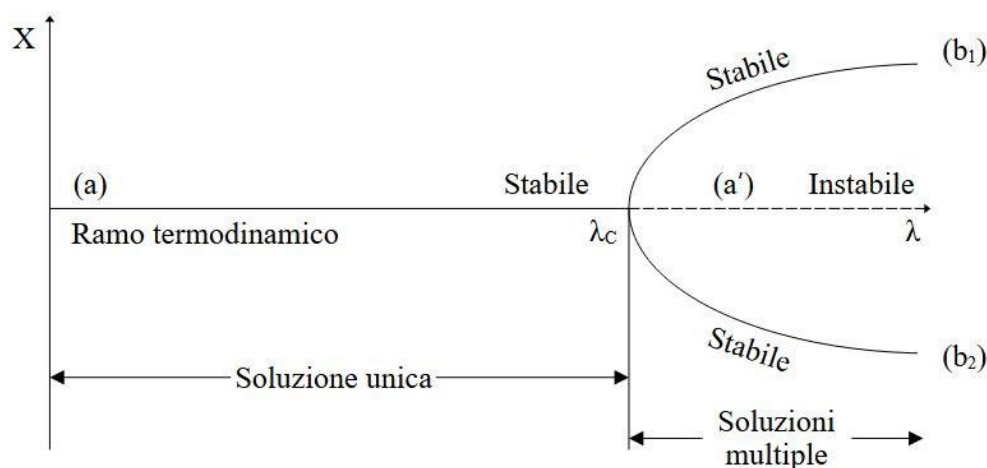


Figura 6: Diagramma di biforcazione che mostra come una variabile di stato X è influenzata dalla variazione del parametro di controllo λ . Quando $\lambda = \lambda_c$, la soluzione unica (il *ramo termodinamico*) perde la sua stabilità e si generano due nuovi rami di soluzione, stabili in questo esempio. Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 85)

Per piccoli valori di λ , esiste un'unica soluzione corrispondente allo stato di equilibrio (*ramo termodinamico*) asintoticamente stabile, in cui il sistema è in grado di smorzare le fluttuazioni interne e/o i disturbi esterni. Tuttavia, superato un certo valore critico λ_c , il ramo termodinamico diventa instabile e le fluttuazioni e/o perturbazioni vengono "amplificate". Di conseguenza, il sistema si allontana dallo stato stazionario di riferimento ed evolve verso uno dei due nuovi regimi che si differenziano per $\lambda > \lambda_c$.

In molte situazioni, come questa, il sistema compie una *sceita* in corrispondenza di determinati "momenti critici" ($\lambda = \lambda_c$). Per esempio, nel fenomeno fisico della convezione di Bénard, che descriveremo in dettaglio nel Capitolo 4, le correnti in ogni regione del fluido possono

originare una cella convettiva destrogira oppure levogira. Non è possibile stabilire in anticipo lo stato finale (cella destrogira o levogira); sarà il caso a decidere, attraverso la dinamica delle fluttuazioni interne. Con l'amplificarsi di una particolare fluttuazione, il sistema diventa un *oggetto storico*, nel senso che la sua evoluzione futura dipenderà dalle "scelte critiche" presenti e passate.

Osserviamo che, nella prospettiva dinamico-evolutiva alla scienza della complessità, le proprietà emergenti nei sistemi corrispondono all'apparizione di uno o più nuovi rami evolutivi nel fenomeno della biforcazione. L'instabilità dello stato stazionario di riferimento è causata dalla non-linearità delle equazioni e dai vincoli che agiscono sui sistemi. La biforcazione costituisce "una fonte di innovazione e diversificazione" per i sistemi (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 86); infatti, le nuove soluzioni, oltre a essere asintoticamente stabili (e, dunque, attrattori) sono meno simmetriche rispetto alla soluzione dello stato di riferimento. La modellizzazione della biforcazione riesce così a descrivere il verificarsi di *rottture di simmetria* spaziali e/o temporali in condizioni lontane dall'equilibrio e a spiegare le *differenziazioni* che si osservano fra le diverse parti dei sistemi o fra i sistemi e il loro ambiente. In particolare, una volta "differenziati", nei sistemi possono avviarsi ulteriori processi che, altrimenti, sarebbero impossibili.

2.2.5 Due esempi di biforcazione: a forcone (o pitchfork) e di Hopf

In questo paragrafo, descriviamo in modo più quantitativo il diagramma di biforcazione della Figura 6 e introduciamo un secondo fenomeno di biforcazione di tipo differente. Nello specifico, presentiamo due modelli matematici astratti che descrivono le transizioni di non-equilibrio caratteristiche di molti sistemi complessi. Come verrà esaminato in dettaglio nel Capitolo 4, questi modelli spiegano le strutture spaziali e temporali emergenti nei due fenomeni di auto-organizzazione, su cui sono basati gli esperimenti didattici proposti a una classe seconda di Liceo Scientifico.

L'evoluzione temporale di un sistema dinamico dissipativo può essere visualizzata attraverso il moto del *punto rappresentativo* nello spazio delle fasi. Le equazioni di evoluzione dei sistemi dinamici che coinvolgono un numero finito di variabili hanno la forma:

$$\frac{dX_i}{dt} = F_i(\{X_j\}, \lambda), \quad i = 1, \dots, n \quad (2.10)$$

Un tipo di traiettoria compatibile con l'equazione è quella corrispondente agli stati stazionari di non-equilibrio:

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{dX_2}{dt} = \dots = \frac{dX_n}{dt} = 0 \quad (2.11)$$

Nello spazio delle fasi, tali traiettorie sono degeneri, poiché corrispondono alle soluzioni di n equazioni algebriche $F_i = 0$ in n incognite e vengono chiamate *punti fissi*.

Il primo modello che presentiamo descrive l'evoluzione di un sistema nello spazio delle fasi a una dimensione. In questo caso, le traiettorie di fase sono delle semirette che convergono o divergono da punti fissi, a seconda della loro stabilità (Figura 7).

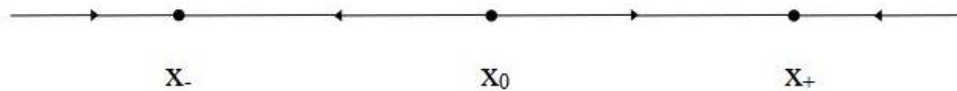


Figura 7: Traiettorie nello spazio delle fasi di un sistema dinamico dissipativo a una variabile x : una soluzione instabile (x_0) e due asintoticamente stabili (x_+ e x_-).
Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 115)

Consideriamo una singola variabile x che evolve secondo l'equazione cubica:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \lambda) = -x^3 + \lambda x \quad (2.12)$$

Il sistema è controllato da un singolo parametro di controllo λ . I punti fissi (stati stazionari) sono le soluzioni dell'equazione algebrica:

$$-x_s^3 + \lambda x_s = 0 \quad (2.13)$$

Una soluzione di questa equazione, che esiste sotto ogni condizione, è $x_0 = 0$.

Altre soluzioni non banali si ottengono eliminando x_s : $-x_s^2 + \lambda = 0$. Se λ è negativo, l'equazione non ha significato fisico poiché genera una soluzione complessa che non descrive una situazione reale. Se, invece, λ è positivo, l'equazione ammette la coppia di soluzioni $x_{\pm} = \pm\sqrt{\lambda}$ che, per $\lambda = 0$, si uniscono a x_0 , mentre per $\lambda > 0$ si distaccano da x_0 .

In particolare, all'equilibrio ($\lambda = 0$) l'equazione ammette una sola soluzione, mentre lontano dall'equilibrio ($\lambda > 0$) ci sono tre soluzioni, di cui due asintoticamente stabili (attrattori puntiformi). Lo stato di riferimento x_0 è un *attrattore globale* per $\lambda < 0$ e instabile per $\lambda > 0$, mentre gli stati x_+ e x_- sono *attrattori locali*. In altre parole, i rami stabili x_{\pm} biforcano nella direzione lungo la quale lo stato $x_0 = 0$ perde la sua stabilità. Questo è il fenomeno di biforcazione che abbiamo descritto qualitativamente nel paragrafo precedente, noto come *biforcazione a forcone* o pitchfork. Nella Figura 8, le linee continue e tratteggiate indicano, rispettivamente, le soluzioni asintoticamente stabili (attrattori) e instabili.

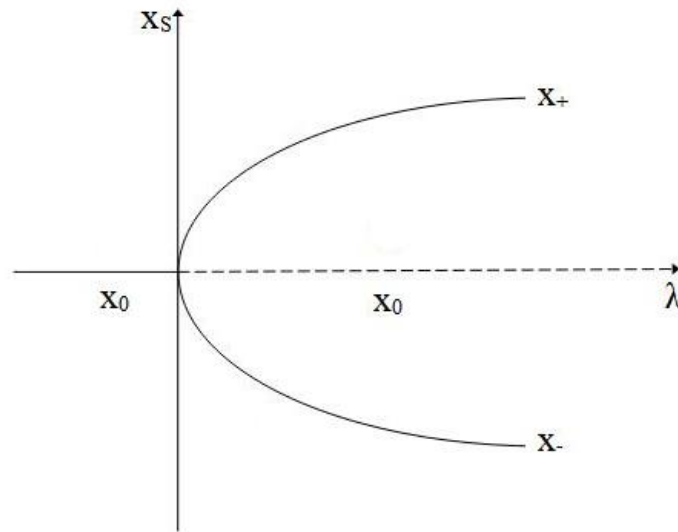


Figura 8: Biforcazione a forcone: lo stato di riferimento x_0 perde la sua stabilità (U) per $\lambda > 0$ e dà luogo a due rami di soluzioni x_+ , x_- che si fondono in x_0 per $\lambda = 0$.
Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 110)

Il modello matematico della biforcazione a forcone permette di spiegare una delle più tipiche transizioni di non-equilibrio che caratterizzano il comportamento complesso osservato sperimentalmente, ovvero la comparsa di soluzioni multiple simultaneamente stabili.

Descriviamo ora un altro fenomeno di biforcazione. Consideriamo questa volta un sistema specificato da due variabili che evolve in uno spazio delle fasi bidimensionale. Anche un sistema dissipativo a due variabili possiede punti fissi (stati stazionari). In particolare, un punto fisso P può dar luogo a due possibili configurazioni nello spazio delle fasi bidimensionale. Supponendo che P sia asintoticamente stabile (attrattore puntiforme), si hanno due possibilità:

- a) P è un *nodo* (stabile) se, nel limite $t \rightarrow \infty$, le traiettorie di fase tendono monotonamente a esso: ciò corrisponde a una caduta esponenziale nel tempo di una perturbazione attorno a P ;
- b) P è un *fuoco* (stabile) se, nel limite $t \rightarrow \infty$, le traiettorie di fase si muovono a spirale e convergono alla fine verso di esso.

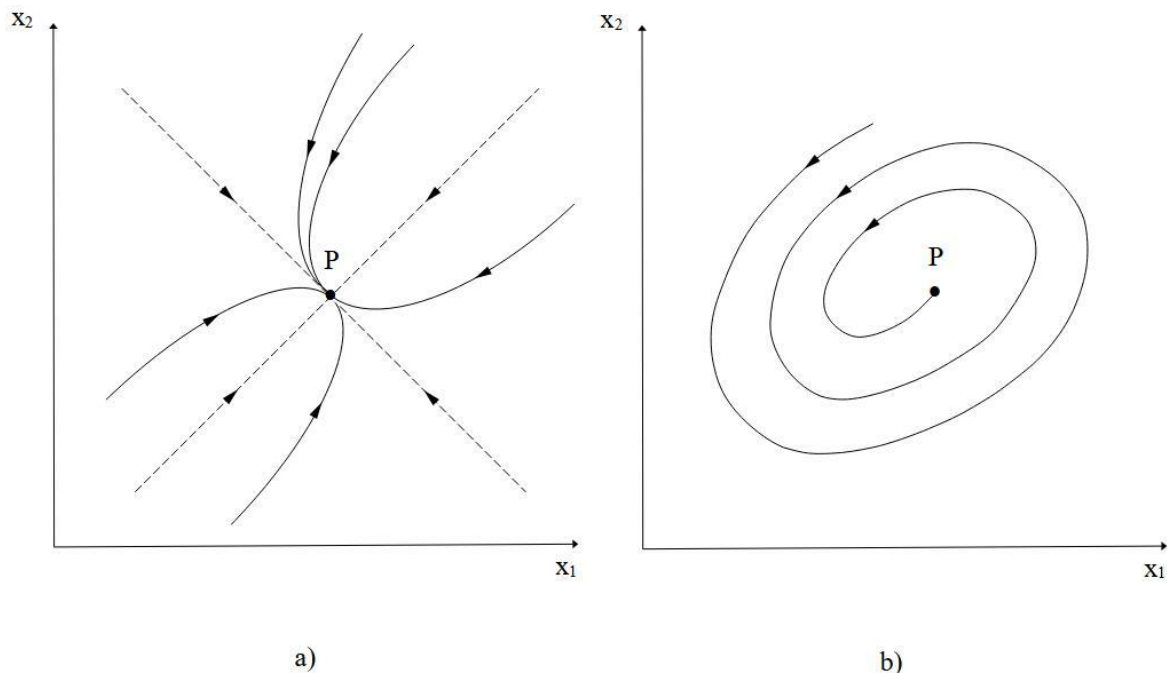


Figura 9: Due possibili configurazioni dello spazio delle fasi attorno a un punto fisso P asintoticamente stabile (attrattore) di un sistema dissipativo a due variabili:

- a) Nodo: le traiettorie di fase tendono monotonamente verso P
- b) Fuoco: le traiettorie di fase convergono a spirale verso P

Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 116)

Osserviamo che è possibile anche la configurazione in cui tutte le frecce delle traiettorie di fase sono invertite, ma in questo caso si tratta di un nodo o di un fuoco instabile. Qualunque sia la loro stabilità, i nodi e i fuochi possono esistere solo nei sistemi dissipativi, poiché violano l'invarianza rispetto all'inversione temporale.

Un'altra situazione che può verificarsi in un sistema a due variabili è quella corrispondente all'esistenza di un attrattore periodico C che circonda un punto fisso P instabile. In questo caso, le traiettorie nello spazio delle fasi evolvono verso la curva chiusa C (Figura 10). Infatti, le traiettorie che partono vicino a P non possono essere attratte dal punto fisso e tendono a divergere. Tuttavia, in una situazione fisicamente reale, la divergenza non può tendere all'infinito, poiché ciò significherebbe che il sistema scambia una quantità infinita di energia e materia con l'esterno. Le traiettorie, pertanto, rimangono confinate e, in uno spazio delle fasi bidimensionale, l'unica possibilità è che esse tendano all'orbita chiusa C . In altri termini, la curva chiusa corrisponde a una soluzione del sistema asintoticamente stabile e, dunque, a uno stato attrattore.

Fu Poincaré a scoprire una curva di questo tipo e a chiamarla *ciclo limite*. "Ciclo" sta per moto periodico; "limite" indica che vi convergono asintoticamente i moti vicini.

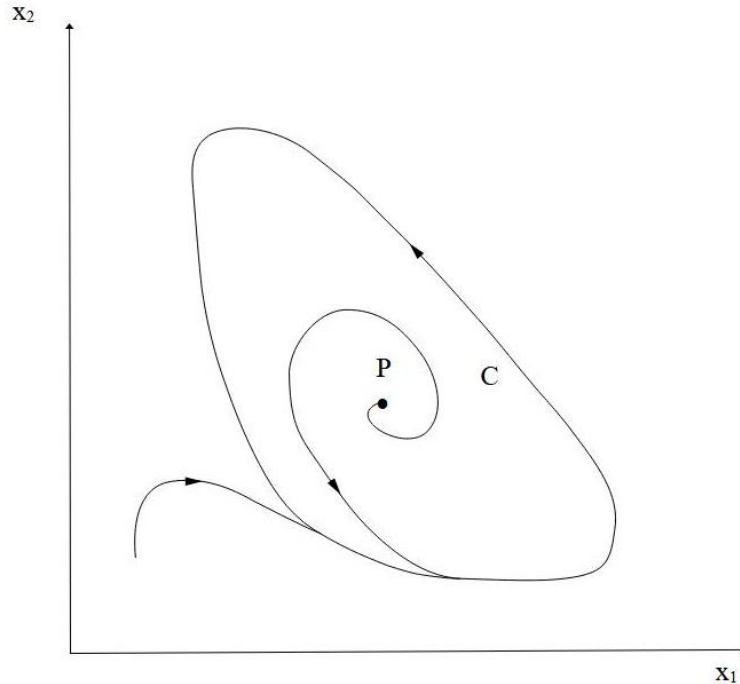


Figura 10: Attrattore periodico: le traiettorie nello spazio delle fasi evolvono verso un ciclo limite C , che circonda un punto fisso instabile P .

Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 117)

Il ciclo limite descrive un sistema che percorre ripetutamente la stessa successione di stati, esibendo così un comportamento periodico nel tempo. La differenza sostanziale rispetto ai sistemi conservativi che eseguono moti periodici, come l'oscillatore armonico o il pendolo, è che questi ultimi hanno un continuo di moti periodici diversi, mentre il ciclo limite è un moto periodico isolato a cui convergono i moti vicini. Inoltre, la stabilità asintotica del ciclo limite garantisce al sistema una "resistenza" alle fluttuazioni interne e/o perturbazioni esterne. Per questo, il ciclo limite può essere considerato l'archetipo dei fenomeni ritmici riproducibili osservati in natura.

Descriviamo ora i meccanismi che presiedono alla formazione di un ciclo limite, considerando un sistema dissipativo a due variabili, r e φ , rappresentato dal seguente modello matematico:

$$\frac{dr}{dt} = \lambda r - r^3 \quad (2.14)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega \quad (2.15)$$

La prima equazione è identica alla (2.3) con l'ulteriore richiesta che la variabile r (il raggio del ciclo limite) sia positiva (Figura 11).

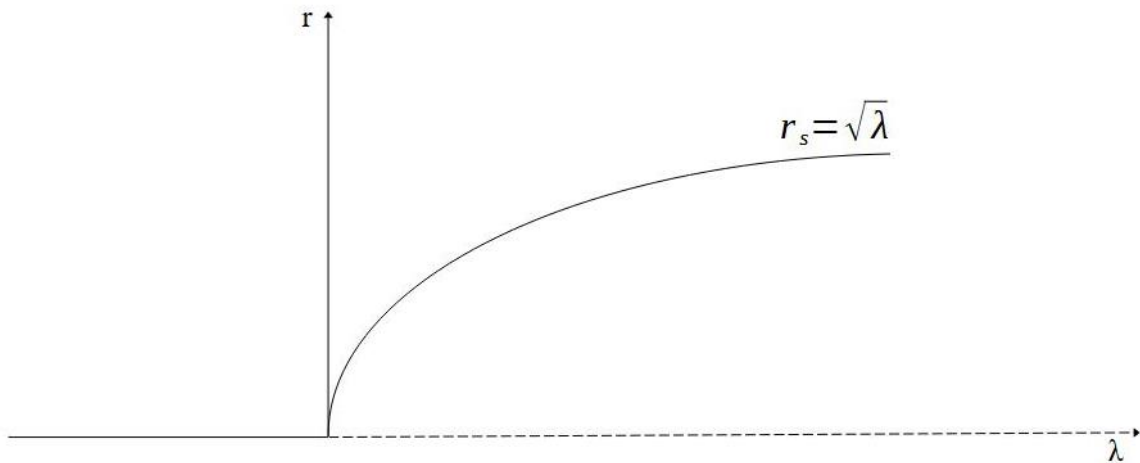


Figura 11: Raggio di un ciclo limite in funzione del parametro di controllo λ
 Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 119)

Il comportamento delle soluzioni varia a seconda dei valori assunti dal parametro di controllo λ .

Per $\lambda < 0$ esiste solo la soluzione banale $r = 0$ che è stabile. Nello spazio delle fasi, definito dalle coordinate $x_1 = r \cos \varphi$ e $x_2 = r \sin \varphi$, le traiettorie convergono al punto fisso $x_1 = x_2 = 0$ che si comporta come un fuoco, poiché la variabile di fase φ evolve nel tempo secondo:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t \quad (2.16)$$

dove φ_0 è la fase iniziale (Figura 12).

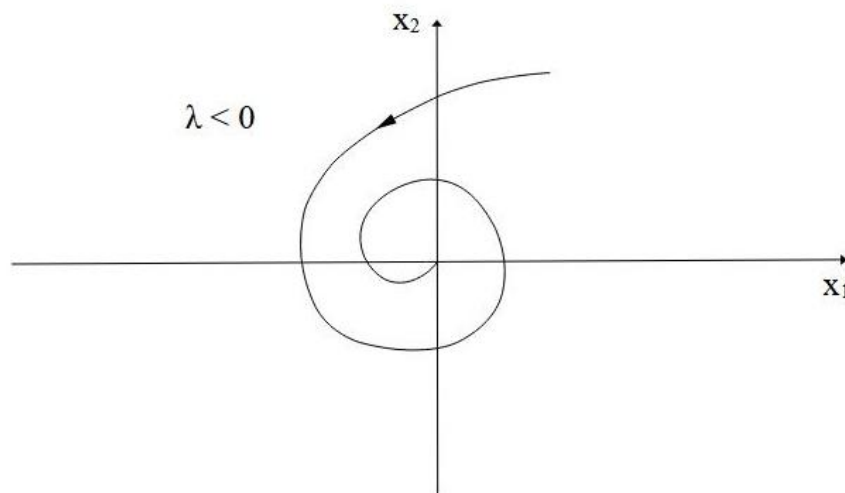


Figura 12: Ritratto delle fasi per $\lambda < 0$
 Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 119)

Quando $\lambda > 0$, la prima equazione ammette una soluzione non banale $r_s = \sqrt{\lambda}$ che è asintoticamente stabile, mentre il punto fisso $r = 0$ è instabile. Nello spazio delle fasi, le traiettorie partono lungo una spirale dal punto fisso e convergono al ciclo limite di raggio $r_s = \sqrt{\lambda}$ (Figura 13).

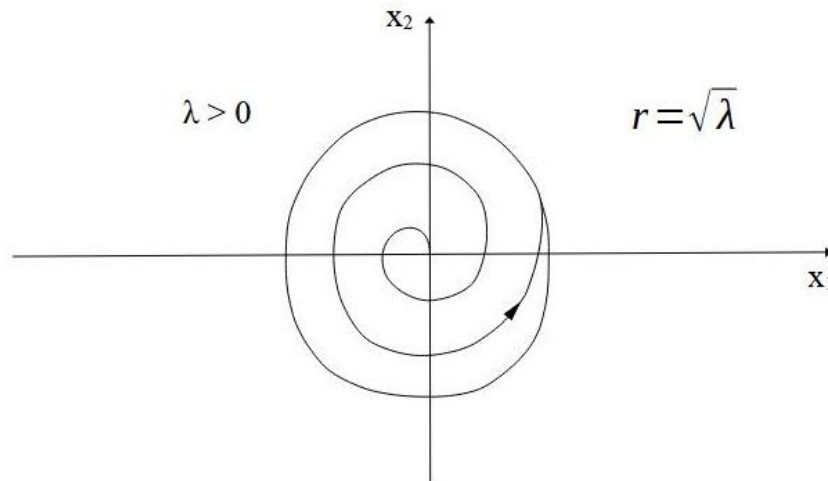


Figura 13: Ritratto delle fasi per $\lambda > 0$
 Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 119)

Per $\lambda = 0$ si verifica una biforcazione di tipo nuovo, conosciuta come *biforcazione di Hopf* (Figura 14). Questa biforcazione descrive un processo dinamico che porta il sistema a un comportamento periodico nel tempo. L'ampiezza di oscillazione (il raggio del ciclo limite) parte da zero e cresce monotonamente man a mano che il parametro λ si allontana dal punto di biforcazione. Se $\omega \neq 0$, il periodo di oscillazione assume un valore finito già nel punto di biforcazione. Sia il periodo che l'ampiezza sono intrinseci al sistema in esame e dipendono esclusivamente dai valori di λ e ω presenti nell'equazione di evoluzione. È importante notare che nei sistemi conservativi le caratteristiche delle oscillazioni (ampiezza e periodo) dipendono anche dalle condizioni iniziali (per esempio, nel caso del periodo del pendolo per angoli grandi).

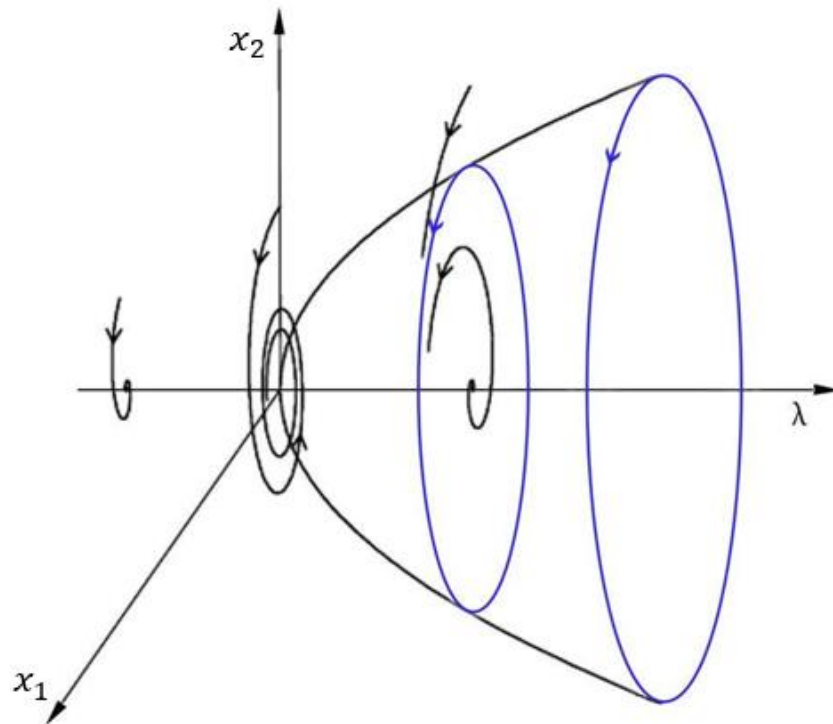


Figura 14: Diagramma di biforcazione per una biforcazione di Hopf
 Immagine adattata da (Lorenzo & Cicogna, 2012, p. 24)

Riassumendo, nei paragrafi precedenti abbiamo esaminato come l'emergere di comportamenti complessi in un sistema dinamico dissipativo sia segnato dall'instabilità delle soluzioni di stato stazionario di non-equilibrio. In particolare, abbiamo descritto due scenari distinti: uno in cui il sistema evolve verso la coesistenza di diverse soluzioni a *punto fisso* (attrattori puntiformi multipli) e un altro in cui il sistema evolve verso un *ciclo limite* asintoticamente stabile che manifesta un comportamento periodico nel tempo.

2.2.6 Cenni alla descrizione probabilistica dei sistemi dinamici complessi

La prospettiva dinamico-evolutiva con cui stiamo esaminando la scienza della complessità rivela che i sistemi complessi hanno la capacità di attraversare *momenti critici* di vario tipo e di stabilirsi in regimi nuovi, qualitativamente diversi dai precedenti. Abbiamo osservato che i sistemi dinamici, quando sono sottoposti a opportuni vincoli di non-equilibrio (rappresentati dai parametri di controllo λ), evolvono verso stati asintoticamente stabili chiamati attrattori. Prigogine interpreta l'evoluzione dinamica di un sistema verso un determinato attrattore come una manifestazione dell'irreversibilità temporale che caratterizza la maggior parte dei fenomeni naturali. Immaginando il *paesaggio evolutivo* (lo spazio delle fasi) come una "superficie" suddivisa in sottoregioni, all'interno delle quali un sistema realizza "destini" diversi, lo stato iniziale evolve nel tempo verso uno degli attrattori possibili. La natura, il numero e l'accessibilità degli attrattori da parte di un sistema complesso possono essere

modificati variando i parametri di controllo λ , ossia i modi con cui il sistema interagisce con l'ambiente. Queste variazioni sono caratterizzate da situazioni "critiche" in cui il paesaggio evolutivo cambia improvvisamente con l'apparizione di nuovi stati al di là di un certo valore di soglia dei parametri.

Abbiamo visto che, in alcuni casi, in prossimità di una biforcazione, i sistemi hanno la possibilità di *scegliere* tra percorsi alternativi diversi, originando così un'incertezza su quale attrattore verrà effettivamente raggiunto. Il "futuro aperto" dell'evoluzione dei sistemi in prossimità di una biforcazione chiama in causa il *caso*, cioè il volto probabilistico della complessità. Il caso diventa un prerequisito per la diversificazione di un sistema e, dunque, per l'insorgenza del comportamento complesso. Nei *momenti critici*, un sistema complesso *prospera sulla casualità* "in order to acquire transiently the variability and flexibility needed for its evolution" (Nicolis & Nicolis, 2007, p. 25).²³

Gli elementi stocastici giocano un ruolo cruciale nell'emergere del comportamento complesso nei sistemi fisici e chimici, poiché sono intrinsecamente legati alle *fluttuazioni* interne. Nella dinamica dei sistemi vicini a un punto di biforcazione, l'approccio alle fluttuazioni si basa sulla teoria della probabilità. In questo paragrafo conclusivo del capitolo, vogliamo dare un'idea intuitiva di come queste fluttuazioni influenzino il comportamento macroscopico dei sistemi. Le fluttuazioni sono generate spontaneamente dalla dinamica molecolare dei sistemi fisico-chimici e si manifestano su scale spaziali e temporali microscopiche. Lo stato di un sistema fisico-chimico tipicamente rappresenta una media dei valori istantanei delle variabili su tempi e volumi macroscopici. Consideriamo per esempio la densità di un fluido composto da $0,33 \cdot 10^{23}$ molecole di acqua contenute in un centimetro cubo, a temperatura e pressione ambiente. La densità media in questo caso è di $(0,33 \cdot 10^{23} / \text{cm}^3) \cdot (\text{massa di una molecola di } H_2O) = 1 \text{ g/cm}^3$. Tuttavia, su scale più piccole, come volumetti dell'ordine di dieci angstrom cubici, la densità del fluido è soggetta a fluttuazioni significative rispetto al valore macroscopico. Questo è dovuto al movimento casuale delle molecole che attraversano i confini dei volumetti. A causa di queste fluttuazioni, non è possibile prevedere con precisione il numero esatto di particelle contenute in ciascun volumetto in un dato istante. Queste deviazioni, generando un carattere randomico nei moti molecolari, consentono ai sistemi fisico-chimici di esplorare lo spazio delle fasi attorno agli stati previsti dalle soluzioni delle equazioni deterministiche.

Durante il capitolo abbiamo evidenziato più volte che i fenomeni di transizione osservati nei sistemi lontani dall'equilibrio termodinamico sono spesso caratterizzati da correlazioni spaziali su scala macroscopica. Questo è sorprendente, soprattutto se si considera che tali transizioni possono verificarsi anche in sistemi ideali, dove le interazioni intermolecolari sono trascurabili. Per illustrare questo concetto in modo intuitivo, prendiamo in considerazione un sistema ideale come un gas perfetto.

Quando il sistema è in equilibrio termodinamico, le fluttuazioni in un dato volume seguono una distribuzione poissoniana. Questa distribuzione riflette il completo disordine presente nel

²³ "al fine di acquisire transitoriamente la variabilità e la flessibilità necessarie per la sua evoluzione"

sistema, dovuto al moto termico casuale delle particelle. Siano V il volume totale del sistema, N il numero totale di particelle, e ΔV un piccolo volumetto all'interno di V . Indicando con \bar{n} il numero medio di particelle contenute nel volume ΔV , cioè $N \frac{\Delta V}{V}$, la probabilità P_n che n particelle siano presenti nel volumetto ΔV è data dalla legge di Poisson:

$$P_n = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}} \quad (2.17)$$

La distribuzione di Poisson mostra un picco netto intorno al valore medio \bar{n} . Per caratterizzare questo picco, si introducono i momenti $\langle n^k \rangle$:

$$\langle n^k \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} n^k P_n \quad (2.18)$$

Per $k = 0$, si ha $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$, in accordo con il significato di probabilità (condizione di normalizzazione); per $k = 1$, si ha $\langle n \rangle = \bar{n}$, come ci si aspetta. Se la distribuzione di probabilità P_n avesse un picco molto stretto attorno a \bar{n} , tutti i momenti successivi si ridurrebbero a potenze di \bar{n} . Al contrario, la deviazione da questa "legge di potenze" indica l'importanza della larghezza della distribuzione, e quindi delle fluttuazioni.

Poiché $\langle n^2 \rangle = \bar{n}^2 + \bar{n}$, introducendo la *varianza* di P_n , $\langle \delta n^2 \rangle = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2$, troviamo che per una distribuzione poissoniana:

$$\langle \delta n^2 \rangle = \bar{n} = \langle n \rangle \quad (2.19)$$

La varianza misura l'importanza delle fluttuazioni rispetto alla media, che rappresenta lo stato macroscopico del sistema, attraverso una quantità chiamata "dispersione statistica" definita come:

$$\delta = \frac{\sqrt{\langle \delta n^2 \rangle}}{\langle n \rangle} \quad (2.20)$$

Un piccolo valore di δ indica che la distribuzione ha un picco molto acuto intorno al valor medio $\langle n \rangle$. Questa caratteristica è propria della distribuzione di Poisson, dove la dispersione statistica δ è pari a $\frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}$, con \bar{n} che rappresenta la grandezza del sistema attraverso il numero medio di particelle nel volumetto ΔV o nel volume V stesso. Nei sistemi considerati, la dimensione lineare di V è molto grande rispetto alla distanza media tra le molecole. Formalmente, ciò è espresso nel *limite termodinamico* $V \rightarrow \infty$, che implica $\delta \rightarrow 0$. In altre parole, c'è una netta separazione tra il comportamento macroscopico dei sistemi e le loro fluttuazioni interne.

Notiamo che la distribuzione congiunta della probabilità di avere n_1 e n_2 particelle nei volumetti $\Delta V_1, \Delta V_2$ (vicini o meno) è il prodotto delle distribuzioni P_{n_1} e P_{n_2} individuali: $P_{n_1, n_2} = P_{n_1} P_{n_2}$. Prendendo il secondo momento $\langle n_1 n_2 \rangle$ di P_{n_1, n_2} , si ottiene $\langle n_1 n_2 \rangle = \langle n_1 \rangle \langle n_2 \rangle = \bar{n}_1 \bar{n}_2$. Introducendo la *covarianza* di P_{n_1, n_2} , $\langle \delta n_1, \delta n_2 \rangle = \langle n_1 n_2 \rangle - \langle n_1 \rangle \langle n_2 \rangle$, troviamo:

$$\langle \delta n_1, \delta n_2 \rangle = 0 \quad (2.21)$$

La covarianza è una quantità di natura statistica che misura il grado di correlazione tra diverse regioni spaziali nel sistema. Pertanto, in un regime poissoniano, come quello realizzato nello stato di equilibrio termodinamico di un sistema ideale, le fluttuazioni non sono grandi e l'annullarsi della covarianza implica la totale assenza di correlazioni spaziali. Questo stato rappresenta il prototipo del disordine.

Quando il sistema ideale viene allontanato dallo stato di equilibrio termodinamico attraverso vincoli adeguati, le fluttuazioni non seguono più un comportamento poissoniano e si originano correlazioni spaziali a scala macroscopica. Vicino a un punto di biforcazione, le fluttuazioni aumentano e le correlazioni si estendono attraverso il sistema, determinando un cambiamento qualitativo nelle proprietà della distribuzione di probabilità sottostante.

La distribuzione di probabilità che caratterizza un sistema lontano dall'equilibrio è tipicamente multimodale. Consideriamo, per esempio, una distribuzione di probabilità P con due picchi, i cui massimi per $X = X_a$ e $X = X_b$ sono separati da un minimo in $X = X_0$. Per semplificazione, assumiamo che i due picchi siano "infinitamente" acuti:

$$P = \frac{1}{2}(\delta_{X,X_a}^{kr} + \delta_{X,X_b}^{kr}) \quad (2.22)$$

dove il fattore $\frac{1}{2}$ assicura che $P(X)$ sia normalizzata a 1, $\sum_{X=0}^{\infty} P(X) = 1$.

Il valor medio e la varianza sono:

$$\langle X \rangle = \sum_X^{\infty} X P(X) = \frac{1}{2}(X_a + X_b) \quad (2.23)$$

$$\langle X^2 \rangle = \sum_X^{\infty} X^2 P(X) = \frac{1}{2}(X_a^2 + X_b^2) \quad (2.24)$$

$$\langle \delta X^2 \rangle = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 = \frac{1}{2}(X_a^2 + X_b^2) - \frac{1}{4}(X_a + X_b)^2 = \frac{1}{4}(X_a - X_b)^2 \quad (2.25)$$

Di conseguenza, la dispersione statistica δ è pari a:

$$\delta = \sqrt{\frac{\langle \delta X^2 \rangle}{\langle X \rangle^2}} = \frac{(X_b - X_a)}{(X_b + X_a)} \cong 1 \quad (2.26)$$

ovvero la varianza è dello stesso ordine di grandezza del valor medio. In altre parole, lontano dall'equilibrio, l'effetto delle fluttuazioni raggiunge il livello macroscopico e si osserva l'insorgenza di un *comportamento coerente* all'interno del sistema.

In sintesi, nella descrizione probabilistica dei sistemi dinamici complessi, l'emergere di nuove proprietà corrisponde a una transizione da una distribuzione unimodale a una distribuzione multimodale. Questo fenomeno rappresenta l'*analogo stocastico della biforcazione* (Figura 15): il cambiamento qualitativo nella forma della distribuzione di probabilità che descrive il sistema complesso, come l'apparizione di nuove "gobbe", corrisponde al fenomeno macroscopico della biforcazione a forchetta. È importante notare che nel limite tra il regime unimodale all'equilibrio e quello multimodale lontano dall'equilibrio la distribuzione è piatta.

Questo significa che, grazie alle fluttuazioni interne, i sistemi hanno la possibilità di esplorare con una probabilità apprezzabile anche le regioni distanti dal valore più probabile nello spazio delle fasi.

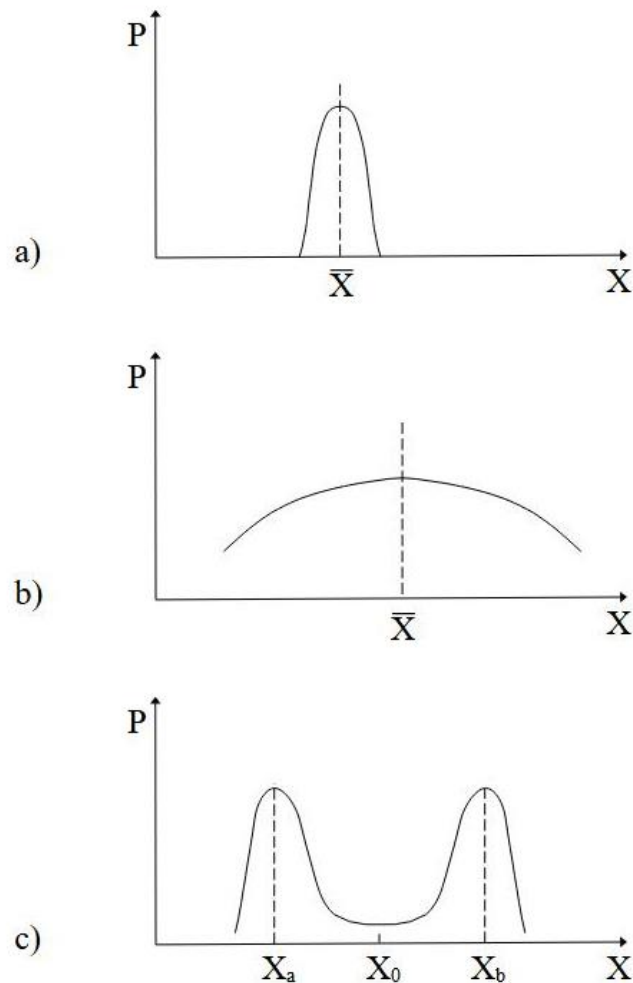


Figura 15: Analogo stocastico della biforcazione. Quando il parametro di controllo λ si avvicina al valore critico λ_c , la distribuzione di probabilità che descrive il sistema cambia forma:

- a) per $\lambda < \lambda_c$ la distribuzione è unimodale e il massimo corrisponde all'unico stato attrattore del sistema prima della biforcazione (le fluttuazioni attorno al valor medio sono piccole)
- b) per $\lambda = \lambda_c$ la distribuzione è piatta (amplificazione delle fluttuazioni attorno al valor medio)
- c) per $\lambda > \lambda_c$ la distribuzione è multimodale e i massimi corrispondono ai nuovi stati attrattori che emergono dopo la biforcazione

Immagine riprodotta da (Nicolis & Prigogine, 1991, p. 172)

I fenomeni di transizione lontani dall'equilibrio sono associati a stati caratterizzati da correlazioni spaziali di dimensioni macroscopiche. Le strutture spaziali e/o temporali emergenti corrispondono alla presenza di correlazioni fra diverse regioni spaziali distanti del sistema. In altre parole, la covarianza $\langle \delta X(r_1), \delta X(r_2) \rangle$ mostra valori apprezzabili anche per distanze spaziali macroscopiche.

Capitolo 3

La scienza della complessità: concetti di base e loro “fortuna” nell’attraversamento di diversi ambiti della conoscenza

Introduzione

Come abbiamo discusso in dettaglio nel capitolo precedente, la scienza della complessità studia i fenomeni naturali che richiedono, per la loro comprensione, la modellizzazione di entità, generalmente macroscopiche, strutturate attraverso interazioni reciproche delle loro parti costituenti, il cui comportamento ordinato può destabilizzarsi e diventare imprevedibile a lungo termine. Una volta destabilizzati, i sistemi complessi si riorganizzano in modo non lineare per raggiungere un nuovo stato evolutivo. Riportiamo qui di seguito un passaggio di I. Prigogine and P. M. Allen (1982) che racchiude questi aspetti:

Nonlinearities clearly abound in social phenomena, where a yawn ... or a life style can spread contagiously throughout a population; where a judicious investment can trigger an explosive growth; and where a steady increase in traffic density provokes, at some critical value, a sudden decrease in the speed of vehicles. We see that, in general terms, the systems which interest us are large, **nonlinear systems operating far from thermodynamic equilibrium**. It is precisely in such systems that **coherent self-organization phenomena can occur, characterized by some macroscopic organization or pattern, on a scale much larger than that of the individual elements in interaction**. It is a structure whose characteristics are a property of the collectivity and cannot be inferred from a study of the individual elements in isolation. We may say that reductionism, long a strongly criticized attitude in the social sciences, is found to be inadequate even in the physical sciences. **The whole is more than the sum of the parts for such systems** (p. 7).²⁴

²⁴ “Le non linearità abbondano chiaramente nei fenomeni sociali, dove uno sbadiglio... o uno stile di vita può diffondersi in modo contagioso in tutta la popolazione; dove un investimento oculato può innescare una crescita esplosiva; e dove un aumento costante della densità del traffico provoca, a un certo valore critico, un'improvvisa diminuzione della velocità dei veicoli. Vediamo che, in termini generali, i sistemi che ci interessano sono grandi **sistemi non lineari che operano lontano dall'equilibrio termodinamico**. È proprio in tali sistemi che **possono verificarsi fenomeni di auto-organizzazione coerente, caratterizzati da una certa organizzazione o schema macroscopico, su una scala molto più grande di quella dei singoli elementi in interazione**. Si tratta di una struttura le cui caratteristiche sono una proprietà della collettività e non possono essere dedotte dallo studio dei singoli elementi isolati. Possiamo dire che il riduzionismo, a lungo fortemente criticato nelle scienze sociali, si rivela inadeguato anche nelle scienze fisiche. **Il tutto è più della somma delle parti per questi sistemi**”.

La fisica classica si è occupata per oltre duecento anni essenzialmente di sistemi conservativi e chiusi studiando le dinamiche lineari con i metodi della meccanica newtoniana. Secondo il paradigma classico, è possibile prevedere con successo gli stati futuri di un sistema dinamico se, note le condizioni iniziali (posizione e quantità di moto di tutti i componenti del sistema) e le leggi dinamiche che governano il comportamento complessivo, sono soddisfatte due condizioni: non ci sono feedback tra i componenti del sistema e i processi sono temporalmente reversibili.

Tuttavia, all'inizio del XX secolo, questo paradigma entra in crisi, poiché le scienze naturali hanno scoperto "anomalie" non conformi ai protocolli della dinamica classica. Tra queste "anomalie" spiccavano i processi caratterizzati da relazioni di causalità circolare e da una deriva evolutiva temporalmente irreversibile. Il cosiddetto *problema dei tre corpi* messo in luce da Poincaré ha incarnato la crisi della scienza di stampo newtoniano, poiché la struttura temporale e previsionale offerta dai sistemi non lineari si opponeva a quella della fisica classica.

Per quasi settant'anni gli scienziati impegnati nelle descrizioni meccaniche classiche del mondo hanno considerato il dominio non lineare descritto da Poincaré come un regno di disordine casuale e, quindi, di scarso interesse scientifico. La prospettiva della complessità avrebbe richiesto di abbandonare il paradigma classico della scienza newtoniana, sostituendo "previsioni precise" con "previsioni asintotiche" che avrebbero solo potuto anticipare possibili tendenze comportamentali dei sistemi complessi.

In questo nuovo paradigma, che poi si è affermato, i processi di interesse sono quelli dei sistemi lontani dall'equilibrio che, nell'interazione con l'ambiente circostante, possono destabilizzarsi per poi riorganizzarsi in nuove strutture d'ordine dando luogo a fenomeni di transizione. Abbiamo visto che se la dinamica interna di questi sistemi è favorevole, il comportamento stabile iniziale lascia il posto al processo di amplificazione delle fluttuazioni casuali. A seconda delle fluttuazioni che prendono il sopravvento, l'evoluzione di questi sistemi può assumere, in alcuni casi, la struttura di una "biforcazione a forchetta".

In situazioni come queste, la storia di un sistema può essere ricostruita solo a posteriori in termini delle "scelte" effettuate nei punti "critici" di biforcazione che si presentano lungo il percorso evolutivo. Ogni nuova biforcazione chiude una serie di alternative aprendone altre, determinando, a grandi linee, le opzioni che verranno offerte al sistema nel "momento critico" successivo. Tuttavia, nessuna scelta che precede una biforcazione consente di prevedere il percorso che il sistema intraprenderà al "punto critico" evolutivo successivo. In altri termini, la storia evolutiva di un sistema complesso lontano dall'equilibrio assume la struttura di una *successione di cascate irreversibili di biforcazioni*.

In questo capitolo discutiamo dell'applicazione dei concetti della fisica dei sistemi complessi in altri ambiti della conoscenza. Il nostro obiettivo non è solo quello di mostrare le potenzialità della scienza della complessità di generare nuova conoscenza in altri contesti, ma soprattutto di mettere in risalto la "fortuna" del *pensiero della complessità* nell'attraversamento di ambiti diversi. Sosteniamo che la scienza della complessità non ha solo influenzato altri ambiti, ma l'applicazione dei suoi concetti ha permesso di elaborare un *nuovo linguaggio*, fatto di termini,

espressioni e immagini, arricchendo così il *pensiero della complessità* di sfumature concettuali che non si potrebbero intravedere e apprezzare se si rimanesse solo all'interno della fisica. L'interdisciplinarietà tra il *pensiero della complessità* e un altro ambito della conoscenza si manifesta attraverso una "dinamica circolare" in cui i concetti della fisica vengono prima spostati in un altro ambito, poi adattati e contestualizzati e, infine, ampliati. L'ultima fase, in particolare, è quella più significativa, poiché non permette solo di risolvere eventuali problemi o di chiarificare alcuni processi interni al nuovo contesto. Infatti, nell'espansione dei concetti di partenza c'è anche un ritorno al *pensiero della complessità* della fisica con un guadagno in termini di concettualizzazione. In altri termini, l'interdisciplinarietà è analisi ("spacchettamento") e arricchimento concettuale, poiché solo uscendo dal contesto della fisica è stato possibile, come vedremo nel capitolo, ampliare l'orizzonte del *pensiero della complessità* e, al contempo, far emergere le sue specificità.

Per mostrare questa dinamica, sono stati scelti quattro ambiti di conoscenza non correlati fra di loro: il management, la cultura popolare, la biologia evolutiva e la critica letteraria. Tra questi, solo la biologia evolutiva, costituisce un ambito di ricerca scientifica. Ovviamente, la scelta poteva cadere su altri contesti, poiché per sostenere la nostra tesi ciò che conta è che gli ambiti presentati siano diversi e indipendenti tra loro. In particolare, gli ultimi due casi che proponiamo rappresentano due esempi di come la struttura del *tempo interno-kairologico* della complessità sia andata in risonanza con altri ambiti di conoscenza, uno scientifico (biologia evolutiva) e l'altro non (critica letteraria).

3.1 Il VUCA nella gestione strategica delle organizzazioni

In questa prima sezione vogliamo far vedere come l'applicazione del *pensiero della complessità* della fisica nell'ambito del management organizzativo permetta non solo di far luce sui processi interni di gestione strategica, ma anche di arricchire il concetto stesso di complessità.

Forme organizzative diverse presentano sfide diverse e richiedono un approccio alla gestione specifico. La maggior parte delle teorie manageriali moderne risale all'era industriale e, nel tempo, queste hanno strutturato quello che oggi è noto come approccio manageriale tradizionale (*Si Network*, n.d.).

Originariamente, l'approccio tradizionale era stato concepito per gestire organizzazioni semplici come le fabbriche, cioè caratterizzate da un numero limitato di componenti che interagiscono in modo lineare a un basso livello di interconnettività. In particolare, le fabbriche dell'era industriale costituivano organizzazioni centralizzate e chiuse, dove era possibile immaginare un confine che delimitava la gestione gerarchica interna.

La gestione manageriale tradizionale si basa sul pensiero analitico e lineare. Secondo il paradigma del pensiero analitico, la comprensione di un'organizzazione passa attraverso la scomposizione nelle sue parti costituenti e l'analisi dettagliata di ciascuna di esse. Il pensiero analitico corrisponde, cioè, a un approccio riduzionista. In particolare, i vertici decidono cosa

è meglio per l'intera organizzazione e coordinano direttamente le azioni dei singoli membri verso il risultato globale desiderato.

I metodi di gestione tradizionali si basano anche sul pensiero lineare di causa ed effetto. Nei contesti cosiddetti "semplici", i risultati finali dipendono da un'unica causa e, pertanto, è possibile agire su un solo fattore per risolvere i problemi che via via si presentano. È interessante osservare che il pensiero lineare di causa ed effetto permette di considerare i problemi da affrontare come indipendenti ed esterni da chi li studia e li osserva. Inoltre, il futuro, concepito in termini di trasformazione lineare del passato, è conoscibile. Cioè, nell'approccio gestionale tradizionale, si usano vecchi campioni di dati per calcolare i nuovi risultati attesi.

Oggi giorno accanto a organizzazioni semplici e chiuse come le fabbriche troviamo organizzazioni sempre più complesse come la politica internazionale, le multinazionali, le reti logistiche globali, i sistemi sanitari, ecc. In particolare, nella gestione di queste forme di organizzazione si sta facendo riferimento alle nuove teorie manageriali che attingono dalla scienza della complessità idee e concetti chiave come il pensiero sistemico, la non-linearità, le reti e l'evoluzione.

Secondo il paradigma del pensiero sistemico le parti di un sistema possono essere comprese, e quindi gestite, solo se considerate in relazione all'intero sistema. Mentre l'approccio analitico tradizionale si concentra sulle singole parti dell'organizzazione, il pensiero sistemico guarda alla relazione tra le parti e il contesto in cui esse operano. Infatti, le organizzazioni complesse possono essere modellizzate come sistemi aperti in virtù delle tante interazioni e degli scambi che hanno con l'ambiente. A differenza delle tradizionali organizzazioni centralizzare, chiuse e ben limitate, nelle organizzazioni complesse nessuno ha il controllo diretto delle azioni dei singoli membri e i confini sono sfumati o addirittura inesistenti. Nello specifico, se nelle organizzazioni chiuse i membri vengono coordinati globalmente verso un risultato predefinito, nelle organizzazioni aperte si cerca di creare il contesto all'interno del quale essi possono interagire e coordinarsi localmente. Poiché non è possibile controllare direttamente il risultato globale *emergente* dalle organizzazioni, le strategie adottate vanno nella direzione di influenzare le *condizioni iniziali* per favorire la comparsa di un contesto *attrattore* per il coordinamento e la cooperazione tra i singoli membri.

Negli ultimi decenni, la globalizzazione ha aumentato notevolmente la connettività e le parti di un'organizzazione sono diventate sempre più interdipendenti. L'interdipendenza ha mostrato nel tempo l'inefficacia del pensiero lineare e delle spiegazioni causa-effetto degli eventi. Infatti, se il pensiero lineare mostra la sua utilità nelle organizzazioni semplici, ostacola la gestione delle dinamiche tipiche degli ambienti complessi.

Nelle organizzazioni complesse, i risultati globali sono il prodotto di una serie di variabili diverse che interagiscono in modo specifico e non lineare, amplificandosi o smorzandosi a vicenda. A questo proposito, è interessante osservare che trattare i fenomeni organizzativi come risultati globali emergenti aiuta a riconoscere e identificare la rete di interdipendenze che generano i problemi, compresi i ruoli giocati dalle azioni dei singoli individui.

Il processo decisionale strategico implica la formulazione e l'attuazione dei principali obiettivi e delle iniziative sulla base di una valutazione dell'ambiente in cui operano le organizzazioni. Pertanto, la gestione strategica cambia in relazione al modo in cui l'ambiente organizzativo viene interpretato e descritto.

A causa delle sue origini nell'ambito del settore industriale, gran parte della moderna teoria del management si basa sull'assunto che l'ambiente in cui operano le organizzazioni sia statico, stabile e prevedibile. In particolare, secondo l'approccio manageriale tradizionale è necessario disporre di tutte le informazioni provenienti dall'esterno per guidare le organizzazioni, attraverso il controllo diretto sui singoli membri, verso il risultato desiderato. D'altra parte, negli ultimi decenni, le organizzazioni hanno affrontato continui cambiamenti a causa di eventi inaspettati, come le crisi finanziarie, la pandemia Covid-19 e le guerre. La rapida crescita della globalizzazione, i cambiamenti climatici e l'"ondata tecnologica" che investe i più recenti sviluppi delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione, i big data, l'intelligenza artificiale costituiscono il contesto ambientale *complesso* in cui operano le organizzazioni al giorno d'oggi. I crescenti livelli di imprevedibilità e complessità pongono continuamente nuove sfide alla gestione strategica che cerca di rispondere efficacemente a un ambiente così dinamico. In un mondo interconnesso e volatile, il processo decisionale strategico richiede un'interpretazione limitata di fenomeni in rapida evoluzione per interagire con l'ambiente e cercare di raggiungere gli obiettivi prefissati.

Nel mondo post-industriale, l'ambiente non è più statico, stabile e prevedibile. Il successo delle organizzazioni dipende dalla capacità di decodificare e dare senso a dati e informazioni volatili, incerti, complessi e ambigui (*VUCA - Surviving in a World of Complexity*, n.d.). Questo problema, emerso alcuni decenni fa, è noto tra professionisti e studiosi con l'acronimo VUCA (volatilità, incertezza, complessità e ambiguità).

L'acronimo VUCA è stato coniato dall'Army War College degli Stati Uniti alla fine degli anni Novanta, inizialmente utilizzato per descrivere il nuovo ordine mondiale multipolare dopo la fine della Guerra Fredda. Successivamente, è stato adottato nell'ambito aziendale per caratterizzare contesti lavorativi caotici, instabili e in rapida evoluzione. In particolare, la pandemia Covid-19 ha aumentato la sua rilevanza nell'identificare e comprendere le principali sfaccettature dell'ambiente complesso in cui operano le organizzazioni. Il termine VUCA cerca di catturare situazioni incerte e in rapida evoluzione, in cui le informazioni sono scarse. Indicando un cambiamento sistemico nella natura dell'ambiente organizzativo attuale, il mondo VUCA implica la necessità di un cambiamento sistemico concomitante nella strategia manageriale.

Nonostante la popolarità dell'acronimo, vi è spesso sovrapposizione nell'interpretazione delle sue componenti. La mancanza di definizioni precise di ciascuna componente e delle loro interrelazioni può compromettere l'accuratezza dell'acronimo VUCA nel categorizzare e interpretare le informazioni ambientali, influenzando così la sua efficacia nel prendere decisioni strategiche.

In questo contesto, intendiamo mostrare come il paradigma della complessità chiarisca le dimensioni del mondo VUCA e faciliti lo sviluppo e l'implementazione di nuove strategie organizzative finalizzate al raggiungimento degli obiettivi desiderati.

Basandoci su uno studio condotto da un gruppo di ricercatori nel campo del management organizzativo (Taskan et al., 2022), riportiamo brevemente le definizioni di ambienti volatili, incerti, complessi e ambigui più comuni nella letteratura. Gli ambienti volatili sono caratterizzati da cambiamenti rapidi in cui non esiste una tendenza prevedibile o un modello riproducibile. L'incertezza descrive situazioni con conoscenze limitate, come la valutazione dell'importanza di un evento appena osservato che non va sottovalutato. La complessità si riferisce a situazioni con molte parti interconnesse che ostacolano l'identificazione dei fattori che contribuiscono ai problemi da risolvere. Le situazioni ambigue implicano difficoltà nel riconoscere le cause e il chi, cosa, dove, quando, come e perché dietro gli eventi, specialmente quando le informazioni sono scarse.

Per evitare sovrapposizioni nei significati dei costrutti volatilità, incertezza, complessità e ambiguità, e per facilitare il lavoro gestionale strategico delle organizzazioni, i ricercatori di questo studio hanno chiarito le diverse componenti del modello VUCA e specificato le loro interrelazioni. Queste conoscenze sono rappresentate in una mappa concettuale, illustrata nella Figura 1 di seguito.

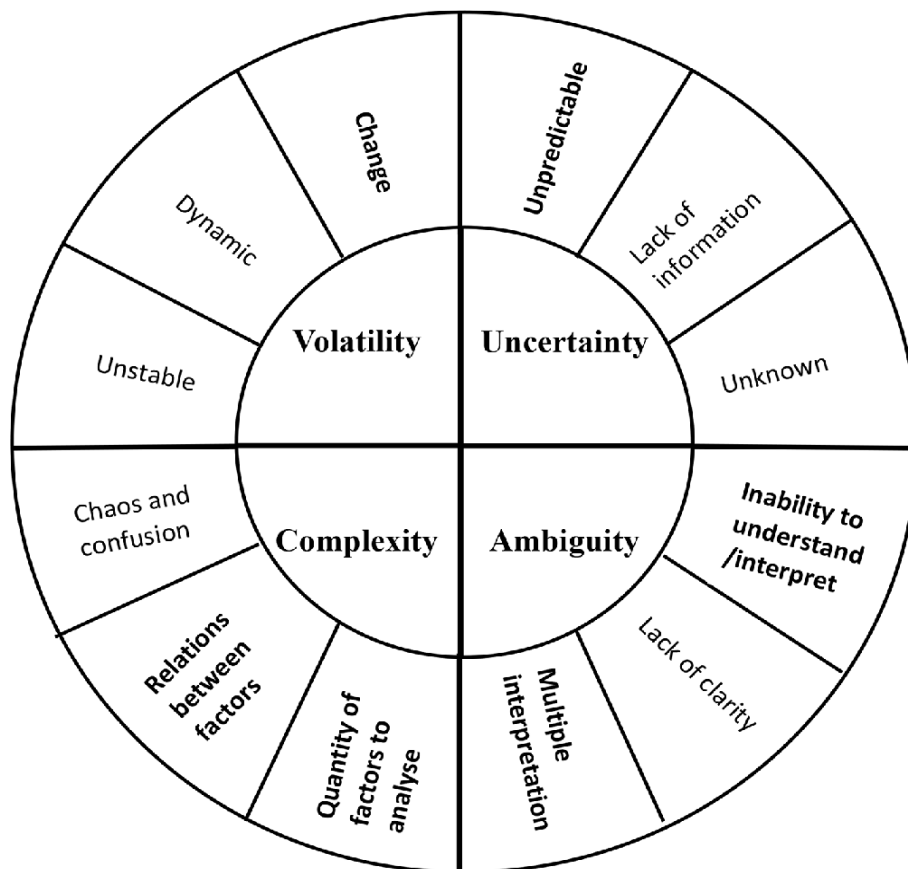


Figura 1: Mappa concettuale dell'acronimo VUCA.
Immagine tratta da (Taskan et al., 2022, p. 213)

La mappa concettuale illustra chiaramente i significati distinti associati a ciascun costrutto del VUCA, evitando sovrapposizioni. In particolarità, la volatilità si riferisce al *cambiamento incessante* del mondo; l'incertezza è legata alla *natura imprevedibile* degli eventi; la complessità implica l'analisi di *numerosi fattori* e delle loro *interrelazioni*; l'ambiguità emerge dall'incapacità di comprendere e interpretare gli eventi, sia per la mancanza di chiarezza sul loro *significato* che per le *molteplici interpretazioni* possibili.

La scienza della complessità, con i suoi concetti fondamentali di evoluzione, imprevedibilità, interazione tra componenti del sistema, "criticità" trasformativa e pluralità di scenari possibili, ha permesso di affinare le definizioni e le peculiarità dei costrutti che formano l'acronimo VUCA. Questo processo ha migliorato l'interpretazione dell'ambiente dinamico in cui le organizzazioni operano oggi, rendendo più preciso ed efficace il processo gestionale strategico.

In parallelo, l'applicazione della scienza dei sistemi complessi all'interno delle strutture manageriali ha consentito di arricchire il *pensiero della complessità*, evidenziando le relazioni tra il concetto stesso di complessità e i costrutti di volatilità, incertezza e ambiguità. L'interdisciplinarietà in questa dinamica circolare tra la scienza della complessità e le strutture manageriali organizzative, mediata dall'acronimo VUCA, ha ampliato l'orizzonte del *pensiero della complessità*, introducendo sfumature concettuali che non sarebbero state visibili se si fosse rimasti sempre all'interno dell'ambito della fisica.

3.2 La metafora dell'*Effetto farfalla* nella cultura popolare

In questa sezione esploriamo la metafora dell'*effetto farfalla*, ben nota nella scienza della complessità, mettendo in luce come sia stata influenzata dalla cultura occidentale e, a sua volta, abbia contribuito a plasmarla.

La metafora dell'effetto farfalla – l'idea che il battito d'ali di una farfalla in Brasile possa provocare un tornado in Texas – esprime non solo il concetto di dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali all'interno della teoria dei sistemi dinamici caotici, come discusso nel Capitolo 2, ma viene anche usata nel linguaggio comune per descrivere relazioni non lineari di causa ed effetto tra eventi distanti nel tempo e nello spazio.

Sebbene il fisico Edward Lorenz abbia coniato il termine "effetto farfalla", la metafora sembrava già esistere nella cultura popolare con alcune varianti. Secondo la ricostruzione dello studioso di complessità Kevin J. Dooley (2009), la storia della metafora dell'effetto farfalla risale al 1898, quando il fisico William Suddards Franklin, recensendo il libro di Pierre Duhem sulla termodinamica, scrisse che:

Long range detailed weather prediction is therefore impossible, and the only detailed prediction which is possible is the inference of the ultimate trend and character of a storm from observations of its early stages; and the accuracy of this prediction is subject to the

condition that **the flight of a grasshopper in Montana may turn a storm aside from Philadelphia to New York!** [citato in (2009, p. 2)]²⁵

Nel romanzo *Storm* (1941) dello storico George Stewart, si trova un passaggio in cui un meteorologo riflette:

He [the junior meteorologist] thought of his old professor's saying: **A Chinaman sneezing in Shen-si may set men to shoveling snow in New York City** [citato in (2009, p. 2)]²⁶

Inoltre, nel racconto di fantascienza *A Sound of Thunder* (1952), lo scrittore Ray Bradbury narra di un viaggiatore nel tempo che, uccidendo una farfalla preistorica, trova al suo ritorno un mondo completamente diverso. Un passaggio significativo del libro è:

Crushing certain plants could add up infinitesimally. **A little error here would multiply in sixty million years, all out of proportion.** Of course maybe our theory is wrong. Maybe time can't be changed by us. Or maybe it can be changed only in little subtle ways. A dead mouse here makes an insect imbalance there, a population disproportion later, a bad harvest further on, a depression, mass starvations, and, finally a change in social temperament in farflung countries. Something much more subtle, like that. [citato in (2009, pp. 2–3)]²⁷

Lavorando al suo modello di simulazione meteorologica, Lorenz scoprì nel 1961 che, a causa della loro sensibile dipendenza dalle condizioni iniziali, alcuni sistemi deterministici potevano mostrare comportamenti imprevedibili. Ricominciando i calcoli da metà processo, Lorenz notò che un piccolo cambiamento nelle condizioni iniziali aveva prodotto una traiettoria completamente differente, nonostante la simulazione fosse governata da equazioni deterministiche.

Lorenz fondò la metafora dell'effetto farfalla sulla realtà fisica. Nel famoso articolo del 1963 pubblicato sulla rivista *Transactions of the New York Academy of Science*, il fisico scriveva:

When the instability of uniform flow with respect to infinitesimal perturbations was first suggested as an explanation for the presence of cyclones and anticyclones in the atmosphere, the idea was not universally accepted. One meteorologist remarked that if the theory were correct, **one flap of a sea gull's wings would be enough to alter the course of the weather forever.** The controversy has not yet been settled, but the most recent evidence seems to favor the gulls. [citato in (2009, p. 3)]²⁸

²⁵ “Le previsioni meteorologiche dettagliate a lungo termine sono quindi impossibili, e l'unica previsione dettagliata possibile è l'inferenza della tendenza e del carattere finale di una tempesta dalle osservazioni delle sue prime fasi; l'accuratezza di questa previsione è soggetta alla condizione che **il volo di una cavalletta in Montana possa deviare una tempesta da Filadelfia a New York!**”

²⁶ “Un cinese che starnutisce a Shen-si può far spalare la neve a New York City.”

²⁷ “Schiacciare certe piante potrebbe sommarsi infinitesimamente. **Un piccolo errore qui si moltiplicherebbe in sessanta milioni di anni, in modo sproorzionato.**”

²⁸ “Quando l'instabilità del flusso uniforme rispetto alle perturbazioni infinitesimali fu suggerita per la presenza di cicloni e anticicloni nell'atmosfera, l'idea non fu universalmente accettata. Un meteorologo osservò che, se la teoria fosse corretta, **un battito d'ali di un gabbiano sarebbe sufficiente a modificare per sempre il corso del tempo.** La controversia non è ancora risolta, ma le prove più recenti sembrano favorire i gabbiani.”

Nel 1972, durante alla conferenza organizzata dall' *Association for the Advancement of Science* l'intervento di Lorenz si intitolava : *Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?* In particolare, il suo discorso iniziò così:

Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?
Lest I appear frivolous in even posing the title question, let alone suggesting that it might have an affirmative answer, let me try to place it in proper perspective by offering two propositions:

- a) If a single flap of a butterfly's wings can be instrumental in generating a tornado, so also can all the previous and subsequent flaps of its wings, as can the flaps of the wings of millions of other butterflies, not to mention the activities of innumerable more powerful creatures, including our own species.
- b) If the flap of a butterfly's wings can be instrumental in generating a tornado, it can equally well be instrumental in preventing a tornado.

[citato in (2009, p. 3)]²⁹

Lorenz e i suoi colleghi propongono inizialmente la metafora come un'ipotesi di ricerca. Per il fisico era importante sottolineare che non c'era nulla di speciale nella farfalla o in un suo particolare battito d'ali; il suo interesse era quello di trovare un modo efficace per esprimere il fatto che l'atmosfera sembrava essere instabile al punto che piccole perturbazioni potessero produrre effetti sproporzionatamente grandi, rendendo così più difficile, se non impossibile, la previsione del meteo.

Per una quindicina di anni, l'effetto farfalla rimase noto ai pochi scienziati che seguirono il lavoro di Lorenz. L'opera dello storico della scienza James Gleick (1987) contribuì in modo particolare, alla messa in cultura della metafora e del concetto scientifico di "caos". In particolare, nell'attraversare i confini della fisica, la metafora inizia a essere "shaped by cultural forces"³⁰ (Dooley, 2009, p. 4) e ad arricchirsi di significato. Per esempio, si inizia a interrogarsi su alcune proprietà fisiche come l'importanza del ruolo giocato in un dato fenomeno da una singola causa oppure dalla rete complessa di tutte le cause esistenti. Gleick (1987) insistette sull'importanza di *una particolare farfalla* e di *un particolare battito di ali*. Cioè, lo scrittore contribuì a rafforzare l'idea che non è una piccola causa qualsiasi ad avere conseguenze significative (grandi effetti) nelle situazioni al limite della stabilità, bensì una piccola *causa specifica*. Famoso è il seguente passaggio:

²⁹ "Prevedibilità: Il battito d'ali di una farfalla in Brasile può provocare un tornado in Texas? Per evitare di sembrare frivolo nel porre questa domanda, tanto meno nel suggerire che possa avere una risposta affermativa, cercherò di metterla nella giusta prospettiva offrendo due proposizioni:

- a) Se un singolo battito d'ali di una farfalla può essere determinante nel generare un tornado, lo possono essere anche tutti i battiti d'ali precedenti e successivi, così come i battiti delle ali di milioni di altre farfalle, senza contare le attività di innumerevoli creature più potenti, inclusa la nostra specie.
- b) Se il battito d'ali di una farfalla può essere determinante nel generare un tornado, può altrettanto bene essere determinante nel prevenire un tornado."

³⁰ "plasmata dalle forze culturali"

For want of a nail a shoe was lost;
for want of a shoe the horse was lost: for want of a horse the rider was lost;
for want of a rider the battle was lost;
for want of a battle the kingdom was lost
(Gleick, 1987, p. 23).³¹

Rielaborazioni come quella di Gleick se, da una parte, hanno allontanato la metafora dell'effetto farfalla dalle sue radici scientifiche dall'altra, hanno contribuito a renderla molto attraente e potente nella cultura popolare. L'industria cinematografica, per esempio, si è appropriata della metafora arricchita di significato proponendo, in numerose occasioni, film in cui piccoli eventi si amplificano e portano a grandi conseguenze nel futuro. Spesso le persone "viaggiano nel tempo", finendo per cambiare la storia, per caso o di proposito. Tuttavia, Dooley osserva:

If the movies were true to the scientific meaning behind the metaphor, then *anything* the time travelers did would be cause for concern about the future, not just some specific thing (2009, p. 4).³²

La fisica dei sistemi complessi ha contribuito a dare nuova linfa alla metafora, poiché risuonando con essa ne ha mostrato le potenzialità grazie alle sue origini nella cultura popolare. Secondo Dooley, la messa in cultura della metafora dell'effetto farfalla ha creato valore in tre modi.

In primo luogo, la metafora possiede una struttura semantica invariante (*una piccola causa porta a grandi effetti a distanza*) e flessibile, poiché la causa, l'effetto e la distanza specifici possono essere scelti di volta in volta dal parlante. In particolare, si può riflettere sul ruolo delle cause specifiche e della distanza temporale e spaziale tra causa ed effetto:

... not answering a phone call at home leads to one not being fired at work, drug busts increase drug prices, a drowning polar bear leads to a power outage, and the flapping butterfly is behind the Chicago Cubs inability to get into the World Series (2009, pp. 5-6-7).³³

In secondo luogo, la metafora incorpora l'emozione della paura dovuta alla mancanza di controllo sulle piccole cause che possono generare effetti significativi negativi. L'effetto farfalla permette, cioè, di strutturare la trama narrativa dello "spettatore innocente" in cui la risposta emotiva della paura è provocata non solo dall'effetto finale del pericolo imminente,

³¹ "Per mancanza di un chiodo si perse una scarpa;
per mancanza di una scarpa si perse il cavallo: per mancanza di un cavallo si perse il cavaliere;
per mancanza di un cavaliere si perse la battaglia;
per mancanza di una battaglia si perse il regno."

³² "Se i film fossero fedeli al significato scientifico della metafora, qualsiasi azione dei viaggiatori del tempo sarebbe motivo di preoccupazione per il futuro."

³³ "... non rispondere a una telefonata a casa porta a non essere licenziati al lavoro, le retate antidroga aumentano i prezzi della droga, un orso polare che annega provoca un'interruzione di corrente e il battito d'ali della farfalla è la causa dell'incapacità dei Chicago Cubs di arrivare alle World Series."

ma anche dalle cause rappresentate come piccoli eventi apparentemente insignificanti e invisibili che sfuggono al controllo degli individui.

Allo stesso tempo, però, la metafora include anche un elemento di speranza, poiché permette a ciascun individuo di immaginare se stesso e le sue azioni come la “piccola causa specifica” di un effetto significativo su scala globale. Da questo punto di vista l'effetto farfalla potrebbe considerarsi un caso particolare della metafora generale “agisci localmente, pensa globalmente”. D'altra parte, Lorenz stesso nutriva una visione speranzosa verso la metafora quando scrive:

Perhaps the butterfly, with the seeming frailty and lack of power, is a natural choice for a symbol of the small that can produce the great [citato in (Dooley, 2009, p. 8)].³⁴

Concludiamo osservando che la fisica, in risonanza con la cultura popolare, ha adottato la metafora dell'effetto farfalla al punto da renderla parte integrante del linguaggio tecnico dei sistemi complessi. Lorenz intuì le potenzialità della metafora e la sua carica di contenuto per esprimere l'importante proprietà della sensibilità alle condizioni iniziali. Parallelamente, la messa in cultura del suo lavoro ha arricchito il *pensiero della complessità* con nuove riflessioni e domande (Qual è il ruolo di una causa specifica e quello di tutte le cause? La distanza tra una causa e l'effetto è di tipo temporale e/o spaziale?), introducendo sfumature di significato che emergono solo quando i concetti fisici escono dal proprio ambito e si lasciano “contaminare” dalla cultura popolare.

3.3 La *Teoria degli equilibri punteggiati* e la *Contingenza* nella biologia evolutiva

In questa terza sezione consideriamo l'ambito della biologia evolutiva mostrando in che modo Stephen Jay Gould riprende le nozioni dei sistemi dinamici complessi per cambiare il paradigma scientifico. In particolare, discuteremo come il lavoro e le riflessioni del biologo possono aiutare a chiarificare la struttura del *tempo interno-kairologico* dal punto di vista immaginativo e concettuale.

Nel tentativo di render conto della mancanza di reperti fossili che documentino il passaggio da una specie all'altra, i paleontologi e biologi statunitensi Niles Eldredge e Stephen Jay Gould (1971) presentarono la teoria degli equilibri intermittenti o punteggiati³⁵.

Il pensiero punteggiatore si proponeva alla fine degli anni Sessanta del '900 come un'alternativa alla dottrina evoluzionistica conservatrice, il gradualismo, che vedeva la speciazione (ovvero il processo evolutivo di formazione di nuove specie) tramite selezione naturale avvenire con gradualità e continuità. I biologi gradualisti contemporanei di Eldredge

³⁴ “Forse la farfalla, con la sua apparente fragilità e mancanza di potere, è una scelta naturale come simbolo del piccolo che può produrre il grande.”

³⁵ Punctuated Equilibrium viene spesso tradotto come equilibrio intermittente o “punteggiato”

e Gould ritenevano che l'evoluzione di una specie avvenisse in modo uniforme mediante una trasformazione costante e graduale ("*natura non facit saltus*") in seguito al variare delle circostanze ambientali e alle mutazioni casuali degli individui. Il gradualismo si basa essenzialmente sull'idea, comunemente attribuita a Charles Darwin, che le specie cambino con regolarità a un ritmo evolutivo costante. In tal modo, secondo questo modello evolutivo, i dati fossili avrebbero restituito una serie non interrotta di specie, fino ad arrivare a quelle attualmente esistenti. Pertanto, i gradualisti dovevano spiegare l'effettiva mancanza dei reperti a disposizione e tra le varie ipotesi proposte c'era anche quella della difficoltà del processo di fossilizzazione, come aveva già fatto notare lo stesso Darwin.

Nel modello degli equilibri intermittenti, invece, l'evoluzione di una specie intervalla periodi di cambiamento modesto o addirittura nullo a "momenti" di rapido mutamento. Le specie, cioè, non cambiano con regolarità e gradualità nel tempo come nel gradualismo, ma variano molto velocemente in certi momenti, per poi assestarsi in lunghe fasi di cambiamento limitato o del tutto assente. L'originalità della teoria si basa, dunque, sulla variazione del ritmo evolutivo, in particolare sull'accelerazione del processo evolutivo in certi periodi. Nello specifico, secondo questo modello, le specie animali, quando sono perfettamente adattate al loro ambiente, tendono a conservare le loro caratteristiche per lunghi periodi (anche milioni di anni) ma, al mutare delle condizioni "esterne" (insorgenza di eventi climatici, geologici o astronomici) possono manifestare cambiamenti morfologici notevoli nell'arco di poco tempo (anche alcune decine di millenni), soprattutto se la popolazione non è molto numerosa ed è confinata in un habitat ristretto.

Da questo modello scaturisce una storia naturale in cui lunghi periodi di stasi (o di *equilibrio*) delle specie sono intervallati (o *punteggiati*) da brevi periodi di rapida evoluzione: i cosiddetti *equilibri punteggiati*. La teoria spiega la scarsità dei ritrovamenti fossili che mostrano gli "anelli di congiunzione" tra specie diverse attraverso la rapidità dei tempi di *transizione*, spesso non compatibili con quelli richiesti dai processi di fossilizzazione, e/o l'esiguità del numero delle popolazioni interessate, che rende notevolmente bassa la probabilità di far giungere prove paleontologiche fino a oggi. Inoltre, se nel gradualismo il lavoro della selezione naturale è lento e costante, nel modello punteggiato questo è concentrato in brevi periodi di intensa attività, alla fine dei quali nascono nuove specie. Ci sono, cioè, "istanti" più importanti, momenti in cui la selezione e altri meccanismi evolutivi modificano qualitativamente la popolazione di una specie.

Dunque, la punteggiatura è coerente con la concezione di Darwin dell'evoluzione per selezione naturale. In realtà, Darwin fu anche il primo a parlare dell'esistenza, all'interno di una stessa specie, di più ritmi evolutivi caratteristici e, più tardi, a notare che la velocità di evoluzione delle specie non fosse, generalmente, costante. Nella prima edizione di *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* scrisse che:

Species of different genera and classes have not changed at the same rate, or in the same degree. In the oldest tertiary beds a few living shells may still be found in the midst of a multitude of extinct forms. [...] The Silurian *Lingula* differs but little from the living species of this genus (*Darwin, C. R. 1859. On the Origin of Species by Means of Natural*

*Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London: John Murray. [1st Edition], n.d., p. 313).*³⁶

Lingula è un genere di Brachiopodi che comprende alcune specie fossili e rappresentanti tuttora viventi che nel corso degli ultimi 500 milioni di anni non hanno subito trasformazioni morfologiche (stasi evolutiva). Nella quinta edizione (1869), invece, Darwin scrisse che:

Many species when once formed never undergo any further change but become extinct without leaving modified descendants; and **the periods, during which species have undergone modification**, though long as measured by years, **have probably been short in comparison with the periods during which they have retained the same form** (Darwin, C. R. 1869. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London: John Murray. 5th Edition. Tenth Thousand.*, n.d., p. 551).³⁷

Riassumendo, gli equilibri punteggiati si basano su tre principi:

- stasi a lungo termine delle specie,
- sviluppo a fasi alterne e non lineari dei cambiamenti evolutivi,
- insorgenza di “catastrofi” ambientali.

Il primo principio esprime che le specie seguono un percorso evolutivo di stabilità dove restano invariate per milioni di anni. Il secondo principio si riferisce ai rapidi cambiamenti che occasionalmente interrompono il percorso evolutivo delle specie. Gli eventi di speciazione si verificano in un arco di tempo relativamente breve (se paragonato al tempo geologico) dell'ordine delle decine di migliaia di anni e avvengono a seguito di improvvisi isolamenti di una o più sottopopolazioni ai margini dell'area ecologica in cui la specie madre prospera da molto tempo. Questo isolamento improvviso è il risultato del terzo principio del modello degli equilibri punteggiati, ovvero le catastrofi ecologiche. Esempi di catastrofi possono essere gli impatti astronomici sulla Terra (prodotti da asteroidi, comete e meteoriti), il degrado ambientale causato dalle specie che trasformano il loro habitat nel corso del tempo oppure gli eventi casuali come l'inondazione che ha portato alla formazione delle Channeled Scablands nello stato di Washington negli Stati Uniti. Qualunque sia l'evento scatenante, la comparsa di nuove specie non è il risultato di modifiche graduali, attraverso un accumulo di piccole mutazioni dei singoli individui. Le catastrofi, isolano spazialmente una o più sottopopolazioni impedendo che queste interagiscano con la specie madre. Pertanto, le piccole mutazioni, se nella situazione ecologica iniziale erano tenute sotto controllo, quando le sottopopolazioni vengono marginalizzate, si esplicano improvvisamente. Isolata dal punto di

³⁶ “**Le specie di generi e classi diversi non sono cambiate alla stessa velocità**, né nella stessa misura. Nei più antichi strati terziari si possono ancora trovare alcune conchiglie viventi in mezzo a una moltitudine di forme estinte. [...] La Lingula del Siluriano differisce poco dalle specie viventi di questo genere.”

³⁷ “Molte specie, una volta formatesi, non subiscono ulteriori cambiamenti e si estinguono senza lasciare discendenti modificati; e **i periodi durante i quali le specie hanno subito modificazioni**, sebbene lunghi in termini di anni, **sono probabilmente stati brevi rispetto ai periodi durante i quali hanno mantenuto la stessa forma.**”

vista riproduttivo, ciascuna sottopopolazione costituirà la fonte di un nuovo evento di speciazione futuro.

Nel modello dell'equilibrio punteggiato, l'apparizione improvvisa di nuove specie che punteggia i lunghi periodi di stabilità morfologica (o stasi) avviene per divisione di una specie ancestrale. La discontinuità morfologica si manifesta attraverso un rapido processo di speciazione (*salto*, o *balzo*, improvviso) in cui una specie si divide in due o più specie distinte. Il modello è solitamente rappresentato da un diagramma di barre verticali (indicanti stasi evolutive) separate da intervalli orizzontali (rappresentanti salti improvvisi), come mostrato in Figura 2:

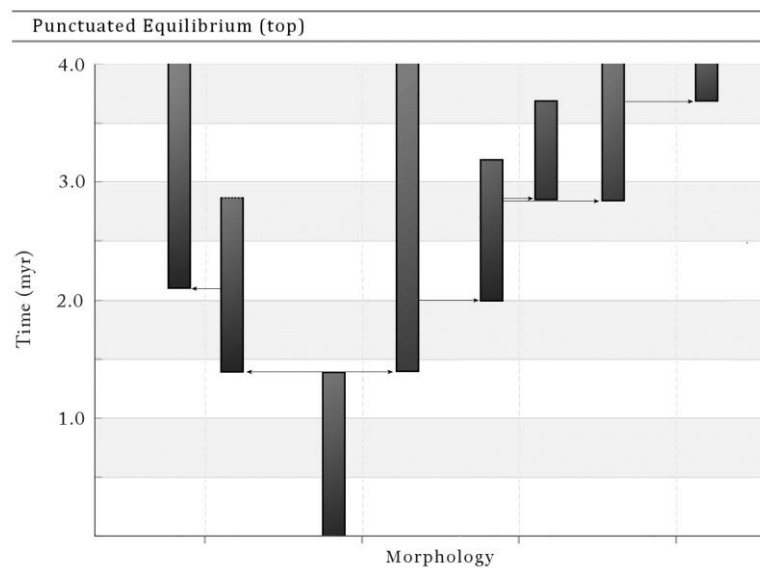


Figura 2: Rappresentazione del modello degli equilibri punteggiati.
Immagine tratta da (Chavez, 2018)

In altre parole, le *biforcazioni* sono al centro della concezione di Gould della storia naturale. In particolare, osserviamo che l'attraversamento dei confini disciplinari non è unidirezionale. Infatti, non solo la nozione di biforcazione entra con tutta la sua carica di contenuto, come vedremo tra poco, nell'ambito della biologia evolutiva, ma anche le idee di punteggiatura, in quegli anni, influenzano e risuonano con altre discipline; pensiamo, per esempio, al lavoro di René Thom sulla teoria delle catastrofi, antesignano della moderna scienza del caos e della complessità.

Le considerazioni fatte finora mostrano che la biologia evolutiva costituisce un ambito scientifico, diverso dalla fisica, che può aiutare a chiarificare la struttura del tempo interno-kairologico della complessità dal punto di vista immaginativo. I tratti caratteristici dei due modelli evolutivi, il gradualismo e gli equilibri intermittenti, portano con sé echi di alcune proprietà peculiari delle strutture temporali della fisica, il *tempo esterno-cronologico* e il *tempo interno-kairologico*. In particolare, gli aspetti di gradualità e continuità nell'evoluzione delle specie che, secondo il modello del gradualismo, avviene attraverso processi trasformativi costanti e uniformi, risuonano con la proprietà di *progressione lineare: chronos* che

caratterizza la struttura del *tempo esterno-cronologico*. Analogamente, l'idea centrale di un percorso evolutivo costituito da una successione di "istanti", tutti della stessa importanza, echeggia con la proprietà di *visione statica del mondo*. Allo stesso modo, la discontinuità segnata dalla variazione del ritmo del processo evolutivo delle specie, le quali, secondo il modello degli equilibri punteggiati, manifestano cambiamenti morfologici notevoli nell'arco di poco tempo, risuona con la proprietà di *sfida alla progressione lineare di chronos* che caratterizza la struttura del *tempo interno-kairologico*. Analogamente, l'ipotesi dell'esistenza di alcuni "istanti" più importanti di altri, corrispondenti a cambiamenti strutturali qualitativi e irreversibili della popolazione di una specie, echeggia con la proprietà di *visione dinamica del mondo*. Dunque, facendo un'analogia tra i modelli evolutivi e le strutture temporali della fisica, è possibile evidenziare alcune proprietà del tempo interno-kairologico, che risuonano con la teoria degli equilibri punteggiati, mettendole a confronto con le proprietà del tempo esterno-cronologico che, invece, echeggiano nel modello del gradualismo.

Osserviamo, inoltre, che le riflessioni di Gould possono aiutare a chiarificare la struttura del tempo interno-kairologico della complessità anche dal punto di vista concettuale. La storia naturale, secondo il modello degli equilibri punteggiati, è composta da punti di scelta in cui il corso dell'evoluzione può prendere strade diverse. Per Gould sono i piccoli eventi, apparentemente trascurabili e insignificanti, che accadono in prossimità di questi punti, a giocare un ruolo fondamentale nel processo evolutivo.

Ne "La vita meravigliosa" Stephen Jay Gould (2018) costruisce un'argomentazione serrata contro la teleologia e fa un appello per il riconoscimento del contingente nell'evoluzione. Il libro racconta la storia di un errore scientifico - l'errata interpretazione dei risultati paleontologici dell'*argillite di Burgess* (dal nome del Monte Burgess, vicino al luogo di rinvenimento) nelle Montagne Rocciose del Canada. Nel 1909, il geologo Charles Doolittle Walcott scoprì l'*argillite di Burgess* e, all'epoca, la maggior parte dei paleontologi concordava sul fatto che la popolazione di questi organismi corrispondesse a un periodo evolutivo di grande importanza, ovvero quello successivo alla poco conosciuta esplosione cambriana avvenuta circa 530 milioni di anni fa. Secondo Walcott gli organismi di Burgess costituivano le forme ancestrali della vita animale odierna, cioè appartenevano a phyla di animali attualmente esistenti. Questa interpretazione, osserva Gould, si inserisce all'interno di una visione teleologica dell'evoluzione basata sull'idea che la storia naturale sia un cammino lineare che tende verso la formazione di specie sempre più complesse, in modo tale che le successive siano "migliori" delle precedenti. In particolare, la visione teleologica interpreta lo sviluppo evolutivo della vita animale come un "cono di diversità crescente" che procede da un singolo vertice a una gamma sempre più ampia e divergente di specie, in cui i rami precedenti rappresentano forme ancestrali meno sviluppate dei rami successivi. Gould rifiuta l'immagine del cono che, con la sua direzionalità e l'idea che il presente è più vario e complesso del passato, porta con sé le nozioni teleologiche della "marcia del progresso" e dell'inevitabilità. Lo scienziato ritiene che, sopraffatto dal paradigma teleologico, Walcott non riuscì ad apprezzare l'ampia diversità strutturale degli organismi che aveva scoperto.

Negli anni Sessanta del '900, un'analisi più attenta dei reperti del deposito fossile di Burgess Shale ha mostrato che, contrariamente alla valutazione iniziale, molti degli esemplari sembrano, in realtà, essere fossili di organismi che non hanno discendenti evolutivi viventi. Infatti, circa 15-20 organismi diversi, distinti l'uno dall'altro per le rispettive caratteristiche strutturali, rappresentano phyla che non hanno progenie viventi. In altre parole, la grande maggioranza delle prime forme di vita è stata eliminata e i pochi sopravvissuti si sono diversificati in specie con discendenti contemporanei. Inoltre, sottolinea con forza Gould, non c'è motivo di ritenere che gli organismi sopravvissuti fossero quelli più sviluppati, cioè l'adattamento degli organismi al loro ambiente non richiede una spiegazione teleologica. Tuttavia, come osserva la filosofa della scienza Yemima Ben-Menahem (1997), il modello teleologico dell'evoluzione è così saldamente radicato nel pensiero che, pur essendo stato superato in termini di teoria scientifica, rimane influente nella pratica: l'evoluzione è ancora percepita come uno sviluppo lineare, con l'homo sapiens come prodotto più avanzato. La reinterpretazione dei reperti di Burgess Shale ha mostrato che il presente biologico non è da intendersi come il prodotto di un processo teleologico e inevitabile ma, anzi, sostiene Gould, è da ritenere fondamentalmente contingente. Riportiamo un passaggio in cui introduce il concetto della *contingenza*:

Il rifiuto della scala e del cono non ci getta nelle braccia del suo presunto opposto: il puro caso nel senso di lanciare una moneta o di Dio che gioca a dadi con l'universo. Come la scala e il cono sono iconografie limitanti per la storia della vita, così l'idea stessa di dicotomia restringe dolorosamente il nostro pensiero. La dicotomia ha la sua sfortunata iconografia: una singola linea che abbraccia tutte le possibili opinioni, con i due estremi che rappresentano due opposti polari, nella fattispecie il **determinismo e il caso**. ...

Io rifiuto decisamente qualsiasi schema concettuale che situi le nostre scelte su una linea e che sostenga che l'unica alternativa a due posizioni estreme si trovi in una posizione intermedia. Punti di vista più fecondi richiedono spesso che, per sottrarci alla dicotomia, usciamo decisamente dalla linea.

Scrivo questo libro per suggerire una terza possibilità, fuori dalla linea. Io credo che **la fauna di Burgess ricostruita, interpretata alla luce del tema della ripetizione del film della vita**, offra un forte sostegno alla seguente concezione diversa della vita: **ogni ripetizione del film condurrebbe l'evoluzione su una via radicalmente diversa da quella intrapresa in realtà**. Ma le differenze conseguenti nell'esito non significano che l'evoluzione sia priva di significato, e priva di un ordine significante; la via divergente della ripetizione sarebbe altrettanto interpretabile, altrettanto spiegabile, a posteriori, quanto la via reale. La diversità dei possibili itinerari dimostra però che **i risultati finali non possono essere predetti fin dal principio. Ogni passo procede sulla base di precise ragioni, ma non si può specificare un finale sin dal principio, e nessun finale si verificherebbe mai una seconda volta nello stesso modo**, perché ogni via procede passando per migliaia di fasi improbabili. **Se cambia un evento remoto, anche di pochissimo e in un modo privo di alcuna apparente importanza, l'evoluzione imboccherà un canale radicalmente diverso**.

Questa terza possibilità rappresenta né più né meno che l'essenza della storia. Il suo nome è **contingenza**, e la contingenza è una cosa a sé, non un'attenuazione del determinismo per opera del caso (2018, pp. 47–48).

Per Gould, la storia naturale non segue un percorso predefinito, ma ammette molteplici direzioni possibili, determinate dalla contingenza. Secondo lo scienziato, anche l'esistenza dell'uomo è frutto di una serie di eventi che avrebbero potuto prendere un corso diverso. Egli illustra il suo punto di vista con il famoso esperimento mentale che consiste nel ripetere il film della vita per verificare se il risultato finale rimarrebbe invariato. Gould sostiene che il mondo vivente è il prodotto di una storia particolare, poiché l'evoluzione avrebbe potuto seguire direzioni radicalmente diverse. Di conseguenza, l'uomo rappresenta un risultato contingente. Scrive Gould: "Se ripetiamo un milione di volte il film della vita a cominciare da Burgess, dubito che tornerà mai a svilupparsi qualcosa di simile all'Homo Sapiens" (2018, p. 297).

È importante notare che Gould non fornisce una definizione formale di contingenza, un concetto che i filosofi della scienza hanno cercato chiarire e formalizzare nel corso degli anni. In particolare, il filosofo Eric Cyr Desjardins (2011) ha definito la contingenza come la sensibilità del percorso evolutivo alle piccole variazioni che possono verificarsi nel corso della storia, incluse le variazioni delle condizioni iniziali e gli eventi apparentemente insignificanti che possono deviare i percorsi rendendo i risultati imprevedibili.

Riportiamo di seguito due passaggi in cui Gould allude al ruolo fondamentale delle condizioni iniziali e degli eventi nel corso della storia:

Una spiegazione storica non si fonda su deduzioni dirette da leggi di natura, bensì da una sequenza imprevedibile di stati antecedenti, in cui **ogni mutamento importante in qualsiasi passo della sequenza avrebbe modificato il risultato finale**. Questo perciò è **dipendente, o contingente**, da tutto ciò che è venuto prima: la firma incancellabile e determinante della storia (2018, p. 290).

Piccoli eventi bizzarri iniziali, occorrenti senza alcuna ragione particolare, **mettono in moto serie di conseguenze che fanno sembrare retrospettivamente inevitabile un particolare futuro. Ma basta una lievissima differenza all'inizio per avviare la storia verso un'altra direzione plausibile, la quale diverge di continuo rispetto alla sua via originaria. I risultati finali sono molto diversi, anche se la perturbazione iniziale può apparirci banale**. Se i priapulidi avessero regnato in mare, non penso che l'australopiteco avrebbe mai camminato eretto nelle savane africane. E quindi, per noi stessi, io penso che possiamo solo ammirare con stupore questo improbabile *brave new world* che ha in sé un così gran numero di persone interessanti! (2018, p. 332)

Queste considerazioni evidenziano come, insieme alle *biforcazioni*, anche il concetto della sensibilità dei sistemi complessi alle perturbazioni vicino ai punti di biforcazione sia un elemento centrale nella concezione di Gould della storia naturale. Inoltre, la contingenza, nell'ambito della biologia evolutiva, risuona con la proprietà di *alta sensibilità a rumori esterni e interni* caratteristica del *tempo interno-kairologico*. In altri termini, le riflessioni di Gould aiutano a chiarire la struttura temporale della complessità, sia da un punto di vista immaginativo che concettuale.

In questa sezione abbiamo visto come la biologia evolutiva possa arricchire il *pensiero della complessità* con una nuova parola, la contingenza, che amplia i significati dei concetti fisici mettendone in risalto le loro specificità. Abbiamo inoltre mostrato come i concetti fisici del *pensiero della complessità* abbiano permesso a Gould di cambiare il paradigma scientifico. Con le nozioni di biforcazione e di sensibilità dei sistemi complessi alle perturbazioni vicino ai punti di biforcazione, Gould è entrato nel dibattito sul tema di che cos'è la stasi e sul ruolo delle *catastrofi*, superando la visione tradizionale teleologica dell'evoluzione delle specie a favore di un modello che concepisce la storia naturale come un percorso contrassegnato da punti di scelta che aprono a strade evolutive diverse.

3.4 Il *Tempo aperto* e la tecnica del *Sideshadowing* nella critica letteraria

In questa sezione conclusiva del capitolo, esploreremo l'ambito della critica letteraria mostrando come Gary Saul Morson, studioso americano di letteratura russa e comparata, adotti le strutture temporali della fisica, in particolare la distinzione, messa in luce da Prigogine, tra tempo inteso come *parametro* e tempo inteso come *operatore*, per ampliare il pensiero di Mikhail Bakhtin (1895-1975), critico letterario e filosofo russo. In particolare, esamineremo come le riflessioni di Morson e i termini da lui conati possano contribuire a chiarire la struttura del *tempo interno-kairologico* della complessità dal punto di vista immaginativo.

Il lavoro di Morson ha notevolmente contribuito alla comprensione delle opere di Bakhtin, il cui pensiero è stato riscoperto sia in Unione Sovietica che in Occidente solo negli anni Sessanta e Settanta. Morson introduce il termine "prosaica" per delineare due concetti correlati ma distinti che permeano l'opera del pensatore russo. In primo luogo, contrapposto alla *poetica*, il concetto di *prosaica* descrive una teoria letteraria che dà primaria importanza alla prosa in generale e al romanzo in particolare rispetto ai generi poetici. In secondo luogo, la *prosaica* si estende oltre la teoria letteraria per indicare una forma di pensiero che riconosce l'importanza del quotidiano, dell'ordinario, del "prosaico" nel dare forma e significato alla vita individuale e alla storia collettiva (Morson & Emerson, 1990, p. 15).

Morson introduce una "teoria della *prosaica*" che offre sia un'alternativa alle convenzioni strutturali e poetiche su cui si basano molte opere letterarie, sia un modo di interpretare il mondo. Egli critica gli strutturalisti, sottolineando come essi tendano a considerare un'opera letteraria come un *prodotto* costruito "dalla fine", dove ogni parte è disposta in una rigida gerarchia prestabilita e si integra ordinatamente nell'insieme. Questo approccio permette al lettore di percepire l'opera letteraria come una struttura sincronica che si *dispiega* nel tempo. In altre parole, le norme strutturali, osserva Morson, rendono un'opera letteraria *spazializzata* (1998, p. 600).

In aggiunta, dal punto di vista filosofico, la teoria della prosaica suggerisce che gli eventi più significativi della vita personale o della storia collettiva possono essere quelli ordinari e prosaici che spesso vengono trascurati perché non sono eclatanti. Morson, nel suo studio sulla filosofia di Bakhtin (1990), fa riferimento al filosofo tedesco Ludwig Wittgenstein, il quale suggerisce che spesso gli aspetti più significativi delle cose ci sfuggono proprio a causa della loro semplicità e della loro familiarità, tanto che non riusciamo a notarli nonostante siano sempre presenti davanti ai nostri occhi.

Sulla scia di Bakhtin, Morson esplora una serie di pensatori, sia russi che occidentali, tra i quali emerge Lev Tolstoj come figura di spicco. Tolstoj afferma che considerare importanti solo le decisioni cruciali, che sembrano avere effetti di vasta portata, “is like assuming that it may harm a watch to be struck against a stone, but that a little dirt introduced into it cannot be harmful” (1990, p. 23)³⁸. Morson osserva che, nel tentativo di catturare lo spirito di un’epoca storica specifica, Tolstoj cerca di spostare l’attenzione dai grandi eventi drammatici socioeconomici e politici verso i *complessi processi* della vita quotidiana delle persone, verso “richly trivial events hidden in the diffuse light of plain view”³⁹ (1988, p. 271). Secondo Tolstoj, la vita “consist of a series of almost imperceptible choices; it is the myriad infinitesimally small decisions we make and the aggregate of habits we acquire from moment to moment that shape selves and constitute personal identity”⁴⁰ (Morson, 1988, p. 269).

Morson osserva che mentre la *poetica* tratta un’opera letteraria come un *prodotto* in cui gli eventi si dispiegano per completare uno schema predeterminato, la *prosaica* tende a considerarla come un *processo* in cui gli eventi presenti possono influenzare l’evoluzione degli individui in direzioni diverse, a seconda del contesto e delle scelte fatte.

Espandendo il lavoro di Bakhtin, il quale vedeva le opere letterarie come espressioni di forme di pensiero, Morson identifica nella distinzione tra *poetica* e *prosaica* la manifestazione di una specifica struttura temporale elaborata dai vari scrittori. Morson si serve delle concezioni di tempo della fisica, *tempo come parametro* e *tempo come operatore*, per chiarire le sue intuizioni e sistematizzare i suoi studi. Egli conclude che le opere letterarie si fondano generalmente su una struttura temporale aperta o chiusa. Il *tempo chiuso* rappresenta l’opera letteraria come un prodotto finito e trasmette un senso di inevitabilità degli eventi. In queste opere, secondo Morson, è sempre presente un’intenzionalità e continui anticipi. Il tempo chiuso è *simmetrico*: gli eventi acquistano significato non solo in base a ciò che li precede, ma anche in base a dove devono portare per completare al meglio la struttura dell’opera. Morson (2013) scrive:

When time is understood as closed, the world resembles a well-made literary work, a finished product described by poetics from Aristotle to the present. Such works create

³⁸ “Equivale a pensare che possa danneggiare un orologio essere colpito da una pietra, mentre un po' di sporco introdotto al suo interno non possa causare danni.”

³⁹ “eventi riccamente banali nascosti nella luce diffusa della vista quotidiana”

⁴⁰ “consiste in una serie di scelte quasi impercettibili; sono le miriadi di decisioni infinitamente piccole che prendiamo e l'insieme delle abitudini che acquisiamo di momento in momento a plasmare il sé e a costituire l'identità personale”

a sense of inevitability. Everything has to be just as it is: nothing in it is just there, and a sufficient reason accounts for each detail. Everything plays its part in a total structure. That is why, as we read a literary work, we can guess at its ending by imagining what an effective structure would require (p. 5).⁴¹

Morson chiama *foreshadowing* (prefigurazione) la tecnica utilizzata dagli scrittori, più o meno consapevolmente, nelle loro opere letterarie che esprimono una struttura temporale chiusa. Spiegando questa tecnica, Morson, afferma che alcuni eventi non sono solo causati da eventi precedenti, ma sono anche conseguenza di eventi futuri. Di conseguenza, la struttura temporale di queste opere letterarie è caratterizzata dalla *prevedibilità*, dove il futuro è determinato e conosciuto tanto quanto il passato, e il presente non ha maggiore importanza degli altri momenti. In queste opere letterarie che trasmettono un senso della vita o della storia come prodotto finito le scelte, le responsabilità e la creatività individuali non hanno un significato particolare. Scrive Morson:

Even when foreshadowing is not explicitly used, it is implicitly present by virtue of a narrative's reliance on structure and closure. In a well-constructed story, everything points (or will turn out to point) to the ending and to the pattern that will eventually be revealed. When we finish reading such a work, we can see that **each detail can be explained not only causally, by what happened before, but also retrospectively in terms of the completed structure.** In rereading it, we may take pleasure in contemplating this **double explanation of events** (1994, p. 7).⁴²

The very term *foreshadowing* indicates backward causality. **A spatial metaphor for a temporal phenomenon, it is a shadow cast in advance of an object;** its temporal analog is **an event that indicates (is the shadow of) another event to come.** The spatial image contains nothing unfamiliar. An object in our path may cast a shadow backward, so that we reach the shadow before reaching the object casting it; and from experience, we may know to expect the object when we encounter the shadow. The shadow does not cause the object ahead but is caused by it, even though we encounter the shadow first. A temporal foreshadow works the same way. The storm is there because the catastrophe follows; it is an effect of that future catastrophe visible in temporal advance, much **as the shadow of an object may be visible in spatial advance** (1994, p. 48).⁴³

⁴¹ “Quando il tempo è inteso come chiuso, il mondo assomiglia a un'opera letteraria ben fatta, un prodotto finito descritto dalla poetica da Aristotele fino ai giorni nostri. Queste opere creano un senso di inevitabilità. Tutto deve essere esattamente come è: nulla è semplicemente lì, e ogni dettaglio è giustificato da una ragione sufficiente. Ogni elemento svolge il suo ruolo in una struttura totale. Ecco perché, leggendo un'opera letteraria, possiamo intuire il suo finale immaginando ciò che una struttura efficace richiederebbe.”

⁴² “Anche quando la prefigurazione non è esplicitamente utilizzata, è implicitamente presente grazie alla dipendenza della narrazione dalla struttura e dalla chiusura. In una storia ben costruita, tutto punta (o si rivelerà puntare) verso il finale e il modello che alla fine sarà svelato. Quando finiamo di leggere un'opera di questo tipo, possiamo vedere che **ogni dettaglio può essere spiegato non solo causalmente, da ciò che è accaduto prima, ma anche retrospettivamente in termini della struttura completata.** Rileggendola, possiamo provare piacere nel contemplare questa **doppia spiegazione degli eventi.**”

⁴³ “Il termine stesso *foreshadowing* indica una causalità retrospettiva. **Una metafora spaziale per un fenomeno temporale, è un'ombra proiettata in anticipo rispetto a un oggetto;** il suo analogo temporale è **un evento che**

Foreshadowing robs a present moment of its presentness ... **foreshadowing lifts the veil on a future that has already been determined and inscribed.** Somehow, **a specific later event is already given at the time of an earlier event.** Thus the sense of many possible futures, which we experience at every present moment, is revealed as an illusion. What *will be must be; events are heading in a single direction; time is entirely linear ... because the future is either known for certain or calculable (at least in principle) with mathematical certainty.*

Wisdom in such a world consists in the appreciation of **inevitability**. As readers or viewers of a story with foreshadowing, we recognize a character's struggle for alternatives as doomed and deluded (1994, p. 117).⁴⁴

In base a quanto appena esaminato, notiamo che i tratti distintivi delle opere letterarie caratterizzate dalla struttura temporale chiusa e dalla tecnica del foreshadowing, evidenziate da Morson, portano con sé echi di alcune proprietà peculiari del *tempo esterno-cronologico* della fisica classica. In particolare, la prevedibilità degli eventi, l'assenza di momenti più significativi di altri e la percezione dei personaggi come semplici spettatori del mondo in cui vivono risuonano con le proprietà di *progressione lineare: chronos, visione statica del mondo e passività*.

Il *tempo aperto*, invece, si ricollega alla concezione dell'opera letteraria come processo e trasmette un senso di incertezza e imprevedibilità degli eventi. Caratterizzato dall'*asimmetria*, per i personaggi delle opere il passato è stabile, il futuro appare aperto e il momento presente assume un'importanza particolare, poiché le scelte individuali o la contingenza possono generare esiti divergenti. Come afferma Morson:

Il tempo è fondamentale. **Tutti noi viviamo la nostra vita come un'apertura verso un futuro incerto. Non abbiamo alcuna garanzia che ogni evento della nostra vita si riveli significativo o si inserisca in uno schema significativo.** Ma l'arte narrativa di successo, a differenza della vita, in genere garantisce tale significato, e questo è uno dei motivi per cui quasi tutti percepiscono l'artificiosità anche della storia più realistica. Per quanto l'autore possa essere preciso nel registrare la trama della vita quotidiana, **il fatto stesso**

indica (è l'ombra di) un altro evento futuro. L'immagine spaziale non contiene nulla di sconosciuto. Un oggetto sul nostro cammino può proiettare un'ombra all'indietro, così che raggiungiamo l'ombra prima di raggiungere l'oggetto che la proietta; e dall'esperienza, possiamo sapere di aspettarci l'oggetto quando incontriamo l'ombra. L'ombra non causa l'oggetto avanti a noi, ma è causata da esso, anche se incontriamo prima l'ombra. Un presagio temporale funziona allo stesso modo. La tempesta è lì perché la catastrofe segue; è un effetto di quella catastrofe futura visibile in anticipo temporale, proprio **come l'ombra di un oggetto può essere visibile in anticipo spaziale.**"

⁴⁴ **"Il foreshadowing** priva un momento presente della sua immediatezza... **solleva il velo su un futuro che è già stato determinato e iscritto.** In qualche modo, **un evento specifico futuro è già dato al momento di un evento precedente.** Pertanto, il senso di molti futuri possibili, che sperimentiamo in ogni momento presente, è rivelato come un'illusione. Ciò che sarà, deve essere; **gli eventi stanno andando in una sola direzione; il tempo è interamente lineare... perché il futuro è o conosciuto con certezza o calcolabile (almeno in linea di principio) con certezza matematica.** La saggezza in un mondo del genere consiste nell'apprezzamento dell'**inevitabilità**. Come lettori o spettatori di una storia con foreshadowing, riconosciamo la lotta di un personaggio per trovare alternative come destinata al fallimento e illusoria."

della struttura di un'opera rende la sua temporalità radicalmente diversa da quella della vita reale.

Nella vita, la maggior parte delle persone considererebbe futile prevedere il proprio futuro sulla base di ciò che sarebbe la storia più efficace. Ma nella letteratura, questo modo di pensare alla vita dei personaggi è spesso giustificato. Nei romanzi c'è un momento in cui tutti i fili sciolti devono essere legati insieme. Ma il tempo reale è un processo continuo che non ha nulla a che vedere con la chiusura letteraria. ...

TIME IS OF THE ESSENCE. **All of us directly experience our lives as opening into an uncertain future. We possess no guarantee that each event in our lives will prove to be of significance or will fit a meaningful pattern.** But successful narrative art, unlike life, does typically ensure such significance, which is one reason almost everyone senses the artificiality of even the most realistic story. However precise the author may be in recording the texture of daily life, **the very fact of a work's structure renders its temporality radically different from that of real life.**

In life, most people would regard it as futile to forecast one's future on the basis of what would make the most effective story. But in reading literature, this way of thinking about characters' lives is often justified. In novels there is a point when all loose threads must be tied together. But real time is an ongoing process without anything resembling literary closure (1998, p. 599).⁴⁵

I believe that a **great deal of the history of thought in many areas - ranging from biology and physics to economics, anthropology, and city planning, as well as literature and philosophy - manifests a continuing dialogue between various models that resemble poetics and those that strive to incorporate a real sense of process** (1998, pp. 600–601).⁴⁶

In the view of the tradition [poetics], time is simply t in an equation. As d'Alembert remarked in 1754, it is a mere 'geometrical parameter' Newton's equations can be run equally well in both directions. We can just as easily retrodict the position of Mars as predict it. **The directedness of time is illusory.** [...]

From this perspective, the present moment is simply the one where we happen to be located. It is like the page of a novel we happen to have reached. What happens later is already determined, indeed, already accomplished. The present moment has no presentness. [...]

⁴⁵ "IL TEMPO È ESSENZIALE. **Tutti noi viviamo le nostre vite aprendo un futuro incerto. Non abbiamo la garanzia che ogni evento nelle nostre vite si rivelerà significativo o si inserirà in uno schema dotato di senso.** Tuttavia, l'arte narrativa di successo, a differenza della vita, tipicamente garantisce tale significato, il che è una delle ragioni per cui quasi tutti percepiscono l'artificialità anche della storia più realistica. Per quanto l'autore possa essere preciso nel registrare la trama della vita quotidiana, **il solo fatto dell'esistenza di una struttura narrativa rende la sua temporalità radicalmente diversa da quella della vita reale.** Nella vita, la maggior parte delle persone considererebbe futile prevedere il proprio futuro basandosi su ciò che renderebbe la storia più efficace. Ma nella lettura della letteratura, questo modo di pensare alla vita dei personaggi è spesso giustificato. Nei romanzi arriva un momento in cui tutti i fili sciolti devono essere intrecciati insieme. Ma il tempo reale è un processo continuo senza nulla che assomigli alla chiusura letteraria."

⁴⁶ "Credo che una **gran parte della storia del pensiero in molti campi - che vanno dalla biologia e dalla fisica all'economia, all'antropologia e alla pianificazione urbana, così come alla letteratura e alla filosofia - manifesti un dialogo continuo tra vari modelli che assomigliano alla poetica e quelli che cercano di incorporare un reale senso di processo.**"

By contrast, **the counter-traditional [prosaics] view regards time not as a parameter but as an 'operator'. Time is genuinely asymmetrical and has an inherent directedness.** The past is given, but the future is what we, or sheer contingency, make it. **The present has more than one possibility hidden in its womb, and some possible futures are never born while others come to be only because of what we do or what chances to happen.** [...] **Human effort can affect the future** in a way that it cannot affect the past. **We are, as Niels Bohr remarked, actors as well as spectators** (2013, pp. 67–69).⁴⁷

Morson chiama *sideshadowing* la tecnica utilizzata dagli scrittori che esprimono una struttura temporale aperta nelle loro opere letterarie. Lo studioso osserva che molti scrittori nel corso della storia hanno ritenuto impossibile rendere la temporalità di una narrazione isomorfa alla struttura del tempo aperto, ad eccezione dei “two extreme devotees of realism, Tolstoj and Dostoevsky”⁴⁸ (1998, p. 600): Tolstoj mirava a rappresentare la contingenza del mondo, mentre Dostoevskij cercava di riprodurre il libero arbitrio. Morson scrive:

The greatest novelists, and especially Dostoevsky and Tolstoj, posed what the Russians called the “accursed questions” (*proklyatye voprosy*): **are we responsible for what we do or is it all determined for us?** Are our choices real or do they only seem so? Does the objective view of the world include everything, or is it essentially incomplete? Does it in fact omit what is most valuable to us, our direct sense of a subjective self? Is our selfhood given to us by outside forces, or do we in part make it ourselves? **Do we change in unpredictable ways or merely reveal already given qualities?** (2013, p. 2)⁴⁹

Quando si usa la tecnica del *sideshadowing*, spiega Morson, oltre agli eventi concreti e a quelli impossibili si trova un *regno di mezzo* costituito da tutti gli eventi possibili che sarebbero potuti accadere. Nelle opere letterarie che trasmettono un senso della vita o della storia come processo aperto, il lettore percepisce che le vicende passate sarebbero

⁴⁷ “Secondo la tradizione [poetica], il tempo è semplicemente **t in un'equazione**. Come osservò d'Alembert nel 1754, è un mero **'parametro geometrico'**. Le equazioni di Newton possono essere eseguite altrettanto bene in entrambe le direzioni. Possiamo prevedere la posizione di Marte così come possiamo retroprevederla. **La direzionalità del tempo è illusoria.** [...] Da questa prospettiva, il momento presente è semplicemente quello in cui ci troviamo. È come la pagina di un romanzo che abbiamo raggiunto. Ciò che accade dopo è già determinato, anzi, è già compiuto. Il momento presente non ha presenza. [...]

Al contrario, **la visione contro-tradizionale [prosaica] considera il tempo non come un parametro, ma come un 'operatore'. Il tempo è genuinamente asimmetrico e ha una direzionalità intrinseca.** Il passato è dato, ma il futuro è ciò che noi, o la pura contingenza, facciamo. **Il presente nasconde più di una possibilità nel suo grembo, e alcuni futuri possibili non nascono mai, mentre altri si realizzano solo a causa di ciò che facciamo o di ciò che accade per caso.** [...] Lo sforzo umano può influenzare il futuro in un modo che non può influenzare il passato. **Come osservò Niels Bohr, siamo attori oltre che spettatori.**”

⁴⁸ “due devoti estremi del realismo, Tolstoj e Dostoevskij”

⁴⁹ “I più grandi romanzieri, in particolare Dostoevskij e Tolstoj, posero quelle che i russi chiamavano le “domande maledette” (*proklyatye voprosy*): **siamo responsabili delle nostre azioni o tutto è già determinato per noi?** Le nostre scelte sono reali o lo sembrano soltanto? La visione oggettiva del mondo include tutto o è essenzialmente incompleta? Omette forse ciò che è più prezioso per noi, il nostro senso diretto di un sé soggettivo? La nostra identità ci viene data da forze esterne o la creiamo in parte noi stessi? **Cambiamo in modi imprevedibili o riveliamo semplicemente qualità già date?**”

potute andare diversamente, che esistono alternative reali al momento presente descritto e che il futuro comprende una pluralità di strade possibili. In altri termini, il sideshadowing non considera il presente e il futuro conseguenze inevitabili degli eventi passati. Scrive Morson:

I coined the term "sideshadowing" by analogy to foreshadowing. [...]

[S]ideshadowing is used to create a sense of that "something else." Instead of casting a shadow from the future, it **casts a shadow "from the side," that is, from the other possibilities. Along with an event, we see its alternatives;** with each present, another possible present. [...] In sideshadowing, two or more alternative presents, the actual and the possible, are made simultaneously visible. This is not a simultaneity in time but of times; we do not see contradictory actualities, but one possibility that was actualized and another that could have been but was not. **Time itself acquires a double and, often, many doubles. A haze of possibilities surrounds each actuality.** [...]

Sideshadowing invites us to inquire into the other possible presents that might have been and to imagine a quite different course of events. If only that chance incident had not happened, if only a different choice had been made, if only a favorable sequence of events had not been interrupted, or had been interrupted a moment later? what would have happened then? Sideshadowing constantly prompts questions of this sort. In permitting us to catch a glimpse of unrealized but realizable possibilities, sideshadowing demonstrates that our tendency to trace straight lines of causality (usually leading to ourselves at the present moment) oversimplifies events, which always allow for many possible stories (1998, pp. 601–602).⁵⁰

Sideshadowing restores **the possibility of possibility**. Its most fundamental lesson is: **to understand a moment is to grasp not only what did happen but also what else might have happened. Hypothetical histories shadow actual ones.** Some nonactual events enjoy their own kind of reality: the temporal world consists not just of actualities and impossibilities but also of real though unactualized possibilities. Sideshadowing invites us into this peculiar *middle realm*. [...]

Time ramifies, and the present we know is one of many possible presents. **Every actual moment could have been other, and it could lead to many possible futures, some more likely than others, but none inevitable**, as often appears. [...]

⁵⁰ "Ho coniato il termine 'sideshadowing' per analogia con 'foreshadowing'. [...] **Il sideshadowing** viene utilizzato per creare un senso di "qualcos'altro". Invece di proiettare un'ombra dal futuro, **proietta un'ombra "di lato", cioè dalle altre possibilità. Insieme a un evento, vediamo le sue alternative;** con ogni presente, un altro presente possibile. [...] Nel sideshadowing, due o più presenti alternativi, l'effettivo e il possibile, sono resi visibili simultaneamente. Questa non è una simultaneità nel tempo, ma di tempi; non vediamo attualità contraddittorie, ma una possibilità che si è realizzata e un'altra che avrebbe potuto essere ma non è stata. **Il tempo stesso acquisisce una doppia, e spesso molte doppie, dimensioni. Una nebbia di possibilità circonda ogni attualità.** [...] **Il sideshadowing ci invita a indagare sugli altri presenti possibili che avrebbero potuto essere e a immaginare un corso degli eventi completamente diverso.** Se solo quell'incidente casuale non fosse accaduto, se solo fosse stata fatta una scelta diversa, se solo una sequenza favorevole di eventi non fosse stata interrotta, o fosse stata interrotta un momento dopo, cosa sarebbe successo allora? Il sideshadowing solleva costantemente domande di questo tipo. Permettendoci di intravedere possibilità non realizzate ma realizzabili, il sideshadowing dimostra che la nostra tendenza a tracciare linee causali rette (di solito portandoci a noi stessi nel momento presente) semplifica eccessivamente gli eventi, che permettono sempre molte storie possibili."

Sideshadowing relies on a concept of time as *field of possibilities*. Each moment has a set of possible events (though by no means every conceivable event) that could take place in it. **From this field a single event emerges—perhaps by chance, perhaps by choice, perhaps by some combination of both with the inertia of the past,** and in any case contingently. To later observers, the other possibilities usually appear invisible or distorted. Thus a field is mistakenly reduced to a point, and, **over time, a succession of fields is reduced to a line. Sideshadowing restores the field and thereby recreates the fullness of time as it was** (1994, pp. 119–120).⁵¹

Analogamente a quanto visto in precedenza, i tratti caratteristici delle opere letterarie che presentano la struttura del *tempo aperto* e la tecnica del sideshadowing, evidenziate da Morson, portano con sé echi di alcune proprietà peculiari del *tempo interno-kairologico* della scienza della complessità. Nello specifico, l'imprevedibilità degli eventi, l'esistenza di momenti significativi e più importanti di altri, e la percezione dei personaggi delle opere di essere sia attori che spettatori del mondo in cui vivono risuonano con le proprietà di *sfida alla progressione lineare di chronos: kairos, visione dinamica del mondo e agency*. In altri termini, le riflessioni di Morson aiutano a chiarire la struttura temporale della complessità da un punto di vista immaginativo.

Concludendo, in questa sezione abbiamo osservato come l'ambito della critica letteraria possa arricchire il *pensiero della complessità* con nuovi termini, come il tempo aperto e il sideshadowing, che ampliano il significato del concetto fisico della molteplicità degli scenari possibili. Inoltre, abbiamo mostrato come le strutture temporali della fisica classica e della scienza della complessità abbiano permesso a Morson di espandere il pensiero del filosofo e critico letterario russo Bakhtin e, al contempo, di sistematizzare il suo lavoro di analisi delle opere letterarie all'interno di quella che egli stesso chiama *teoria della prosaica*.

⁵¹ “Il sideshadowing restituisce la *possibilità della possibilità*. La sua lezione più fondamentale è: **per comprendere un momento, bisogna afferrare non solo ciò che è accaduto, ma anche cos'altro avrebbe potuto accadere. Le storie ipotetiche affiancano quelle effettive.** Alcuni eventi non reali godono di una loro particolare realtà: il mondo temporale non consiste solo di attualità e impossibilità, ma anche di possibilità reali, sebbene non realizzate. Il sideshadowing ci invita in questo peculiare *regno intermedio*. [...]

Il tempo si ramifica, e il presente che conosciamo è uno dei tanti presenti possibili. **Ogni momento attuale avrebbe potuto essere diverso e potrebbe portare a molti futuri possibili, alcuni più probabili di altri, ma nessuno inevitabile**, come spesso appare. [...]

Il sideshadowing si basa su un concetto di tempo come *campo di possibilità*. Ogni momento ha un insieme di eventi possibili (anche se non tutti gli eventi concepibili) che potrebbero verificarsi. **Da questo campo emerge un singolo evento— forse per caso, forse per scelta, forse per una combinazione di entrambi con l'inerzia del passato**, e in ogni caso contingentemente. Per gli osservatori successivi, le altre possibilità solitamente appaiono invisibili o distorte. Così, un campo viene erroneamente ridotto a un punto e, **nel tempo, una successione di campi viene ridotta a una linea. Il sideshadowing restituisce il campo e quindi ricrea la pienezza del tempo com'era.**”

Capitolo 4

Dalle strutture temporali della complessità alla progettazione didattica

Introduzione

Nel presente lavoro di tesi abbiamo esplorato il *pensiero della complessità* in fisica attraverso le principali nozioni della teoria dei sistemi dinamici non lineari e della termodinamica lontana dall'equilibrio. Queste includono concetti come la stabilità, l'instabilità oltre l'equilibrio, che favorisce l'emergenza, i feedback (negativi e positivi), le biforcazioni e le rotture di simmetria conseguenti, i regimi attrattori, nonché l'ordine e la coerenza a lungo raggio. L'approccio dinamico-evolutivo alla scienza dei sistemi complessi si è dimostrato utile e prezioso in diversi ambiti di ricerca, come le scienze sociali (Byrne, 1998; Harvey & Reed, 1997) e gli studi sulle organizzazioni (Goldstein, 1999), rivelando la possibilità di correlare concetti fisici con fenomeni di natura diversa e consentendo un nuovo modo di studiarli.

Con questo lavoro di tesi vogliamo mettere in evidenza come tale approccio consenta di *immaginare* una struttura temporale alternativa rispetto a quella proposta dalla scienza classica. Il nostro obiettivo è valorizzare la struttura temporale offerta dalla scienza della complessità e contribuire alla progettazione di moduli didattici interdisciplinari mirati a far riflettere gli studenti delle scuole secondarie di secondo grado su come le diverse discipline concettualizzano e trattano i vari aspetti del tempo. Vogliamo creare ambienti di insegnamento e apprendimento che favoriscano la consapevolezza e la comprensione delle concezioni di tempo degli studenti, nonché dei modi personali e soggettivi di rapportarsi a esso, contribuendo così la loro formazione identitaria.

Nel Capitolo 1, partendo dalla distinzione tra tempo esterno ("parametro geometrico") e tempo interno ("operatore") introdotta da Prigogine e ispirandoci al pensiero greco sui "volti" del tempo, abbiamo costruito una griglia di proprietà che ci ha consentito di interpretare, dal punto di vista fisico, le strutture temporali del "tempo dell'orologio" e del "tempo della natura/esperienza" emerse dall'analisi dei due campioni di dati: saggi di futuro e racconti sulla complessità. Abbiamo così messo in relazione il "tempo dell'orologio" con la struttura temporale della fisica classica (*tempo esterno-cronologico*) e il "tempo della natura/esperienza" con la struttura temporale della scienza della complessità (*tempo interno-kairologico*).

Nel Capitolo 2 sono stati descritti i concetti principali della fisica dei sistemi complessi, con particolare riferimento alla teoria dei sistemi dinamici non lineari e alla termodinamica

lontana dall'equilibrio. Abbiamo esaminato il *pensiero della complessità* per individuare gli aspetti concettuali che permettono di evidenziare la struttura temporale della scienza della complessità, descritta nel Capitolo 1. Seguendo un approccio dinamico-evolutivo alla scienza della complessità, abbiamo riconosciuto le seguenti proprietà del tempo interno-kairologico: *Particolarità, Sfida alla progressione lineare di chronos: kairos, Alta sensibilità ai rumori interni ed esterni, Sorgente di un nuovo ordine e Visione dinamica del mondo.*

Nel Capitolo 3 abbiamo esaminato come l'applicazione della scienza dei sistemi complessi in diversi ambiti del sapere consenta di tornare al pensiero della complessità in fisica, con un significativo guadagno in termini di concettualizzazione. In particolare, la "dinamica circolare" tra i concetti fisici e gli altri contesti ha consentito di concepire l'interdisciplinarietà come un processo di analisi (o "spacchettamento") e di arricchimento concettuale. Uscire dall'ambito scientifico ha ampliato l'orizzonte del pensiero della complessità in fisica, permettendo contemporaneamente di evidenziarne le specificità.

In questo capitolo conclusivo, descriviamo due fenomeni di auto-organizzazione, uno in fisica e l'altro in chimica, che riteniamo particolarmente significativi per illustrare le peculiarità delle strutture temporali nella scienza della complessità. Gli esperimenti che proponiamo sono la convezione di Bénard e la reazione chimica oscillante di Belousov-Zhabotinsky. Abbiamo scelto questi fenomeni complessi in fisica e in chimica per due motivi fondamentali. Da un lato, l'interdisciplinarietà nelle STEM può aiutare gli studenti a sviluppare una comprensione del *pensiero della complessità*, esaminando contesti diversi e osservando fenomeni di transizione che portano a rotture di simmetria spaziale e temporale. Dall'altro lato, i due esperimenti possono stimolare una riflessione sulle strutture temporali, attraverso un processo dinamico e circolare tra discipline (in questo caso tra fisica e chimica) che, come discusso nel Capitolo 3, permette ai concetti della complessità di arricchirsi di significato e di *prendere vita*.

Nella sezione 4.2 introdurremo i due fenomeni di auto-organizzazione in fisica e chimica, che verranno descritti in dettaglio rispettivamente nelle sezioni 4.3 e 4.4. Il capitolo si concluderà con il racconto di un *episodio toccante* avvenuto durante la realizzazione di una versione riadattata degli esperimenti descritti in una classe seconda di Liceo scientifico.

4.1 Fenomeni di auto-organizzazione in fisica e in chimica

Sistemi come uno strato di fluido o una miscela di prodotti chimici possono generare, sotto certe condizioni, *fenomeni auto-organizzanti* su scala macroscopica, manifestandosi attraverso pattern spaziali o ritmi temporali. In entrambi i casi, gli effetti cooperativi e sinergici tra le molecole costituenti i sistemi giocano un ruolo cruciale nelle *transizioni* che portano alla formazione di nuovi stati ordinati. I fenomeni di auto-organizzazione sono caratterizzati dalla comparsa di *strutture dissipative* attraverso l'amplificazione di fluttuazioni casuali. In condizioni lontane dall'equilibrio, si stabilisce una relazione inaspettata tra le dinamiche interne dei sistemi complessi e le strutture spaziali e/o temporali emergenti su scala

macroscopica. Il comportamento coerente di un sistema dinamico complesso oltre l'instabilità del ramo termodinamico è oggetto di studio della "teoria della biforcazione", che studia la comparsa di nuove soluzioni in *momenti critici* noti come punti di biforcazione. Come discusso nel Capitolo 2, le biforcazioni che generano nuovi rami di sviluppo sono rappresentazioni geometriche della rottura di simmetria degli stati di equilibrio, un tratto distintivo dei sistemi complessi.

Tra la varietà di strutture dissipative che emergono attraverso la biforcazione, abbiamo scelto di focalizzarci sulla suddivisione spontanea di un fluido in celle nel regime di convezione e sull'apparizione di oscillazioni periodiche in un "orologio chimico". Nella sezione 4.3 descriviamo il fenomeno di auto-organizzazione in fisica, mentre nella sezione 4.4 approfondiamo il fenomeno di auto-organizzazione in chimica.

4.2 La convezione di Bénard

La convezione di Bénard rappresenta un classico esempio di fenomeno di auto-organizzazione che manifesta una struttura spaziale emergente (Figura 1). Come in ogni fenomeno di convezione, anche quella di Bénard è generata da forze che operano all'interno di un fluido. Essenzialmente, coinvolge il movimento ascendente di fluido caldo e quello discendente di fluido freddo. La convezione sottende a numerosi processi naturali, come i moti circolatori nell'atmosfera e negli oceani (che influenzano i cambiamenti climatici a breve e a medio termine) e la deriva dei continenti (movimento delle placche continentali indotto dai flussi nel mantello terrestre). Inoltre, la convezione è fondamentale per il trasferimento di energia e materia all'interno del Sole, incidendo significativamente sulla sua attività.

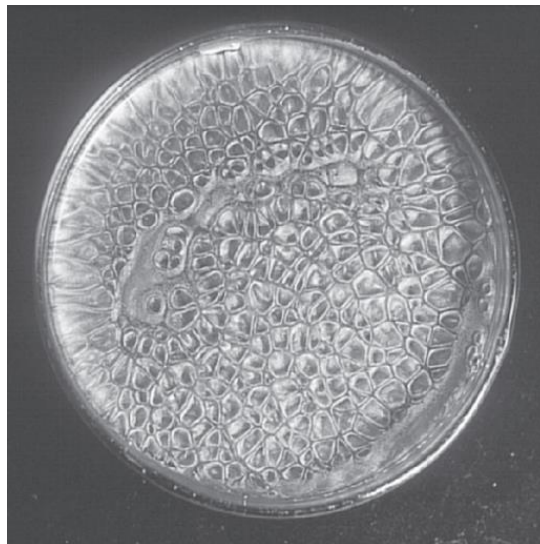


Figura 1: Celle convettive di Bénard che si originano spontaneamente quando un sottile strato di fluido (per esempio l'olio) viene riscaldato uniformemente dal basso. In questo caso è stata aggiunta polvere di alluminio al fluido. Immagine tratta da (Camazine, 2003, p. 13)

In laboratorio è possibile studiare il fenomeno della convezione utilizzando un apparato sperimentale di dimensioni ridotte. Questo esperimento, condotto per la prima volta all'inizio del secolo scorso dal ricercatore francese Henri Bénard (1901), offre l'opportunità di studiare diverse proprietà. Il suo dispositivo sperimentale era stato progettato per investigare il comportamento di uno strato sottile di olio di spermaceti (olio di balena) su una lastra metallica sospesa sopra un bagno d'acqua bollente a circa 100°C. L'olio veniva riscaldato uniformemente dal basso, mentre la superficie superiore si trovava a contatto con l'aria a temperatura ambiente (Figura 2).

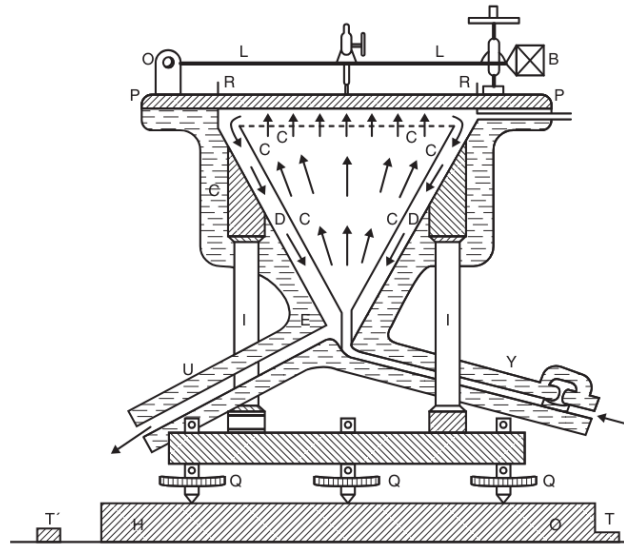


Figura 2: Schema dell'apparato sperimentale usato da Bénard nel 1901 per il suo progetto di dottorato. Immagine tratta da (Mutabazi et al., 2006, p. 18)

In questo esperimento, il contenitore del fluido aveva una larghezza molto superiore alla sua profondità, e Bénard osservò che oltre un certo gradiente verticale di temperatura, la superficie dell'olio subiva una trasformazione improvvisa: si formavano ordinatamente delle celle convettive esagonali (note come "celle di Bénard") lontano dai bordi del contenitore. Lo scienziato osservò anche la direzione del flusso del fluido: al centro di ogni cella, l'olio caldo saliva mentre lungo i bordi esagonali scendeva l'olio freddo (Figura 3).

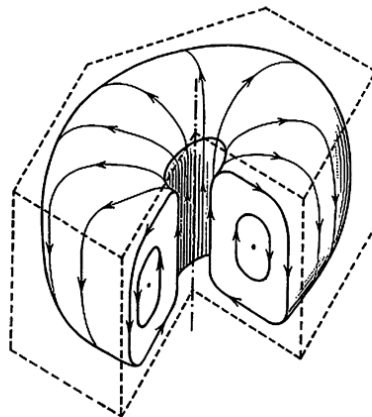


Figura 3: Schema di una cella convettiva esagonale. Immagine tratta da (Wesfreid, 2017, p. 448)

Il lavoro sperimentale di Bénard ha attribuito la struttura spaziale emergente esclusivamente alla forza di Archimede che agisce nei fluidi. Tuttavia, all'inizio del XX secolo, il principale teorico della convezione, John William Strutt, noto come Lord Rayleigh, tentò di spiegare i risultati di Bénard attraverso un'analisi di stabilità lineare (1916). Oggi sappiamo che la teoria di Rayleigh non si applica ai sistemi convettivi studiati da Bénard, dove strati poco profondi di fluido, riscaldati dal basso, erano esposti all'aria sovrastante. Nonostante ciò, il lavoro di Rayleigh è stato il punto di partenza per quasi tutte le moderne teorie sulla convezione. La sua teoria può essere spiegata attraverso un "esperimento modello" in cui un sottile strato di fluido è contenuto tra due piani orizzontali e riempie completamente lo spazio tra di essi. In queste condizioni sperimentali, il flusso convettivo è avviato da uno squilibrio di forze. Qui si seguito, descriviamo brevemente il fenomeno.

Quando uno strato di fluido è riscaldato dal basso, si genera un gradiente di temperatura e densità. Consideriamo un elemento di fluido vicino al fondo dello strato. A causa della maggiore temperatura sul fondo, l'elemento ha una densità inferiore rispetto alla densità media dell'intero strato. Finché rimane vicino al fondo, è circondato da un fluido della stessa densità e, quindi, le forze che agiscono su di esso sono in equilibrio, e l'elemento non sale né affonda. Supponiamo ora che, a causa di una perturbazione casuale, l'elemento di fluido caldo venga spostato leggermente verso l'alto. Questo spostamento altera gli equilibri di forze: l'elemento, trovandosi ora circondato da un fluido più freddo e denso, è soggetto a una forza netta diretta verso l'alto, proporzionale alla differenza di densità e al suo volume. Di conseguenza, l'elemento tende a salire. Pertanto, il gradiente di densità (e temperatura) nel fluido *amplifica* uno spostamento iniziale casuale verso l'alto di un elemento caldo, dando così origine a forze che provocano un ulteriore movimento ascendente.

Analogamente, se un elemento di fluido freddo e denso vicino alla sommità dello strato viene spostato leggermente verso il basso, entra in una regione con una densità media inferiore. Essendo più *pesante* del fluido circostante, l'elemento tende ad affondare. Questa perturbazione iniziale viene amplificata. La convezione è il risultato di questi flussi combinati verso l'alto e verso il basso all'interno dello strato di fluido.

L'analisi di Rayleigh dimostra che la semplice esistenza di un gradiente di temperatura non è sufficiente per avviare il flusso convettivo. È necessario che la "spinta" del fluido, causata dal gradiente di densità, superi gli effetti di smorzamento (o dissipativi) della resistenza viscosa e della diffusione del calore. L'attrito viscoso è sempre diretto in senso opposto al moto del fluido ed è influenzato dalla viscosità cinematica del fluido. La diffusione del calore, d'altra parte, tende a uniformare la temperatura di un elemento di fluido spostato rispetto al suo ambiente. L'effetto della diffusione può essere compreso considerando nuovamente lo spostamento di un elemento di fluido caldo dalla sua posizione di equilibrio in un ambiente più freddo. Le molecole del fluido caldo, avendo una velocità media superiore a quelle del fluido freddo circostante, possono attraversare liberamente il confine che delimita il volumetto. Questo scambio di molecole in entrambe le direzioni tende a uniformare le velocità medie delle due popolazioni di molecole. Il tempo necessario per un volumetto di

fluido per raggiungere l'equilibrio termico con l'ambiente circostante dipende in parte dalla diffusività termica, una proprietà intrinseca del fluido.

Il rapporto tra la "spinta" del fluido dovuta al gradiente di temperatura e il prodotto degli effetti dissipativi (resistenza viscosa e diffusione del calore) è chiamato numero di Rayleigh, Ra , ed è espresso dalla seguente forma:

$$Ra = \frac{g\alpha\Delta T d^3}{\nu\kappa} \quad (4.1)$$

dove g indica l'accelerazione di gravità, α è il coefficiente di espansione termica del volume, ΔT è il gradiente verticale di temperatura, ν è la viscosità cinematica, κ è la diffusività termica del fluido e d è lo spessore dello strato liquido. Nella teoria di Rayleigh, la convezione inizia quando la "spinta" supera gli effetti dissipativi della resistenza viscosa e della diffusione del calore, ovvero quando il numero di Rayleigh supera un valore critico, Ra_c .

In uno strato di fluido riscaldato uniformemente dal basso, il gradiente di temperatura è indipendente dalla posizione orizzontale, così come la "spinta" che agisce su ciascun elemento. Quando il numero di Rayleigh supera il valore critico (punto di instabilità), il fluido caldo tende a salire e il fluido freddo tende a scendere. Ovviamente, entrambi i fenomeni non possono verificarsi contemporaneamente in uno stesso punto: in ogni punto del fluido, può avvenire solo un movimento, verso l'alto o verso il basso, ma non entrambi simultaneamente. Questa situazione di stallo viene superata dalla formazione spontanea di una struttura a celle poligonali di convezione, all'interno delle quali il fluido esegue un moto circolatorio. Inizialmente, i poligoni sono irregolari, con un numero di lati che varia da quattro a sette, sebbene la forma più comune sia l'esagono. Con lo sviluppo completo della struttura, si forma una disposizione quasi perfetta di esagoni regolari, simile a un nido d'ape (Figura 4a).

Come osservato da Bénard, al centro di ogni cella esagonale il fluido caldo sale, si diffonde sulla superficie e scende lungo il perimetro, dove si trovano le celle adiacenti. La distanza tra i punti centrali delle celle esagonali vicine definisce la lunghezza d'onda λ del sistema (Figura 4b). La tassellatura della superficie del fluido è una delle caratteristiche più interessanti dei fenomeni convettivi ed è possibile osservarla aggiungendo particelle marker, come polvere di alluminio o grafite. La teoria della stabilità lineare permette di determinare il valore critico del numero di Rayleigh Ra_c e la lunghezza d'onda λ corrispondenti a uno strato di fluido di spessore d : $Ra_c \cong 1100,7$ e $\lambda \cong 2,342d$.

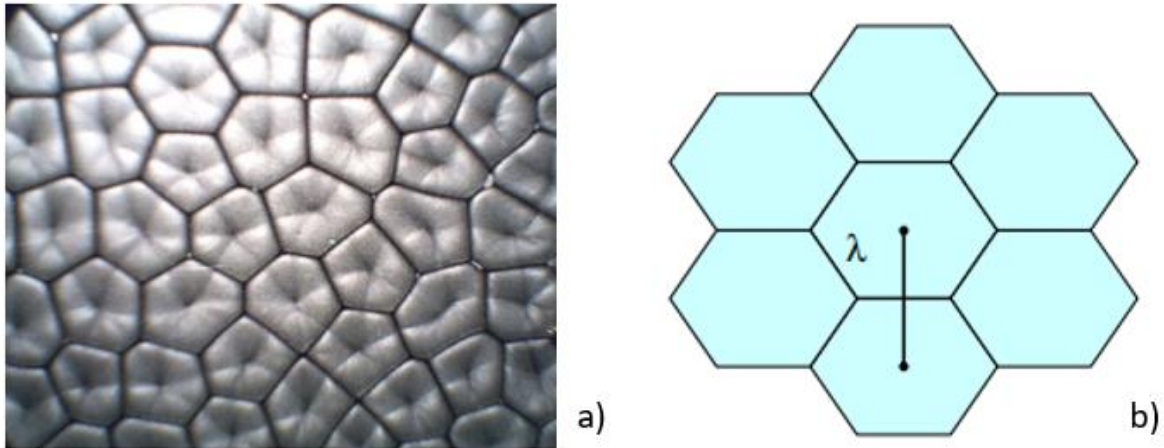


Figura 4: a) Schema cellulare a nido d'ape osservato nella convezione di Bénard aperta all'aria e (b) geometria esagonale che mostra la lunghezza d'onda λ .
 Immagini tratte da (Maroto et al., 2007, p. 314)

La principale differenza tra l'esperimento-modello di Rayleigh e l'esperimento di Bénard risiede nell'utilizzo di due piani per contenere lo strato di liquido. Nella convezione di Bénard, la superficie superiore del liquido è aperta all'aria, e quindi il flusso è influenzato anche dalla tensione superficiale, una forza coesiva che tende a minimizzare la superficie esposta del fluido. La tensione superficiale può agire come forza propulsiva in un flusso convettivo perché, come la densità, diminuisce all'aumentare della temperatura. Di conseguenza, qualsiasi gradiente di temperatura che si sviluppa sulla superficie del liquido è accompagnato da un gradiente di tensione superficiale: nelle regioni più calde, la tensione superficiale è inferiore, mentre nelle regioni più fredde è superiore.

Quando il gradiente di tensione superficiale crea uno squilibrio di forze, si genera un flusso convettivo. Questo effetto è stato descritto da Pearson (1958) in una teoria di successo, alternativa a quella di Rayleigh. Il meccanismo di convezione associato è comunemente noto come convezione di Marangoni, in riconoscimento del suo lavoro. Quando si include la tensione superficiale, viene introdotta una nuova grandezza adimensionale nell'analisi della convezione, chiamata numero di Marangoni Ma . Questo numero rappresenta il rapporto tra la forza del gradiente di tensione superficiale e il prodotto della resistenza viscosa con il tasso di diffusione del calore, e assume la forma:

$$Ma = \frac{\gamma \Delta T d}{\rho \nu \kappa} \quad (4.2)$$

dove γ indica la derivata rispetto alla temperatura della tensione superficiale e ρ è la densità a una temperatura di riferimento (solitamente 20°C). Analogamente ai risultati ottenuti da Rayleigh, anche nella teoria di Pearson, la convezione inizia quando il numero di Marangoni supera un valore critico Ma_c . È importante notare che la convezione guidata dal gradiente di tensione superficiale altera la "rugosità" della superficie: le regioni con una tensione

superficiale maggiore tendono ad “accartocciarsi”, riducendo la loro superficie esposta. Questo fenomeno porta alla formazione di piccole depressioni al centro di ogni celletta.

Diversi studi hanno preso in considerazione il caso generale in cui entrambi i meccanismi, densità e tensione superficiale, agiscono simultaneamente. Una situazione di questo tipo è comunemente definita come convezione di Bénard-Marangoni. Il rapporto tra il numero di Rayleigh e il numero di Marangoni

$$\frac{Ra}{Ma} = \left(\frac{\rho \alpha g}{\gamma} \right) d^2 \quad (4.3)$$

mostra che, nella convezione Bénard-Marangoni, l'importanza relativa dei due effetti coinvolti dipende dallo spessore d dello strato di fluido. Nei tipici esperimenti di convezione, i parametri tra parentesi dipendono dal fluido utilizzato e assumono valori costanti. Quindi, la convezione è controllata dalle forze di tensione superficiale per piccoli spessori dello strato liquido (elevato numero di Marangoni) e dal gradiente di densità per spessori maggiori (elevato del numero di Rayleigh).

Le previsioni teoriche sulle dimensioni delle celle esagonali nella convezione di Marangoni sono approssimativamente uguali a quelle ottenute da Rayleigh, che considerava la “spinta” originata dal gradiente di densità. Inoltre, il valore della lunghezza d’onda misurato sperimentalmente da Bénard era in accordo con quello previsto teoricamente da Rayleigh. Pertanto, poiché siamo interessati ai fenomeni di auto-organizzazione nei sistemi dinamici complessi, consideriamo esclusivamente il flusso convettivo derivato dalla presenza di un gradiente di densità e temperatura nel fluido.

La convezione di Bénard implica i concetti dinamici di instabilità, non-linearità, regimi attrattori e biforcazione. Il problema fondamentale riguarda la stabilità di uno strato di fluido nel campo di gravità. Come scrivono Prigogine e Stengers:

The "Benard instability" is another striking example of the instability of a stationary state giving rise to a phenomenon of spontaneous self-organization. The instability is due to a vertical temperature gradient set up in a horizontal liquid layer. The lower surface of the latter is heated to a given temperature, which is higher than that of the upper surface. As a result of these boundary conditions, a permanent heat flux is set up, moving from the bottom to the top. **When the imposed gradient reaches a threshold value, the fluid's state of rest-the stationary state in which heat is conveyed by conduction alone, without convection-becomes unstable.** [...] The Benard instability is a spectacular phenomenon. **The convection motion produced actually consists of the complex spatial organization of the system.** Millions of molecules move coherently, forming hexagonal convection cells of a characteristic size (1984, p. 142)⁵².

⁵² “La “instabilità di Bénard” è un altro esempio impressionante dell'instabilità di uno stato stazionario che dà origine a un fenomeno di auto-organizzazione spontanea. L'instabilità è dovuta a un gradiente di temperatura verticale creato in uno strato orizzontale di liquido. La superficie inferiore di quest'ultimo viene riscaldata a una temperatura data, più alta di quella della superficie superiore. Come risultato di queste condizioni ai bordi, si crea un flusso di calore permanente, che si sposta dal basso verso l'alto. **Quando il gradiente imposto raggiunge un valore soglia, lo stato di riposo del fluido - lo stato stazionario in cui il calore**

Descriviamo l'insorgenza dell'instabilità nella convezione di Bénard utilizzando i concetti della teoria dei sistemi dinamici e della termodinamica lontana dall'equilibrio presentati nel Capitolo 2. Iniziamo considerando uno strato di fluido (per esempio l'acqua) contenuto tra due piani orizzontali e paralleli. Il fluido si trova in uno stato omogeneo, con proprietà identiche per tutti gli osservatori disposti lungo una certa direzione (invarianza traslazionale). Prigogine scrive che in questo stato:

[U]n minuscolo osservatore non sarà in grado di sapere se egli si trova nel piccolo volume V_A piuttosto che nel piccolo volume V_B del fluido sulla sola base delle osservazioni dell'ambiente che lo circonda. [...] Tutti i volumi che si possono definire arbitrariamente entro un fluido sono indistinguibili, e la conoscenza dello stato di uno di questi è sufficiente per conoscere lo stato di tutti, indipendentemente dalla loro forma e dimensione. In altre parole, dal punto di vista del nostro osservatore, la posizione che egli occupa non fa differenza. Alternativamente, non c'è alcun modo intrinseco che lo renda capace di percepire la nozione di spazio (1991, p. 11).

L'omogeneità del sistema si estende a tutte le sue proprietà, in particolare alla temperatura, che assume lo stesso valore in tutto il fluido. Il sistema è in equilibrio termico con l'ambiente esterno se la differenza tra il piano superiore e il fondo, indicata come $\Delta T = T_2 - T_1$, è pari a zero.

Nel Capitolo 2 abbiamo spiegato che uno stato di equilibrio termodinamico è asintoticamente stabile, poiché le perturbazioni che agiscono sul sistema scompaiono in un tempo relativamente breve. Per esempio, se si tocca il sistema per un breve istante, modificando la temperatura di una piccola regione sulla superficiale del fluido, questa perturbazione termica non avrà effetti duraturi. Dopo un po', la temperatura tornerà uniforme in tutto il fluido. A questo proposito, Prigogine osserva che:

Dal punto di vista del nostro minuscolo osservatore, non solo l'omogeneità del fluido gli rende impossibile sviluppare un intrinseco concetto di spazio, ma, in aggiunta, la stabilità dello stato di equilibrio rende alla fine tutti gli istanti identici. È dunque impossibile per lui sviluppare un intrinseco concetto di tempo (1991, p. 12).

Immaginiamo ora di scaldare lo strato di fluido dal basso, fornendo energia al sistema in modalità calore. In questo caso, la temperatura T_1 del piano superiore è inferiore alla temperatura T_2 del fondo del recipiente che contiene il fluido. L'applicazione di questo vincolo esterno impedisce al sistema di raggiungere l'equilibrio termodinamico.

Se il vincolo è debole (ΔT piccolo), nel sistema avviene un trasferimento di energia sotto forma di calore dal fondo del contenitore verso l'alto e dal piano superiore all'ambiente circostante, per mantenere costante la temperatura T_1 . A differenza dello stato di equilibrio, la temperatura e la densità non sono più uniformi lungo lo spessore del fluido, ma variano in

viene trasportato solo per conduzione, senza convezione - diventa instabile. [...] L'instabilità di Bénard è un fenomeno spettacolare. **Il moto convettivo prodotto consiste effettivamente nell'organizzazione spaziale complessa del sistema.** Milioni di molecole si muovono in modo coerente, formando celle convettive esagonali di una dimensione caratteristica."

modo lineare. In particolare, sottoponendo uno strato di fluido di spessore d a un gradiente di temperatura $\beta = \frac{\Delta T}{d}$, si instaura un regime in cui la temperatura varia secondo la relazione $T(z) = T_2 - \beta z$ (Figura 5). Questo fenomeno è noto come *conduzione termica*, e pone il sistema in una situazione potenzialmente instabile. Vedremo tra poco che il regime di conduzione rappresenta, nel diagramma di biforcazione, il “ramo termodinamico” che collega lo stato di equilibrio ($\Delta T \rightarrow 0$) con *uno* dei possibili stati verso cui il sistema evolve lontano dall’equilibrio (ΔT grande).

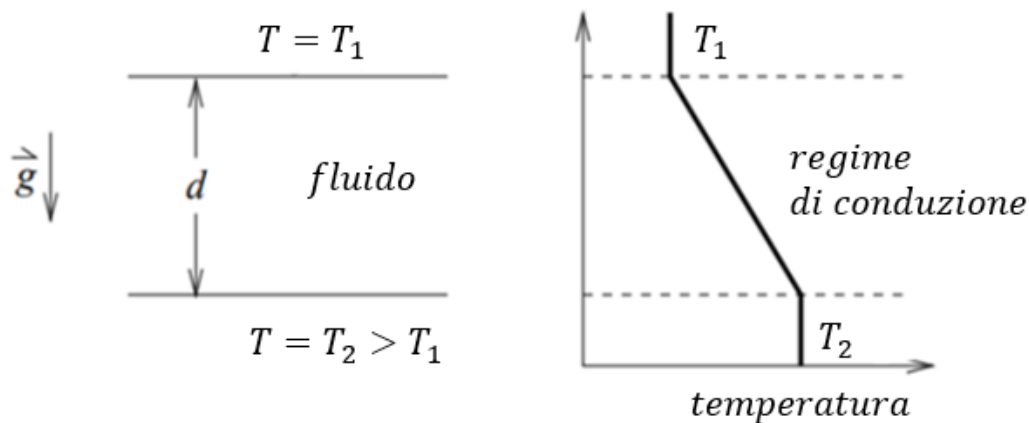


Figura 5: Conduzione termica
Immagine adattata da (Rothman, 2006, p. 91)

Allontanando il sistema sempre di più dall’equilibrio, si raggiunge un valore critico $\Delta T = \Delta T_c$, oltre il quale si instaura il regime della convezione. Superata questa soglia, la configurazione del sistema è instabile, poiché gli effetti destabilizzanti del gradiente di densità superano quelli stabilizzanti dell’attrito interno al fluido (viscosità), che si oppone al movimento, e della conducibilità termica (diffusione), che tende a uniformare le differenze di temperatura. Lo strato di fluido inizia a manifestare un comportamento coordinato, strutturandosi in una serie di “celle” convettive. All’inizio di questo paragrafo abbiamo descritto il meccanismo che amplifica una fluttuazione casuale all’interno del sistema (Figura 6). Quando una gocciolina calda di fluido viene spostata leggermente verso l’alto, o una gocciolina fredda viene spostata leggermente verso il basso, queste perturbazioni iniziano a essere amplificate. ovvero il movimento verso il piano superiore (verso il fondo) del contenitore di una gocciolina calda (fredda) di fluido che viene leggermente spostata verso il basso (verso l’alto). In altri termini, l’instabilità del sistema permette l’ascesa del fluido caldo e la discesa del fluido freddo, che sono le caratteristiche dei fenomeni di convezione.

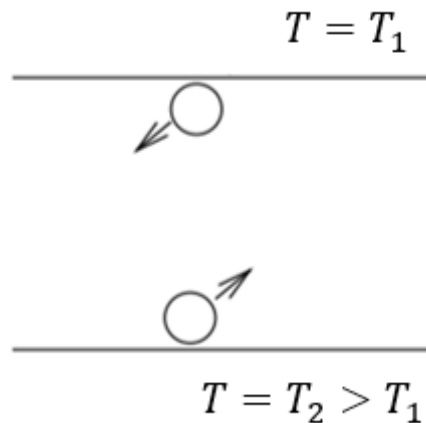


Figura 6: Amplificazione delle fluttuazioni casuali (feedback positivo)
Immagine adattata da (Rothman, 2006, p. 92)

Il gradiente di temperatura β , o equivalentemente la differenza di temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$, rappresenta il *parametro di controllo* del sistema dinamico dissipativo. Quando questo parametro supera il valore *critico* ΔT_c , nello strato di fluido di spessore d appare una struttura ordinata caratterizzata da una lunghezza d'onda pari a $\lambda \cong 2d$. Le celle convettive di Bénard si sviluppano lungo l'asse orizzontale, adottando una rotazione destrogiro o levogiro. In particolare, due celle adiacenti ruotano in senso opposto (Figura 7).

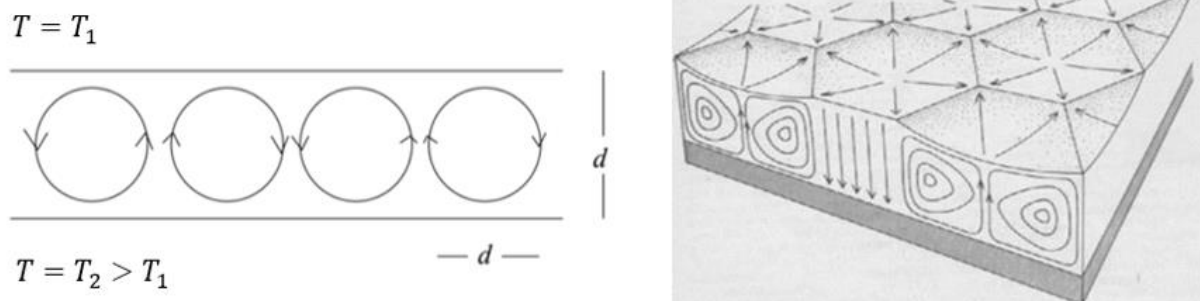


Figura 7: Per $\Delta T > \Delta T_c$ si forma una struttura regolare di “celle” di convezione, con il fluido caldo che sale e il fluido freddo che scende.
Immagine a sinistra adattata da (Rothman, 2006, p. 96); immagine a destra tratta da (Velarde & Normand, 1980, p. 100)

Indicando con $\theta > 0$ ($\theta < 0$) una fluttuazione di temperatura, ossia la perturbazione casuale verso l'alto (il basso) di una gocciolina calda (fredda) di fluido, le celle di convezione possono essere descritte (Manneville, 1990, pp. 6–7) da un campo di temperatura periodico a metà altezza: $\theta \left(z = \frac{d}{2}, x, t \right) \cong A(t) \cos(kx)$, dove la variabile A misura l'ampiezza della fluttuazione. Si ha $A = 0$ sotto la soglia critica e $A \neq 0$ sopra il valore critico ΔT_c .

Per $\Delta T \cong \Delta T_c$, e A sufficientemente piccola, l'evoluzione della fluttuazione è governata da un'equazione differenziale lineare $\frac{dA}{dt} = sA$, dove il "tasso di amplificazione" s è negativo sotto la soglia critica (smorzamento della fluttuazione) e positivo al di sopra (amplificazione della fluttuazione). È quindi ragionevole assumere $s = \frac{r}{\tau}$, dove $r = \frac{\Delta T - \Delta T_c}{\Delta T_c} = \frac{Ra - Ra_c}{Ra_c}$ rappresenta la distanza relativa dalla soglia critica e τ è la scala temporale naturale del processo. Tuttavia, oltre il valore critico ΔT_c , la fluttuazione non può crescere indefinitamente. Per tenere conto di questa auto-limitazione, il tasso di amplificazione s viene sostituito dal "tasso efficace" $s_{eff} = \frac{r - gA^2}{\tau}$, indipendente dal segno di A (con $g > 0$ per garantire l'auto-limitazione). Si ottiene così un'equazione di evoluzione non lineare per l'ampiezza A della fluttuazione:

$$\tau \frac{dA}{dt} = rA - gA^3 \quad (4.4)$$

Questa equazione descrive un fenomeno di *biforcazione* dal regime di conduzione al regime di convezione. La conduzione corrisponde alla soluzione banale $A = 0$ dell'equazione di *punto fisso* $\frac{dA}{dt} = 0$. Questa soluzione esiste per tutti i valori di r (distanza dal valore critico ΔT_c), ma diventa instabile quando $r > 0$ ($Ra > Ra_c$). D'altra parte, la convezione è caratterizzata dall'esistenza, al di sopra della soglia ($r > 0$), di due soluzioni asintoticamente stabili, $A_{\pm} = \pm \sqrt{\frac{r}{g}}$.

Immaginando di posizionare una sonda a metà altezza dello strato di fluido, la componente verticale v della velocità misurata potrebbe essere positiva o negativa, indicando che il grafico di $v(Ra)$ ha l'aspetto di un diagramma di biforcazione a forchetta (Figura 8).

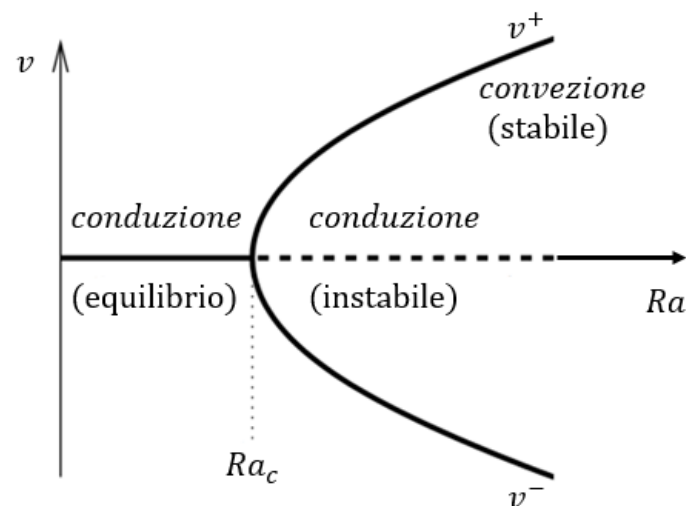


Figura 8: Gli stati stabili sono in grassetto e quelli instabili sono tratteggiati. Non è possibile sapere in anticipo se la velocità del fluido in un punto è diretta verso l'alto v^+ o verso il basso v^- . Immagine adattata da (Rothman, 2006, p. 97)

Riassumendo, l'applicazione di un vincolo di non-equilibrio, come l'energia fornita in modalità calore, induce nel sistema una transizione spontanea verso uno stato più ordinato al punto di biforcazione. Il regime di convezione è caratterizzato dalla rottura della simmetria spaziale, in cui il sistema sceglie tra diverse configurazioni possibili, e dalla presenza di correlazioni a lungo raggio tra le molecole del fluido.

Prigogine scrive:

[T]orniamo al nostro minuscolo osservatore. Al suo livello, il suo universo è stato completamente trasformato. Per esempio egli può stabilire dove si trova e dove non si trova osservando il senso di rotazione della cella che occupa. Per di più, contando durante il suo spostamento, il numero di celle che attraversa, può acquisire un'efficiente nozione di spazio. Chiamiamo *rottura di simmetria* questa apparizione della nozione di spazio in un sistema nel quale, fino a un certo momento, questa nozione non poteva essere percepita in modo intrinseco. In un certo senso, la rottura di simmetria ci porta da una visione dello spazio statica, geometrica, a una visione "aristotelica", in cui **lo spazio è modellato dalle funzioni che si stanno svolgendo nel sistema** (1991, p. 15).

In particolare, i concetti di spazio geometrico (o *statico*) e spazio funzionale (o *dinamico*) si ritrovano anche in un'opera precedente dello scienziato:

The role of geometrical representations in classical physics is well known. Classical physics is based on Euclidean geometry, and modern developments in relativity and other fields are closely related to extensions of geometrical concepts. But take the other extreme: the field theory used by embryologists to describe the complex phenomena of morphogenesis. [...] We see the progressive organization of a biological space in which every event proceeds at a moment and in a region that make it possible for the process to be coordinated as a whole. **This space is functional, not geometrical.** The standard geometrical space, the Euclidean space, is invariant with respect to translations or rotations. This is not so in the biological space. In this space the events are processes localized in space and time and not merely trajectories. [...]

[T]he modern theory of bifurcations and instabilities allows us to see that the two concepts—the geometrical world and the organized, functional world—are not incompatible. This advance will, I think, have a lasting influence (1980, pp. xiv–xv).⁵³

Un altro aspetto interessante nella transizione del sistema dal regime di conduzione a quello di convezione è l'*ordine* e la *coerenza* emergenti. Quando la differenza di temperatura ΔT tra

⁵³ "Il ruolo delle rappresentazioni geometriche nella fisica classica è ben noto. La fisica classica si basa sulla geometria euclidea e gli sviluppi moderni nella relatività e in altri campi sono strettamente legati alle estensioni dei concetti geometrici. Ma prendiamo l'altro estremo: la teoria dei campi utilizzata dagli embriologi per descrivere i complessi fenomeni della morfogenesi. [...] Vediamo l'organizzazione progressiva di uno spazio biologico in cui ogni evento avviene in un momento e in una regione tali da permettere che il processo sia coordinato nel suo insieme. **Questo spazio è funzionale, non geometrico.** Lo spazio geometrico standard, lo spazio euclideo, è invariante rispetto alle traslazioni o alle rotazioni. Non è così nello spazio biologico. In questo spazio, gli eventi sono processi localizzati nello spazio e nel tempo e non semplicemente traiettorie. [...] La moderna teoria delle biforcazioni e delle instabilità ci permette di vedere che i due concetti — il mondo geometrico e il mondo organizzato e funzionale — non sono incompatibili. Questo progresso avrà, credo, un'influenza duratura."

il fondo del contenitore e il piano superiore è inferiore al valore critico ΔT_c , il fluido è omogeneo e le diverse parti lungo la direzione orizzontale sono indipendenti tra loro. Al contrario, superata la soglia ΔT_c , ogni volumetto sembra “osservare” il comportamento dei suoi vicini e “tenerne conto” per contribuire all’insieme. Confrontiamo il carattere a lungo raggio delle correlazioni nel regime conduttivo con quello a corto raggio delle forze intermolecolari. In condizioni di laboratorio, la dimensione spaziale caratteristica di una cella di Bénard è dell’ordine del millimetro, mentre le forze intermolecolari agiscono su distanze dell’ordine dell’Angstrom (all’incirca pari alle dimensioni di una molecola). Una cella di Bénard comprende circa 10^{20} molecole, e una delle proprietà più sorprendenti del comportamento complesso di un sistema è che un enorme numero di particelle si comporti in modo coerente, nonostante il moto termico casuale di ciascuna molecola. Dall’interazione tra il moto termico disordinato delle singole molecole e il vincolo del non-equilibrio emerge una complessità “organizzata”.

Un’ultima osservazione riguarda il verso di rotazione delle celle convettive. Abbiamo detto che nello strato di fluido sono alternativamente destrogire e levogire. Oltrepassata la soglia critica ΔT_c , possono verificarsi due situazioni qualitativamente diverse: una cella può essere levogira oppure destrogira. La convezione mostra, quindi, una cooperazione fra determinismo e caso. Quando ΔT supera ΔT_c , sappiamo con certezza che appariranno le celle (un fenomeno soggetto a un determinismo rigoroso), ma il verso di rotazione delle celle è imprevedibile e incontrollabile. Solo il caso, sotto forma della particolare perturbazione prevalente in un momento specifico dell’esperimento, può decidere se una certa cella è destrogira o levogira. In altre parole, per uno stesso valore del parametro di controllo ΔT (o Ra), sono possibili più soluzioni, e solo il caso deciderà quale di queste soluzioni si realizza. La realizzazione di un’unica soluzione conferisce al sistema una dimensione storica e, quindi, la “memoria” di un *evento critico* passato che ha influenzato la sua evoluzione.

4.3 La reazione chimica oscillante di Belousov-Zhabotinsky

Nel fenomeno della convezione di Bénard, la natura chimica delle sostanze che costituiscono lo strato di fluido rimane immutata. Al contrario, le reazioni chimiche coinvolgono modificazioni nell’identità delle molecole e possono essere rappresentate simbolicamente nel seguente modo:



dove k indica la costante di velocità, A e B sono i *reagenti* che diminuiscono nel corso del tempo per formare i *prodotti* di reazione C e D .

Tuttavia, in un sistema isolato, i reagenti non scompaiono mai completamente. Dopo un adeguato tempo di reazione, le quantità dei costituenti A , B , C e D raggiungono un valore fisso del rapporto $\frac{c_C c_D}{c_A c_B}$, dove c indica la concentrazione di ogni costituente. Questo rapporto è

chiamato costante di equilibrio, e un sistema in questo stato si dice essere in equilibrio chimico. In un sistema chimico all'equilibrio, esiste anche la trasformazione inversa:



In particolare, entrambe le reazioni avvengono alla stessa velocità. Questa proprietà è nota come *bilancio dettagliato*. Una reazione chimica reversibile viene quindi rappresentata nel modo seguente:



Nella convezione di Bénard, il sistema veniva allontanato dallo stato di equilibrio fornendo energia dall'esterno. In chimica, si ottiene una situazione analoga sottoponendo il sistema a un flusso di materia verso (o dall') ambiente circostante. Per esempio, si può eliminare uno dei prodotti C e D dal recipiente di reazione quando la concentrazione supera un valore prestabilito, oppure si può fornire al sistema una miscela ricca di reagenti A e B .

Operando opportunamente sulla velocità di ingresso e di uscita del flusso di materia, è possibile creare le condizioni affinché il sistema raggiunga uno stato in cui le concentrazioni dei costituenti A, B, C e D rimangono costanti nel tempo, ma il loro rapporto non è più determinato dalla costante di equilibrio. In questo caso, il sistema si trova in uno *stato stazionario* di non-equilibrio, descritto dalla condizione:

$$\frac{dc_A}{dt} = \frac{dc_B}{dt} = \dots = 0 \quad (4.8)$$

Un sistema chimico lontano dall'equilibrio può mostrare un comportamento complesso. Supponiamo che, a un certo punto, la velocità di una reazione aumenti notevolmente rispetto al passo precedente. Nello stato di equilibrio, il bilancio dettagliato tenderebbe a ristabilire le condizioni iniziali. Allontanando un po' il sistema dall'equilibrio, tuttavia, si potrebbe verificare una situazione potenzialmente instabile, simile a quella descritta per il sistema fisico di Bénard, quando viene applicata una debole differenza di temperatura tra i piani che contengono lo strato di fluido. In presenza di un meccanismo chimico chiamato autocatalisi, il sistema può catturare e amplificare l'aumento della velocità di reazione. Questo perché l'autocatalisi fa sì che la presenza di un prodotto di reazione aumenti la velocità della sua produzione.

In chimica, un esempio tipico di fenomeno complesso sono le reazioni oscillanti. Una delle principali caratteristiche di queste reazioni è la variazione periodica delle concentrazioni degli intermedi o dei catalizzatori nel tempo. Ciò avviene perché la cinetica dei sistemi chimici oscillanti è governata da equazioni non lineari e il meccanismo di reazione include stadi autocatalitici e autoinibitori. Inoltre, per manifestare comportamenti oscillanti, i sistemi chimici devono essere lontani dal loro stato di equilibrio.

Sebbene la prima reazione chimica oscillante in fase omogenea sia stata descritta dal chimico americano William Crowell Bray (1921), sono trascorsi oltre trent'anni prima della scoperta

della seconda, la reazione di Belousov-Zhabotinsky (Belousov, 1959; Žabotinskij, 1964), o reazione BZ, oggi la più nota e studiata, e circa altri venti prima che i chimici e i chimico-fisici si occupassero seriamente di questi fenomeni, in seguito agli sviluppi della termodinamica dei sistemi lontani dall'equilibrio dovuta a Prigogine (1961) e alla sua scuola.

La reazione classica di Belousov-Zhabotinsky consiste nella bromurazione e ossidazione di un substrato organico (generalmente acido malonico) da parte di ioni bromato in soluzione acida, catalizzata da ioni metallici. In certe condizioni la reazione mostra andamenti oscillanti di concentrazione degli intermedi e dei catalizzatori. I principali intermedi sono Br_2 , Br^- , $HOBr$, $HBrO_2$ e i radicali BrO_2 . L'effetto sperimentale più spettacolare del comportamento oscillante di questa reazione si ha quando il catalizzatore ha un colore diverso nei due stati di ossidazione n^+ e $(n + 1)^+$. Se come catalizzatore si impiegano ioni Ce^{4+} si noterà un cambiamento periodico nel colore della soluzione da giallo a incolore Ce^{3+} , se invece si usa il complesso ferriina ($Fe(phen)_3^{2+}$, rosso) si noterà una variazione periodica di colore dal rosso al blu (colore della ferrina, $Fe(phen)_3^{3+}$) (Miyazaki, 2013).

Le "oscillazioni chimiche" nei sistemi omogenei furono per molto tempo considerate come impossibili. I chimici, infatti, ritenevano che i comportamenti oscillanti in reazioni omogenee in soluzione fossero in contraddizione con il secondo Principio della Termodinamica, secondo il quale l'entropia di un sistema isolato deve aumentare durante l'evoluzione spontanea di un processo. Pertanto, in base all'interpretazione classica di tale principio, il verificarsi di un fenomeno periodico implica che l'evoluzione spontanea del processo si alterni con l'evoluzione inversa, durante la quale si scambiano i ruoli di stato iniziale e finale del sistema. Essendo l'entropia una funzione di stato, la sua variazione globale risulterebbe perciò nulla, in contrasto con il secondo principio. Prigogine e i suoi collaboratori furono i primi a riconoscere che l'interpretazione classica richiede non solo che i sistemi siano isolati, ma anche che siano vicini al loro stato di equilibrio. Per sistemi isolati e prossimi all'equilibrio non sono perciò possibili comportamenti oscillanti, mentre i sistemi lontani dall'equilibrio possono generare fenomeni periodici. Infatti, la variazione nulla di entropia causata dalle variazioni periodiche nelle concentrazioni degli intermedi è compensata dall'aumento di entropia dovuto ad altri processi che avvengono contemporaneamente. Pertanto, la variazione totale di entropia del sistema isolato è sempre positiva, come richiesto dal secondo principio.

Supponiamo che la reazione si svolga in un apparato sperimentale che mantiene il sistema spazialmente omogeneo e permette di controllare la sua distanza dall'equilibrio mediante l'ingresso e l'uscita di sostanze chimiche a diverse velocità. Questo apparato consente di regolare il *tempo di permanenza* di una certa sostanza nel recipiente di reazione.

Un tempo di permanenza molto lungo equivale, essenzialmente, a realizzare condizioni termodinamiche chiuse. In questo caso, il sistema raggiunge uno stato omogeneo simile a quello di equilibrio chimico, caratterizzato dal bilancio dettagliato. Questa situazione è analoga al regime di conduzione termica nel sistema di Bénard.

Al contrario, un tempo di permanenza ridotto equivale a realizzare condizioni termodinamiche aperte. Il sistema non riesce a raggiungere un equilibrio completo fra i passi in avanti e indietro della reazione e mostra un comportamento oscillante. Preparando la reazione BZ con solfato

di cerio $Ce_2(SO_4)_3$, acido malonico $CH_2(COOH)_2$ e bromato di potassio $KBrO_3$, disciolti in acido solforico, il sistema si colora improvvisamente di giallo chiaro, indicando un eccesso di ioni Ce^{4+} . Dopo un po', la soluzione diventa incolore, indicando invece un eccesso di ioni Ce^{3+} . Il processo procede ritmicamente con alternanza tra giallo e incolore, con un periodo regolare caratteristico del sistema. Dunque, le oscillazioni misurano il tempo attraverso una dinamica generata internamente, costituendo un vero e proprio *orologio chimico*.

Una volta entrato nel regime periodico, il sistema chimico "scopre" improvvisamente il tempo. In altre parole, si verifica una *rottura della simmetria temporale* in cui il sistema passa dalla staticità dello stato omogeneo iniziale alla dinamicità del comportamento oscillatorio finale. Le oscillazioni che coinvolgono l'intero sistema implicano che le sue diverse parti interagiscono tra loro. Come nel sistema fisico di Bénard, il vincolo di non-equilibrio permette l'emergere di una *correlazione a lungo raggio*. A tal proposito, riportiamo le parole di Prigogine e Stengers:

La nostra immagine mentale delle reazioni chimiche corrisponde a molecole che corrono nello spazio, scontrandosi qua e là caoticamente. Una tale immagine non lascia spazio all'auto-organizzazione [...].

Si possono manifestare svariati nuovi fenomeni oltre la soglia dell'instabilità chimica in condizioni lontane dall'equilibrio.

[...] Il comportamento periodico adottato dal sistema è stabile. Oltre la soglia critica, il sistema abbandona spontaneamente lo stato stazionario ... come risultato delle fluttuazioni. [...] Dunque disponiamo di un processo chimico periodico: un orologio chimico. Fermiamoci un momento per sottolineare quanto un tale fenomeno sia inaspettato. Supponiamo di avere due tipi di molecole, "rosse" e "blu". A causa del moto caotico delle molecole, ci aspetteremmo che in un dato momento ci possano essere più molecole rosse in una parte del recipiente, per esempio quella sinistra. Ma poco dopo compariranno più molecole blu, e così via. Il recipiente dovrebbe sembrarci "violetto" con lampi irregolari di rosso o di blu. Ma questo non succede con un orologio chimico; il sistema è tutto blu, poi improvvisamente il suo colore diventa rosso, poi ancora blu. E tutti questi cambiamenti avvengono a intervalli di tempo regolari: siamo di fronte a un processo coerente.

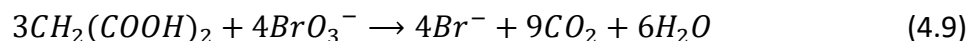
Questo sembra incredibile e infatti, se gli orologi chimici non fossero stati effettivamente osservati, nessuno ci crederebbe. Per cambiare colore tutte in una volta le molecole hanno bisogno di "comunicare". Il sistema deve agire come *un tutto* (1981, pp. 149–152).

Prima di approfondire il meccanismo del fenomeno di auto-organizzazione della reazione BZ, è utile discutere brevemente della differenza tra il comportamento ritmico di un orologio chimico e l'oscillazione di un pendolo fisico. Consideriamo un pendolo ideale senza attrito che oscilla attorno alla verticale con un'ampiezza θ_1 e un periodo T , e la variazione nel tempo della concentrazione di una specie chimica della reazione BZ, caratterizzata da un'ampiezza A e da un periodo T . Immaginiamo ora di disturbare entrambi i sistemi: spostiamo il pendolo a un angolo θ_2 rispetto alla verticale e perturbiamo leggermente la temperatura o la concentrazione dei reagenti della BZ (per esempio toccando il recipiente per alcuni secondi o

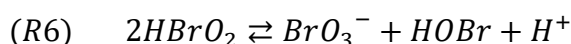
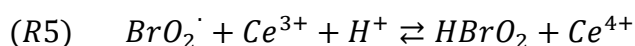
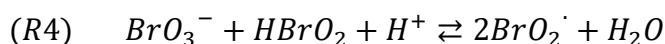
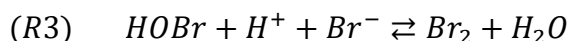
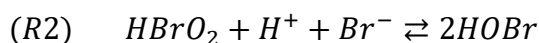
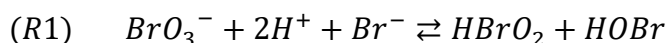
iniettando poche millimoli di bromato di potassio). I sistemi risponderanno in modi diversi a questi disturbi. Il pendolo continuerà a oscillare, ma con un'ampiezza ora pari a θ_2 invece di θ_1 , e il periodo T sarà leggermente più lungo. Al contrario, dopo un breve transitorio, le componenti chimiche della BZ riprenderanno a oscillare esattamente con la stessa ampiezza e lo stesso periodo di prima. Questa è la proprietà della *stabilità asintotica*, di cui abbiamo discusso nel Capitolo 2, che può essere messa in relazione all'irreversibilità dei fenomeni. La stabilità asintotica garantisce la riproducibilità degli eventi nel tempo. I sistemi come il pendolo non possiedono questa proprietà perché la loro dinamica è invariante per inversione temporale. Sono quindi vulnerabili alle perturbazioni esterne che possono influenzarli, e poiché le perturbazioni sono imprevedibili, tali sistemi sono destinati prima o poi a mostrare un comportamento irregolare.

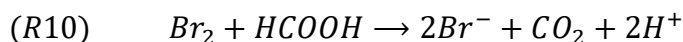
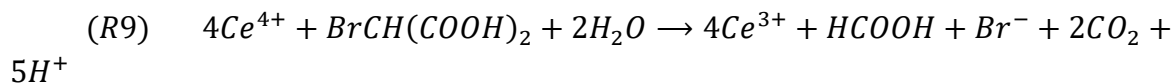
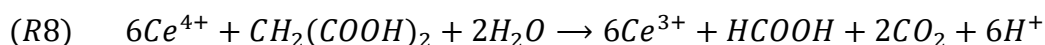
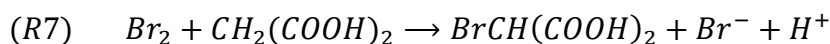
Per molto tempo l'esistenza di reazioni chimiche oscillanti in fase omogenea è stato oggetto di controversia. Il matematico e chimico fisico Alfred Lotka scrisse diversi articoli teorici sulle oscillazioni chimiche e dimostrò che un insieme di reazioni consecutive può dare origine a oscillazioni smorzate sulla via dell'equilibrio (Lotka, 1910). Inoltre, propose un modello cinetico di reazione oscillante, che sebbene non poteva applicarsi a nessun sistema chimico reale, ispirò notevolmente gli ecologisti. Il fisico Vito Volterra utilizzò idee simili a quelle di Lotka per studiare un'ampia gamma di problemi nel contesto ecologico, come gli effetti della migrazione e dell'interazione simultanea di più specie (Volterra, 1926). Il modello più noto di questo tipo è chiamato modello Lotka-Volterra ed è spesso utilizzato per caratterizzare le interazioni predatore-preda. Il modello Lotka-Volterra genera un insieme di moti periodici, ciascuno con periodo diverso. Per questo motivo non può essere utilizzato per modellizzare le reazioni chimiche oscillanti caratterizzate, invece, da un periodo ben definito e determinato dai valori dei parametri caratteristici, come le costanti di velocità e la temperatura.

La reazione oscillante di Belousov-Zhabotinski presenta caratteristiche di auto-organizzazione e gli scienziati R.J. Field, E. Körös e R.M. Noyes (Field et al., 1972) proposero un meccanismo (chiamato "meccanismo FKN" dal nome degli autori) per rendere conto delle oscillazioni di intermedi e catalizzatore generate in un sistema bromato in ambiente acido malonico, catalizzato dalla coppia Ce^{4+}/Ce^{3+} . L'equazione di reazione complessiva è data da:



Il "meccanismo FKN" (dal nome degli autori) consiste in 10 step elementari:





Il punto centrale del meccanismo è l'ossidazione di Ce^{3+} a Ce^{4+} svolta autocataliticamente dal radicale $BrO_2\cdot$. Infatti, la produzione autocatalitica dell'acido bromoso $HBrO_2$ ha questo radicale come intermedio ma la sua crescita esponenziale è poi limitata da un suo disproporzionamento (autocatalisi e inibizione). A questo punto è necessario che intervenga un terzo processo che riduca il Ce^{4+} a Ce^{3+} e contemporaneamente faccia aumentare la concentrazione degli ioni bromuro Br^- . Queste condizioni si realizzano attraverso l'intervento del substrato organico (acido malonico, MA). Quanto detto è riportato nel seguente schema (Figura 9) in cui il meccanismo FKN è stato per comodità suddiviso in tre processi.

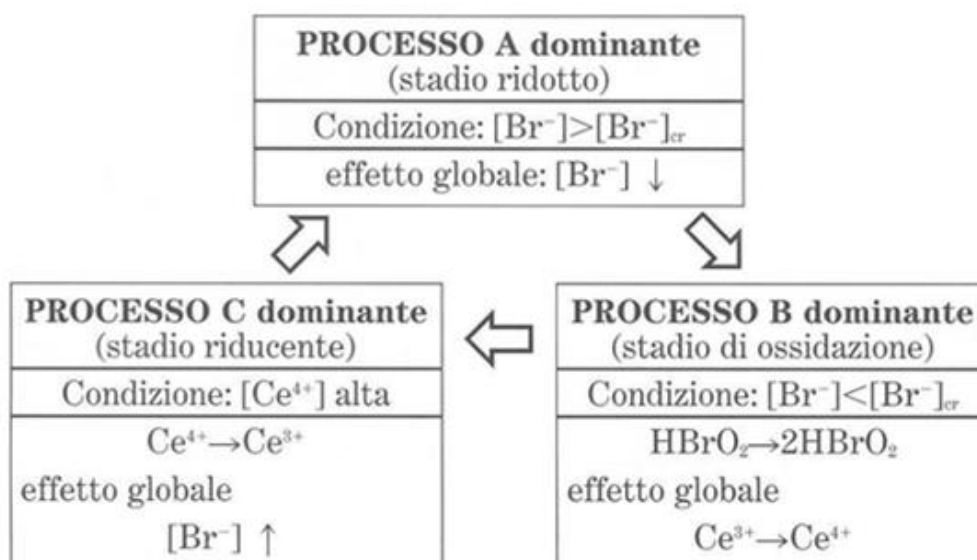


Figura 9: Schema del meccanismo FKN
Immagine tratta da (Cervellati, 2015)

Il processo A ha inizio quando la concentrazione degli ioni bromuro Br^- è alta. Questo processo a tre fasi costituisce i passi di reazione R1 – R3: lo ione bromato BrO_3^- viene ridotto a bromo Br_2 attraverso gli acidi bromoso $HBrO_2$ e ipobromoso $HOBr$ da parte dell'agente riducente bromuro Br^- . Di conseguenza, la concentrazione di ioni bromuro cala.

Quando la concentrazione dello ione bromuro scende al di sotto di un certo valore critico $[Br^-]_{cr}$ ha inizio il processo B. L'acido bromoso $HBrO_2$ inizia a competere con il bromuro Br^- per ridurre il bromato BrO_3^- in R4. La produzione autocatalitica di acido bromoso $HBrO_2$ in R4 e R5 è accompagnata dall'ossidazione del catalizzatore (cerio) in R5, che porta a un

improvviso cambiamento di colore (da giallo pallido a giallo scuro). La reazione $R6$ impedisce la crescita esponenziale della concentrazione di acido bromoso $HBrO_2$. Infatti, aggiungendo $R4$ e $2 R5$ si può notare che:



e quindi viene prodotta una molecola in più di acido bromoso $HBrO_2$ per ogni singola reazione. $R6$ rimuove l' $HBrO_2$ e consente quindi di stabilire una concentrazione di acido bromoso allo stato stazionario.

La concentrazione degli ioni bromuro Br^- continua a calare. Interviene quindi il processo C che riduce il catalizzatore e aumenta la produzione di gli ioni bromuro. I passi di reazione $R7 - R10$ chiudono il ciclo di feedback. Si torna quindi al processo A. Questa fase è graduale, con un lento cambiamento di colore (da giallo scuro a giallo pallido).

Una rappresentazione analoga dello svolgimento della reazione BZ in un ciclo di tre stadi che mette in evidenza la concentrazione degli ioni bromuro Br^- è la seguente (Figura 10):

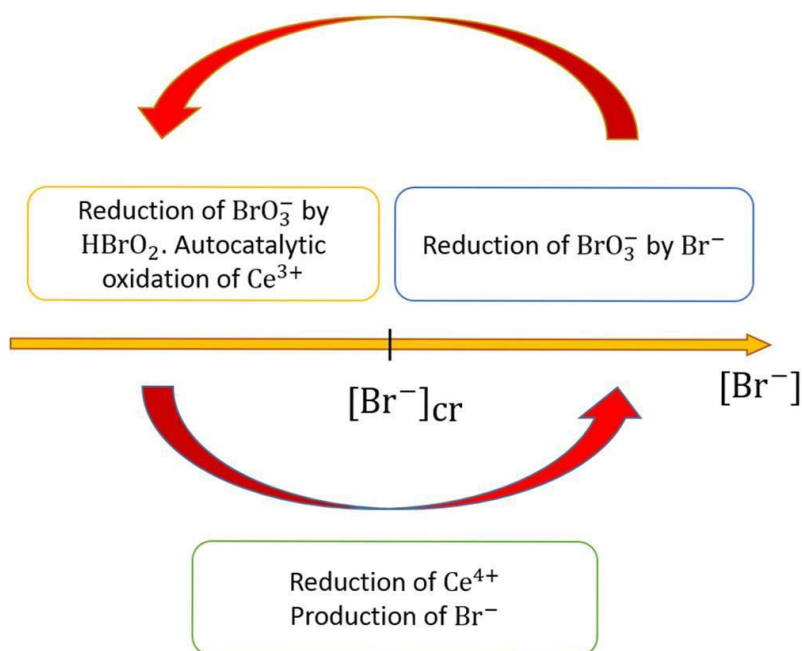


Figura 10: Illustrazione schematica dei tre stadi ciclici della reazione BZ
Immagine tratta da (Barzykina, 2020)

Si osserva che nel sistema chimico tutte le reazioni avvengono contemporaneamente, la suddivisione dei tre processi sequenziali A, B e C è soltanto una rappresentazione utile per illustrare il comportamento oscillante degli intermedi e del catalizzatore.

Un modello semplificato del meccanismo FKN ha ricevuto particolare attenzione con il nome di Oregonator (Field & Noyes, 1974), dall'Università dell'Oregon. L'Oregonator è il modello più semplice che descrive le oscillazioni della reazione BZ. Prevede solo tre concentrazioni variabili ($HBrO_2$, Br^- e Ce^{4+}) mentre alcuni componenti della reazione (come BrO_3^- ,

$CH_2(COOH)_2, HOBr, H^+$) vengono trattati come parametri costanti, poiché essendo presenti in eccesso il loro consumo avviene molto lentamente.

Il modello Oregonator è costituito da cinque reazioni elementari, come mostrato nella Tabella 1:

Passo di reazione	Reazione	Costante di velocità
(O1)	$A + Y \rightarrow X + P$	$k_1 = k_{R1}[H^+]^2$
(O2)	$X + Y \rightarrow 2P$	$k_2 = k_{R2}[H^+]$
(O3)	$A + X \rightarrow 2X + 2Z$	$k_3 = k_{R4}[H^+]$
(O4)	$2X \rightarrow A + P$	$k_4 = k_{R6}[H^+]$
(O5)	$B + Z \rightarrow \frac{1}{2}fY$	k_5

Tabella 1: Schema di reazione del modello Oregonator

Le identificazioni delle specie chimiche rispetto al meccanismo FKN sono $X = HBrO_2$, $Y = Br^-$, $Z = Ce^{4+}$, $A = BrO_3^-$, $B = CH_2(COOH)_2$ e $P = HOBr$. In questo modello, le reazioni inverse non vengono prese in considerazione e le costanti di velocità sono definite in termini delle corrispondenti costanti di velocità del meccanismo FKN. Nel passo di reazione (O5) il fattore stechiometrico f e la costante di velocità k_5 sono regolabili.

La legge di azione di massa in un sistema omogeneo (ben mescolato) genera un sistema di tre equazioni differenziali ordinarie non lineari per le variabili X , Y e Z . Tipicamente, il sistema viene scritto in forma adimensionale per convenienza:

$$\varepsilon \frac{dx}{d\tau} = qy - xy + x(1 - x) \quad (4.11)$$

$$\delta \frac{dy}{d\tau} = -qy - xy + fz \quad (4.12)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = x - z \quad (4.13)$$

utilizzando il cambiamento di variabili:

$$x = \frac{X}{X_0}, y = \frac{Y}{Y_0}, z = \frac{Z}{Z_0}, \tau = \frac{t}{T} \quad (4.14)$$

dove

$$X_0 = \frac{k_3A}{2k_4}, Y_0 = \frac{k_3A}{k_2}, Z_0 = \frac{(k_3A)^2}{k_4k_5B}, T = \frac{1}{k_5B} \quad (4.15)$$

e

$$\varepsilon = \frac{k_5B}{k_3A}, \delta = \frac{2k_4k_5B}{k_2k_3A}, q = \frac{2k_1k_4}{k_2k_3} \quad (4.16)$$

Le variabili x , y e z rappresentano le concentrazioni adimensionali di $HBrO_2$, Br^- e Ce^{4+} , rispettivamente. Le equazioni (4.11)–(4.13) sono chiamate equazioni di Field-Noyes. I parametri adimensionali descrivono la relazione tra le diverse fasi del ciclo della BZ. Per esempio, ε descrive la forza della fase di recupero degli ioni bromuro rispetto alla produzione autocatalitica dell'acido bromoso. La scala temporale della reazione è definita in termini della costante di velocità di decomposizione dell'acido malonico inversa, $T = (k_5 B)^{-1}$.

Descriviamo ora, dal punto di vista matematico, il comportamento periodico che interessa il sistema chimico e stimiamo il valore caratteristico del periodo di oscillazione. Le costanti di velocità sono disponibili in letteratura:

$$k_{R1} = 2 \text{ mol}^{-3} \cdot \text{dm}^9 \text{ s}^{-1}, \quad (4.17)$$

$$k_{R2} = 1,8 \times 10^6 \text{ mol}^{-2} \cdot \text{dm}^6 \text{ s}^{-1}, \quad (4.18)$$

$$k_{R4} = 48 \text{ mol}^{-2} \cdot \text{dm}^6 \text{ s}^{-1}, \quad (4.19)$$

$$k_{R6} = 3 \times 10^3 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{dm}^3 \text{ s}^{-1}. \quad (4.20)$$

Prendendo $k_5 = 1,6 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{dm}^3 \text{ s}^{-1}$ e $f = 1$ e assumendo le concentrazioni iniziali (cit. articolo Barzykina) pari a $[H^+] = 1,68 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, $[A] = [BrO_3^-] = 0,058 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ e $[B] = [CH_2(COOH)_2] = 0,105 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, si ottiene per i parametri adimensionali: $\varepsilon = 3,6 \times 10^{-2}$, $\delta = 1,2 \times 10^{-4}$ e $q = 2,4 \times 10^{-4}$. La scala temporale caratteristica è $T = (k_5 B)^{-1} = 5,95 \text{ s}$.

Risolviendo numericamente il sistema di equazioni di Field-Noyes, si ottiene $\tau_0 = 7,4$ e, di conseguenza, un periodo di oscillazione teorico pari a $T_0 = \tau_0 T = 44 \text{ s}$ che risulta essere in accordo con il valore sperimentale (Barzykina, 2020).

È importante notare che considerare i valori di $[A]$ e $[B]$ come costanti equivale a trattare il sistema chimico come aperto. Variando quindi le concentrazioni iniziali di A e B è possibile allontanare sempre di più il sistema dall'equilibrio fino a raggiungere il punto di biforcazione di Hopf. Si assiste cioè a un cambiamento qualitativo nel comportamento del sistema che passa dallo stato statico a un regime oscillante periodico.

Poiché $\delta \ll \varepsilon$, il lato sinistro dell'equazione (4.12) è approssimativamente nullo, ovvero $y = \frac{fz}{x+q}$. Ciò equivale a dire che y è quasi-stazionario e quindi il modello Oregonator si riduce a un sistema di due equazioni nelle variabili, x e z :

$$\varepsilon \frac{dx}{d\tau} = x(1-x) + fz \frac{x-q}{x+q} \equiv g(x, z) \quad (4.21)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = x - z \equiv h(x, z) \quad (4.22)$$

Ricordiamo che x ($HBrO_2$) agisce come specie autocatalitica e z (Ce^{4+}) come specie inibitrice. Le isocline nulle (o *nullcline*) del sistema sono le curve corrispondenti alle derivate temporali nulle:

$$g(x, z) = 0 \Leftrightarrow z = \frac{x(1-x)(x+q)}{f(x-q)} \quad (4.23)$$

$$h(x, z) = 0 \Leftrightarrow z = x \quad (4.24)$$

Il punto di equilibrio non banale si trova nella loro intersezione:

$$x^* = z^* = \frac{1}{2}(1 - f - q + \sqrt{(1 - f - q)^2 + 4q(1 + f)}) \quad (4.25)$$

Le isocline nulle (nullclines) relative ai valori dei parametri descritti sono rappresentate nella Figura 11.

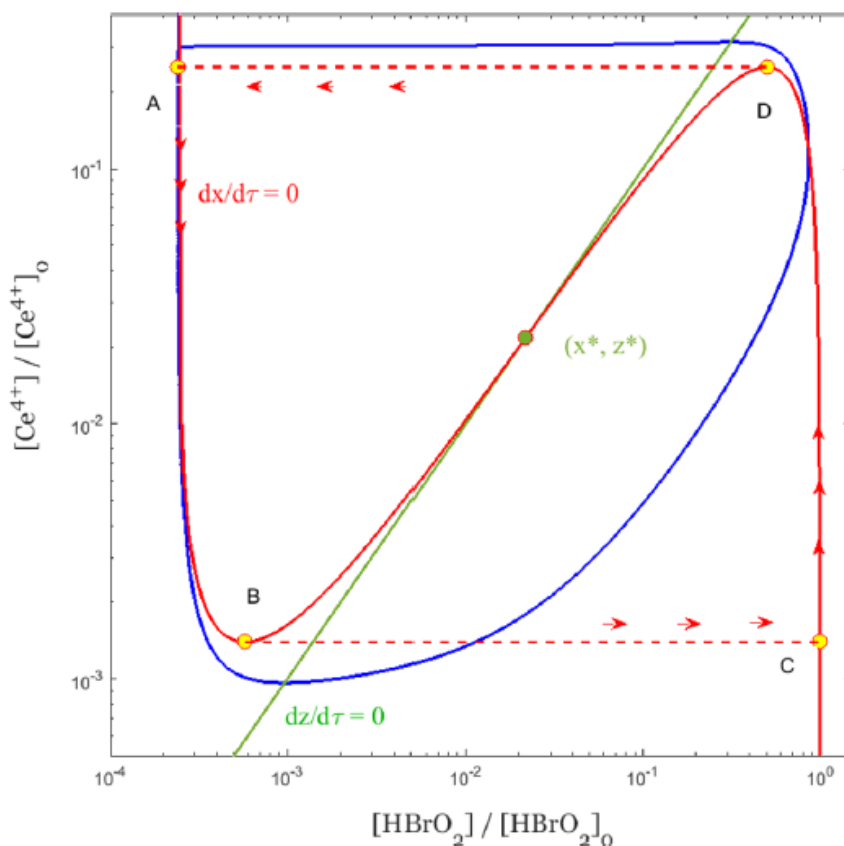


Figura 11: Grafico $x - z$ del modello Oregonator: ciclo limite del modello originale (blu), isocline nulle e dell'Oregonator ridotto ($\frac{dz}{d\tau} = h(x, z) = 0$, verde) e ($\frac{dx}{d\tau} = g(x, z) = 0$, rosso); punto di equilibrio (x^*, z^*) .
Immagine tratta da (Barzykina, 2020)

Poiché $\varepsilon \ll 1$, x mantiene un valore (rispetto a z) tale che il lato destro della (4.21) sia vicino a zero. Quindi il sistema tenderà a muoversi lungo la nullcline $g(x, z) = 0$, ove possibile. Se perturbiamo il sistema dal punto di equilibrio verso l'alto lungo la curva rossa $g(x, z) = 0$, esso si troverà sotto la curva verde $h(x, z) = 0$, cioè nella regione $\frac{dz}{d\tau} > 0$. In altre parole, il sistema tenderà a muoversi ulteriormente verso l'alto.

Allo stesso modo, se perturbiamo il sistema verso il basso, esso tenderà a muoversi ulteriormente verso il basso, cioè lontano dal punto di equilibrio. Questo segnala che il punto di equilibrio (x^*, z^*) è instabile. Invece di raggiungere (x^*, z^*) , il sistema si muoverà lungo la curva rossa $g(x, z) = 0$ da A a B, poi salterà rapidamente verso C perché non può muoversi ulteriormente lungo $g(x, z) = 0$ verso il punto di equilibrio mentre si trova nella regione $\frac{dz}{d\tau} < 0$. Da C si sposterà in D e poi salterà di nuovo in A perché non può muoversi ulteriormente lungo $g(x, z) = 0$ verso il punto di equilibrio mentre si trova nella regione $\frac{dz}{d\tau} > 0$. ABCD è il ciclo limite, che non è molto lontano dal ciclo limite prodotto dall'Oregonator originale, come mostrato nella Figura 11.

Per stimare il periodo di oscillazione, si ipotizza che i salti BC e DA siano istantanei e ci si concentra sul tempo trascorso per spostarsi lungo l'isocline nulla $g(x, z) = 0$. Si assume $f = 1$. Durante il passaggio AB $x \approx q$, e la (4.22) si semplifica in $\frac{dz}{d\tau} = q - z$. Il tempo trascorso in AB può essere trovato integrando:

$$T_{AB} = \int_{z_A}^{z_B} \frac{dz}{z-q} = -\log q - 3 \log 2 - \log(1 + \sqrt{2}) \quad (4.26)$$

Qui, $z_A = \frac{1}{4} + q$ e $z_B = (1 + \sqrt{2})^2 q$ sono gli estremi della nullcline $g(x, z) = 0$.

Durante il passaggio CD $x \gg q$ e quindi $z = x(1 - x)$. Sostituendo questo risultato nella (4.22) e integrando si trova:

$$T_{CD} = \int_{x_C}^{x_D} \frac{1-2x}{x^2} dx = 2 \log 2 - 1 \quad (4.27)$$

Infine, la stima del periodo totale di oscillazione è data da:

$$T = -\log q - 1 - \log 2 - \log(1 + \sqrt{2}) \approx 5,76 \quad (4.28)$$

Notiamo che questo risultato si colloca entro il 30% della soluzione numerica del modello completo dell'Oregonator con tre variabili.

In sintesi, abbiamo esaminato due fenomeni irreversibili di auto-organizzazione, la convezione di Bénard e la reazione BZ, che mettono in evidenza le strutture temporali relative all'evoluzione e alle proprietà emergenti dei sistemi complessi. Tra le proprietà del tempo interno-kairologico che risuonano con le specificità degli esperimenti presentati, possiamo identificare: *Particolarità*, *Sfida alla progressione lineare di chronos*, *Alta sensibilità ai rumori interni ed esterni*, *Sorgente di un nuovo ordine* e *Visione dinamica del mondo*. Nel caso della convezione di Bénard, l'emergere di un *pattern spaziale* distintivo evidenzia il comportamento complesso del sistema fisico. Nella reazione chimica BZ, invece, la complessità si manifesta attraverso l'apparizione di un *ritmo temporale*.

Inoltre, è interessante osservare che il ritmo emergente del sistema chimico complesso mostra sia le proprietà del tempo interno-kairologico, come la *Particolarità* e la capacità di essere una *Sorgente di un nuovo ordine*, sia le caratteristiche del tempo esterno-cronologico,

come la *Progressione lineare* e la riproducibilità dei fenomeni. Le reazioni oscillanti, come abbiamo discusso, sono dotate di meccanismi come l'autocatalisi, che amplificano o reprimono le fluttuazioni casuali interne, consentendo ai sistemi di evolvere verso stati oscillatori periodici distintivi.

4.4 Realizzazione degli esperimenti: un episodio significativo

Una versione riadattata degli esperimenti descritti nelle due sezioni precedenti è stata proposta in una classe seconda del Liceo scientifico “A. Einstein” di Rimini, all’interno di un percorso didattico interdisciplinare chiamato progetto Kairos⁵⁴. Questo progetto mirava a far riflettere gli studenti sui modi in cui le diverse discipline concettualizzano e trattano i vari “volti” del tempo. Dopo aver introdotto in classe il *pensiero della complessità*, insegnanti e tecnici di fisica e chimica hanno collaborato nei rispettivi laboratori per condurre le attività sperimentali sulla convezione di Bénard e sulla reazione chimica oscillante. Questa esperienza ha evidenziato una dinamica di cooperazione e collaborazione tra le varie figure professionali coinvolte, creando un contesto molto stimolante per la riflessione sul significato che la conoscenza può avere anche a livello personale. In altre parole, l’interdisciplinarietà tra il *pensiero della complessità* della fisica e l’ambito della chimica, attraverso un processo dinamico circolare tra *saperi*, ha favorito la partecipazione e il coinvolgimento delle figure professionali, permettendo ai concetti della complessità di assumere un significato personale e di *prendere vita*.

Riportiamo di seguito la riflessione condivisa con la classe dalla tecnica di laboratorio di chimica, dopo un breve riepilogo dei concetti della complessità presentati agli studenti nelle lezioni precedenti l’attività di laboratorio. Riprendendo il discorso sulla grande opportunità offerta dalla scienza della complessità di costruire una lente attraverso cui osservare il mondo e interpretare ciò che accade nella società complessa di cui facciamo parte, superando i confini disciplinari e tenendo insieme due livelli di realtà (quello macroscopico, percepibile con gli *occhi della fronte*, e quello microscopico, percepibile solo con il pensiero o gli *occhi della mente*), la tecnica di laboratorio ha commentato in questo modo:

“Allora io mi collego perché tutto quello che è stato detto, è esattamente ciò che condivido in pieno ed è una consapevolezza a cui si arriva. Non è che uno nasce e sa già tutto. Uno impara ... anche io ho avuto dei maestri, coetanei anche, perché non c'è bisogno di essere più grandi... il maestro più grande e lo studente più piccolo. A volte si impara anche dai più piccoli, dal modo che hanno di fare, etc. ...
Non dobbiamo dividere la conoscenza in compartimenti stagni. La conoscenza è qualcosa di universale. ... quando vedo un fenomeno, non lo guardo solo da un

⁵⁴ Riportiamo il sito del liceo Einstein di Rimini in cui viene descritto il progetto “Kairos”:
<https://www.einsteinrimini.edu.it/progetti-interdisciplinari/kairos-la-scrittura-creativa-per-esplorare-la-categoria-del-tempo/>

punto di vista, ma devo imparare ad osservarlo da tutti i punti di vista per leggere la realtà. E quando ... si parlava dell'indagare nel microscopico ... perché è quello poi che regola quello che vediamo, a me viene in mente ... "Il piccolo principe", l'avete letto?

Ad ogni età racconta delle cose diverse ... è una storia che va bene dalle elementari fino a quando si è nonni, perché ... **ogni volta che lo leggi scopri delle cose diverse, un modo di guardare, di osservare, di sentirsi parte di quello che si osserva, che è molto forte; e c'è una frase che viene detta in quest'opera che è "l'essenziale è invisibile agli occhi", quindi dobbiamo cercarlo come si diceva prima con gli occhi della mente ..."**

Conclusione

In questo studio, abbiamo esplorato la *dimensione temporale* della scienza dei sistemi complessi. Partendo dall'analisi delle concezioni di tempo di studenti di scuola secondaria superiore, abbiamo mostrato come la scienza della complessità costituisca una sorgente di conoscenze e competenze per riflettere sul concetto di tempo. Approfondendo alcuni concetti di base della fisica dei sistemi complessi, è stato possibile evidenziare il loro impatto culturale in ambiti di conoscenza *altri*. L'interdisciplinarietà ha inoltre permesso di valorizzare le strutture temporali della scienza della complessità, creando le condizioni per lo sviluppo di *competenze di tempo*. I risultati ottenuti hanno guidato la progettazione di attività didattiche incentrate su esperimenti che mostrano strutture temporali significative.

Di seguito, i principali risultati dello studio:

Capitolo 1: Partendo dal senso di alienazione e appropriazione emerso da due campioni di dati costituiti da scritti di studenti di Liceo, abbiamo preso spunto dagli studi sulla sociologia del tempo per caratterizzare le immagini di tempo uscenti dai saggi di futuro e dai racconti di complessità. Questo ci ha permesso di distinguere il "tempo dell'orologio" dal "tempo della natura/esperienza" e formulare cinque coppie di categorie che rispondono a quattro domande generali: "Che cosa struttura il tempo?" (1° coppia di categorie), "Quando avviene un evento?" (2° coppia), "Cos'è che dà valore al tempo?" (3° coppia), "È un tempo statico/invariante oppure dinamico/trasformativo?" (4° e 5° coppia). Abbiamo osservato che il "tempo dell'orologio" è spesso associato a situazioni di sofferenza o distacco emotivo, mentre il "tempo della natura/esperienza" viene utilizzato per connettersi profondamente e autenticamente con sé stessi, sperimentando serenità. Gli studenti utilizzano una struttura temporale o l'altra a seconda del contesto, mostrando che alienazione e appropriazione non sono proprietà intrinseche del tempo, ma rappresentano modi personali e soggettivi di relazionarsi al tempo.

Le immagini di tempo uscenti dai due campioni di dati sono state interpretate dalla prospettiva della fisica, associando il "tempo dell'orologio" alla scienza classica (ovvero al "tempo esterno-cronologico") e il "tempo della natura/esperienza" alla scienza della complessità (ovvero al "tempo interno-kairologico").

Capitolo 2: Sono stati descritti i concetti principali della fisica dei sistemi complessi, con particolare riferimento alla teoria dei sistemi dinamici non lineari e alla termodinamica lontana dall'equilibrio. Analizzando il *pensiero della complessità* abbiamo individuato gli aspetti concettuali che permettono di evidenziare la struttura temporale della scienza della complessità, descritta nel Capitolo 1. Nello specifico, seguendo un approccio dinamico-evolutivo alla scienza della complessità, abbiamo riconosciuto le seguenti proprietà del tempo interno-kairologico: *Particolarità, Sfida alla progressione lineare di chronos: kairos, Alta*

sensibilità ai rumori interni ed esterni, Sorgente di un nuovo ordine e Visione dinamica del mondo.

Capitolo 3: È stata discussa la “fortuna” del pensiero della complessità nell’attraversamento di vari ambiti del sapere. In particolare, la “circolarità creativa” tra i concetti fisici e altri contesti ha mostrato l’interdisciplinarietà come un processo di analisi (“spacchettamento”) e arricchimento concettuale, poiché solo uscendo dall’ambito scientifico è stato possibile ampliare l’orizzonte del pensiero della complessità della fisica e, al contempo, evidenziare le sue specificità. Per mostrare questa dinamica sono stati esaminati quattro ambiti di conoscenza non correlati fra di loro, ovvero il management, la cultura popolare, la biologia evolutiva e la critica letteraria.

Capitolo 4: Sono stati descritti due fenomeni di auto-organizzazione, uno in fisica e uno in chimica, scelti per illustrare le peculiarità delle strutture temporali relative all’evoluzione e alle proprietà emergenti dei sistemi complessi. Questi esperimenti mostrano come l’interdisciplinarietà, attraverso un processo dinamico e circolare tra diverse discipline (in questo caso tra fisica e chimica), possa arricchire la riflessione sulle strutture temporali della fisica e, più in generale, permettere ai concetti della scienza della complessità di arricchirsi di significato e di *prendere vita*. I fenomeni complessi presentati sono stati il punto di partenza per la progettazione di attività didattiche, realizzate nei laboratori di fisica e chimica del Liceo scientifico "A. Einstein" di Rimini, con una classe seconda.

Concludo questa tesi con alcune considerazioni personali. Questo lavoro riflette la mia profonda convinzione che l’insegnamento della fisica, e delle scienze in generale, oltre a preparare solidamente gli studenti che desiderano intraprendere percorsi di studio scientifici, abbia il *dovere* di fornire ai futuri cittadini “strumenti di pensiero” che permettano loro di interpretare il mondo complesso che li circonda e di orientarsi in esso.

Attraverso questo studio, incentrato sulle strutture temporali della complessità, ho cercato di contribuire allo sviluppo di competenze di pensiero immaginativo, creativo e interdisciplinare. In particolare, ho voluto mostrare come, partendo da un’analisi del *sapere* della fisica, sia possibile creare le condizioni per la formazione di *competenze di tempo*, che permettano agli studenti di esplicitare le proprie concezioni di tempo e di acquisire consapevolezza dei loro modi personali e soggettivi di rapportarsi ad esso, aiutandoli così a conoscere meglio sé stessi. In conclusione, spero che questo studio possa essere fonte di ispirazione per docenti e ricercatori, incoraggiandoli a continuare a esplorare e innovare l’insegnamento delle scienze, mantenendo sempre al centro l’obiettivo di promuovere la crescita personale e culturale degli studenti.

Bibliografia

- Adorno, T. W., & Canadè, A. (Eds.). (2007). *Benjamin, il cinema e i media*. Pelligrini.
- Barelli, E. (2022). *Complex systems simulations to develop agency and citizenship skills through science education*. <https://doi.org/10.48676/UNIBO/AMSDOTTORATO/10146>
- Barelli, E., Tasquier, G., Caramaschi, M., Satanassi, S., Fantini, P., Branchetti, L., & Levrini, O. (2022). Making sense of youth futures narratives: Recognition of emerging tensions in students' imagination of the future. *Frontiers in Education*, 7, 911052. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.911052>
- Barzykina, I. (2020). Chemistry and Mathematics of the Belousov–Zhabotinsky Reaction in a School Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 97(7), 1895–1902. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00906>
- Belousov, B. P. (1959). A periodic reaction and its mechanism. *Collection of Short Papers on Radiation Medicine for 1958*.
- Bénard, H. C. (1901). *Les Tourbillons Cellulaires dans une Nappe Liquide Transportant de la Chaleur par Convection en Régime Permanent* [Thèse de doctorat].
- Ben-Menahem, Y. (1997). Historical Contingency. *Ratio*, 10(2), 99–107. <https://doi.org/10.1111/1467-9329.00032>
- Bocchi, G., & Ceruti, M. (2007). *La sfida della complessità*. Mondadori Bruno.
- Bray, W. C. (1921). A PERIODIC REACTION IN HOMOGENEOUS SOLUTION AND ITS RELATION TO CATALYSIS. *Journal of the American Chemical Society*, 43(6), 1262–1267. <https://doi.org/10.1021/ja01439a007>
- Byrne, D. S. (1998). *Complexity theory and the social sciences: An introduction*. Routledge.

Camazine, S. (Ed.). (2003). *Self-organization in biological systems* (2. print., and 1. paperback print).

Princeton Univ. Press.

Campbell, D., Campbell, D. K., & Center for Nonlinear Studies (Eds.). (1985). *Order in chaos:*

Proceedings of the International Conference on Order in Chaos: [second annual international conference of the Center for Nonlinear Studies] ; held at the Center for Nonlinear Studies, Los Alamos, New Mexico, USA, 24 - 28 May 1982 (2. print). North-Holland.

Cervellati, R. (2015, April 3). Le reazioni chimiche oscillanti (1 parte). *La Chimica e la Società*.

<https://ilblogdellasci.wordpress.com/2015/04/03/le-reazioni-chimiche-oscillanti-1-parte/>

Chavez, M. (2018). *English: The model of punctuated equilibrium contrasted against the phyletic gradualism model of speciation*. Own work.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PunctuatedEquilibrium.png#metadata>

Crespi, F., & Bonichi, F. (Eds.). (2005). *Tempo vola: L'esperienza del tempo nella società contemporanea*. Il mulino.

Darwin, C. R. 1859. *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London: John Murray. [1st edition]. (n.d.). Retrieved 22

June 2024, from <https://darwin->

[online.org.uk/content/frameset?itemID=F373&viewtype=text&pageseq=1](https://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F373&viewtype=text&pageseq=1)

Darwin, C. R. 1869. *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London: John Murray. 5th edition. Tenth thousand.

(n.d.). Retrieved 22 June 2024, from <https://darwin->

[online.org.uk/content/frameset?itemID=F387&viewtype=text&pageseq=1](https://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F387&viewtype=text&pageseq=1)

De Zuani Cassina, F., & Levrini, O. (2024). Educational reconstruction of physics of complexity within a creative writing classroom activity. *Journal of Physics: Conference Series*, 2750(1), 012048.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2750/1/012048>

Desjardins, E. (2011). Reflections on Path Dependence and Irreversibility: Lessons from Evolutionary Biology. *Philosophy of Science*, 78(5), 724–738. <https://doi.org/10.1086/662560>

- Dooley, K. (2009). The Butterfly Effect of the 'Butterfly Effect'. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 13, 279–288.
- Eldredge, N., & Gould, S. (1971). Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism. In *Models in Paleobiology* (Vol. 82, pp. 82–115).
- Field, R. J., Koros, E., & Noyes, R. M. (1972). Oscillations in chemical systems. II. Thorough analysis of temporal oscillation in the bromate-cerium-malonic acid system. *Journal of the American Chemical Society*, 94(25), 8649–8664. <https://doi.org/10.1021/ja00780a001>
- Field, R. J., & Noyes, R. M. (1974). Oscillations in chemical systems. IV. Limit cycle behavior in a model of a real chemical reaction. *The Journal of Chemical Physics*, 60(5), 1877–1884. <https://doi.org/10.1063/1.1681288>
- Galison, P. (2000). *Einstein's clocks: The place of time*. 355–389.
- Galison, P. (2004). *Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré*. Raffaello Cortina Editore.
- Glaser, B. G., & Strauss, A. L. (1967). *The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*.
- Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a new science*. Viking.
- Goldstein, J. (1999). Emergence as a Construct: History and Issues. *Emergence*, 1(1), 49–72. https://doi.org/10.1207/s15327000em0101_4
- Goldstein, J. (2001). *Scientific & Mathematical Roots of Complexity Science*. http://www.plexusinstitute.com/edgeware/archive/think/main_filing3.html
- Gould, S. J. (2018). *La vita meravigliosa. I fossili di Burgess e la natura della storia*. Feltrinelli.
- Harvey, D. L., & Reed, M. (1997). Social science as the study of complex systems. *Chaos Theory in the Social Sciences: Foundations and Applications*, 295.
- Israel, G. (2005). The Science of Complexity: Epistemological Problems and Perspectives. *Science in Context*, 18(3), 479–509. <https://doi.org/10.1017/S0269889705000621>
- Leccardi, C. (2009). *Sociologie del tempo: Soggetti e tempo nella società dell'accelerazione* (1. ed). Laterza.

- Levrini, O., Fantini, P., Barelli, E., Branchetti, L., Satanassi, S., & Tasquier, G. (2021). The Present Shock and Time Re-appropriation in the Pandemic Era: Missed Opportunities for Science Education. *Science & Education*, *30*(1), 1–31. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00159-x>
- Levrini, O., Fantini, P., Tasquier, G., Pecori, B., & Levin, M. (2015). Defining and Operationalizing Appropriation for Science Learning. *Journal of the Learning Sciences*, *24*(1), 93–136. <https://doi.org/10.1080/10508406.2014.928215>
- Levrini, O., Tasquier, G., Barelli, E., Laherto, A., Palmgren, E., Branchetti, L., & Wilson, C. (2021). Recognition and operationalization of *Future-Scaffolding Skills*: Results from an empirical study of a teaching–learning module on climate change and futures thinking. *Science Education*, *105*(2), 281–308. <https://doi.org/10.1002/sce.21612>
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *20*(2), 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2)
- Lorenzo, T. D., & Cicogna, G. (2012). *Problemi di biforcazione in fisica*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27305.34408>
- Lotka, A. J. (1910). Contribution to the Theory of Periodic Reactions. *The Journal of Physical Chemistry*, *14*(3), 271–274. <https://doi.org/10.1021/j150111a004>
- Mainzer, K., Eisinger, J., & Mainzer, K. (2002). *The little book of time*. Copernicus Books.
- Manneville, P. (1990). *Dissipative structures and weak turbulence*. Academic Press.
- Maroto, J. A., Pérez-Muñuzuri, V., & Romero-Cano, M. S. (2007). Introductory analysis of Bénard–Marangoni convection. *European Journal of Physics*, *28*(2), 311–320. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/2/016>
- Miyazaki, J. (2013). 2—Belousov–Zhabotinsky Reaction. In S. Kinoshita (Ed.), *Pattern Formations and Oscillatory Phenomena* (pp. 61–83). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397014-5.00002-X>
- Morin, E. (2011). *La sfida della complessità. La défi de la complexité*. Le Lettere.
- Morson, G. S. (1988). *Hidden in Plain View: Narrative and Creative Potentials in 'War and Peace'*.

- Morson, G. S. (1994). *Narrative and Freedom*. Yale University Press; JSTOR.
<http://www.jstor.org/stable/j.ctt32bmv0>
- Morson, G. S. (1998). Sideshadowing and Tempics. *New Literary History*, 29(4), 599–624.
<https://doi.org/10.1353/nlh.1998.0043>
- Morson, G. S. (2013). *Prosaics and other provocations: Empathy, open time, and the novel*. Academic Studies Press.
- Morson, G. S., & Emerson, C. (1990). *Mikhail Bakhtin: Creation of a prosaics*. Stanford Univ. Press.
- Mutabazi, I., Wesfreid, J. E., & Guyon, E. (Eds.). (2006). *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures: Henri Bénard Centenary Review* (Vol. 207). Springer New York.
<https://doi.org/10.1007/b106790>
- Nicolis, G., & Nicolis, C. (2007). *Foundations of Complex Systems: Nonlinear Dynamics, Statistical Physics, Information and Prediction*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/6253>
- Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. Wiley.
- Nicolis, G., & Prigogine, I. (1991). *La complessità Esplorazioni nei nuovi campi della scienza* (prima edizione). Einaudi.
- Pearson, J. R. A. (1958). On convection cells induced by surface tension. *Journal of Fluid Mechanics*, 4(5), 489–500. <https://doi.org/10.1017/S0022112058000616>
- Philippon, P. (1949). Il Concetto Greco di Tempo Nelle Parole Aion, Chronos, Kairos, Eniautos. *Rivista Di Storia Della Filosofia*, 4(2), 81.
- Prigogine, G. N., Ilya. (1991). *La complessità—Esplorazioni nei nuovi campi della scienza* (prima edizione). Giulio Einaudi Editore.
- Prigogine, I. (1961). *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*.
- Prigogine, I. (1980). *From being to becoming: Time and complexity in the physical sciences*. W. H. Freeman.

- Prigogine, I. (2002, January 25). *Ilya Prigogine, sistemi lontani dall'equilibrio* [Interview].
<https://giamod.it/nuova/index.php/84-fisica-e-dintorni/232-ilya-prigogine-sistemi-lontani-dall-equilibrio>
- Prigogine, I., & Allen, P. M. (1982). 1. The Challenge of Complexity. In W. C. Schieve & P. M. Allen (Eds.), *Self-Organization and Dissipative Structures* (pp. 1–39). University of Texas Press.
<https://doi.org/10.7560/703544-002>
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1981). *La nuova alleanza. Metamorfosi della scienza*. Einaudi.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1984). *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*. Bantam Books.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1989). *Tra il tempo e l'eternità*. Boringhieri.
- Rämö, H. (1999). An Aristotelian Human Time-Space Manifold: From Chronochora to Kairotopos. *Time & Society*, 8(2–3), 309–328. <https://doi.org/10.1177/0961463X99008002006>
- Rayleigh, Lord. (1916). LIX. *On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 32(192), 529–546. <https://doi.org/10.1080/14786441608635602>
- Roberts, J. (2003). Kairos, Chronos and Chaos. *Group Analysis*, 36(2), 202–217.
<https://doi.org/10.1177/0533316403036002005>
- Rosa, H. (2003). Social Acceleration: Ethical and Political Consequences of a Desynchronized High-Speed Society. *Constellations*, 10(1), 3–33. <https://doi.org/10.1111/1467-8675.00309>
- Rosa, H. (Ed.). (2009). *High-speed society: Social acceleration, power, and modernity*. Pennsylvania State University Press.
- Rosa, H. (2015). *Accelerazione e alienazione Per una teoria critica del tempo nella tarda modernità*. Einaudi.
- Rothman, D. H. (2006). *Fluid dynamics and Rayleigh-B' enard convection*.
- Sambursky, S., & Geymonat, L. (1959). *Il mondo fisico dei greci*. Feltrinelli.
<https://books.google.it/books?id=bi7FnQEACAAJ>

- Si Network*. (n.d.). Si Network. Retrieved 22 June 2024, from
<https://www.systemsinnovation.network/>
- Smith, J. E. (1969). Time, Times, and the 'Right Time'; Chronos and Kairos: *Monist*, 53(1), 1–13.
<https://doi.org/10.5840/monist196953115>
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Westview Press.
- Taskan, B., Junça-Silva, A., & Caetano, A. (2022). Clarifying the conceptual map of VUCA: A systematic review. *International Journal of Organizational Analysis*, 30(7), 196–217.
<https://doi.org/10.1108/IJOA-02-2022-3136>
- Tasquier, G., Branchetti, L., & Levrini, O. (2019). Frantic Standstill and Lack of Future: How Can Science Education Take Care of Students' Distopic Perceptions of Time? In E. McLoughlin, O. E. Finlayson, S. Erduran, & P. E. Childs (Eds.), *Bridging Research and Practice in Science Education* (Vol. 6, pp. 205–224). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-17219-0_13
- Tonelli, G. (2021). *Tempo: Il sogno di uccidere Chrónos* (Prima edizione in 'Varia.'). Feltrinelli.
- Valotta, B. (2017). *La rivoluzione del tempo di Ilya Prigogine*. <https://doi.org/10.7408/epkn.1>
- Velarde, M. G., & Normand, C. (1980). Convection. *Scientific American*, 243(1), 92–109.
- Volterra, V. (1926). Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically¹. *Nature*, 118(2972), 558–560. <https://doi.org/10.1038/118558a0>
- VUCA - Surviving in a World of Complexity*. (n.d.). Si Network. Retrieved 16 June 2024, from
<https://www.systemsinnovation.network/posts/20014264>
- Wesfreid, J. E. (2017). Henri Bénard: Thermal convection and vortex shedding. *Comptes Rendus Mécanique*, 345(7), 446–466. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.06.006>
- Žabotinskij, A. M. (1964). *Periodical oxidation of malonic acid in solution (a study of the Belousov reaction kinetics)*. *Biofizika*.

Ringraziamenti

Nella stesura di questa tesi, il supporto di molte persone è stato fondamentale. Senza di loro, il mio percorso di crescita universitaria e personale non sarebbe stato possibile.

Per prima cosa, vorrei ringraziare la mia relatrice, Olivia Levrini, per avermi proposto l'argomento di questa tesi. Grazie per la sua disponibilità e pazienza nel guidarmi fino alla fine di questo percorso. Non dimenticherò mai le ore trascorse nel suo ufficio a discutere delle *strutture temporali della fisica* e le sue intuizioni, che improvvisamente aprivano nuove prospettive quando l'orizzonte di fronte a me sembrava avvolto dalla nebbia.

Vorrei ringraziare anche il mio correlatore, Francesco De Zuani Cassina, per i suoi preziosi consigli. Grazie per avermi fornito spunti fondamentali nella stesura di questo lavoro e per avermi sostenuto nei *momenti critici*.

Un sentito ringraziamento va anche alla correlatrice Paola Fantini, che oltre ad avermi accolto nella sua splendida casa, mi ha aperto le porte del Liceo Scientifico "A. Einstein" di Rimini. Non dimenticherò mai l'emozione provata in classe con gli studenti e i momenti trascorsi a discutere nel suo ufficio e per strada sull'epistemologia della complessità.

Ringrazio infinitamente i miei genitori, senza i quali questo momento non sarebbe stato possibile. Grazie per avermi sostenuto e permesso di coltivare i miei sogni per così tanto tempo. La mia gratitudine va oltre ogni parola che possa esprimere.

Un grazie speciale a Donatella, che è stata sempre al mio fianco anche nei momenti di silenzio. Il tuo affetto supera le barriere dello spazio e del tempo.

Grazie ai miei amici fisici e metafisici Federica, Francesco, Matteo e Santiago per essere stati sempre presenti. Senza di voi il mio percorso di studi non sarebbe stato lo stesso. Grazie per avermi costantemente ricordato cos'è la *Bellezza* e per avermi insegnato che nella *Leggerezza* si cela un'immensa *Profondità*. Un grazie speciale a Fede per aver accettato e fatto propri tutti i miei sfoghi e pensieri. Ti tengo nel cuore ogni giorno.

Un sentito ringraziamento ai miei amici di sempre, Ave, Chiara, Noemi, Sara e Serena, che hanno alleggerito i momenti più pesanti e mi hanno spronato a dare sempre il massimo.

Grazie anche ad Alessandro, Chiara, Davide, Matteo, Simone e Orso, per aver condiviso con me questo percorso universitario.

Grazie a Beatrice, la tua presenza negli ultimi mesi a Bologna ha ravvivato una fiamma mai sopita. Sono grata per la tua gentilezza e la tua bontà d'animo. Ti voglio bene!

Grazie ad A. F. per avermi aiutato a trovare il filo che tiene insieme le perle bianche e grigie delle esperienze di vita. Grazie per avermi ricordato che lo spazio di libertà si trova nelle mattonelle e non nelle fughe!

Grazie a Sara per avermi ricordato cosa significa avere un *corpo* e come questo possa risuonare con la nostra spiritualità. Sei stata una scoperta preziosa e ti sono immensamente grata. Un sincero ringraziamento anche ai gruppetti di yoga del lunedì e del giovedì!

Grazie ad Ahmed, che mi ha permesso di arrivare a questo traguardo con più leggerezza e velocità. Apprezzo profondamente la tua comprensione, disponibilità e pazienza. Grazie per avermi ascoltata anche quando le mie parole potevano sembrarti norvegese!

Infine, grazie a me stessa per non aver mai dimenticato che la vita è fatta di molti capitoli da scrivere, e anche se l'inizio di qualcosa di nuovo può spaventare, è solo così che possiamo dare forma alla nostra *storia*.