



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI UDINE**

**hic sunt futura**

Master di I Livello in  
*Filosofia del Digitale e Intelligenza Artificiale*

ELABORATO FINALE

## **ALLEGATO 1 – DOC. TECNICO**

### **Principi, Struttura e Fondamenti Filosofici delle Reti Locali di Astrazione (RLA)**

Stratificazione Informativa, Collassi ed Emergenza  
in una Visione Multi-Livello Realtà

**Candidato**  
*Gianluca Conte*

ANNO ACCADEMICO 2024 – 2025

## Abstract

La letteratura sui sistemi complessi esplora l'*emergenza* di proprietà macro non immediatamente riconducibili alle configurazioni micro, mentre l'informatica teorica e la fisica computazionale studiano l'*indecidibilità* in contesti Turing-like, evidenziando limiti non aggirabili nella capacità di calcolo. Questi due temi, cruciali e apparentemente separati, trovano una cornice unificante nelle *Reti Locali di Astrazione* (RLA), proposte in questo lavoro, che definiscono: (i) *livelli di astrazione* (insiemi di stati e regole) organizzati in catene o reticoli multi-livello, (ii) *funzioni di trasmissione* fra livelli adiacenti (iniettive o non iniettive), (iii) *assiomi, lemmi e teoremi* che stabiliscono se e come *problemi indecidibili* si trasmettano a livelli superiori o vengano “bloccati” da *collassi informativi*. RLA non descrive la “*realtà fenomenica*” bensì *come essa viene rappresentata*, in modo parcellizzato e specialistico, dalle varie discipline scientifiche, che appaiono tra loro contigue o disgiunte a seconda delle funzioni di trasmissione tra i livelli. Non si tratta, dunque, di un modello ontologico, ma di uno *schema epistemico-matematico* delle condizioni in cui si verificano *trasferimenti di indecidibilità* e/o *emergenza irriducibile*. Dal punto di vista della *Filosofia della Scienza*, RLA non si pone come una teoria *alternativa* ai modelli disciplinari consolidati, ma come una *struttura di raccordo* che integra: la *pluralità dei livelli*, la possibilità di un *riduzionismo parziale* nei casi di iniettività, e la necessaria *presenza di limiti computazionali* nei livelli Turing-like. L'elemento innovativo è mostrare *quando* l'indecidibilità (*inevitabile* in un livello Turing-like) “risale” la scala disciplinare e *quando* la non iniettività porta a *proprietà emergenti* irriducibili. Sottolineiamo tuttavia che *non ogni* collasso informativo genera novità: soltanto la fusione di *stati rilevanti* (differenze sperimentali/teoriche significative) origina un “collasso con emergenza”; al contrario, la fusione di stati marginali costituisce un “collasso senza emergenza” e non implica fenomeni emergenti. L'impianto RLA, radicato nei teoremi di Turing e Rice, è supportato da esempi provenienti dalla biologia molecolare (DNA computing), dalla fisica (automi cellulari e termodinamica), dall'IA (reti neurali) e dalle scienze sociali. Presentiamo inoltre una *catena complessa* come esempio operativa multi-scala e forniamo una *tabella* di discipline, distinguendone la *Turing-likeness*. Proseguiamo discutendo le prospettive di falsificabilità popperiana, le possibili *metriche di collasso*, l'estensione a *reticoli con loop* e il potenziale dialogo con la *Category Theory*. Nella trattazione viene, inoltre, introdotta la nozione di *Topologia RLA Compatta*, definita come Reticolo Locale di Astrazione Ontologicamente Indipendente, Epistemologicamente Chiuso e Computabile ai sensi di Turing, rilevando quindi come struttura per costruire reticoli multi-livello computazionalmente “autosufficienti”.

# Contents

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1      | Motivazioni . . . . .  | 5         |
| 1.2      | Obiettivi . . . . .  | 5         |
| 1.3      | Organizzazione del Paper . . . . .                             | 6         |
| <b>2</b> | <b>Revisione Letteratura e Fondamenti Disciplinari</b>         | <b>7</b>  |
| 2.1      | Emergenza e Sistemi Complessi . . . . .                        | 7         |
| 2.2      | Indecidibilità e Turing-likeness . . . . .                     | 8         |
| 2.3      | Livelli di Astrazione e Sistemi Multi-Livello . . . . .        | 8         |
| 2.4      | Necessità di un Quadro Unificante . . . . .                    | 8         |
| <b>3</b> | <b>Quadro Epistemico-Filosofico di RLA</b>                     | <b>9</b>  |
| 3.1      | Convenzionalità dei Domini e Realismo Parziale . . . . .       | 9         |
| 3.2      | Definizione di Contiguità: Criteri Empirico-Teorici . . . . .  | 10        |
| 3.3      | Riduzionismo, Collassi Informativi e Reticoli . . . . .        | 10        |
| 3.4      | Raccordo Epistemico-Matematico . . . . .                       | 10        |
| <b>4</b> | <b>Assunzioni Fattuali</b>                                     | <b>12</b> |
| 4.1      | Che Cosa si Intende per Turing-likeness . . . . .              | 12        |
| 4.2      | Contiguità e Validazione Empirica . . . . .                    | 13        |
| 4.3      | Definizione Operativa di Stati Turing-centrali . . . . .       | 13        |
| 4.4      | Rilevanza del Collasso e Soglie Sperimentali . . . . .         | 14        |
| <b>5</b> | <b>Formalizzazione Matematica di RLA</b>                       | <b>15</b> |
| 5.1      | Definizioni Fondamentali . . . . .                             | 15        |
| 5.2      | Assiomi del Modello RLA . . . . .                              | 16        |
| 5.3      | Lemmi e Teoremi Principali . . . . .                           | 17        |
| 5.4      | Commenti e Collegamenti con la Logica Computazionale . . . . . | 18        |
| <b>6</b> | <b>Falsificabilità e Possibili Esperimenti</b>                 | <b>20</b> |
| 6.1      | Principi di Falsificabilità . . . . .                          | 20        |
| 6.2      | Casi di Test e Protocollo Sperimentale . . . . .               | 20        |
| 6.3      | Esempio di Setup: Dal Protocollo all'Interpretazione . . . . . | 21        |
| 6.4      | Framework Aperto a Verifiche Incrociate . . . . .              | 22        |
| <b>7</b> | <b>Fondamenti Minimi Disciplinari</b>                          | <b>23</b> |
| 7.1      | Matematica e Teoria della Computazione . . . . .               | 23        |
| 7.2      | Filosofia della Scienza . . . . .                              | 23        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 7.3       | Biologia Computazionale . . . . .   | 24        |
| 7.4       | Fisica Computazionale . . . . .   | 24        |
| 7.5       | IA e Scienze Cognitive . . . . .  | 25        |
| <b>8</b>  | <b>Esempi Concreti e Funzioni di Trasmissione</b>   | <b>26</b> |
| 8.1       | Es.1: Biologia Molecolare → Cellula Computazionale . . . . .  | 26        |
| 8.2       | Es.2: Automa Cellulare Universale → Parametri Termodinamici . . .   | 26        |
| 8.3       | Es.3: IA Neurale (RNN) → Livello Cognitivo . . . . .  | 28        |
| 8.4       | Es.4: Un Caso di Calcolo Indecidibile “Trasmesso” . . . . .   | 28        |
| <b>9</b>  | <b>Esempio Operativo (Catena Livelli Contigui)</b>  | <b>30</b> |
| 9.1       | Filosofia della Sequenza: Linearità come Semplificazione . . . . .  | 30        |
| 9.2       | Descrizione Dettagliata dei 15 Livelli . . . . .  | 30        |
| 9.3       | Quando Avviene la Trasmissione di Indecidibilità? . . . . .   | 36        |
| 9.4       | Accumulo di Collassi ed Emergenza . . . . .   | 36        |
| 9.5       | Blocco e Ri-emersione della Turing-likeness . . . . .   | 36        |
| 9.6       | Rilievi Metodologici: Linearità e Reticoli con Loop . . . . .   | 37        |
| <b>10</b> | <b>Esempi di altri Domini Scientifici</b>   | <b>38</b> |
| 10.1      | Ragioni della Classificazione SI/NO . . . . .   | 39        |
| 10.2      | Discipline-Ponte e Futuri Sviluppi . . . . .  | 40        |
| 10.3      | Implicazioni per RLA . . . . .  | 40        |
| <b>11</b> | <b><i>Topologie RLA Compatte: Reticoli Indipendenti Ontologicamente, Chiusi Epistemicamente e Computabili</i></b> | <b>42</b> |
| 11.1      | Indipendenza Ontologica . . . . .   | 43        |
| 11.2      | Chiusura Epistemica . . . . .   | 44        |
| 11.3      | Turing-Computabilità . . . . .  | 44        |
| <b>12</b> | <b>Costruzione di una Topologia RLA Compatta</b>  | <b>46</b> |
| 12.1      | Fase 1: Identificare il Dominio e le Fonti di Microfondazione . . . . .   | 46        |
| 12.2      | Fase 2: Selezione e Descrizione dei Livelli . . . . .   | 46        |
| 12.3      | Fase 3: Definire le Funzioni di Trasmissione ( $f_{ij}$ ) con Riferimenti Empirici . . . . .                      | 47        |
| 12.4      | Fase 4: Verificare Indipendenza Ontologica e Chiusura Epistemica . .  | 47        |
| 12.5      | Fase 5: Assicurare la Turing-Computabilità . . . . .  | 48        |
| 12.6      | Conclusioni . . . . .   | 48        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>13 Discussione Interdisciplinare</b>                                   | <b>50</b> |
| 13.1 Raccordo con la Matematica e la Filosofia della Scienza . . . . .    | 50        |
| 13.2 Coesistenza di Emergenza e Indecidibilità . . . . .                  | 50        |
| 13.3 Funzioni di Trasmissione come Chiave di Volta . . . . .              | 51        |
| 13.4 Topologia RLA Compatta . . . . .                                     | 51        |
| 13.5 Reticoli Multi-livello con Loop: Prospettive Future . . . . .        | 51        |
| 13.6 Sintesi Interdisciplinare . . . . .                                  | 52        |
| <b>14 Riflessioni Ontologiche, Epistemologiche e Questione Coscienza</b>  | <b>54</b> |
| 14.1 Linee di Pensiero: dalla Storia Antica a Quella Moderna . . . . .    | 54        |
| 14.2 Epistemologia: Pluralità Livelli e Limiti Conoscenza . . . . .       | 55        |
| 14.3 Ontologia: Riduzionismo, Emergenza e Sguardo Teologico . . . . .     | 56        |
| 14.4 Confronto con l'Antispecismo Post-Umanista . . . . .                 | 57        |
| 14.5 La Coscienza: Mente-Corpo e Indecidibilità . . . . .                 | 57        |
| 14.6 RLA come Modello di Sintesi . . . . .                                | 58        |
| <b>15 Conclusioni e Prospettive Future</b>                                | <b>59</b> |
| 15.1 Riassunto dei Contributi Chiave . . . . .                            | 59        |
| 15.2 Limiti Correnti e Criticità Aperte . . . . .                         | 60        |
| 15.3 Direzioni di Ricerca e Sviluppi Futuri . . . . .                     | 61        |
| 15.4 Conclusioni Finali . . . . .   | 63        |
| <b>Glossario dei Termini-Chiave in RLA</b>                                | <b>64</b> |
| <b>Appendica A: Dimostrazioni Formali Estese</b>                          | <b>66</b> |
| <b>Appendica B: Approfondimenti Tecnici per i Protocolli Sperimentali</b> | <b>70</b> |
| <b>Appendica C: Bozza di Metrica di Collasso e Indice di Emergenza</b>    | <b>74</b> |
| <b>Bibliografia</b>   | <b>77</b> |

# 1 Introduzione

## 1.1 Motivazioni

La scienza contemporanea affronta, in modo capillare, la *complessità* del reale, riscontrando da un lato *fenomeni emergenti* non immediatamente riconducibili ai microstati (come in fisica statistica o biologia dei sistemi), e dall'altro i *vincoli di calcolo* scaturiti dalla teoria della computazione (teoremi di Turing, Church, Rice). Tuttavia, tali temi — *emergenza* e *indecidibilità* — sono spesso trattati in letterature separate e con approcci epistemici poco interconnessi.

Le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) nascono come tentativo di colmare il *vuoto* tra questi due paradigmi: esse offrono una cornice formale che integri *multi-livello* (tipico degli studi sull'emergenza) e *limiti computazionali* (radicati nei risultati classici della teoria di Turing). *In ultima istanza*, mira a rispondere alla domanda: *come possono fenomeni emergenti e indecidibilità coesistere o escludersi in un sistema descritto su più livelli disciplinari?*

Dal punto di vista epistemologico, RLA *non pretende di rappresentare la realtà "in sé"*, bensì si concentra su **come** essa venga *descritta* da differenti discipline scientifiche. In tal senso, RLA analizza *le condizioni formali* con cui avvengono trasferimenti informativi, collassi o trasmissioni tra livelli disciplinari adiacenti. Si tratta, dunque, non di un modello ontologico, ma di uno *schema di meta-riflessione* sulla struttura epistemica delle scienze.

In particolare, RLA non si propone come una *teoria sostitutiva*, bensì come una *struttura integrativa* che raccorda: (1) la *pluralità disciplinare* (con livelli specialistici diversi ma interconnessi), (2) la possibilità di *riduzioni parziali* nei casi di trasmissione iniettiva, (3) la *presenza inevitabile di limiti computazionali* in alcuni domini dotati di Turing-likeness.

## 1.2 Obiettivi

Il presente lavoro intende:

1. **Formalizzare** un *quadro teorico unificante* in cui:
  - (a) I *livelli di astrazione* (pratiche disciplinari e scale descrittive) siano definiti matematicamente come insieme di *stati* e *regole*.
  - (b) Le *funzioni di trasmissione* tra livelli (spesso non iniettive) possano spiegare *quando* i problemi indecidibili (Halting Problem, Teorema di Rice)

“risalgano” la scala e *quando* emergano proprietà *non deducibili* dal mero micro.

2. **Dimostrare** la validità del modello con *esempi* trasversali: DNA computing, fisica degli automi cellulari, reti neurali ricorrenti, scienze cognitive e sociali.
3. **Mostrare** come RLA sia *falsificabile*: ognuno dei tre assiomi centrali (A1–A3) presenta condizioni empiriche o concettuali che consentono test e potenziali confutazioni in senso popperiano.
4. **Introdurre** la nozione di *Topologia RLA Compatta*, ossia un reticolo di livelli Ontologicamente indipendente, Epistemologicamente chiuso e computabile in senso Turing, in cui la dinamica multi-livello possa darsi in modo localmente autosufficiente, aprendo la strada a implementazioni sperimentali e simulazioni di sistemi che si comportino come “microcosmi” di studio.
5. **Proporre** spunti di estensione futura: reticoli con loop e retroazioni, definizione quantitativa di “coefficiente di collasso,” collegamenti con la Category Theory, e protocolli sperimentali in biologia sintetica e IA.

### 1.3 Organizzazione del Paper

Il lavoro si articola in dodici sezioni principali (più appendici). Dopo questa **Introduzione**, la **Sez. 2** rivede lo stato dell’arte su emergenza e indecidibilità, chiarendo la necessità di un *framework* integrato. La **Sez. 3** pone le basi epistemico-filosofiche e discute la *contiguità* disciplinare.

Nella **Sez. 4** vengono esplicitate le *Assunzioni Fattuali* (che cosa si intende per Turing-likeness reale o teorica, come si validano empiricamente le funzioni di trasmissione e come si isolano gli stati computazionali centrali). La **Sez. 5** presenta la *formalizzazione matematica* di RLA: definizioni (livello di astrazione, (non) iniettività), assiomi (A1–A3) e teoremi fondamentali (propagazione dell’indecidibilità, emergenza da collasso).

La **Sez. 6** si sofferma sulla *falsificabilità* del modello, fornendo esempi di *come* A1–A3 possano essere smentiti e con quali sperimentazioni. La **Sez. 7** chiarisce i “fondamenti minimi” di matematica, filosofia, biologia, fisica e IA necessari a comprendere e applicare RLA. La **Sez. 8** espone *esempi concreti* di funzioni di trasmissione fra livelli (DNA→Cellula, AutomaCell.→Termodinamica, RNN→Cognizione, ecc.), integrando un esempio dettagliato di “calcolo indecidibile trasmesso.”

La **Sez. 9** illustra un esempio di *catena di 15 livelli contigui* come dimostrazione operativa multi-scala, mentre la **Sez. 10** presenta una *tabella estesa di altre disci-*

*pline*, distinte in Turing-like (15) e non Turing-like (15), con brevi commenti motivazionali. Nella **Sez. 11**, si introduce la definizione di "Topologia RLA Compatta", cioè un Reticolo Locale di Astrazione che risulti Indipendente dal punto di vista Ontologico, Chiuso dal punto di vista Epistemico e Computabile ai sensi di Turing. Nella **Sez. 12**, si definisce un metodo step-by-step per la costruzione di una Topologia RLA Compatta, microfondata in base alla letteratura inerente all'oggetto modellato (es. Briofita Generalista come da caso Studio Allegato).

Nella **Sez. 13** si discutono i risultati in prospettiva interdisciplinare, evidenziando la *chiusura del cerchio* tra emergenza e limiti computazionali e introducendo la questione dei *reticoli con loop*.

La **Sez. 14** si presenta un approfondimento di RLA in chiave filosofica e, in particolare, Ontologica ed Epistemica.

Infine, la **Sez. 15** offre una visione di insieme sulle *prospettive future*: metriche di collasso, protocolli sperimentali e potenziali sviluppi teorici (Category Theory, reticoli dinamici). Le Appendici riportano dimostrazioni matematiche complete e approfondimenti tecnici per i lettori specializzati.

## 2 Revisione Letteratura e Fondamenti Disciplinari

### 2.1 Emergenza e Sistemi Complessi

Nell'ambito dei sistemi complessi, (Anderson 1972) segnala come “*More is Different*”: la comparsa di *proprietà macro* (rotture di simmetria, transizioni di fase, comportamenti collettivi) non immediatamente deducibili dalla somma delle microparti. In *biologia dei sistemi*, (Morin 2008) sottolinea l'idea di *emergenza* come effetto di interazioni non lineari e multi-agente, dove la *descrizione microscopica* non basta per spiegare *completamente* le dinamiche emergenti.

Gran parte di questa letteratura, tuttavia, inquadra l'emergenza in termini di *complessità computazionale* o *difficoltà pratica* di riduzione, più che in termini di *limiti logico-computazionali* intrinseci. L'assenza di un *riferimento esplicito* alle *indecidibilità* — e ai loro principi formali — lascia aperta la questione di *se* e *come* i fenomeni emergenti possano risultare, in linea di principio, “irriducibili” per motivi non soltanto pratici, ma *logici*. In molti studi sulla complessità computazionale, si tende infatti a focalizzarsi sulle difficoltà *pratiche* (p.es. NP-hardness), senza tuttavia collegarle a *indecidibilità forte* (Halting Problem, Rice). Questa distinzione tra “complessità elevata” e “limite logico assoluto” è raramente esplicitata nella letteratura emergentista, e costituisce invece un asse cardine del presente lavoro.



## 2.2 Indecidibilità e Turing-likeness

Fin dalla formulazione di (Turing 1936) e (Church 1936), la teoria della computazione classica ha mostrato che *ogni* sistema Turing-like — in grado cioè di simulare una Macchina di Turing universale — ospita problemi indecidibili (quali l’Halting Problem o il Teorema di Rice (Rice 1953)). Nel corso del tempo, è emerso che *vari* sistemi fisici o biologici *possono* implementare computazioni universali: dagli *automi cellulari* (Wolfram 2002) alle *reti neurali ricorrenti* (Siegelmann & Sontag 1991), passando per il *DNA computing* (Winfrey 1998; Benenson et al. 2001).

Tuttavia, gran parte di questi risultati vive *all’interno* della comunità di “informatica teorica” e “fisica computazionale,” rimanendo *parzialmente* slegata dalla letteratura su *emergenza* nei sistemi multi-scala. Ciò lascia irrisolta la questione di *come*, in un sistema *Turing-completo*, le *transizioni micro-macro* possano *trasmettere* o *bloccare* l’indecidibilità.

## 2.3 Livelli di Astrazione e Sistemi Multi-Livello

Uno dei punti cardine per studiare i *fenomeni emergenti* è l’uso di “livelli di astrazione” (in fisica, biologia, scienze cognitive, ecc.): si passa, ad esempio, da un *livello molecolare* a un *livello cellulare*, poi a un *livello d’organo*, e infine a un *livello d’organismo*. Simili progressioni si ritrovano in *fisica statistica* (microstati → parametri termodinamici) e in *scienze sociali* (individuo → gruppo → società). Nel contesto di *Teoria Generale dei Sistemi*, (Bertalanffy 1968) e (Koestler 1967) già postulavano gerarchie nested (holarchie), ma non approfondivano la connessione con i *limiti computazionali*.

Allo stato attuale, mancano *cornici* che *formalizzino*, in termini di *(non) iniettività* e *Turing-likeness*, *quali* informazioni micro siano *preservate* nella trasmissione a un livello macro e *quali* differenze vadano “fuse” o “collassate,” originando fenomeni *non riducibili*. Inoltre, la maggior parte dei modelli multi-livello non abbraccia sistematicamente la teoria dell’indecidibilità.

## 2.4 Necessità di un Quadro Unificante

La *storia* della scienza multi-disciplinare (biologia, fisica, IA, scienze cognitive) e della *teoria della computazione* suggerisce che esista un *potenziale* di integrazione tra la prospettiva emergentista e i teoremi sul *limite* del calcolo. Da un lato, in un contesto micro Turing-like, emergono *problemi insolubili* (Halting Problem, Rice); dall’altro, la fisica e la biologia mostrano *collassi informativi* che generano novità macro. Il *collegamento* tra queste due dinamiche è stato poco esplorato.

Le **Reti Locali di Astrazione (RLA)** nascono per *colmare* tale *gap*, fornendo:

- Una *formalizzazione* in chiave set-based e logico-computazionale, che includa la *(non) iniettività* come meccanismo di riduzione dell'informazione.
- Un *metodo* per stabilire se i *limiti d'indcidibilità* si conservano lungo una catena di livelli (Teorema 1) o se subentrano fenomeni emergenti irriducibili (Teorema 2).
- Un *criterio* di *contiguità* basato sulle evidenze empiriche e la coerenza disciplinare, col fine di ancorare la teoria a basi sperimentali (cap. 3).

Nelle sezioni successive, *ripercorriamo* la cornice epistemica (Sez. 3) e poi entriamo nella *formalizzazione* vera e propria (Sez. 4 e 5), cercando di offrire al lettore un quadro completo di come *emergenza* e *indcidibilità* possano, in effetti, *coesistere* o *ostruirsi* a seconda delle *funzioni di trasmissione* fra livelli adiacenti.

## 3 Quadro Epistemico-Filosofico di RLA

### 3.1 Convenzionalità dei Domini e Realismo Parziale

Secondo le posizioni di (Berger & Luckmann 1966), i domini scientifici (ad esempio, “fisica molecolare,” “biologia cellulare,” “IA neurale,” ecc.) nascono da un processo *storico* e *socialmente condiviso*, volto a *ritagliare* porzioni di realtà osservabile in insiemi di *fenomeni* e *concetti* coerenti. Tale “*convenzione*” non nega la dimensione realistica: i livelli disciplinari non sono arbitrarie finzioni, bensì entità ancorate a *dati empirici*, sperimentazioni e parametri riconosciuti.

Adottiamo qui un *realismo parziale*, in cui i livelli di astrazione sono *ricostruzioni concettuali* legate alla capacità di un dominio di *spiegare*, *prevedere* e *controllare* fenomeni concreti. Ad esempio, un “livello molecolare” in biologia possiede strumenti (microscopia, reazioni chimiche, modelli di interazione) che *dimostrano* la validità del proprio “*ritaglio*” disciplinare; analogamente, un “livello cognitivo” in psicologia/IA è fondato su misure comportamentali e modelli cognitivi condivisi dalla relativa comunità scientifica.

### 3.2 Definizione di Contiguità: Criteri Empirico-Teorici

Postuliamo che due livelli di astrazione  $L_i$  e  $L_{i+1}$  siano *contigui* se e solo se esiste una *funzione di trasmissione*

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$$

che rifletta il *rapporto empirico-teorico* riconosciuto dalla disciplina. In altre parole, occorre:

1. **Un corpus di conoscenze** che leghi i due domini, come la genetica formale (genotipo  $\rightarrow$  fenotipo), la meccanica statistica (spin reticolari  $\rightarrow$  parametri termodinamici), o i modelli cognitivi (stati neurali  $\rightarrow$  concetti mentali).
2. **Coerenza empirica**: la mappa  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  deve corrispondere a processi osservabili o teorie verificate (sebbene non necessariamente *complete*).

La contiguità non implica *per forza* un rapporto “micro determina macro” in senso puramente riduzionista. Essa *ammette* che possano esserci *collassi informativi* (non iniettività), e anzi ne fa un elemento costitutivo della transizione fra livelli.

### 3.3 Riduzionismo, Collassi Informativi e Reticoli

L’idea di “livello inferiore” che *determina* il “livello superiore” è stata al centro del *riduzionismo classico*. Qui, tuttavia, riconosciamo che le *funzioni di trasmissione* fra livelli contigui **possono** essere:

- **Iniettive** (o quasi iniettive), in grado di preservare distinzioni micro anche su scala macro.
- **Non iniettive**, fondendo distinti stati micro in un’unica configurazione macro (cosiddetto *collasso informativo*).

La non iniettività crea fenomeni *irriducibili*, “nuove proprietà” emergenti che non si possono *dedurre* come un’ovvia proiezione biunivoca dal micro. In quest’ottica, *RLA* non sceglie un *unico* percorso riduzionista o emergentista, bensì offre un *reticolo discorsivo* di livelli, potenzialmente con scambi di informazione in entrambe le direzioni (micro $\leftrightarrow$ macro).

### 3.4 Raccordo Epistemico-Matematico

Il passaggio dai *costrutti epistemici* (livelli come “convenzioni disciplinari”) alla *formalizzazione matematica* (insiemi di stati, mappe iniettive/non iniettive) costituisce

la caratteristica centrale di RLA. Da un lato, si *rispetta* la natura storica e sperimentale dei livelli, senza imporre un rigido dogma “micro spiega macro.” Dall’altro, si *applica* la teoria degli insiemi e la logica delle riduzioni computazionali: questa base permette di definire *quando* un livello è Turing-like e *quando* la non iniettività produca *proprietà emergenti* irriducibili.

Nella prossima sezione (§4), introdurremo le *assunzioni fattuali* che chiariscono *come* riconoscere, nella pratica scientifica, i *livelli Turing-like*, *quali* criteri empirici definiscano la contiguità, e *come* isolare gli *stati computazionali* effettivamente coinvolti. Con tali basi, passeremo poi alla *formalizzazione* rigorosa in Sez. 5.

## 4 Assunzioni Fattuali

In questa sezione formalizziamo le *condizioni* necessarie per applicare correttamente le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) in contesti disciplinari *realistici*. Sezioni precedenti hanno introdotto l'idea di “livelli di astrazione” come *domini* disciplinari e la “contiguità” come *funzioni di trasmissione*. Qui esplicitiamo (i) i criteri per definire un livello come *Turing-like* o meno, (ii) le basi empiriche che giustificano i passaggi micro→macro, e (iii) l'identificazione degli *stati computazionali centrali* in ogni dominio. Infine, affrontiamo (iv) la questione di *quando* un collasso informativo (non iniettività) sia “rilevante” ai fini dell'emergenza.

### 4.1 Che Cosa si Intende per Turing-likeness

**Turing-likeness “piena”.** La definizione classica di Turing-likeness (Turing 1936; Church 1936) richiede che il sistema sia in grado di simulare, in linea di principio, *ogni* computazione eseguibile da una Macchina di Turing universale. In termini di *livello di astrazione*, ciò si traduce nell'esistenza di:

- Un *insieme di stati*  $C \subseteq D(L)$  e un *insieme di regole*  $\Sigma_{\text{comp}} \subseteq \Sigma(L)$  tali da garantire la possibilità di eseguire, con risorse potenzialmente illimitate o estensibili, *qualunque* programma Turing.
- Possibilità di codificare input e memorizzare configurazioni intermedie senza vincoli insormontabili in termini di *memoria* o *tempo*.

Esempi noti includono *DNA computing* (con protocolli adeguati), alcune *reti neurali ricorrenti* (Siegelmann & Sontag 1991) e *automi cellulari* universali (Wolfram 2002).

**Turing-likeness “limitata”.** Nella pratica, moltissimi sistemi naturali o artificiali *supportano* computazioni di potenza prossima a Turing, ma devono fronteggiare vincoli energetici, spaziali o di precisione numerica. In tali casi, si può parlare di “Turing-likeness limitata,” ritenendo che l'infinitezza delle risorse sia un modello *idealizzato*. Un esempio è quello di *reti neurali reali* in un cervello biologico, potenzialmente universali ma con risorse finite.

**Turing-likeness “teorica” (per costruzione).** Alcune piattaforme, specie *biologiche sintetiche* e *fisico-simulazionali*, possono essere *ingegnerizzate* ad hoc per ospitare calcoli universali, sebbene in condizioni sperimentali molto specializzate. Esse rientrano nel novero “teorico” in quanto la realizzabilità della Turing-likeness è dimostrata su *piccole scale*, ma è plausibile in linea di principio su grandi scale.

## 4.2 Contiguità e Validazione Empirica

Come discusso in §3.2, due livelli contigui  $L_i$  e  $L_{i+1}$  prevedono una funzione di trasmissione  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ . Perché ciò non resti *un mero esercizio formale*, occorre che esistano:

1. **Modelli o teorie empiriche** che descrivano *come*  $L_i$  influenzi  $L_{i+1}$ . Ad esempio, in *genetica formale*, i geni (livello molecolare) determinano proteine e fenotipi *in modo sperimentabilmente verificato*.
2. **Misure o evidenze sperimentali** che supportino la mappa  $\tau$ . Ciò garantisce che la contiguità *non* sia un'ipotesi arbitraria, ma rifletta uno *scenario* consolidato nella disciplina (o *falsificabile*, se emergono dati contrari).

Il *grado di dettaglio* con cui  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  è definita può variare da modelli deterministici espliciti a funzioni di *coarse graining* (nel caso di transizioni micro $\rightarrow$ macro in fisica).

## 4.3 Definizione Operativa di Stati Turing-centrali

Se un livello  $L$  è *Turing-like*, è spesso necessario identificare il sottoinsieme  $C \subseteq D(L)$  di *stati computazionali centrali*, la cui *dinamica* rende possibile la potenza di calcolo illimitata. Esempi:

- *DNA computing*: i filamenti codificano input e “memoria,” e reazioni di ibridazione/fissione corrispondono alle “istruzioni” Turing.
- *Reti neurali ricorrenti*: vettori di stato in un layer hidden, con parametri sinaptici che consentono la simulazione di macchine di Turing.
- *Automi cellulari*: configurazioni su reticolo, dotate di regole di aggiornamento in grado di esprimere computazione universale.

In *RLA*, la *quasi-iniettività* sui soli  $C$  è sufficiente (Sez. 5, Def. 4) per trasmettere l'indecidibilità (A2). Non occorre l'iniettività su *tutto*  $D(L)$ , bensì la conservazione delle distinzioni *critiche* interne alla computazione.

**Stati Rilevanti e Ruolo Empirico.** Nell'ambito di *Reti Locali di Astrazione*, qualificiamo come *stati rilevanti* quelli che (i) possiedono un impatto *misurabile* o *teoricamente significativo* nel dominio disciplinare considerato, e (ii) risultano *discriminabili* sul piano sperimentale. In altre parole, la sola differenza formale tra due configurazioni  $x_1$  e  $x_2$  non basta a rendere tali stati *rilevanti*, se essa non comporta effetti apprezzabili (p.es. in un output osservabile o in un calcolo critico).

Nel prosieguo, assumiamo che i *collassi* di stati *rilevanti* possano dare luogo a novità macro ( $A\beta$ ), mentre la fusione di stati pressoché indistinguibili (e sperimentalmente irrilevanti) può non generare alcun fenomeno emergente.

## 4.4 Rilevanza del Collasso e Soglie Sperimentali

**Collasso informativo “rilevante.”** La funzione di trasmissione  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  può fondere (cioè mandare alla stessa immagine) più stati micro di  $L_i$ . Non tutti i “collassi” però hanno rilevanza nell’ottica RLA. Un *collasso* è *rilevante* se:

1. Coinvolge *stati* che differiscano *in modo significativo* per la disciplina (p.es. geni con funzioni distinte, pattern neurali con output diversi, ecc.).
2. Crea una *proprietà emergente* a livello  $L_{i+1}$  che *non* può essere ricostruita da un predicato su  $L_i$  (cfr. Teorema 2).

**Soglie e misure di collasso.** In sezioni successive (Sez. 5–6) e nelle Appendici, si discuterà la possibilità di *quantificare* il collasso tramite entropie o metriche di “overlap” fra preimmagini. In sede sperimentale, *valori soglia* possono definire quando considerare “non iniettiva” una mappa, se la fusione di stati è rilevante su scale biologiche, fisiche o cognitive. Ad esempio, in un esperimento di biologia sintetica, *molteplici* configurazioni di DNA che sfociano nella *medesima* via fenotipica rappresentano un collasso sperimentabile e potenzialmente *generatore* di emergenza fenotipica.

## Conclusione

Le *assunzioni fattuali* servono dunque a evitare astrazioni “vuote”: i *livelli* devono avere un *aggancio empirico*, e la *Turing-likeness* va trattata con pragmatismo (piena, limitata, o teorica). È altresì cruciale delimitare *quali* stati micro siano rilevanti per la computazione (stati Turing-centrali) e *quanto* un collasso informativo incida in modo “emergente.” È su questa base concreta che, nella sezione seguente, potremo definire formalmente i concetti di (*non*) *iniettività* e *propagazione* dell’indecidibilità.

## 5 Formalizzazione Matematica di RLA

Dopo aver delineato il quadro epistemico (Sez. 3) e specificato le principali *assunzioni fattuali* (Sez. 4), possiamo ora presentare la **formalizzazione matematica** del framework RLA. In particolare, introduciamo dapprima le definizioni fondamentali (livello di astrazione, contiguità, Turing-likeness, iniettività) e, successivamente, i tre assiomi (A1–A3), cui seguono lemmi e teoremi che illustrano la dinamica di *trasmissione* (o *blocco*) dell’indecidibilità e la *nascita* di fenomeni emergenti.

### 5.1 Definizioni Fondamentali

**Def. 1 — Livello di Astrazione.** Un *livello di astrazione*  $L$  è formalizzato come una coppia

$$L = \langle D(L), \Sigma(L) \rangle,$$

dove:

- $D(L)$  è l’insieme degli *stati* o *configurazioni* caratteristici della disciplina o del dominio;
- $\Sigma(L)$  è l’insieme di *regole*, *leggi* o *operazioni* che agiscono su tali stati.

Esempio: in un *livello neurale*,  $D(L)$  può essere l’insieme dei possibili pattern di attivazione dei neuroni, mentre  $\Sigma(L)$  include le regole di aggiornamento sinaptico.

**Def. 2 — Contiguità e Funzione di Trasmissione.** Due livelli  $L_i$  e  $L_{i+1}$  sono *contigui* se esiste una *funzione di trasmissione*

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1})),$$

riconosciuta dalla comunità scientifica (cf. Sez. 4.2), che “mappa” gli *stati* del livello  $L_i$  a *uno o più* stati (sottoinsiemi) del livello  $L_{i+1}$ . Tale mappa può essere *iniettiva*, *quasi-iniettiva* (limitata a un certo sottoinsieme), o *non iniettiva*, come precisato di seguito.

**Def. 3 — Turing-likeness (Sufficienza Espressiva).** Un livello  $L$  è *Turing-like* se esiste un sottoinsieme

$$C \subseteq D(L)$$

e un sottoinsieme di regole  $\Sigma_{\text{comp}} \subseteq \Sigma(L)$  tali che, in linea di principio,  $L$  sia in grado di simulare calcoli Turing-compatibili (Sez. 4.1). In termini operativi, la “potenza di



calcolo” interna deve poter emulare *qualunque* Macchina di Turing, almeno a livello teorico o limitato, purché la memoria e le risorse siano considerate potenzialmente estese.

**Def. 4 — Iniettività, Quasi-iniettività e Non iniettività.** Data la funzione di trasmissione

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1})),$$

si distinguono:

- **Iniettività:**

$$\forall x_1 \neq x_2 \in D(L_i), \quad \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) = \emptyset.$$

Cioè, stati diversi in  $L_i$  non sono mai “fusi” a livello  $L_{i+1}$ .

- **Quasi-iniettività (ristretta a  $S \subseteq D(L_i)$ ):**

$$\forall x_1, x_2 \in S, \quad x_1 \neq x_2 \implies \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) = \emptyset.$$

Spesso  $S$  corrisponde agli *stati Turing-centrali*  $C$  (vedi Def. 3): la distinzione è necessaria per trasmettere i limiti logici di indecidibilità.

- **Non iniettività (collasso):**

$$\exists (x_1, x_2), \quad x_1 \neq x_2 \text{ con } \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset.$$

Significa che *almeno* una coppia di stati in  $L_i$  viene “fusa” in un singolo stato (o un sottoinsieme che si sovrappone) in  $L_{i+1}$ . Questo può generare perdita di informazione micro e, potenzialmente, fenomeni emergenti.

**Def. 5 — Stati Computazionali Centrali.** Se  $L$  è Turing-like, vi è un insieme  $C \subseteq D(L)$  di *stati computazionali centrali* attorno a cui si realizza la potenza di calcolo Turing-compatibile (p.es. filamenti DNA, neuroni hidden in RNN, celle reticolari “universali”). La *quasi-iniettività* su  $C$  gioca un ruolo decisivo per la trasmissione di problemi indecidibili ad altri livelli (Sez. 5.3).

## 5.2 Assiomi del Modello RLA

**A1 (Indecidibilità in Livelli Turing-like).** Se  $L_i$  è Turing-like (Def. 3), allora *ospita inevitabilmente* almeno un problema indecidibile (cfr. Turing 1936; Church

1936; Rice 1953). In altre parole, non esiste un “risolutore universale” interno al livello in grado di decidere *tutte* le proprietà computazionali non banali.

**A2 (Trasmissione d’Indecidibilità via Quasi-iniettività).** Se la funzione di trasmissione  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  *preserva iniettivamente* (o quasi-iniettivamente) gli stati  $C_i$  Turing-centrali del livello  $L_i$ , allora i vincoli d’indecidibilità *risalgono* nel livello  $L_{i+1}$ . In termini di riduzione, se  $L_{i+1}$  “risolvesse” un problema indecidibile di  $L_i$ , ciò equivarrebbe a un risolutore interno a  $L_i$  (che violerebbe A1).

**A3 (Non iniettività e Emergenza). (versione aggiornata)** Se, per una coppia di *stati rilevanti*  $x_1, x_2$  in  $L_i$ , la mappa  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  li fonde in un medesimo output (cioè non è iniettiva su quelle configurazioni), allora *si verifica una perdita di informazione* che *può* innescare proprietà non deducibili a livello  $L_{i+1}$ . In altre parole, la **non iniettività** (collasso) su stati *disciplinarmente significativi* può produrre *emergenza* (Anderson 1972), ossia novità macro *irriducibile* a un singolo predicato su  $L_i$ .

**Nota Importante.** Se il collasso riguarda stati che *non* sono sperimentalmente o teoricamente rilevanti (ad esempio, differenze marginali che non influenzano alcuna variabile critica nel dominio), allora non si genera una *nuova* proprietà emergente nel senso forte utilizzato in RLA. In tal caso, possiamo parlare di “*collasso innocuo*”, di seguito **Collasso senza emergenza**, che non implica alcun fenomeno emergente.

**Collasso con emergenza:** fusione di stati micro effettivamente significativi, generante una nuova proprietà non deducibile.

**Collasso senza emergenza:** fusione di stati micro che, nonostante la loro differenza formale, non influiscono su alcuna variabile critica nel dominio, e quindi non danno luogo a novità macro.

### 5.3 Lemmi e Teoremi Principali

**Lemma 1 — Composizione di Inietive.** Siano  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  e  $\tau_{(i+1 \rightarrow i+2)}$  (quasi) inietive sugli stati Turing-centrali. Allora la composizione

$$\tau_{(i \rightarrow i+2)} = \tau_{(i+1 \rightarrow i+2)} \circ \tau_{(i \rightarrow i+1)}$$

mantiene (quasi) iniettività su tali stati, garantendo che la *propagazione* di eventuali problemi indecidibili si estenda ulteriormente.

**Lemma 2 — Ri-emersione dell’Indecidibilità.** Anche se il passaggio  $L_i \rightarrow L_{i+1}$  presenta un collasso informativo (bloccando l’indecidibilità di  $L_i$ ), se  $L_{i+1}$  (o un successivo  $L_{i+2}$ ) *di per sé* è nuovamente Turing-like, può emergere un *nuovo* problema indecidibile a quel livello. La mancata trasmissione non impedisce che un livello successivo “ricrei” uno spazio Turing-completo, affetto dai classici vincoli logici.

**Teorema 1 — Propagazione Multi-livello dell’Indecidibilità.** In una *catena contigua*  $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$ , se  $L_1$  è Turing-like e *tutti* i passaggi  $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$  rispettano la (quasi) iniettività sugli stati Turing-centrali, *allora* ogni livello  $L_2, \dots, L_n$  *incorpora* i vincoli di indecidibilità iniziali. Si tratta di un’estensione “multi-scala” del principio di riduzione computazionale: un ipotetico risolutore all’ultimo livello implicherebbe un risolutore al primo.

**Teorema 2 — Emergenza Non Derivabile da Collasso (revised). Enunciato.** Sia  $\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$  una funzione di trasmissione fra due livelli contigui  $L_i$  e  $L_{i+1}$ . Se esiste almeno una *coppia di stati rilevanti*  $(x_1, x_2)$  tale che  $x_1 \neq x_2$  e  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset$ , *allora esiste almeno una proprietà* di  $L_{i+1}$  *non* descrivibile da un predicato *univoco* su  $L_i$  (emergenza). In termini più intuitivi, la fusione di stati diversi (*rilevanti a livello disciplinare*) produce almeno una “novità macro” non deducibile dal solo micro-livello.

**Osservazione (Origini di Teorema 2).** Il principio secondo cui la fusione di stati distinti produce “proprietà non derivabili” risale idealmente al *Teorema di Rice* (Rice 1953), secondo cui *qualsiasi* proprietà non banale di un linguaggio riconoscibile è indecidibile. In parallelo, l’idea di “emergenza” da collasso informativo trova una radice in (Anderson 1972), che sottolinea la nascita di novità macroscopiche non deducibili semplicemente dalla somma di micro-parti. Il nostro Teorema 2 raccoglie dunque *entrambe* le ispirazioni: una logico-matematica (Rice) e una emergentista (Anderson).

## 5.4 Commenti e Collegamenti con la Logica Computazionale

Le definizioni precedenti rispecchiano i classici risultati di indecidibilità: se un livello  $L$  è Turing-like (A1), *inevitabilmente* ospita problemi insolubili. La *quasi-iniettività* trasferisce questi limiti ai livelli superiori (A2), mentre la *non iniettività* (collasso) crea spazi di *emergenza* irriducibile (A3). Tali assiomi costituiscono l’ossatura di *Reti Locali di Astrazione*: nella prossima sezione (§6), spiegheremo *come* si possano

empiricamente o teoricamente confutare (falsificare), e in che modo i ricercatori *possano* verificare la validità (o la caduta) di RLA in diversi contesti sperimentali.

## 6 Falsificabilità e Possibili Esperimenti

Le *Reti Locali di Astrazione* (RLA) si presentano non come un modello *pansofico* e non confutabile, bensì come una *cornice* in cui ciascuno degli *assiomi* (A1, A2, A3) è passibile di test sperimentali e controesempi logici. In questa sezione, spieghiamo *perché* RLA è falsificabile in senso popperiano (Popper 1959) e *come ogni* assioma possa venire messo in dubbio da esperimenti o situazioni contraddittorie. Inoltre, presentiamo esempi di *protocolli* sperimentali in diversi domini (biologia, fisica computazionale, IA neurale) che potrebbero supportare o confutare il quadro teorico.

### 6.1 Principi di Falsificabilità

Che significa falsificare A1, A2 o A3?

- **A1 (Indecidibilità in Livelli Turing-like).** Sarebbe confutato se si dimostrasse che un *livello* indiscutibilmente Turing-like (in grado di simulare M. di Turing universali) *non* presenti alcun problema indecidibile. In altre parole, se all'interno di un sistema Turing-like si trovasse un meccanismo capace di risolvere *qualsiasi* questione (es. Halting Problem), violando i teoremi di Turing e Church.
- **A2 (Trasmissione d'Indecidibilità via Quasi-iniettività).** Si confuterebbe trovando un esempio in cui: (i)  $L_i$  è Turing-like e ospita problemi indecidibili, (ii) la mappa  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  è (quasi) iniettiva sugli *stati Turing-centrali*, (iii) il livello  $L_{i+1}$  *consente* un “decisore” (ovvero, risolve i problemi indecidibili di  $L_i$ ), senza contraddire A1 all'interno di  $L_i$ . Qualora accadesse, avremmo un caso di *indecidibilità* che non si trasmette *nonostante* la preservazione informativa, smentendo così l'assioma.
- **A3 (Non iniettività e Emergenza).** Qui la falsificazione consisterebbe nel mostrare che un *collasso* di stati rilevanti a livello  $L_i$  (una palese non iniettività) *non* genera proprietà “non derivabili” a livello  $L_{i+1}$ . In tal caso, *malgrado* la fusione di differenze micro, la disciplina riuscirebbe comunque a ricostruire completamente  $L_{i+1}$  dal micro-livello.

### 6.2 Casi di Test e Protocollo Sperimentale

**Biologia Sintetica: DNA Computing e Fenotipo.** Consideriamo un *livello molecolare* Turing-like (DNA computing, cfr. Winfree 1998; Benenson et al. 2001). Se emergesse un *fenotipo* macroscopico (ad es. risposta cellulare) in cui:

- *Non* vi fosse alcuna traccia del problema indecidibile locale (in presenza di quasi-iniettività sui circuiti di DNA), potremmo *smentire* A2.
- Oppure, se la fusione di vari circuiti di DNA in un unico segnale fenotipico *non* producesse alcuna proprietà emergente “inaspettata,” si *confuterebbe* A3.

Protocolli ad hoc includono la costruzione di *circuiti* specifici (Halting problem-like) e l’osservazione delle risposte fenotipiche su diverse linee cellulari.

**Fisica Computazionale: Automi Cellulari e Termodinamica.** Un *automa cellulare* (AC) universale è Turing-like (Wolfram 2002). Se *non* subisse coarse graining o se si riuscisse a preservare iniettivamente gli stati microscopici, allora A2 prevede che i problemi indecidibili si “risalgano” al livello termodinamico. Verificando *empiricamente* (in modelli sperimentali o simulatori) che ciò non accade *nonostante* la contiguità preservata, potremmo *contraddire* l’assioma. Viceversa, misurare *collassi* (coarse graining) e constatare la *nascita di proprietà emergenti* non riconducibili al micro-livello testerebbe A3.

**IA Neurale: Reti Ricorrenti e Cognizione.** Se una rete neurale ricorrente è Turing-like (Siegelmann & Sontag 1991) e i suoi stati *critici* vengono mantenuti distinti in uno strato cognitivo o meta-rappresentazionale, A2 predice la trasmissione dell’ind decidibilità (Halting Problem interno). Un *decisore cognitivo* che risolvesse *quella* indecidibilità senza contraddire la potenza Turing della rete è esattamente il *controesempio* per falsificare A2.

## 6.3 Esempio di Setup: Dal Protocollo all’Interpretazione

**DNA e Collasso Fenotipico.** Un protocollo sperimentale potrebbe:

1. Ingegnerizzare circuiti di DNA computing capaci di simulare un *problema* “*halting-like*”.
2. Introdurre tali circuiti in cellule progettate per emettere segnali (proteine fluorescenti) in risposta a esiti computazionali.
3. Studiare *quali* stati molecolari vengano *fusi* in un *identico* output fenotipico (non iniettività) e *se* ciò generi “novità macro” impossibili da ricondurre a un singolo predicato su DNA.

Se si scoprisse che anche stati Turing-centrali distinti subiscono fusione, ma *non* emerge alcun comportamento “irriducibile” a livello cellulare, si *confuterebbe* A3

(non iniettività senza emergenza). In tal modo, la *verifica sperimentale* del passaggio micro→macro diventa *strumento* per testare la validità dell'assioma.

## 6.4 Framework Aperto a Verifiche Incrociate

L'approccio proposto mostra come RLA *non* pretenda di eludere la critica empirica. Anzi, l'intera teoria è orientata a *comprendere* e *schematizzare* le condizioni in cui l'indecidibilità (intrinseca a un sistema Turing-like) si *blocca* o *si trasmette*. Allo stesso tempo, descrive *quando* le differenze micro si perdano, generando emergenza. È *plausibile* che alcune discipline o modelli possano fornire *controesempi* inattesi, spingendo a modificare o affinare gli assiomi, o a restringerne l'ambito di validità.

Nella prossima sezione (§7), discutiamo i *fondamenti minimi* in matematica, filosofia, biologia, fisica e IA, così da mettere in luce *come* RLA si connetta ai risultati classici e *come* lo scenario di falsificabilità si applichi di volta in volta, con esempi e riferimenti specifici alle letterature disciplinari.

## 7 Fondamenti Minimi Disciplinari

L'idea delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA) poggia su risultati e metodi consolidati in varie aree: teoria della computazione, filosofia della scienza, biologia computazionale, fisica computazionale e scienze cognitive/IA. In questa sezione, forniamo i *fondamenti minimi* che consentono di comprendere come la nozione di (*non*) *iniettività*, *Turing-likeness* ed *emergenza* si innesti in ciascuna disciplina, chiarendone la base teorica e i riferimenti principali.

### 7.1 Matematica e Teoria della Computazione

**Teoremi cardine e indecidibilità.** La nozione di *Turing-likeness* affonda le radici nei classici teoremi di (Turing 1936) e (Church 1936), secondo cui *non* esiste un algoritmo generale (universale) capace di decidere il problema dell'arresto di una Macchina di Turing arbitraria. (Rice 1953) amplia ulteriormente il discorso, mostrando che ogni proprietà *non banale* dei linguaggi riconoscibili risulta indecidibile.

**Approccio insiemistico e riduzioni.** Nella formalizzazione di RLA, i *livelli* e le *funzioni di trasmissione* (iniettive o no) si interpretano in chiave *set-based*:  $D(L_i)$  e  $D(L_{i+1})$  sono insiemi, e  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  si colloca come funzione che può aggregare più elementi del dominio in singoli output (non iniettività). Le dimostrazioni di *trasmissione di indecidibilità* (A2) e *emergenza da collasso* (A3) si basano su riduzioni computazionali note dalla teoria classica (Sipser 2006).

**Implicazioni per RLA.** - A1 sancisce che un *livello* Turing-like non può “sfuggire” ai vincoli di insolubilità tipici della computazione universale. - La quasi-iniettività (Def. 4) collegata a stati Turing-centrali è l'elemento-chiave per *propagare* i limiti logici a livelli superiori. - La *non iniettività* introduce un parallelismo con la “non derivabilità” e con i principi di *coarse graining* propri delle scienze fisiche.

### 7.2 Filosofia della Scienza

**Livelli come costrutti epistemici.** L'idea di *livelli* o *scale* descrittive è centrale in molte riflessioni di epistemologia e filosofia della scienza (p. es. Bertalanffy 1968; Koestler 1967), dove si riconosce che ogni disciplina “*astragga*” la realtà in specifici termini e modelli, costruendo convenzioni condivise di analisi e sperimentazione.



**Emergenza e riduzionismo.** (Anderson 1972) pone l'attenzione sulla *non* riducibilità di certe proprietà “macro” ai microstati, sostenendo che “*più non è soltanto più grande, è diverso*”. In RLA, la *(non) iniettività* formalizza *come* e *quando* questa differenza si generi a livello matematico: se differenti configurazioni micro finiscono in un'unica configurazione macro, si produce *novità* irriducibile, in linea con la posizione emergentista.

**RLA e costruzionismo disciplinare.** La struttura RLA si *ancora* al “costruzionismo disciplinare,” riconoscendo il *ruolo sociale* (storicità, validazione empirica) nel definire i livelli (§4.2). Al contempo, traduce *formalmente* come i passaggi (iniettivi o meno) diano luogo a proprietà emergenti o trasmissione di limiti logici. Così, RLA non scinde epistemologia e formalismo matematico, bensì li *integra*.

### 7.3 Biologia Computazionale

**DNA Computing e reti booleane geniche.** *DNA computing* (Winfrey 1998; Benenson et al. 2001) ha dimostrato che certe configurazioni di filamenti e reazioni di ibridazione possono simulare macchine di Turing, dunque *Turing-likeness*. Ciò giustifica l'applicazione di A1: *se* si modella un livello molecolare come suff. espressivo, *allora* vi permangono problemi indecidibili. Spesso, tuttavia, nel passaggio a sistemi cellulari o fenotipici, si osservano *collassi* massicci di differenze genetiche, generando effetti emergenti (A3).

**Genotipo–fenotipo: collasso e novità.** I noti fenomeni di “pleiotropia” o “ridondanza genica” suggeriscono che *diversi* assetti genetici possano condurre a *simili* fenotipi, implicando una *non iniettività*. Secondo RLA, ciò spiega *perché* certe proprietà macro (fenotipiche) non si deducano univocamente da un singolo microstato, bensì emergano da una fusione di dettagli molecolari.

### 7.4 Fisica Computazionale

**Automati cellulari universali.** (Wolfram 2002) descrive automi cellulari (AC) come “*macchine*” in grado di emulare la computazione Turing. *Rule 110*, *Game of Life* e altri esempi presentano *universalità*. Pertanto, un *livello* reticolare/AC è Turing-like e “*ospita*” indecidibilità (A1).

**Micro–macro: coarse graining e termodinamica.** La *meccanica statistica* (Landau & Lifshitz 1980) interpreta i passaggi micro→macro come *coarse graining*: *moltissime* configurazioni di spin o particelle vengono “riassunte” in *pochi*

parametri (pressione, temperatura, magnetizzazione). Se *questo passaggio* collassa stati Turing-centrali, la *trasmissione* dell’indcidibilità viene bloccata; al contempo, emergono *nuove* proprietà di fase che *non* si ricostruiscono in modo invertibile dal micro (Teorema 2).

## 7.5 IA e Scienze Cognitive

**Reti neurali ricorrenti.** (Siegelmann & Sontag 1991) dimostrano la Turing-completezza di certe RNN. Se un *livello* di IA neurale è “pienamente ricorrente” (memoria illimitata, tempo di esecuzione esteso), rientra in A1, con problemi indecidibili. In realtà, le implementazioni pratiche restano “Turing-limited,” ma *formalmente* vicino all’universalità.

**Pooling, astrazione e coscienza.** Nei modelli cognitivi, uno *strato successivo* “collassa” molteplici pattern neurali in un *singolo* concetto (pooling). Qui è frequente la non inietività: *troppi* stati neurali diversi confluiscono in un *unico* pattern concettuale. Tale fusione può generare *emergenza* di proprietà non semplicemente ricavabili dal “pattern neurale elementare,” come *significati* cognitivi superiori. In alcuni modelli (Dehaene et al. 2011), *certi* circuiti cognitivi *mantengono* una distinzione su un sottoinsieme di stati neurali, consentendo la *trasmissione* di limiti logici se la quasi-inietività è rispettata.

## Conclusione Sez. 7

In sintesi, ciascuna disciplina fornisce *fondamenti* e *esempi* che giustificano l’applicazione di RLA e la plausibilità dei suoi assiomi (A1–A3). La matematica e la computazione permettono di *codificare* formalmente la Turing-likeness, la *non inietività*, e la *trasmissione d’indcidibilità*. La filosofia della scienza radica i *livelli di astrazione* in un contesto storico e convenzionale, mentre la biologia e la fisica offrono esempi concreti di passaggi micro–macro (collasso o quasi-inietività). Le scienze cognitive e l’IA, infine, testimoniano la possibilità di reti neurali Turing-like e la rilevanza di mappe di pooling non inietive. Nella prossima sezione, inizieremo a illustrare esempi *concreti* di funzioni di trasmissione, applicando i concetti formali a casi disciplinari specifici.

## 8 Esempi Concreti e Funzioni di Trasmissione

Nei paragrafi precedenti abbiamo delineato i *fondamenti* (Sez. 7) e la *formalizzazione* (Sez. 5) delle Reti Locali di Astrazione (RLA). Ora mostriamo *casi di studio* che illustrano *come* le funzioni di trasmissione (iniettive o meno) agiscano fra livelli *contigui* e *generino* (o *blocchino*) il passaggio dei limiti computazionali, nonché la nascita di proprietà emergenti. Segue anche un *esempio* di calcolo indecidibile “trasmesso” fra due livelli.

### 8.1 Es.1: Biologia Molecolare → Cellula Computazionale

**Livello Biologia Molecolare (Turing-like).** Come discusso in Sez. 7.3, alcuni *circuiti* di DNA computing (o reti booleane geniche complesse) possono implementare calcoli Turing-compatibili. Dunque,  $L_{\text{mol}}$  risulta Turing-like e, in base ad A1, contiene almeno un problema indecidibile (p. es. una variante “halting-like”).

**Livello Cellula Computazionale.** Un livello  $L_{\text{cell}}$  descrive l’*organizzazione* dei pathway cellulari, integrando segnali ed effettori fenotipici. Letteratura di (Cardelli 2005) o (Noble 2008) evidenzia come la “funzionalità” cellulare emerga da molteplici reti molecolari.

**Funzione di Trasmissione e Risultati.** Sia

$$\tau_{(\text{mol} \rightarrow \text{cell})} : D(L_{\text{mol}}) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{\text{cell}})).$$

In moltissimi casi, *distinte* configurazioni molecolari (*stati* Turing-centrali *inclusi*) confluiscono in un’unica risposta cellulare *macro* (collasso informativo), *bloccando* la trasmissione d’ind decidibilità (A2). Al contempo, *emerge* il fenomeno “fenotipo unico,” irriducibile a una descrizione univoca del micro (A3). Qualora invece un *sottoinsieme* di circuiti di DNA fosse *preservato* (quasi-iniettivamente), allora la *propagazione* dell’ind decidibilità sarebbe teoricamente possibile, e un *ipotetico* “decisore cellulare” contraddirebbe A1.

### 8.2 Es.2: Automa Cellulare Universale → Parametri Termodinamici

**Livello Automa Cellulare Reticolare (Turing-like).** Automi cellulari come la *Rule 110* di (Wolfram 2002) possono essere Turing-completi, implicando la presenza

di problemi indecidibili localmente (A1). Qui, gli *stati* corrispondono a configurazioni reticolari e le *regole* di aggiornamento a  $\Sigma(L)$ .

Per rendere più chiaro il meccanismo di quasi-iniettività vs. collasso, presentiamo un toy model ispirato a (Wolfram 2002). Consideriamo un Automa Cellulare unidimensionale con 4 celle binarie, dove la regola locale aggiorna ogni cella in base alle due adiacenti e a quella stessa (configurazione iniziale differisce in un singolo bit). La funzione di trasmissione  $\tau$  associa a ogni configurazione una proprietà macro: il numero totale di celle ‘attive’. Se due configurazioni distinte (ad es. 0011 e 0101) si proiettano nello stesso conteggio (2),  $\tau$  è non iniettiva; ciò impedisce di risalire ai microstati e può generare proprietà emergenti non deducibili. Se  $\tau$  preserva le distinzioni (ad es. conteggio + posizione), diventa quasi-iniettiva e consente la trasmissione di limiti computazionali (A2).”

**Livello Parametri Termodinamici.** In fisica statistica (vedi Sez. 7.4), il *livello macro* si occupa di grandezze aggregate (temperatura, pressione, magnetizzazione). Questo passaggio di “coarse graining” s’identifica con una funzione di trasmissione

$$\mathcal{T}_{(\text{retic} \rightarrow \text{thermo})}$$

che tipicamente *fonda* una vasta molteplicità di micro-configurazioni in un *poche* parametri globali (non iniettività).

**Effetti: Blocco Indecidibilità e Emergenza.** La *non* iniettività “somma” molteplici stati Turing-centrali in un singolo valore termodinamico, *azzerando* la possibilità di “risalita” dei limiti computazionali (A2 *non* si applica). In compenso, *nuovi* fenomeni emergono, come transizioni di fase non riconducibili al solo *dettaglio* di microstati (*coincide* con A3). Questo scenario è ampiamente trattato nella meccanica statistica e illustra la convivenza di “limiti di calcolo” a livello reticolare con “emergenza” su scala termodinamica.

### Esempio di Collasso Innocuo

In un automa cellulare fisico, due configurazioni microscopiche che differiscono unicamente per la fase di un singolo spin periferico (posizionato in un angolo isolato e non interagente) potrebbero venire fuse in un’unica macro-configurazione, e tuttavia non generare alcun cambiamento comportamentale o termodinamico. Qui il collasso è di fatto *innocuo*: non dà luogo a nuove proprietà a livello  $L_{i+1}$  perché l’interazione dello spin con il reticolo è trascurabile.

### 8.3 Es.3: IA Neurale (RNN) → Livello Cognitivo

**Livello Rete Neurale Turing-completa.** (Siegelmann & Sontag 1991) provano che alcune RNN possono simulare qualsiasi computazione Turing. Se un *livello neurale*  $L_{\text{RNN}}$  incorpora tali capacità, *inevitabilmente* (A1) ospita problemi indecidibili.

**Livello Cognitivo.** Si postula un successivo strato cognitivo  $L_{\text{cog}}$  che “interpreti” o “astragga” i pattern neurali in concetti e rappresentazioni simboliche (Dehaene et al. 2011). La funzione

$$\tau_{(\text{RNN} \rightarrow \text{cog})}$$

spesso collassa (pooling) stati neurali *numerosi* in un *unico* concetto (*non* iniettività).

**Risultati: Coscienza Emergente o Trasmissione d’Indecidibilità.** - *Se* la mappa collassa *anche* i pattern Turing-centrali, l’indecidibilità *non* risale, e  $A3$  predice la comparsa di proprietà cognitive “nuove” (emergenti). - *Se*, invece, qualche meccanismo di “self-monitoring” o “meta-rappresentazione” *preserva* la distinzione degli stati critici, allora (A2) indica che i problemi indecidibili del livello neurale *restano* irrisolvibili anche a livello cognitivo, pena una contraddizione con A1.

### 8.4 Es.4: Un Caso di Calcolo Indecidibile “Trasmesso”

Illustrando uno scenario più *specifico*, consideriamo:

1. Un **livello RNN**  $L_{\text{RNN}}$ , Turing-like, con un *sottospazio*  $C_{\text{RNN}}$  di stati ricorrenti effettivamente utilizzati per calcoli “halting-like.”
2. Un **livello Cognitivo**  $L_{\text{cog}}$ , definito come insieme di “rappresentazioni” (concepts, beliefs) con regole di composizione logica.
3. La funzione di trasmissione  $\tau_{(\text{RNN} \rightarrow \text{cog})}$  *quasi-iniettiva* su  $C_{\text{RNN}}$ : i pattern che *codificano* l’esecuzione Turing rimangono *distinti*.

**Propagazione dell’Halting Problem.** In base ad A2, *se* un “supervisore cognitivo” fosse capace di *decidere* se la RNN (in quello specifico pattern) *arresterà* la computazione, *allora* ciò equivarrebbe a possedere un “decisore” anche a livello RNN (riducendo la decisione cognitiva al pattern neurale). Questo *contraddice* A1 (che sancisce l’impossibilità di un decisore universale su calcoli Turing). Si conclude che *anche* a livello cognitivo, quell’Halting Problem rimane *non* decidibile. La *trasmissione* dell’indecidibilità (Teorema 1) si è pertanto realizzata in modo *concreto*.

**Spunto di Falsificabilità.** Se qualcuno dimostrasse un “*algoritmo mentale*” perfettamente in grado di *interpretare* lo stato RNN e di stabilire *per qualunque* input se la RNN si arresterà, *senza* contraddire la Turing-likeness del livello RNN, si confuterebbe A2 — aprendo la strada a una revisione di RLA o dimostrando l’assenza di Turing-likeness reale nella rete.

## Conclusione

I quattro esempi (dalla biologia molecolare alla fisica statistica, dall’IA neurale ai “calcoli indecidibili trasmessi”) mostrano in pratica la differenza fra *mappe* che *preservano* o *collassano* gli stati Turing-centrali, generando rispettivamente *propagazione* d’ind decidibilità (A2) o *emergenza irriducibile* (A3). È un quadro *coerente* con i principi delineati e offre le basi per costruire sperimentazioni e test di falsificazione, in linea con i protocolli discussi in Sez. 6.

## 9 Esempio Operativo (Catena Livelli Contigui)

Dopo aver illustrato esempi puntuali di funzioni di trasmissione (Sez. 8), proponiamo ora una *catena di 15 livelli contigui* che va, dalle *strutture fisiche di base* fino alle *forme sociali complesse*. L'obiettivo è offrire un *esempio operativa* — seppur in forma *lineare* semplificata — di come (*non*) *iniettività* e *Turing-likeness* possano alternarsi e *coesistere*, generando tanto *blocco* o *propagazione* dell'indecidibilità quanto *novità emergenti* a più livelli. Per dare maggiore concretezza, in ciascun passaggio  $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$  si può definire una 'soglia di preservazione' (cfr. (Noble 2008)), individuando un sottoinsieme del 10% di stati Turing-centrali da mantenere distinti. Così, si controlla se l'indecidibilità risale o meno la catena. Qualora il collasso raggiunga anche tali stati critici, emergono proprietà macro irriducibili, mentre i problemi indecidibili restano bloccati.

### 9.1 Filosofia della Sequenza: Linearità come Semplificazione

La sequenza di 15 livelli (dalla *fisica reticolare* alla *società complessa*) rappresenta un “*esempio lineare*” che collega *discipline* e *descrizioni* potenzialmente contigue. Nella realtà, gran parte dei sistemi complessi si struttura in *reticoli* o *grafi* con *loop* e “livelli-ponte.” Tuttavia, una catena lineare rimane utile per:

1. Illustrare *quando* le indecidibilità Turing-like *risalgano* la catena (Teorema 1) e *quando* si blocchino per collassi informativi (Teorema 2).
2. Mostrare *come* ogni livello, con un certo grado di (non) iniettività, possa generare *proprietà emergenti* o *trasmettere* problemi insolubili.
3. Fornire *un* prototipo didattico, pur consapevoli che in un contesto più realistico ciascun “livello” possa anche scambiarsi informazioni in modo non strettamente lineare.

### 9.2 Descrizione Dettagliata dei 15 Livelli

Di seguito, per ogni livello, specifichiamo:

- **Dominio e Regole Principali** (cioè  $D(L)$  e  $\Sigma(L)$ ).
- **Turing-likeness** (SI/NO, o Parziale).
- **Funzione di Trasmissione** al livello successivo ( $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$ ), con indicazione di *iniettività*, *quasi-iniettività* o *non iniettività*.
- Eventuali **Riferimenti di Letteratura** che sostengono tale passaggio.

### Livello 1: Sistemi Fisici Discreti (Automi Cellulari).

- *Dominio e Regole:*  $D(L_1)$  = configurazioni di celle/spin binari;  $\Sigma(L_1)$  = regole di aggiornamento (tipo “Rule 110,” Wolfram 2002).
- *Turing-likeness:* **SI**, poiché è dimostrato che alcuni AC sono Turing-completi.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(1 \rightarrow 2)}$ : Mappa ciascuna configurazione reticolare su un *sottoinsieme* di microstati molecolari (spin-lattice).
  - In gran parte *quasi-iniettiva* sugli stati Turing-centrali, se ipotizziamo un reticolo corrispondente (automa  $\leftrightarrow$  spin-lattice).
  - Alcune degenerazioni fisiche possibili; la letteratura su *meccanica statistica* (Toffoli & Margolus 1987) supporta l’ipotesi di un passaggio micro “quasi-iniettivo” per dimensioni piccole o modelli particolari.

### Livello 2: Microstati Molecolari (Spin-lattice).

- *Dominio e Regole:*  $D(L_2)$  = stati di spin molecolari, potenziali d’interazione;  $\Sigma(L_2)$  = regole di aggiornamento spin, interazioni di vicinato (Ising-like).
- *Turing-likeness:* **SI/Parziale**, esiste letteratura che mostra la possibilità di implementare logica universale in certi spin-lattice, ma *non* tutti.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(2 \rightarrow 3)}$ : Passaggio a “*chimica computazionale*.”
  - Spesso *non* iniettivo, perché molte micro-configurazioni spin equivalgono a reazioni chimiche identiche.
  - Possibile *quasi-iniettività* se si isolano *configurazioni* spin particolari che codificano reazioni distinte.

### Livello 3: Chimica Computazionale (Reazioni).

- *Dominio e Regole:*  $D(L_3)$  = specie chimiche, pathway di reazione;  $\Sigma(L_3)$  = cinetiche e leggi di reazione (p. es. reazioni Markoviane).
- *Turing-likeness:* **SI**, con protocolli adeguati è noto che reazioni chimiche (Mag nasco 1997) possono simulare calcoli Turing.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(3 \rightarrow 4)}$ : Verso la *biologia molecolare*, in cui si identificano “molecole computazionali” (DNA, proteine).
  - Possibile *iniettività* parziale se ogni reazione mappa in modo univoco un filamento o un pattern molecolare, *ma* in molti contesti si osservano collassi enzimatici.



#### Livello 4: Biologia Molecolare Computazionale (DNA).

- *Dominio e Regole*:  $D(L_4)$  = filamenti di DNA, meccanismi di ibridazione e taglio;  $\Sigma(L_4)$  = operatori di riconoscimento, reazioni enzimatiche.
- *Turing-likeness*: **SI**, dimostrata da Winfree 1998; Benenson et al. 2001 in scala sintetica.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(4 \rightarrow 5)}$ : Passaggio a “cellula computazionale” (pathway integrati).
  - Spesso **non iniettiva** sulle differenze molecolari, perché molti filamenti divergenti generano la *stessa* espressione proteica.
  - Se gli stati Turing-centrali *non* collassano, la *trasmissione* dell’indecidibilità risalirebbe alla cellula.

#### Livello 5: Cellula Computazionale (Pathway Integrati).

- *Dominio e Regole*:  $D(L_5)$  = stati cellulari, reti metaboliche e di segnalazione;  $\Sigma(L_5)$  = regolazioni di feedback/feedforward.
- *Turing-likeness*: **SI/NO** a seconda dei casi. Alcune cellule sintetiche *ingegnerizzate* si avvicinano a universalità; cellule naturali difficilmente mostrano *piena* Turing-likeness.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(5 \rightarrow 6)}$ : passaggio a *tessuti e organi virtuali*.
  - In letteratura (Noble 2008), l’integrazione cellulare a livello tissutale spesso *collassa* le differenze tra cellule.
  - Con tutta probabilità **non iniettiva**, impedendo la risalita dell’indecidibilità in molti scenari biologici reali.

#### Livello 6: Tessuti e Organi Virtuali.

- *Dominio e Regole*:  $D(L_6)$  = modelli che descrivono l’organo (e.g. il cuore, polmoni, cervello) come *strutture* integrate;  $\Sigma(L_6)$  = dinamiche di scambio, simulazioni e regolazioni.
- *Turing-likeness*: **NO** (generalmente). La letteratura su organi virtuali (p. es. Virtual Heart) raramente asserisce universalità.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(6 \rightarrow 7)}$ : può condurre, ad esempio, allo *studio del cervello* come rete neurale biologica.

- Laddove si tratta di organi “non cervello,” è tipicamente **non iniettiva** (collasso massiccio di stati cellulari).
- Nel caso specifico del *cervello*, la contiguità con le reti neurali biologiche può a volte preservare una *porzione* di stati computazionali *critici*.

### Livello 7: Reti Neurali Biologiche (Cervello).

- *Dominio e Regole*:  $D(L_7)$  = configurazioni di neuroni e sinapsi biologiche;  $\Sigma(L_7)$  = regole di plasticità, potenziali d’azione, circuiti ricorrenti.
- *Turing-likeness*: **SI**, a livello *teorico* (Siegelmann & Sontag 1991); nella pratica, dipende da risorse/precisione e *numero di neuroni*.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(7 \rightarrow 8)}$ : passaggio allo *strato cognitivo*.
  - Spesso **non iniettiva**: il pooling neurale riduce migliaia di pattern in *pochi* concetti.
  - Possibile *quasi-iniettività* su un sottoinsieme di circuiti “critici” (p. es. aree di meta-rappresentazione), con potenziale trasmissione dell’indecidibilità.

### Livello 8: Coscienza/Cognizione.

- *Dominio e Regole*:  $D(L_8)$  = stati coscienti, credenze, processi cognitivi di alto livello;  $\Sigma(L_8)$  = regole di ragionamento, memoria, attenzione.
- *Turing-likeness*: **NO** nella visione classica; non si assume universalità. Alcuni moduli interni potrebbero comunque implementare calcoli complessi.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(8 \rightarrow 9)}$ : passaggio a *comportamento* e *decisioni* motorie o pratiche.
  - Prevalentemente **non iniettiva**, collassando diversi stati cognitivi in atti comportamentali unitari.
  - Se qualche meccanismo *discrimina* esattamente i pattern neurali, allora (A2) può trasmettere i limiti.

### Livello 9: Comportamento e Decisioni (Neuro-economia).

- *Dominio e Regole*:  $D(L_9)$  = scelte, azioni, output motori;  $\Sigma(L_9)$  = processi decisionali, euristiche, utility function (in modelli agent-based).

- *Turing-likeness*: **NO**, solitamente la “decisione” è un atto limitato, senza cicli di memoria illimitata.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(9 \rightarrow 10)}$ : passaggio a *architetture algoritmiche* (p. es. formalizzare comportamenti come “programmi”).
  - Spesso *parzialmente* non iniettiva: molte scelte comportamentali vengono astratte in modelli “software”.
  - Possibilità di *quasi-iniettività* se si codifica ciascun comportamento in un programma univoco; in pratica, più ipotetico che reale.

### Livello 10: Architetture Algoritmiche (Sistemi di Programmi).

- *Dominio e Regole*:  $D(L_{10})$  = insiemi di programmi (linguaggi di programmazione),  $\Sigma(L_{10})$  = regole sintattiche e semantiche per esecuzione.
- *Turing-likeness*: **SI**, per definizione di “architetture generiche” (linguaggi Turing-completi).
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(10 \rightarrow 11)}$ : passaggio a *reti neurali artificiali*, p. es. *Neural Turing Machines* (Graves et al. 2016).
  - **quasi-iniettiva** sui diagrammi di flusso e i parametri di rete (strutture software  $\leftrightarrow$  architetture neurali).
  - Se la “traduzione” dei programmi in reti neurali è *1-1*, l’indecidibilità si conserva (A2).

### Livello 11: Reti Neurali Artificiali (Deep/Ricorrenti).

- *Dominio e Regole*:  $D(L_{11})$  = parametri, pesi, stati di attivazione;  $\Sigma(L_{11})$  = regole di training, forward/backprop, eventuali meccanismi ricorrenti e memoria estesa.
- *Turing-likeness*: **SI** se la rete è ricorrente e con meccanismi di “infinite tape” (NTM). **NO** se puramente feed-forward con dimensione fissa.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(11 \rightarrow 12)}$ : passaggio a *linguistica computazionale* (livello di grammatiche e parsing).
  - Sovente **non iniettiva**: reti seq2seq *embed* molte frasi in uno stesso vettore.
  - Possibile quasi-iniettività su stati Turing-centrali, ma non comune nelle implementazioni standard.

## Livello 12: Linguistica Computazionale (Grammatiche Type-0).

- *Dominio e Regole:*  $D(L_{12})$  = frasi e stringhe di un linguaggio generato;  $\Sigma(L_{12})$  = regole di riscrittura (fino alle grammatiche Type-0).
- *Turing-likeness:* **SI**, le grammatiche di tipo 0 corrispondono a macchine di Turing.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(12 \rightarrow 13)}$ : passaggio a *comunicazione interpersonale* (pragmatica).
  - Di solito **non iniettiva**: molte frasi formali si “fondono” in un atto linguistico pragmaticamente equivalente.
  - Quando si conserva la distinzione sintattica, si può preservare parte dell’indecidibilità, ma raramente i modelli pragmatici lo fanno.

## Livello 13: Comunicazione Interpersonale (Pragmatica).

- *Dominio e Regole:*  $D(L_{13})$  = atti linguistici, contesto sociale, enunciazioni.  $\Sigma(L_{13})$  = regole pragmatiche, intenzioni, convenzioni di discorso (Searle 1992).
- *Turing-likeness:* **NO**, discorso quotidiano non è pensato come meccanismo Turing-completo.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(13 \rightarrow 14)}$ : passaggio a *cultura e simboli*, ove gli atti comunicativi si trasformano in *pratiche* e *significati* stabili.
  - Fortemente **non iniettiva**: enunciazioni multiple riconfluiscono in “macro-significati” socioculturali.

## Livello 14: Cultura e Simboli.

- *Dominio e Regole:*  $D(L_{14})$  = repertori simbolici, memi, ideologie;  $\Sigma(L_{14})$  = dinamiche di trasmissione culturale (Sperber 1996).
- *Turing-likeness:* **NO**, non esiste una struttura di calcolo “universale” nella cultura generica.
- *Funzione di Trasmissione*  $\tau_{(14 \rightarrow 15)}$ : passaggio a *società complesse e organizzazioni*.
  - Sovente **non iniettiva**: molteplici simboli confluiscono in prassi sociali simili.

## Livello 15: Società Complesse e Organizzazioni.

- *Dominio e Regole*:  $D(L_{15})$  = istituzioni, governance, processi collettivi;  $\Sigma(L_{15})$  = leggi, norme, convenzioni economico-politiche.
- *Turing-likeness*: **NO** in senso standard. Alcune versioni agent-based *potrebbero* introdurre sub-livelli Turing-like, ma non *nella forma comune* di una macro-società.
- In questa “cima” della catena lineare, le *non iniettività* accumulate generano *forme macrosociali emergenti* molto distanti dai dettagli informatici del *Livello 1*, salvo *riapparire* (Lemma 2) in qualche sottosistema computazionale sofisticato.

### 9.3 Quando Avviene la Trasmissione di Indecidibilità?

Secondo il *Teorema 1* (Propagazione multi-livello), se *ogni* passaggio  $\tau_{(\ell \rightarrow \ell+1)}$  mantiene (quasi) iniettivi gli stati Turing-centrali, *ogni* livello successivo *incorpora* i vincoli d’indecidibilità del primo livello Turing-like. Tuttavia, nella pratica, la maggior parte delle transizioni (p. es. da DNA a cellula, da neuroni a concetti) risulta **non iniettiva**, di conseguenza blocca la risalita dei limiti e introduce *proprietà emergenti* (Teorema 2).

### 9.4 Accumulo di Collassi ed Emergenza

Se a *ogni* passaggio si produce *almeno* un collasso su stati *rilevanti*, si ottiene un “*effetto a cascata*” di riduzione micro→macro: il livello  $L_{15}$  differisce profondamente dal primo, ospitando fenomeni *non più* riconducibili all’origine Turing-like. Ciò giustifica, ad esempio, *perché* le strutture sociali appaiano molto “nuove” rispetto ai micro-dettagli molecolari, *accumulando* proprietà emergenti a ogni step.

### 9.5 Blocco e Ri-emersione della Turing-likeness

In alcuni punti della catena (p. es. *Livello 7* “Reti Neurali Biologiche,” *Livello 10* “Architetture Algoritmiche,” *Livello 11* “Reti Neurali Artificiali,” *Livello 12* “Grammatiche di tipo 0”), la *Turing-likeness* *riappare*. In base al *Lemma 2*, ciò riporta *nuove* indecidibilità “endogene” a questi livelli. Ne consegue che l’assenza di trasmissione di limiti da un livello inferiore *non* impedisce di “incontrare” di nuovo problemi indecidibili a un livello successivo, se esso *ricostruisce* un potere Turing.

## 9.6 Rilievi Metodologici: Linearità e Reticoli con Loop

- **Catena lineare come esempio didattico.** La presentazione (Livelli 1  $\rightarrow$  15) è uno *schema* che semplifica la reale complessità dei sistemi naturali e sociali. Serve come “dimostrazione operativa” per evidenziare *dove* e *come* emergono blocchi (collassi) e trasmissioni (quasi-iniettività).
- **Reticoli con loop.** Nella realtà, i “Livelli 8, 9, 15” (cognizione, comportamento, società) potrebbero formare *cicli* con “Livello 7” (neuroni) o “Livello 14” (cultura). RLA contempla l’esistenza di tali circuiti (vedi Sez. 13), che ampliano ulteriormente i possibili fenomeni emergenti e la ridefinizione delle mappe iniettive/non iniettive.

## Conclusione

Sebbene una “catena di 15 livelli” possa sembrare un esercizio speculativo, la sua validità scientifica dipende dalla *microfondazione* di ogni livello e di ogni funzione di trasmissione. In altre parole, per rendere il reticolo più di un costrutto astratto, occorre ancorarlo a evidenze sperimentali e a modelli disciplinari consolidati (fisica reticolare, genetica formale, sociologia quantitativa, ecc.). Solo così la catena multi-livello diventa uno strumento *operativo* di analisi, evitando che lo schema risulti fine a sé stesso. La catena di 15 livelli contigui fornisce un *esempio esteso* di come i *principi di RLA* (A1–A3, Teoremi 1–2) si applichino su una sequenza multi-disciplinare, dalla fisica più elementare alle istituzioni sociali. Ogni livello è caratterizzato da un *dominio* e *regole*, e i passaggi micro $\rightarrow$ macro emergono come funzioni di trasmissione (*spesso non iniettive*). Tale esempio lineare *semplifica* la complessità reale (spesso reticolare e con loop), ma illustra in modo coerente *quando* l’ind decidibilità “risale” i livelli (*se* i dettagli Turing-centrali sono preservati) e *quando*, invece, *collassano* generando proprietà emergenti irriducibili.

## 10 Esempi di altri Domini Scientifici

La *catena di 15 livelli contigui* (Sez. 9) offre un esempio lineare e coerente di come emergenza e indecidibilità possano alternarsi nelle *Reti Locali di Astrazione* (RLA). Tuttavia, le possibili discipline o sottodiscipline interessate dal modello RLA sono molte di più. In questa sezione, presentiamo una **tabella esemplificativa di 30 domini scientifici**, ordinandoli in due blocchi:

1. (A) 15 discipline con *Turing-likeness* (SI) o *potenziale* Turing-likeness,
2. (B) 15 discipline *non* (o non ancora) Turing-like (NO), almeno nella loro forma attuale.

L'obiettivo è mostrare la varietà di applicazioni dove RLA può essere pertinente, distinguendo i contesti in cui *indecidibilità* può effettivamente emergere (perché la disciplina ospita calcoli Turing-compatibili) da quelli in cui, *allo stato attuale*, non sussiste la potenza di calcolo necessaria.

---

### (A) 15 Discipline Sufficientemente Espressive (Turing-like)

---

1. DNA computing sintetico (Winfrey, Benenson)
  2. Reti neurali ricorrenti (IA) (Siegelmann, Sontag)
  3. Automi cellulari universali (Wolfram)
  4. Logica combinatoria di alto ordine (Church, Curry–Howard)
  5.  $\lambda$ -calculus esteso (Barendregt)
  6. Quantum automata teorici (QTM)
  7. L-systems iterati con controlli (riscrittura potenzialmente universale)
  8. Modelli sociali agent-based “illimitati” (Epstein, Axtell)
  9. Reti booleane geniche complesse (Kauffman, Winfree)
  10. Grammatiche di tipo 0 (Chomsky)
  11. Sistemi di riscrittura Markov (Markov Normal Algorithms)
  12. Hybrid automata generici (alcune versioni Turing-complete)
  13. Membrane computing (P-systems) (Paun)
  14. Neural Turing Machines (arch. IA) (Graves, Wayne)
  15. “Programming Universe” quantistico (Lloyd)
- 

### (B) 15 Discipline Non (o Non Ancora) Turing-like (NO)

---

1. Geografia descrittiva classica (cartografia, catalogazione)
2. Meteorologia PDE a risoluzione finita (no universalità)
3. Demografia statistica standard

4. Macro-contabilità economica (bilanci, IFRS)
  5. Sistemi PDE lineari (fisica)
  6. Teoria dei giochi classici (modelli finiti)
  7. Sociolinguistica descrittiva (analisi empirica)
  8. Criminologia statistica
  9. Dati epidemiologici SIR base (equazioni differenziali)
  10. Catene di Markov lineari (stati + transizioni, ma no loop illimitato)
  11. Economia DSGE standard (modelli differenziali, nessun calcolo illimitato)
  12. Statistica descrittiva elementare
  13. Biblioteconomia tradizionale (classificazione e indiciz.ne)
  14. Procedure di archiviazione burocratica (finite rules)
  15. PDE della diffusione del calore (Fourier, no universalità)
- 

## 10.1 Ragioni della Classificazione SI/NO

**Perché “SI” (Turing-like).** Nel **primo blocco**, ciascuna disciplina o variante *ammette*, in letteratura, implementazioni o versioni Turing-compatibili. Ad esempio:

- *DNA computing* (Winfrey, Benenson) dimostra la simulazione di calcoli Turing in piccola scala.
- *Reti neurali ricorrenti* (Siegelmann) dimostrano universalità teorica.
- *Grammatiche type-0* e *automi cellulari* completano il quadro classico dell’informatica teorica.

Tali sistemi, secondo *A1*, ospitano inevitabilmente problemi indecidibili. Ciò non implica che *ogni* sottoversione sperimentale attuale riesca a eguagliare una *M.* di Turing, ma *in linea di principio* la Turing-likeness risulta consolidata teoricamente.

**Perché “NO” (Non Turing-like).** Nel **secondo blocco**, le discipline non includono (allo stato attuale) alcuna forma di computazione illimitata. Spesso si tratta di *metodi di analisi* (es. statistica, PDE lineari, catene di Markov con spazi finiti) o *procedure* (bilanci macro, archiviazione burocratica) che non prevedono cicli di calcolo universale:

- *Meteorologia PDE* con griglia finita e orizzonte temporale limitato non si configura come “simulazione Turing-illimitata.”
- *Economia DSGE standard* (senza agent-based illimitati) rimane un sistema di equazioni differenziali, privo di loop computazionale infinito.



- *Statistica descrittiva, biblioteconomia, burocrazia* classica adottano procedure finite, non programmabili come macchine di Turing universali.

Ciò spiega *perché* A1 e A2 non si applichino (non sussiste Turing-likeness), sebbene *collassi* informativi e *emergenza* possano apparire (A3) in alcuni passaggi macro.

Come già accennato, ambiti come la meteorologia PDE a risoluzione finita, classificati qui come ‘NO’, potrebbero evolvere verso Turing-likeness se fossero integrati agent-based model di scala illimitata (Beresnev & Lainscsek 2021). Ciò dimostra che la distinzione attuale non è necessariamente definitiva, ma ancorata allo stato corrente di modelli e risorse.

## 10.2 Discipline-Ponte e Futuri Sviluppi

Alcune discipline del blocco NO possono, in futuro, adottare *versioni agent-based* o *modelli di calcolo* più generali, avvicinandosi alla Turing-likeness (p. es. la meteorologia con simulazioni agent-based *estese*, l’economia con modelli completi di computazione). Un passaggio “NO  $\rightarrow$  SI” comporterebbe l’accoglienza di vincoli d’indecidibilità (A1) e la possibilità di *trasmissione* di quei limiti ad altri livelli.

## 10.3 Implicazioni per RLA

1. Le RLA *riconoscono* come *non* tutti i domini siano Turing-like: in tali contesti (procedurali, PDE lineari), i limiti indecidibili *non nascono* a quel livello.
2. Se un *livello NO* è contiguo a un livello *SI* e la funzione di trasmissione preserva stati Turing-centrali, A2 *impone* la trasmissione dell’indecidibilità, *anche* se il livello NO non la “genera” autonomamente.
3. Dove prevalgono *collassi informativi*, A3 può comunque introdurre *emergenza*, benché non vi sia *indecidibilità* in discussione a quel livello.

## Conclusione

La tabella di 30 discipline, divise tra *SI* (Turing-like o potenzialmente tali) e *NO*, mostra la *grande varietà* di campi scientifici cui l’idea di *livello di astrazione* e *(non) iniettività* può applicarsi. Nei *domini SI*, la presenza di calcoli universali richiama *inevitabilmente* i vincoli d’indecidibilità (A1). Nei *domini NO*, tali limiti non emergono “internamente,” ma *possono* venire “importati” — o *bloccati* — se un livello *SI precedente* (o adiacente) li trasmette (A2), in assenza di collassi informativi.

Restano comunque possibili fenomeni emergenti (A3) dovuti a fusione di stati, anche dove la Turing-likeness non è realizzata. Proseguiremo, nella sezione seguente (§13), a inquadrare questi risultati nel più ampio *dibattito interdisciplinare*, integrando la prospettiva su loop multi-livello e reticoli non lineari.

## 11 *Topologie RLA Compatte: Reticoli Indipendenti Ontologicamente, Chiusi Epistemicamente e Computabili*

Da un punto di vista *filosofico*, le **Reti Locali di Astrazione** (RLA) permettono di rendere conto di fenomeni “alti” (quali *coscienza, vita, auto-organizzazione*), senza obbligare a un riduzionismo integrale. In questo schema, *ogni livello possiede la propria ontologia*, e le relazioni inter-livello si svolgono secondo un criterio di *località*, preservando la possibilità di *proprietà emergenti* e mantenendo la descrivibilità *computazionale* (Turing-likeness) dove necessario.

Da un punto di vista *applicativo*, in un contesto scientifico che fa sempre più ricorso a *simulazioni* e *modelli eseguibili*, RLA fornisce un metodo per progettare sistemi multi-livello (biologici, cognitivi, artificiali) che:

1. Siano *autosufficienti* nei propri livelli e nelle relative leggi, garantendo una forma di “*chiusura disciplinare*” interna.
2. Possano essere *simulati* su macchine Turing, consentendo verifiche sperimentali e quantitativo-computazionali.
3. Limitino la *dipendenza* da complessità esterne, filtrando l’informazione in ingresso tramite funzioni di trasmissione non iniettive (dove appropriato).

Alla luce di queste esigenze, una *topologia RLA* (reticolo di livelli) può aspirare a essere:

- *Ontologicamente Indipendente*: non necessita di entità esterne non filtrate;
- *Epistemicamente Chiusa*: qualunque fenomeno interno risulta spiegabile tramite i livelli e le regole definiti *in loco*;
- *Turing-Computabile*: tutti i processi al suo interno sono rappresentabili e simulabili da una macchina di Turing (senza introdurre oracoli globali).

Queste tre qualità fanno di una topologia RLA un “*microcosmo locale*” in cui la coesistenza di *indecidibilità* e *emergenza* può essere trattata in modo organico, ponendo le basi sia per *interpretazioni filosofiche* (ontologiche) sia per *applicazioni pratiche* (simulazioni, costruzione di modelli chiusi).

Nelle sezioni seguenti, presentiamo le definizioni formali di:

1. *Indipendenza Ontologica* (§11.1),
2. *Chiusura Epistemica* (§11.2),
3. *Turing-Computabilità* (§11.3),

mostrando come esse si combinino per definire una “*Topologia RLA Compatta*”.

## 11.1 Indipendenza Ontologica

**Definizione.** Sia

$$\mathcal{R} = \left\langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \right\rangle$$

un reticolo di livelli RLA dove:

- $\mathcal{L}$  è un insieme finito di indici di livello (ad es.  $L_1, L_2, \dots, L_n$ );
- $\mathcal{E}_i$  indica l'insieme di *stati* o *entità* presenti a livello  $L_i$ ;
- $\mathcal{R}_i$  è l'insieme di *regole* (o leggi) *intra-livello* che ne determinano l'evoluzione e l'interazione interna;
- $f_{ij}$  è la *funzione di trasmissione* (spesso non iniettiva) dal livello  $L_i$  al livello  $L_j$ , definendo come gli stati di  $L_i$  vengano *letti* e *filtrati* in  $L_j$ .

Chiamiamo **Ontologicamente Indipendente** una topologia  $\mathcal{R}$  se:

1. Ogni entità e ogni legge necessari a spiegare i processi interni a  $\mathcal{R}$  è *contenuta* in uno dei livelli  $L_i$  o nelle relative funzioni di trasmissione  $f_{ij}$ .
2. Qualora esistano canali verso un “livello esterno” o “fonte esterna” *non* incluso in  $\mathcal{R}$ , tali canali risultino **non iniettivi** (collasso informativo), evitando che complessità o indecidibilità infinite vengano *ereditate* senza filtraggio.

**Interpretazione Filosofica:** l'*Indipendenza Ontologica* assicura che la topologia costituisca un “*microcosmo*” in cui *tutte* le leggi e le entità significative sono definite *al suo interno*. Ogni ingresso esterno viene *collassato* (non iniettivamente) prima di entrare, garantendo che l'eventuale informazione aggiuntiva non comprometta la coerenza auto-consistente del reticolo.

## 11.2 Chiusura Epistemica

**Definizione.** Chiamiamo **Epistemicamente Chiusa**

una topologia  $\mathcal{R} = \langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \rangle$  se:

1. Nessun “*teorema esterno*” o livello al di fuori di  $\mathcal{R}$  è necessario per descrivere la *totale* dinamica interna di  $\mathcal{R}$ ;
2. Qualsiasi fenomeno che si manifesti dentro  $\mathcal{R}$  può essere spiegato (o almeno modellato) partendo dai livelli  $L_i$  e dalle regole/funzioni  $f_{ij}$  già presenti.

**Interpretazione Filosofica:** la *Chiusura Epistemica* implica che l’insieme di leggi e stati in  $\mathcal{R}$  *basta* a render conto di *tutto* ciò che avviene all’interno del reticolo, senza dover chiamare in causa teorie o principi *esterni*. È una forma di “*autosufficienza esplicativa*,” che nella pratica favorisce una descrizione disciplinare integrale.

## 11.3 Turing-Computabilità

**Definizione.** Data la topologia  $\mathcal{R} = \langle \mathcal{L}, \{\mathcal{E}_i\}, \{\mathcal{R}_i\}, \{f_{ij}\} \rangle$ , diciamo che  $\mathcal{R}$  è *Turing-Computabile* se:

1. Ognuna delle regole  $\mathcal{R}_i$  (le leggi “intra-livello”) è esprimibile come funzione ricorsiva (totale o parziale) o insiemi di regole computazionalmente implementabili;
2. Le funzioni di trasmissione  $f_{ij}$  sono anch’esse definibili in termini computabili (senza oracoli indecidibili esterni);
3. L’intera evoluzione (ad es. a passi discreti) può essere simulata da una Macchina di Turing, pur riconoscendo che eventuali *blocchi* di indecidibilità possono emergere *localmente* e rimanere confinati nel reticolo.

**Interpretazione Filosofica:** la *Turing-Computabilità* formalizza la “*modellabilità*” del sistema. Anche se possono esistere *problemi indecidibili* interni, ciò non contraddice la computabilità *globale*: significa soltanto che *interna* al modello potranno verificarsi dinamiche insolubili, ma *l’intero* reticolo è descrivibile come un insieme di procedure eseguibili su Macchina di Turing.

## Sintesi

I tre requisiti – **Indipendenza Ontologica**, **Chiusura Epistemica** e **Turing-Computabilità** – definiscono una *Topologia RLA Compatta*. Tale reticolo di livelli *(i)* non eredita indefinitamente complessità e indecidibilità dall'esterno, *(ii)* possiede al suo interno tutte le leggi utili alla comprensione e *(iii)* resta simulabile su Macchina di Turing, consentendo test e sperimentazioni. In tal modo, può essere visto come un “*universo locale*” autosufficiente, dove indecidibilità ed emergenza coesistono e possono essere studiate in modo rigoroso. Nelle sezioni successive, verrà illustrato come costruire passo-passo una simile topologia in un caso pratico (*briofito generalista*), mostrando i vantaggi di un sistema “compatto” sia per l'analisi teorica sia per la validazione empirico-sperimentale. *Compatta*.

## 12 Costruzione di una Topologia RLA Compatta

Dopo aver chiarito i requisiti di *Indipendenza Ontologica*, *Chiusura Epistemica* e *Turing-Computabilità*, presentiamo in questa sezione un *metodo a fasi* per costruire una topologia RLA che soddisfi tali criteri in modo congiunto, ciò risulti *Compatta*. Rispetto a un approccio puramente formale, qui sottolineiamo la necessità di *microfondare* ogni fase — cioè di ancorare la definizione di livelli e funzioni di trasmissione alla letteratura scientifica *dominante* (o comunque ben consolidata) del dominio in oggetto. Tale microfondazione assicura la *plausibilità* empirica del reticolo e ne garantisce la *robustezza epistemica*.

### 12.1 Fase 1: Identificare il Dominio e le Fonti di Microfondazione

1. **Scelta del Fenomeno da Modellare:** Stabilire con precisione l'oggetto di studio (per es. un organismo vegetale, un sistema cognitivo, un ecosistema).
2. **Microfondazione Letteraria:** Ogni *livello* e *processo* che si desidera rappresentare va riferito alla letteratura *scientifica* pertinente (articoli peer-reviewed, testi di riferimento). Ad esempio, se si intende modellare la fotosintesi, si utilizzeranno parametri e formule derivanti dalle pubblicazioni standard di fisiologia vegetale.
3. **Definizione dei Confini:** Una volta chiarite le principali fonti bibliografiche, si delimita il *perimetro* del reticolo (cosa rimane interno, cosa è esterno).

**Motivazione Epistemica:** Senza riferimenti a un corpus di conoscenze dominanti, la topologia rischierebbe di essere arbitraria e scollegata dal fenomeno reale; la microfondazione, invece, garantisce coerenza *empirica* e *teorica*.

### 12.2 Fase 2: Selezione e Descrizione dei Livelli

1. **Livelli come Proiezioni Teoriche:** Ogni livello corrisponde a un “piano” di analisi (genetico, metabolico, morfologico, cognitivo, ecc.), basato su *campi disciplinari* ben riconosciuti. Le definizioni e i parametri di tale livello vanno *microfondati* tramite riferimenti mirati: ad esempio, per un livello genetico, si includono parametri di *trascrizione*, *epimutazioni*, *trasposoni* attingendo dai testi di genetica formale e di epigenetica.

2. **Cardinalità e Confini di Ciò che Sta in un Livello:** L'inclusione di un parametro (ad es. Tasso Auxina) deve rifarsi a un *modello standard* in letteratura; la scelta di escludere processi secondari richiede *giustificazioni* (ad es. “per semplicità si trascura la fotoprotezione X, secondo [Autore, anno]”).

**Motivazione Epistemologica:** La formalizzazione di ogni livello non dev'essere “a priori”; deve invece riflettere i *dati* e la *teoria* correnti. Così, la topologia *guadagna validità* e conformità al mondo reale.

### 12.3 Fase 3: Definire le Funzioni di Trasmissione ( $f_{ij}$ ) con Riferimenti Empirici

1. **Coppie di Livelli:** Per ciascuna coppia  $(L_i, L_j)$ , si stabilisce *come* gli stati o parametri di  $L_i$  influenzano (o vengono “letti” da)  $L_j$ . Ad esempio, se  $L_i$  è “fisiologia” e  $L_j$  è “tessuto”, si useranno equazioni o regole validanti la letteratura (p.es. manuali di botanica sulle relazioni tra ormoni e differenziazione cellulare).
2. **Non Iniettività Giustificata:** La letteratura potrebbe indicare che, tra certi range di uno stimolo, la risposta dell'altro livello si satura; questo è un *collasso informativo*. Una *curva di saturazione* Sigmoidale, ad esempio, testimonia la non iniettività: molti valori di input a un certo punto “collassano” nella stessa risposta.

**Valore dell'Evidenza Scientifica:** Ogni funzione  $f_{ij}$ , lungi dall'essere scelta arbitrariamente, viene *microfondata* su curve note (Michaelis-Menten, Hill, logistiche, ecc.), *giustificando* le scelte parametriche sulla base di pubblicazioni e dataset.

### 12.4 Fase 4: Verificare Indipendenza Ontologica e Chiusura Epistemica

1. **Indipendenza Ontologica:** Se *ogni* entità e legge dipende dalle fonti bibliografiche scelte (e *non* da un livello esterno “misterioso”), la condizione è soddisfatta. In pratica, si *esige* che non si importino dinamiche indefinite: l'eventuale ambiente (clima, suolo, ecc.) venga codificato come set di parametri *collassanti* e *filtrati*, definiti anch'essi in base a letteratura (*es.: modelli di precipitazione validati*).
2. **Chiusura Epistemica:** Serve confermare che *tutto* ciò che può avvenire nel reticolo *sia spiegabile* dalle regole interne. Se la letteratura di riferimento



suggerisce un processo cruciale “esterno”, allora bisogna *internalizzarlo* (con un livello ad hoc o funzioni).

**Nota di Filosofia della Scienza:** La microfondazione legittima *ontologicamente* e *epistemicamente* la topologia; ogni passaggio è *un test* di sufficienza: “le nostre leggi interne bastano? Stiamo ricorrendo inconsciamente a entità indescrivibili *extra* reticolo?”

## 12.5 Fase 5: Assicurare la Turing-Computabilità

1. **Formalizzare in Algoritmi:** Per rendere computabili *tutte* le equazioni e i processi, si traducono i modelli e i parametri *microfondati* in una *struttura di calcolo* (per es. un loop giornaliero in cui si applicano successivamente regole e funzioni).
2. **Evitare Oracoli o Sottomodelli Non Calcolabili:** Se la letteratura indica un fenomeno complesso ma *ancora* non completamente definito, si deve optare per un *approssimazione* (equazione), piuttosto che per un “buco nero” che necessiti di un oracolo.
3. **Implementazione Prototipale:** Infine, la Turing-compatibilità si *verifica* realizzando un prototipo software (in Python, C++ o altro) e *simulando* i parametri. La microfondazione fa sì che i risultati siano *confrontabili* con i dati sperimentali (se disponibili).

## 12.6 Conclusioni

La microfondazione è dunque *condizione necessaria* per:

- *Definire i livelli:* Ogni livello corrisponde a un *capitolo disciplinare* o a un sotto-modello validato in letteratura.
- *Giustificare le funzioni di trasmissione:* Senza dati empirici o teorie dominanti, non ci sarebbe criterio per decidere iniettività o forme di saturazione/collasso.
- *Integrare Indipendenza Ontologica, Chiusura Epistemica e Computabilità ai sensi di Turing:* L’indipendenza e la chiusura sono plausibili solo se radicate in conoscenze riconosciute, e la Turing-compatibilità *eseguibile* solo se le equazioni e i processi sono formalizzati come *algoritmi*.

Questo metodo assicura che la topologia RLA non sia un costrutto arbitrario, bensì un *modello robusto*, nato da un intreccio di rigore teorico e ancoraggio continuo alle conoscenze scientifiche che ne legittimano la struttura.

In allegato è illustrato un esempio dettagliato — la *topologia briofita* — per mostrare come ogni passo sia tradotto in pratica e supportato da fonti pertinenti, consentendo di giungere a una Topologia RLA Compatta sperimentabile.

## 13 Discussione Interdisciplinare

Dopo aver illustrato la *catena lineare* di 15 livelli (Sez. 9) e aver presentato *altre* 30 discipline potenzialmente inquadrabili nelle Reti Locali di Astrazione (Sez. 10), in questa sezione **chiudiamo il cerchio** mettendo a fuoco:

1. **Come** RLA *connetta* l'emergenza (tipica dei sistemi complessi) con i limiti computazionali (Turing, Rice) in modo non contraddittorio.
2. **Perché** la presenza di **livelli contigui** e funzioni di trasmissione (iniettive o no) risulti essenziale a questa coesistenza.
3. **In che modo** la struttura possa estendersi, nella pratica, a *reticoli con loop* e *cicli di retroazione* e non solo a catene lineari.

### 13.1 Raccordo con la Matematica e la Filosofia della Scienza

La formalizzazione di RLA (Sez. 5) riprende i *teoremi classici* dell'indecidibilità (Turing, Church, Rice) e li *proietta* su una *rete di livelli* contigui. I livelli non sono presentati come entità metafisiche, ma come *convenzioni disciplinari* (cfr. §3) che “ritagliano” parti di realtà e regole di azione. La contiguità, definita in termini di funzioni di trasmissione, coincide con la *connessione empirico-teorica* fra domini (genetica formale, meccanica statistica, reti neurali, ecc.). Ciò integra la *costruzione sociale* dei livelli (Berger & Luckmann) con il *rigore insiemistico* e computazionale.

### 13.2 Coesistenza di Emergenza e Indecidibilità

La letteratura emergentista (Anderson, Morin) e la teoria dell'indecidibilità (Turing, Rice) possono apparire *distanziate*:

- L'emergenza di proprietà macro *non* riducibili punta l'attenzione sulla “novità”;
- La *teoria dell'indecidibilità* sottolinea *limiti* logico-formali imposti dalla Turing-likeness.

Con RLA, *entrambe* convivono in un sistema multi-livello: se *almeno un* livello *preserva* stati Turing-centrali lungo le mappe di trasmissione, i limiti indecidibili *risalgono* (Teorema 1); se *invece* qualche mappa *collassa* (non iniettività) stati rilevanti, emergono *proprietà non derivabili* (Teorema 2). Questi due fenomeni non si *escludono*, ma si *intrecciano* localmente, producendo scenari ibridi in cui *alcune* differenze micro persistono e *altre* si perdono.

### 13.3 Funzioni di Trasmissione come Chiave di Volta

La nozione di **funzione di trasmissione** (Def. 2) è al centro della *chiusura* epistemico-matematica:

- *Iniettività* e *quasi-iniettività* sostengono la *propagazione* dell’indecidibilità — se c’è un livello Turing-like a monte.
- *Non iniettività* (collasso) introduce *emergenza* irriducibile.

In ogni passaggio micro→macro, i ricercatori possono *indagare* sperimentalmente (Sez. 6) se la funzione di trasmissione conserva o collassa distinzioni. Così RLA *non* proclama un riduzionismo totale, né un emergentismo assoluto, ma *localizza* l’emergenza e i limiti computazionali nelle *singole* transizioni tra livelli contigui.

### 13.4 Topologia RLA Compatta

Un ulteriore passo in questa direzione è la formalizzazione di *Topologie RLA Compatte*, in cui il reticolo multi-livello risulti:

- Ontologicamente indipendente: non “eredita” indefinitamente complessità esterne, grazie a funzioni di trasmissione collassanti in ingresso;
- Epistemicamente chiuso: qualunque fenomeno interno alla topologia può essere compreso e spiegato *all’interno* dei livelli e delle relazioni definiti, senza ricorrere a un meta-livello esterno;
- Turing-computabile: la dinamica d’insieme (livelli, regole, funzioni di trasmissione) risulta simulabile da una macchina di Turing, garantendo che i loop e i fenomeni emergenti siano modellabili e falsificabili.

In un tale schema, le RLA assumono la forma di “microcosmi” autosufficienti, dove l’emergenza e l’indecidibilità convivono *dentro* la struttura senza richiedere entità o regole esterne. Di conseguenza, la ricerca potrebbe mirare alla costruzione esplicita di reticoli “compatti” in varie discipline, esplorando possibili implementazioni sperimentali (nei settori biologici, cognitivi o sociali) e aprendo prospettive di simulazione su scale maggiori.

### 13.5 Reticoli Multi-livello con Loop: Prospettive Future

Nei paragrafi precedenti, abbiamo presentato esempi di *catene* lineari di livelli. Tuttavia, molti sistemi reali (in biologia, fisica o scienze sociali) manifestano *loop di*

*retroazione* e vere e proprie strutture reticolari, nelle quali le funzioni di trasmissione non seguono un'unica direzione “dal basso verso l'alto,” ma si compongono ciclicamente. Questa configurazione introduce ulteriori complessità:

- Se un *loop* preserva iniettività sugli stati Turing-centrali, i limiti d'indecidibilità possono *ricircolare* e manifestarsi persistentemente;
- Se invece si verifica un *collasso informativo* in uno (o più) archi del loop, possono emergere proprietà collettive non riducibili, con possibili effetti di feedback che si auto-sostengono.

L'analisi formale di queste *retroazioni multi-livello* costituisce un'estensione naturale del presente quadro RLA, ma richiede modelli matematici più ricchi (ad esempio, *grafi orientati* e *morfismi* composizionali). Sarà oggetto di studi futuri verificare come la (non) iniettività e la Turing-likeness possano coesistere in cicli complessi, e se emergano fenomeni di *ricorsione* nell'indecidibilità o nell'emergenza.

*Esempio di Ricerca:* Trattare i loop come morfismi endofunzione e verificare se si creano “cicli di emergenza” capaci di amplificare irriducibilità. In tal senso, un confronto con i modelli di retroazione di Koestler (1967) potrebbe chiarire come informazioni collassate vengano ri-generate a un livello inferiore, incrementando la complessità reticolare.

Questi aspetti, potenzialmente rilevanti in neurobiologia, scienze sociali ed ecologia, aprono interessanti prospettive di ricerca interdisciplinare.

## 13.6 Sintesi Interdisciplinare

Le sezioni sulle *discipline* (Sez. 7, 8, 9, 10) mostrano come RLA possa abbracciare *fisica, biologia, IA, scienze sociali, linguistica*, ecc. Lo schema si fa “ponte” fra:

- L'emergenza nel senso di Anderson (1972) — come *non deducibilità* di macro-proprietà;
- I vincoli logico-computazionali (Turing, Rice) — *inevitabili* in sistemi universali;
- La *pluralità* di livelli disciplinari, riconosciuti in ottica costruttivista/realista (Berger & Luckmann).

La formalizzazione matematica (assiomi A1–A3, teoremi 1–2) *saldano* tali aspetti in un *linguaggio coerente e falsificabile* (Popper).

## Riepilogo

In definitiva, *RLA* si presenta come un *meta-teoria* in cui *emergenza* e *indecidibilità* *non* si escludono, bensì *coabitano* in una rete di passaggi locali. La **chiave** risiede nelle *mappe di trasmissione* (iniettive o no) che *rispettano* o *collassano* i “dettagli computazionali critici.” Così, l’eventuale presenza di loop multi-livello aggiunge ulteriore complessità, ma *non* intacca la *validità* degli assiomi A1–A3, bensì la *estende*, consentendo che emergenza e indecidibilità si “rigenerino” o “si blocchino” in percorsi ricorsivi. Nella successiva sezione (§15), tratteremo i *limiti* attuali di *RLA* (come la mancanza di metriche quantitativo-sperimentali ampiamente validate) e le *prospettive* di sviluppo (ad es. category theory, protocolli sperimentali, reticoli con loop), in una visione che incoraggi *ricerca empirica* e *collaborazione interdisciplinare*.

## 14 Riflessioni Ontologiche, Epistemologiche e Questione Coscienza

Le *Reti Locali di Astrazione* (**RLA**), concepite inizialmente come un *meta-quadro* interdisciplinare per studiare l'emergenza e l'indecidibilità, entrano *inevitabilmente* in risonanza con alcuni grandi temi filosofici:

1. **Epistemologia:** in che modo le discipline accedono a distinti “*livelli di realtà*” e quali “*collassi cognitivi*” (parzialità o perdita d'informazione) limitano la nostra conoscenza?
2. **Ontologia:** i livelli sono *oggettivi* o mere costruzioni concettuali (strumenti) della nostra mente? Qual è lo *status* di ciò che “*esiste davvero*”?

Al contempo, emergono **implicazioni teologiche** se *postuliamo* un livello *transcendente* (o *divino*) così “alto” da rendere ancor meno iniettive (o più “collassanti”) le funzioni di traduzione. Sebbene *RLA* non pretenda di stabilire una “teologia scientifica,” esso fornisce un *quadro multi-livello* che può essere reinterpretato (in prospettiva di fede) come “*struttura reticolare della Creazione*.”

Senza alcuna pretesa di *risolvere* dilemmi filosofici o religiosi, questo capitolo *mostra* come *RLA incroci* la storia del pensiero — dalle radici antiche alle discussioni su coscienza e computazione — e in quale senso *indecidibilità* ed *emergenza* contribuiscano al dibattito su “*chi siamo e come conosciamo*”.

### 14.1 Linee di Pensiero: dalla Storia Antica a Quella Moderna

I *Presocratici* (Talete, Eraclito, Parmenide) indagavano un *arché* unico oppure il contrasto fra *divenire* (Eraclito) e *staticità* (Parmenide) (Barnes 1982). In modo suggestivo, *RLA associa* un'idea di “*meta-quadro unificante*” (un potenziale *arché concettuale*) alla pluralità di livelli: la dinamica dei passaggi di trasmissione può richiamare il “*divenire*,” mentre *forme fisse* o proprietà emergenti potrebbero evocare “*forme*” più stabili.

Platone e Aristotele introducono due visioni-chiave:

- *Platone:* un *mondo delle idee* (livello “*superiore*”?) contrapposto alle *cose sensibili* (Barnes 1982).
- *Aristotele:* la distinzione *materia-forma* e le quattro *cause*.

In RLA, l'“*idea*” o “*forma*” potrebbe emergere da un *sostrato* materiale tramite *funzioni di trasmissione* (spesso non iniettive). La non completa risalita salvaguarda, così, la *non totale riducibilità* di tali forme.

In epoca medievale (Agostino, Tommaso d'Aquino), fede e ragione si intrecciano (Aquinas dominum). La separazione tra piano *divino* e *terreno* può, nel lessico RLA, essere intesa come livelli la cui *funzione di trasmissione* è *estremamente* non iniettiva: da ciò potrebbero risultare “*miracoli*” (rotture di continuità nel livello naturale). Un ipotetico “livello Divino” rimane *non* trattabile con i normali assiomi umani (Polkinghorne 1989).

La distinzione cartesiana tra “*res cogitans*” e “*res extensa*” (Descartes 1984) può trovare una “traduzione” in RLA: un *collasso irriducibile* fra *livello fisico* (neuroni) e *livello coscienza*. In modo affine, la contrapposizione kantiana tra *noumeno* (non conoscibile) e *fenomeno* (conoscibile in modo parziale) (Kant 1998) risuona nella *non iniettività* come perdita informativa inevitabile in ogni “descrizione” scientifica.

La scienza positivista (Comte, Mill) mirava a *unificare* tutti i fenomeni in leggi fondamentali. In un contesto RLA, ciò equivale a *cercare* un'iniettività totale dal micro al macro, riducendo completamente i livelli superiori ai precedenti. Tuttavia, le scienze contemporanee (fisica, biologia, scienze sociali) mostrano *collassi* non iniettivi che rendono insostenibile un riduzionismo totale (Morin 2008).

Nel Novecento, autori come *Broad* e *Morgan* propongono l'emergentismo (Broad 1925), mentre *Heidegger*, *Sartre* e altri si concentrano sull'essere *fenomenologico*. Sul fronte teologico, si sviluppano prospettive di *creazione continua* (Teilhard de Chardin) o interpretazioni evolutive (Morin 2008). RLA *non* prende posizioni dogmatiche ma offre uno *schema* in cui *livelli successivi* possono *accogliere* proprietà non deducibili da quelli inferiori. In ottica religiosa, un “livello trascendente” rimane plausibile in un reticolo in cui ciascuna catena subisce *collassi* di informazione.

## 14.2 Epistemologia: Pluralità Livelli e Limiti Conoscenza

La “*non iniettività*” (o *collasso*) esprime la *nostra* difficoltà nel ricostruire in modo pieno un livello inferiore partendo da uno superiore. *Kant* vedrebbe in ciò la *differenza* fra *noumeno* e *fenomeno*, mentre *Popper* sottolineerebbe la *fallibilità* e la *parzialità* di ogni teoria (Popper 1959). Da un punto di vista RLA, l'incompletezza epistemica si traduce nel “collasso informativo” che inevitabilmente si manifesta a ciascun passaggio.

Inoltre, quando incontriamo “vuoti” fra discipline (p. es. tra fisica e biologia, oppure tra neuroscienze e scienze sociali), RLA suggerisce che *nuovi livelli-ponte* possano ridurre il *collasso*, aumentando la risoluzione del nostro modello. Così,



la scienza *non* appare più rigidamente gerarchica ma “reticolare” e potenzialmente *frattale* (Morin 2008).

Un punto cruciale è la *transitività* dei limiti computazionali: *basta* un singolo sottosistema Turing-like, *non* collassato nei livelli successivi, per “*importare*” in tutto il *meta-quadro* le problematiche dell’*indecidibilità*. Se un dominio scientifico integra tale sottosistema, eredita i vincoli di Halting Problem e Rice, indicando la *profonda pervasività* dei limiti logici.

**Postulato di estensione dell’indecidibilità:** Se, in un sistema multi-livello, almeno un sottosistema è Turing-like e non collassa le proprie distinzioni nei passaggi successivi, *tutte* le descrizioni scientifiche che lo includono ne *ereditano* inevitabilmente i limiti d’indecidibilità. Tali vincoli, pertanto, *risalgono* la catena sino ai livelli emergenti, influenzando la nostra capacità di modellarli con gli strumenti logico-matematici a disposizione.

### 14.3 Ontologia: Riduzionismo, Emergenza e Sguardo Teologico

Anderson (Anderson 1972) afferma “*More is different*”: quantità e interazione generano *novità* qualitativa. RLA “incarna” questa visione: quando una funzione micro→macro è non iniettiva, emergono proprietà *non ricostruibili* da predicati micro (Teorema 2). Ciò non preclude *riduzioni parziali*, ma nega il “riduzionismo assoluto,” prospettando una “semi-riducibilità.”

Da una prospettiva teologica, si può ipotizzare un “livello divino” ancora più sfuggente alle mappe umane (Aquinas dominum; Polkinghorne 1989). *Miracoli* potrebbero allora apparire come conseguenze di una *traduzione ultranon-iniettiva* (impossibile da rendere coerente con le catene naturali). Sebbene RLA non *imponga* affatto l’esistenza di tale livello, esso rimane compatibile con un discorso sulla molteplicità dei piani di realtà (Morin 2008).

In ambito “ontologia digitale,” gli esperimenti di “*digital life*” (e.g. Ray 1991; Adami & LaBar 2018) sollevano la questione se forme di vita computazionale possano “*esistere*” al pari di organismi biologici. In RLA, la distinzione fra “entità biologiche” e “entità virtuali” dipenderebbe dalla *catena di livelli* in cui si collocano e dalla (non) iniettività delle loro reciproche funzioni di traduzione.

## 14.4 Confronto con l'Antispecismo Post-Umanista

L'*antispecismo post-umanista* critica la centralità esclusiva della specie umana, riconoscendo continuità (biologica e cognitiva) con animali, entità artificiali ed altre forme di vita. Esso sfuma i confini “umano–non umano,” considerando tali distinzioni in larga parte costrutti culturali. In quest’ottica, *RLA* può fornire un principio unificante: se le proprietà Turing-like e i collassi emergenti non sono appannaggio dell’*homo sapiens* ma *ricorrono* in svariati sistemi (cervelli animali, reti neurali artificiali, entità computazionali), allora la *qualità ontologica* non dipende più soltanto dall’etichetta “umano/non umano,” bensì dalle dinamiche multi-livello e dai gradi di emergenza.

Così, l’antispecismo post-umanista trova un *linguaggio condiviso* con *RLA* per descrivere la comparsa di *valore ontologico* e proprietà “*mentali*” su basi computazionali ed emergenti, senza trincerarsi in dicotomie rigide. Il *collasso informativo*, se “*rilevante*,” può generare forme di *agentività* e di *coscienza* potenzialmente estese oltre lo steccato antropocentrico.

## 14.5 La Coscienza: Mente-Corpo e Indecidibilità

Nel dibattito mente-corpo, i **riduzionisti** puri affermano che la coscienza sia interamente *epifenomeno* delle dinamiche neuronali, mentre i **non-riduzionisti** radicali sostengono che il “qualia” (o l’esperienza soggettiva) sfugga del tutto a spiegazioni fisico-computazionali (Chalmers 1996; Searle 1992). *RLA* propone un “*terreno ibrido*”: alcune funzioni (memoria, attenzione) potrebbero essere tracciate in modo (quasi) iniettivo, mentre altri aspetti (il “sentire soggettivo”) restano *collassati* e non ricostruibili, configurando così una “semi-riducibilità” tra cervello e mente.

*Faggin* (Faggin 2021) ipotizza un “principio interiore” irriducibile alla sola computazione. Nel linguaggio di *RLA*, ciò potrebbe equivalere a dire che *alcuni* stati interni del sistema-neuroni, nel passaggio neurale → coscienza, subiscono un *collasso* non iniettivo e non riducibile, generando fenomeni soggettivi inaccessibili alla mera analisi computazionale.

Se il *cervello* è almeno in parte Turing-compatibile (Siegelmann & Sontag 1991), esisteranno *problemi cognitivi* indecidibili. In *RLA*, qualora i livelli neurale → cognitivo *preservino* le distinzioni Turing-critiche, tale indecidibilità “risale” sino alla nostra coscienza, giustificando l’esistenza di alcuni “*misteri cognitivi*” (al di là del limitato punto di vista soggettivo).

La tensione “riduzionismo vs. emergentismo” trova in *RLA* una via di mezzo:

la mente nasce *anche* da processi fisico-computazionali, ma non *tutti* i dettagli neuronali sono conservati; alcuni collassano e producono proprietà coscienti *non* riducibili fino in fondo. Questo “*semi-dualismo*” accetta la base fisica e riconosce la *non* equivalenza integrale fra mente e cervello, sostenuta dall’inevitabile presenza di limiti computazionali (Gödel 1931; Turing 1936).

## 14.6 RLA come Modello di Sintesi

Dai **Presocratici** all’**epoca medievale** (Agostino, Tommaso), dal **dualismo cartesiano** alle *concezioni informatiche* del Novecento, la filosofia della natura ha alternato tentativi di unificazione e di distinzione tra “micro” e “macro,” fisico e mentale, umano e divino. *RLA* non ambisce a dirimere tutti questi dilemmi, ma *offre* un “**reticolo multi-livello**” che:

- *Conserva* la pluralità disciplinare e ammette *interpretazioni realiste o costruttiviste*,
- *Riconosce* la *non* iniettività (collasso informativo) come radice dell’emergenza,
- *Permette* la trasmissione dei vincoli d’indecidibilità (Turing-likeness) dai livelli più “bassi” fino a quelli umani,
- *Consente* eventuali *letture teologiche* (livello trascendente),
- *Incoraggia* la ricerca di “livelli-ponte” aggiuntivi, in una scienza che si rivela reticolare e aperta a integrazioni inedite.

Così, *mentre* fisici, biologi, teologi e studiosi della coscienza continuano a dialogare, RLA propone un *linguaggio* per articolarne le convergenze: un “*realismo stratificato*” con *funzioni di trasmissione* e *collassi* selettivi. Tale struttura rende plausibile la coesistenza di fenomeni *non deducibili* (come la coscienza) e di limiti computazionali diffusi. In sintesi, RLA non *chiude* la questione ontologica, epistemologica o teologica, ma ne *rilancia* la portata: riconosce i “*collassi e i ponti*” come strumenti per l’analisi e la meraviglia congiunta.

## 15 Conclusioni e Prospettive Future

Con la presentazione delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA), abbiamo proposto un **quadro meta-teorico** che integra *emergenza* e *limiti computazionali* in sistemi multi-livello. Ripercorriamo brevemente i *nuclei centrali* del contributo e delineiamo, infine, possibili **sviluppi** e **ricerche future**.

### 15.1 Riassunto dei Contributi Chiave

1. **Formalizzazione** di un approccio multi-livello per l'emergenza e l'indecidibilità. Abbiamo introdotto le *definizioni* (livelli di astrazione, funzioni di trasmissione, Turing-likeness, (non) iniettività) e i *tre assiomi* (A1–A3). Il *Teorema 1* descrive la propagazione dell'indecidibilità quando i passaggi sono (quasi) iniettivi sugli stati Turing-centrali; il *Teorema 2* evidenzia invece la nascita di *proprietà emergenti* irriducibili in caso di collassi informativi.
2. **Falsificabilità e Protocolli Sperimentali.** Abbiamo mostrato come *ciascun* assioma (A1, A2, A3) sia *testabile*: se un *dominio* Turing-like risultasse privo di problemi indecidibili, A1 verrebbe confutato; se una quasi-iniettività non trasmettesse i limiti, A2 crollerebbe; se una *non* iniettività rilevante non generasse emergenza irriducibile, cadrebbe A3. In Sez. 6 e 8 si sono delineate possibili linee di verifica sperimentale in biologia, fisica computazionale e IA.
3. **Applicazioni Interdisciplinari.** È stato illustrato come la *catena di 15 livelli contigui* (Sez. 9) costituisca un esempio *lineare* dalla fisica reticolare alla società complessa, e come altre *30 discipline* (Sez. 10) possano rientrare nel modello RLA, distinguendo quelle *Turing-like* (SI) da quelle *non Turing-like* (NO).
4. **Coabitazione di Emergenza e Indecidibilità.** L'aspetto più innovativo è mostrare che i *limiti di calcolo* (Halting, Rice) e i *fenomeni emergenti* (collasso informativo, novità macro) *non* si elidono a vicenda, bensì si *localizzano* in funzione delle *funzioni di trasmissione* (iniettive o no). Così si offre una cornice dove *riduzione* e *emergenza* diventano *due* dinamiche *coesistenti*, interpretate in ottica multi-livello.
5. **Topologie RLA Compatte.** la proposta di una *Topologia RLA Compatta* sembra incarnare un'aspirazione conclusiva: riunire in un solo contesto i tre requisiti di *ontologia locale*, *chiusura epistemica* e *computabilità Turing-compatibile*. Se tali condizioni venissero soddisfatte con sufficiente microfondazione

empirica, potremmo disporre di “universi limitati” e al contempo *autosufficienti*, in cui osservare la coesistenza strutturata di emergenza e limiti computazionali. Questa visione, potenzialmente utile in ecologia, biologia sintetica e scienze cognitive, apre una strada per sperimentazioni e simulazioni che verifichino come i loop multi-livello e i collassi informativi possano dar vita a “nuovi mondi” coerenti, da studiare come entità sperimentali a sé stanti.

## 15.2 Limiti Correnti e Criticità Aperte

Nonostante l’architettura RLA offra un *framework* ampio e coerente, permangono alcuni limiti e aspetti da approfondire:

- **Quantificazione del Collasso.** L’idea di un *coefficiente di collasso* o di un *indice di emergenza* (§4.4) è tuttora in fase di sviluppo. Manca una *standardizzazione* di tali metriche che permetta di *misurare* quanta iniettività sia “preservata” e quale novità macro emerga quantitativamente.

Per rendere queste nozioni più operative, consideriamo un esempio pilota ispirato all’entropia di configurazione discussa da (Adami & LaBar 2018). Supponiamo cinque stati micro  $\{x_1, \dots, x_5\}$  con probabilità uniforme, mappati da  $\tau$  in due stati macro  $\{m_1, m_2\}$ . Se  $\tau(x_1, x_2) = m_1$  e  $\tau(x_3, x_4, x_5) = m_2$ , il coefficiente di collasso informativo (CC) può stimarsi come:

$$CC = \log_2(5) - \left[ -\left( \frac{2}{5} \log_2 \frac{2}{5} + \frac{3}{5} \log_2 \frac{3}{5} \right) \right] \approx 1.34.$$

Un valore  $> 1$  segnala un notevole ‘schiacciamento’ della diversità micro. Inoltre, se una proprietà macro associata a  $m_2$  non si riconduce a un singolo microstato, parliamo di emergenza. L’indice di emergenza (IE), definito come frazione di proprietà macro irriducibili, quantifica quanto il collasso crei novità reali.

- **Reticoli con Loop e Feedback Multipli.** Abbiamo riconosciuto che la catena lineare (Sez. 9) è una *semplificazione* e che in sistemi biologici, sociali o cognitivi esistono *cicli* di retroazione. Serve una formalizzazione specifica per le *composizioni cicliche* di funzioni di trasmissione, valutando come l’ind decidibilità possa “rigenerarsi” o “spegnersi” in percorsi circolari.
- **Scala di Realismo per la Turing-likeness.** Molti esempi di Turing-likeness (DNA computing, reti neurali) restano *teorici* o limitati su piccole istanze sperimentali. Servirebbero studi *empirici* più ampi per determinare la soglia

di “*universalità pratica*” e come si relazioni ai vincoli fisici (energia, tempo, rumore).

- **Strumenti di Modellazione Formalizzata.** Esiste l’ipotesi di *Category Theory* o di *approcci topologici* per inquadrare i *livelli* come oggetti e le *funzioni di trasmissione* come morfismi, gestendo *mono/epi* per caratterizzare (quasi) iniettività. Questo aspetto attende uno sviluppo sistematico.

### 15.3 Direzioni di Ricerca e Sviluppi Futuri

**1) Introduzione di Metrica di Collasso.** Pur riconoscendo che la non iniettività nelle funzioni di trasmissione porti alla formazione di emergenze (Assioma A3), il modello attuale non fornisce un criterio quantitativo per valutare il grado di perdita informativa. Affinando la definizione di *entropia di collasso* o di misure basate sulla sovrapposizione di pre-immagini, si potrebbe introdurre un “*coefficiente di collasso*”  $CC$  per ogni  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$ . In parallelo, un “*indice di emergenza*”  $IE$  quantificherebbe la *novità* su scala macro. Tali misure fornirebbero un approccio *quantitativo e comparabile* tra ambiti differenti (biologia, fisica, IA).

**Spunto Formale:** Definire il *coefficiente di collasso*  $M_c$  tramite l’uso della Shannon Entropy, come segue:

$$M_c = \frac{H(D(L_i)) - H(\tau(D(L_i)))}{H(D(L_i))},$$

dove  $D(L_i)$  rappresenta l’insieme degli stati del livello  $L_i$  e  $H(\cdot)$  la funzione di entropia. Tale metrica potrà essere ulteriormente affinata attraverso l’analisi della divergenza di Kullback–Leibler per valutare in maniera più fine la differenza tra la distribuzione dei microstati e quella dei corrispondenti output macroscopici.

**2) Adattamento Operativo della Turing-Likeness** Il concetto ideale di Turing-likeness, basato sulla capacità di emulazione di una Macchina di Turing universale, presuppone risorse illimitate, ipotesi non sempre verosimile nei sistemi reali. **Spunto Formale:** Introdurre un *Indice di Turing-likeness Operativo*  $T_L$ , definito come

$$T_L = \frac{\#\{s \in C \subset D(L) \mid \text{preserva-proprietà-critiche-dopo-}\tau\}}{\#C},$$

dove  $C$  rappresenta l’insieme degli stati Turing-centrali in  $D(L)$ . Questo indice esprime in modo quantitativo il grado di conservazione dei parametri computazionali

critici in presenza di vincoli di risorse (memoria, tempo, energia) e permetterà di calibrare il modello in contesti operativi realistici.

**3) Formalizzazione Operativa della Contiguità** Il framework RLA si basa sull'ipotesi che la funzione di trasmissione  $\tau$  tra livelli ( $L_i \rightarrow L_{i+1}$ ) debba preservare le proprietà fondamentali dei microstati per consentire la trasmissione dell'indecidibilità (Assioma A2). Tuttavia, non è attualmente definito un criterio empirico per verificare tale *contiguità*. **Spunto Formale:** Si propone di definire un indicatore binario di contiguità,  $\chi(L_i, L_{i+1})$ , come:

$$\chi(L_i, L_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{se la mappa } \tau(i \rightarrow i+1) \text{ preserva in modo verificabile stati critici,} \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Integrazioni sperimentali, basate su test statistici (ad esempio analisi di correlazione tra distribuzioni di stati), potranno validare operativamente il mantenimento delle informazioni essenziali lungo la catena di trasmissione.

**4) Category Theory e Morfismi di Traduzione.** Formalizzare i *livelli* come *oggetti* in una categoria e le *funzioni di trasmissione* come *morfismi*, con eventuali sotto/epi-morfismi per (non) iniettività. I loop multi-livello sarebbero *endofunctori* o *cicli di morphisms*, con la possibilità di definire property-preserving morphisms per la Turing-likeness.

**5) Protocollo Sperimentale in Biologia e IA.** I *protocolli* già accennati (Sez. 6) e negli *esempi* (Sez. 8) possono diventare *progetti di ricerca* concreti. Ad esempio, creare *circuiti DNA* che codifichino un “mini Halting Problem” e osservare la risposta cellulare fenotipica, valutando *entropia di collasso*, o implementare *reti neurali* ricorrenti con spazi di stato monitorati e *controllare* se la cognizione successiva preservi (quasi) iniettivamente tali stati.

**6) Applicazioni a Sistemi Sociali e Antropologia Computazionale.** Alcune discipline *NO* (Sez. 10) potrebbero “migrare” verso modelli agent-based Turing-like, integrando loop di feedback. È una frontiera interessante per l'economia computazionale, l'antropologia digitale e le scienze sociali ad alta complessità.

## 15.4 Conclusioni Finali

Le *Reti Locali di Astrazione* delineate in questo lavoro rappresentano un **tentativo** di *unificare*, in un'unica prospettiva formale e *falsificabile*, la *coesistenza* di *indecidibilità* (derivante da Turing-likeness) e *emergenza* (prodotta da collassi informativi) su scale disciplinari molteplici. L'*anima empirica* della teoria è data dalla necessità di definire *contiguità* tra livelli solo dove esista *vera* giustificazione sperimentale o teorica, mentre il *cuore logico* si fonda sugli *assiomi* (A1–A3) e i *teoremi* che ne derivano.

Da un lato, tale *costruzione* aiuta a comprendere *come* sistemi biologici, fisici, cognitivi e sociali possano presentare fenomeni apparentemente “magici” su scala macro (emergenza) e, al tempo stesso, *limitazioni* intrinseche alla loro capacità computazionale (indecidibilità). Dall'altro, rimane *un quadro in evoluzione*, che attende conferme sperimentali e sviluppi formali. La speranza è che *futuri ricercatori* possano applicare e affinare RLA, facendo emergere nuove relazioni tra *livelli scientifici*, testando i principi su *loop multi-livello*, e approfondendo i *nuovi orizzonti* di collaborazione interdisciplinare che quest'ottica unificante promette di aprire.



# Glossario dei Termini-Chiave in RLA

**Reti Locali di Astrazione (RLA)** Framework meta-teorico che integra *indecidibilità* e *emergenza* in sistemi multi-livello. Definisce livelli di astrazione, funzioni di trasmissione (iniettive o meno) e assiomi (A1–A3).

**Livello di Astrazione** Un insieme di *stati* e *regole* (leggi, meccanismi) usato per descrivere fenomeni in un determinato dominio disciplinare. Formalmente,  $L = \langle D(L), \Sigma(L) \rangle$ .

**Contiguità** La relazione tra due livelli  $L_i$  e  $L_{i+1}$ , connessi da una *funzione di trasmissione*  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  empiricamente o teoricamente motivata (p. es. genotipo  $\rightarrow$  fenotipo).

**Funzione di Trasmissione** Mappa  $\tau : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$  che trasferisce stati micro a stati macro (singoli o multipli). Iniettiva, quasi-iniettiva o non iniettiva (collasso).

**Turing-likeness** Capacità di un livello di simulare calcoli Turing-general. Se un livello è Turing-like, esistono stati e regole tali da emulare una Macchina di Turing (A1).

**Stati Turing-centrali** Sottoinsieme di stati  $C \subseteq D(L)$  che consentono l'implementazione effettiva di calcoli Turing (memoria illimitata, transizioni computazionali).

**(Non) Iniettività** *Iniettività*: stati diversi restano distinti a livello superiore. *Non iniettività (collasso)*: due o più stati micro vengono “fusi” in uno stesso stato macro.

**Collasso Informativo** Evento di non iniettività per cui differenze micro non restano distinte a livello macro. Può essere: *collasso con emergenza* (se stati micro *rilevanti* vengono fusi e generano nuove proprietà) oppure *collasso senza emergenza* (se la fusione riguarda differenze marginali o irrilevanti).

**Stati Rilevanti** Configurazioni che incidono in modo *misurabile* o *teoricamente significativo* sulle variabili critiche del dominio. Solo il collasso di tali stati genera emergenza (A3).

**Emergenza** Comparsa di *proprietà macro* irriducibili a un semplice predicato micro, dovuta alla fusione (collasso) di stati *rilevanti* non iniettivamente. Basata su Teorema 2 (principio di non derivabilità).

**Topologia RLA Compatta** Un reticolo di astrazione che soddisfa tre proprietà:

(1) *Ontologica indipendenza* (non importa indefinitamente complessità esterne, grazie a funzioni collassanti in ingresso), (2) *Chiusura epistemica* (tutto ciò che accade nel reticolo è spiegabile internamente), (3) *Computabilità Turing-compatibile* (l'intero sistema rimane modellizzabile e simulabile, senza oracoli).

**Indecidibilità** Esistenza, in un sistema Turing-like, di problemi o proprietà *non* risolvibili algebricamente (Halting Problem, Rice). Trasmissibile ai livelli superiori se la funzione di transizione preserva (quasi) iniettività (A2).

**Falsificabilità** Possibilità di *confutare* gli assiomi A1–A3 tramite esperimenti o controesempi logici. Esempio: un “decisore universale” interno a un livello Turing-like smentirebbe A1.

**Coefficiente di Collasso (CC)** Misura (in via di sviluppo) della *quantità* di fusione informativa fra stati micro e macro. Spesso definibile con funzioni logaritmiche sull'overlap delle pre-immagini.

**Indice di Emergenza (IE)** Percentuale o frazione di “proprietà macro nuove” non riducibili a un predicato micro, su un insieme di proprietà considerate. Stimato sperimentalmente su discipline (biologia, IA, fisica).

## Appendice A: Dimostrazioni Formali Estese

In questa appendice, presentiamo le dimostrazioni *più dettagliate* degli enunciati matematici introdotti nella Sez. 5 e ripresi lungo il testo (Teoremi 1–2, Lemmi e Corollari). L’obiettivo è dare al lettore specializzato una visione più rigorosa dei passaggi logici, mantenendo nel corpo principale del paper (Sez. 5) una descrizione compatta.

### Riepilogo degli Enunciati Principali

**A1 (Indecidibilità in Livelli Turing-like).** Se  $L_i$  è un livello Turing-like (Def. 3), esso ospita inevitabilmente almeno un problema indecidibile, in virtù dei teoremi classici di Turing, Church e Rice.

**A2 (Trasmissione d’Indecidibilità via Quasi-iniettività).** Se la funzione di trasmissione  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  *preserva iniettivamente* (o quasi-iniettivamente) gli stati Turing-centrali di  $L_i$ , allora i vincoli d’indecidibilità di  $L_i$  si *trasmettono* a  $L_{i+1}$ .

**A3 (Non iniettività e Emergenza).** Se  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  *fonde* almeno una coppia di stati *rilevanti* in  $L_i$ , nasce una proprietà non derivabile a  $L_{i+1}$  (emergenza), irriducibile al semplice predicato su  $L_i$ .

**Teorema 1 (Propagazione Multi-livello dell’Indecidibilità).** In una catena di livelli contigui  $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$ , se  $L_1$  è Turing-like e *tutti* i passaggi preservano la quasi-iniettività sugli stati Turing-centrali, allora ciascun livello  $L_2, \dots, L_n$  “eredita” i vincoli indecidibili di  $L_1$ .

**Teorema 2 (Emergenza Non Derivabile da Collasso).** Se in un passaggio  $L_i \rightarrow L_{i+1}$  almeno una coppia di stati *rilevanti* è fusa in un unico output (non iniettività), esiste una proprietà di  $L_{i+1}$  non riducibile a un predicato su  $L_i$ .

**Corollario (Accumulo di Collassi).** In una catena di livelli, se *ciascun* passaggio collassa stati rilevanti, si accumulano proprietà emergenti, allontanandosi progressivamente dai dettagli micro e *bloccando* la trasmissione di indecidibilità originata ai livelli più “bassi”.

## Dimostrazione di A1 (Richiamo ai Classici Turing/ Church/ Rice)

[Sketch della dimostrazione] Per ogni livello Turing-like  $L_i$ , definiamo un opportuno sottoinsieme  $C_i \subseteq D(L_i)$  e un insieme di regole di calcolo  $\Sigma_{\text{comp}} \subseteq \Sigma(L_i)$  tali da simulare una Macchina di Turing universale (cfr. Turing 1936, Church 1936). Seguendo la tradizionale argomentazione (Halting Problem, Teorema di Rice Rice 1953), esistono proprietà (ad es. “arresta su input  $w$ ”) che risultano indecidibili. Quindi, *internamente a  $L_i$* , non può esistere un “decisore generale” che fornisca una risposta valida in tutti i casi.

## Dimostrazione di A2 (Trasmissione d’Indecidibilità via Quasi-iniettività)

[Spiegazione e Riduzione per Contraddizione] Supponiamo che  $L_i$  sia Turing-like e ospiti un problema indecidibile  $\Pi_i$ . Se  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}$  è *quasi-iniettiva* sugli stati  $C_i \subseteq D(L_i)$  (gli stati Turing-centrali) e se esistesse un “decisore universale”  $\mathcal{D}$  in  $L_{i+1}$  capace di risolvere  $\Pi_i$ , allora si potrebbe “trasferire a ritroso” (via *iniezione inversa* su  $C_i$ ) tale decisore nel livello  $L_i$ , contraddicendo A1. Nel dettaglio:

- Per ogni istanza  $\alpha$  in  $L_i$  (negli stati Turing-centrali), la mappa  $\tau_{(i \rightarrow i+1)}(\alpha)$  produce un insieme di stati in  $D(L_{i+1})$ .
- La quasi-iniettività garantisce che *tali* stati “corrispondono” in maniera *univoca* a  $\alpha$ , almeno in termini di computazione cruciale.
- Un “decisore” in  $L_{i+1}$  restituirebbe un output certo (“si arresta/non si arresta”, “soddisfa la proprietà  $p$ /non la soddisfa”) che, per la quasi-iniettività, si potrebbe associare univocamente alla configurazione  $\alpha$  di  $L_i$ .

Ciò implicherebbe la possibilità di risolvere l’indecidibile *dentro*  $L_i$ , chiudendo la catena della riduzione e creando una contraddizione. Ne consegue che *non* può esistere un decisore a livello  $L_{i+1}$  per  $\Pi_i$ , e dunque l’indecidibilità *si trasmette*.

## Dimostrazione di A3 (Non iniettività e Emergenza)

[Struttura dell’Argomentazione] Si consideri la funzione di trasmissione  $\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \rightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$ . Per la “non iniettività rilevante”, esiste almeno una coppia  $x_1, x_2 \in D(L_i)$  con  $x_1 \neq x_2$  e

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset .$$

In termini emergentisti, *differenti stati micro* si fondono in *uno stesso output* (o insieme di output) a livello  $L_{i+1}$ . Si dimostra che *nessun* predicato  $P$  definito in  $L_i$  può, da solo, discriminare i comportamenti di  $L_{i+1}$  scaturiti da  $x_1$  e  $x_2$ , perché gli effetti si *mescolano*. Pertanto, la proprietà “*si origina da  $x_1$  e non da  $x_2$* ” sfugge a una caratterizzazione su  $L_i$ . In altre parole,  $L_{i+1}$  possiede almeno una qualità  $Q$  “novizia” che non è funzione diretta di un singolo predicato micro. Il formalismo attinge all’analogia di Rice e al ragionamento emergentista di Anderson 1972.

## Prova del Teorema 1 (Propagazione Multi-livello Indecidibilità)

[Prova in forma di riduzione ricorsiva] Consideriamo una catena  $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow \dots \rightarrow L_n$ . Assumiamo:

- $L_1$  è Turing-like, quindi ospita almeno una proprietà indecidibile  $\Pi_1$ .
- Ognuno dei passaggi  $\tau_{(1 \rightarrow 2)}, \tau_{(2 \rightarrow 3)}, \dots, \tau_{(n-1 \rightarrow n)}$  è (quasi) iniettivo sugli stati Turing-centrali.

Per contraddizione, supponiamo che  $L_k$ , con  $k \leq n$ , disponga di un “decisore” per  $\Pi_1$ . Grazie alla *composizione di iniettive* (Lemma 1), l’insieme degli stati Turing-centrali di  $L_1$  è *distinto* lungo tutti i passaggi, quindi potremmo “tradurre a ritroso” il decisore di  $L_k$  e ottenerne uno anche in  $L_1$ , contraddicendo A1. Dunque *nessun* livello  $L_2, \dots, L_n$  può decidere  $\Pi_1$ . L’indecidibilità *si estende* (persiste) a tutti i livelli.

## Prova del Teorema 2 (Emergenza Non Derivabile da Collasso)

[Argomentazione sul Principio di Non Derivabilità] Dato un passaggio  $L_i \rightarrow L_{i+1}$  con almeno un collasso  $(x_1, x_2)$ , *rilevante* per la disciplina:

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2) \neq \emptyset .$$

Poniamo  $y \in \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_1) \cap \tau_{(i \rightarrow i+1)}(x_2)$ . Sia  $Q$  la proprietà su  $L_{i+1}$  secondo la quale “*lo stato corrispondeva a  $x_1$  (o a qualche variante di  $x_1$ ), e non a  $x_2$* ”. Ma, *poiché*  $y$  si origina *da entrambe* le preimmagini, a livello macro *non* è più univocamente identificabile come discendente di  $x_1$  o  $x_2$ . Nessun predicato definito in  $L_i$  può fissare una differenza che *a livello macro* risulta fusa.

$\implies$  Il fenomeno in  $L_{i+1}$  associato a  $y$  non è deducibile come “predicato micro su  $L_i$ ”.

Ciò esprime la “novità emergente”. In modo più formale, se esistesse un predicato  $P(x)$  su  $L_i$  che discriminasse tutti i possibili output corrispondenti a  $y$ , avremmo una contraddizione perché  $x_1$  e  $x_2$  darebbero ugual esito a  $P$ , ma generano la stessa immagine macro. La medesima struttura logica, mutuata dal “Principio di Non Derivabilità” di Rice, conferma la non riducibilità.

**Remark (Collasso con Emergenza vs. senza Emergenza).** Si noti che la dimostrazione di Teorema 2 presuppone implicitamente che le configurazioni  $x_1$  e  $x_2$  del livello  $L_i$  siano *rilevanti*, cioè differiscano in modo *efficace* per il dominio disciplinare (evidenze sperimentali o computazionali). In tal caso, la fusione (non iniettività) implica necessariamente la nascita di una proprietà macro non deducibile. Se invece  $x_1$  e  $x_2$  presentano differenze puramente marginali o ininfluenti (“*collasso innocuo*”), non emerge alcun fenomeno *nuovo* a livello  $L_{i+1}$ . Pertanto, l’*emergenza forte* è vincolata a *quali* stati vengano fusi nell’operazione di trasmissione.

## Corollario (Accumulo di Collassi)

[Dimostrazione sintetica] Se in ogni passaggio  $L_\ell \rightarrow L_{\ell+1}$  (per  $\ell = 1, \dots, n-1$ ) esiste *almeno* un collasso su stati rilevanti, si *moltiplicano* le coppie  $(x_1, x_2)$  fuse in ogni livello intermedio. Ad ogni stadio, si genera almeno una proprietà emergente non riconducibile a un singolo predicato sul livello sottostante. Proseguendo fino a  $L_n$ , si ottiene un *cumulativo* insieme di proprietà “nuove” che distanziano sempre di più  $L_n$  dai dettagli micro iniziali.

## Osservazioni Conclusive sull’Apparato Dimostrativo

Le dimostrazioni appena esposte *ricollegano* la struttura multi-livello di RLA ai *classici risultati* dell’informatica teorica e alle *argomentazioni* sull’emergenza (Anderson, Rice, ecc.). L’elemento di *novità* risiede nell’aver *formalizzato*, in chiave insiemistica e di *riduzioni computazionali*, il *ruolo* delle funzioni di trasmissione (*non*) *iniettive* tra livelli, fornendo i lemmi e i corollari che descrivono *quando* i problemi indecidibili “risalgono” e *quando* invece le proprietà emergenti “trascendono” le distinzioni micro.

Nelle appendici successive, se presenti, si potranno approfondire *gli schemi* e le *tabelle* dei 15 livelli e i dettagli di protocolli sperimentali. Chi desiderasse ulteriori chiarimenti tecnici può contattare gli autori per code supplementari e data set relativi a eventuali simulazioni di RLA.

## Appendice B: Approfondimenti Tecnici per i Protocolli Sperimentali

In questa appendice, forniamo *dettagli tecnici* e linee guida per *allestire*, *misurare* e *verificare* i protocolli sperimentali richiamati nel corpo principale del paper (Sez. 6, 8). L'intento è offrire un riferimento operativo a chi desideri tradurre il framework delle *Reti Locali di Astrazione* (RLA) in sperimentazioni concrete, in particolar modo per *biologia sintetica*, *fisica computazionale* e *IA neurale*.

### Protocolli in Biologia Sintetica (DNA Computing)

#### 1) Setup di un Circuito DNA Turing-like.

- *Design molecolare*: Selezionare un set di filamenti di DNA in grado di rappresentare *stati* e *transizioni* di una Macchina di Turing ridotta (ad es. “2-state/3-symbol”).
- *Reazioni di ibridazione e taglio*: Integrare enzimi di restrizione, polimerasi e ligasi per consentire branching e loop di reazione. Vedi Winfree 1998; Benenson et al. 2001 per esempi di protocolli.
- *Verifica Turing-likeness*: Implementare un *benchmark* di problemi computazionali (p. es. piccole istanze di SAT o del problema dell'arresto in forma ridotta).

#### 2) Mappare il DNA sul Fenotipo Cellulare.

- *Trasferimento in cellule ingegnerizzate*: Inserire i costrutti di DNA computing via plasmidi o sistemi CRISPR.
- *Segnale fenotipico*: Progettare un “reporter” (fluorescenza, colorimetria) che *unisca* possibili differenze molecolari in un *output* fenotipico.
- *Misura del Collasso informativo*: Registrare se *diversi* filamenti iniziali producono *identico* output fenotipico, quantificando così la *non iniettività*.

#### 3) Testare l'Emergenza (A3) e la Trasmissione (A2).

- **Emergenza**: Verificare se, in presenza di collasso su stati Turing-centrali diversi, il fenotipo mostra una proprietà *non* deducibile dal semplice “insieme di filamenti” iniziali.

- **Indecidibilità trasmessa:** Nel caso la mappa cellulare *fosse* (quasi) iniettiva sugli stati di DNA computing, tentare di costruire un “decisore” cellulare. Se *fallisce*, si conferma la trasmissione dell’indecidibilità; se *riesce*, si produce un potenziale controesempio per A2.

#### 4) Analisi e Criteri di Convalida.

- *Coefficiente di Collasso:*  $CC = \frac{\text{N. di filamenti distinct} \rightarrow \text{stesso fenotipo}}{\text{N. totale filamenti}}$ .
- *Indice di Emergenza:*  $IE = \frac{\text{N. di proprietà fenotipiche non ricostruibili}}{\text{N. di proprietà fenotipiche misurate}}$ .
- Ripetere con diversi ceppi o condizioni, valutando *robustezza* dei risultati.

## Protocolli in Fisica Computazionale (Automi Cellulari e Coarse Graining)

### 1) Automa Cellulare Turing-like.

- *Scelta dell'automa:* Rule 110, Game of Life, o altri esempi con *universalità* dimostrata (Wolfram 2002).
- *Implementazione simulata:* Riprodurre in un software “fisico” con parametri di dimensione reticolare, regole di frontiera, ecc.

### 2) Passaggio a Parametri Termodinamici.

- *Definizione di  $\tau_{(AC \rightarrow \text{macro})}$ :* Operazione di *coarse graining* (ad es. sommare spin o conteggiare celle attive in blocchi).
- *Verifica della (non) iniettività:* Se *parecchie* configurazioni micro *diverse* confluiscono in uno stesso valore (T, P, magnetizzazione), quantificare il *collasso*.

### 3) Esperimenti/Simulazioni e Test di Indecidibilità

- *Halting Problem interno all'AC:* Porre in input all'AC una configurazione corrispondente a un problema di arresto.
- *Tentare* di “decidere” l’arresto esclusivamente dal macro-livello (T, P, ecc.). Se *impossibile*, si conferma l’ipotesi che la *non* iniettività abbia “bloccato” la trasmissione d’indecidibilità (A2), generando *emergenza* (A3).



4) **Possibili Controesempi per Collasso Parziale.** In alcuni casi di *coarse graining* ridotto, se *non* collassiamo tutti gli stati Turing-centrali, *parte* dell’indecidibilità può risalire. Monitorare questa situazione come test di *quasi-iniettività* limitata.

## Protocolli in IA Neurale (Reti Ricorrenti e Strati Cognitivi)

### 1) RNN con Potere Turing-like.

- *Selezione dell’architettura:* RNN ricorrenti con memoria potenzialmente illimitata, o “Neural Turing Machines” (Graves et al. 2016).
- *Definizione del “problema indecidibile”:* Una variante di Halting Problem simulata in ambiente neurale, con input che codifichino un “programma” e un “nastro” in forma di sequenze simboliche.

### 2) Mappa RNN $\rightarrow$ Cognizione (Strato di Interpretazione).

- *Pooling e Embedding:* Definire un layer di “interpretazione concettuale” (es. un modulo “cognizione astratta”) e specificare la funzione  $\tau_{(\text{RNN} \rightarrow \text{cog})}$ .
- *Valutare la (quasi)iniettività:* Se molti stati RNN *critici* vengono fusi in un unico concetto, siamo in regime *non* iniettivo.

### 3) Test di Trasmissione e Falsificazione A2.

- Tentare di implementare un “decisore cognitivo” che interpreti lo stato RNN e fornisca risposta su “arresto/non arresto.”
- Se la rete *mantiene* distinzione degli stati Turing-centrali, A2 prevede che *non* si possa costruire un decisore (pena contraddizione con indecidibilità).
- Se emergesse un *decisore funzionante*, ciò *falsificherebbe* la tesi (oppure mostrerebbe che la RNN *non* è veramente Turing-like).

### 4) Metriche di Collasso Neurale.

- *Overlap* fra rappresentazioni vettoriali: analizzare la dimensione degli spazi embeddings e quante configurazioni RNN vengono “mappate” in spazi di attivazione *simili* o identici.
- Utilizzare misure di *cosine similarity*, *KL-divergence* o entropie condizionate per valutare la perdita di distinzione micro.

## Indicazioni Generali di Validazione

**Ripetibilità e Scalabilità.** In tutti i contesti sperimentali, l'*obiettivo* è mostrare come la *funzione di trasmissione* micro→macro (*non*) *preservi* stati Turing-centrali o *fonda* differenze rilevanti. La *ripetibilità* degli esperimenti (ripetute runs in IA, più colture cellulari in biologia, più simulazioni in fisica) assicura la robustezza dei dati.

**Strumenti di Analisi Quantitativa.** Come discusso in Sez. 4.4, è possibile definire *coefficienti di collasso* e misure di *emergenza* (ad es. *IE*). A scopo di *pilot*:

- *CC* = “Frazione di stati micro distinti che convergono in un unico output macro.”
- *IE* = “Frazione di proprietà macro che non si riconducono a un predicato micro.”

Tali definizioni quantitative favoriscono confronti cross-disciplinari e stime di *quanto* emergenza o trasmissione limitino la *riduzione* micro→macro.

**Criteri di Falsificazione.** Ricordiamo che i test devono mirare a confutare A1, A2 o A3, in modo *diretto*:

- **A1:** Trovare un livello Turing-like che *risolva* l’Halting Problem.
- **A2:** Costruire un “decisore” a livello  $L_{i+1}$  *nonostante* la quasi-iniettività sugli stati Turing-centrali di  $L_i$ .
- **A3:** Mostrare una *non* iniettività (collasso) *senza* alcuna proprietà emergente irriducibile.

## Conclusione Appendice B

Le linee guida qui proposte *dettagliano* la *fase operativa* di RLA, indicando procedure per *costruire* e *misurare* le funzioni di trasmissione tra livelli micro e macro. Sebbene ogni *setup* presenti sfide sperimentali specifiche (risorse, stabilità biologica, potenza computazionale, ecc.), l’approccio RLA *invita* a sondare la natura (*non*) *iniettiva* di queste relazioni e a valutare *empiricamente* se indecidibilità e/o emergenza siano *effettivamente* verificate. Tali esperimenti potranno *corroborare* o *falsificare* i cardini della teoria (A1–A3), contribuendo a uno sviluppo condiviso e interdisciplinare del framework.

## Appendice C: Bozza di Metrica di Collasso e Indice di Emergenza

Un punto ricorrente nel corpo principale del paper (§4.4 e §15) è l’idea di definire *quantitativamente* il “grado di collasso informativo” e la “entità della novità macro” prodotta. Questa appendice propone una *bozza di formalizzazione* — ancora in via di sviluppo — per due grandezze fondamentali:

$$CC \quad (\text{coefficiente di collasso}), \quad IE \quad (\text{indice di emergenza}).$$

### Coefficiente di Collasso ( $CC$ )

**Definizione Generale.** Siano  $L_i$  e  $L_{i+1}$  due livelli contigui, e

$$\tau_{(i \rightarrow i+1)} : D(L_i) \longrightarrow \mathcal{P}(D(L_{i+1}))$$

la funzione di trasmissione. Consideriamo una *misura* di probabilità o frequenza  $p(x)$  sugli stati  $x \in D(L_i)$  (ossia, quanto spesso *compare* uno stato  $x$ ), e definiamo:

$$CC(\tau) = \sum_{x \in D(L_i)} p(x) \log\left(\frac{|\tau(x)|}{|\tau(D(L_i))|}\right),$$

dove:

- $|\tau(x)|$  indica la *cardinalità* del sottoinsieme di  $D(L_{i+1})$  in cui  $x$  è mappato,
- $|\tau(D(L_i))|$  è la cardinalità complessiva dell’immagine di  $\tau$ .

L’idea è mutuata da concetti entropici, valutando *quanto* la mappa  $\tau$  “schiaccia” i diversi stati micro in un *insieme più piccolo* di stati macro.

Per un esempio numerico concreto, prendiamo 5 stati micro con  $p(x_i) = 1/5$ . Se  $\tau(x_1) = \tau(x_2) = m_1$  e  $\tau(x_3) = \tau(x_4) = \tau(x_5) = m_2$ , l’entropia micro è  $\log_2(5) \approx 2.32$ , mentre l’entropia dell’immagine è  $\approx 0.971$ . Il coefficiente di collasso  $CC = 2.32 - 0.971 = 1.349$ . Se su 4 proprietà macro totali, 2 sono non riducibili a un singolo predicato su  $\{x_1, \dots, x_5\}$ , otteniamo un indice di emergenza  $IE = 2/4 = 0.5$ . Tali valori, pur in forma semplificata, illustrano come calcolare e confrontare le metriche di collasso ed emergenza (Sipser 2006).

### Interpretazione.

- Se la mappa  $\tau$  è *quasi-iniettiva* sugli stati  $C \subseteq D(L_i)$ , gran parte degli  $x \in C$  mappa in regioni distinte di  $D(L_{i+1})$ , facendo sì che  $CC(\tau)$  rimanga “basso” (i logaritmi di  $\frac{|\tau(x)|}{|\tau(D(L_i))|}$  si tengono contenuti).
- Se, viceversa, *molti* stati micro sono fusi in *pochi* stati macro,  $CC(\tau)$  *cresce* (nel senso che la mappa amplifica la *probabilità* di sovrapposizioni), indicando un collasso marcato.

Questa definizione è *una* bozza: si potrebbe raffinare sostituendo la cardinalità con *volumi* in spazi continui, o adottando un differente “peso logaritmico.”

### Indice di Emergenza ( $IE$ )

**Obiettivo.** Mentre  $CC$  misura *quanto* la trasmissione micro $\rightarrow$ macro *fonda* differenze, l'*Indice di Emergenza* ( $IE$ ) valuta *quanto* le proprietà macro risultano “nuove” e *non deducibili* da predicati su  $L_i$ .

**Proposta di Definizione.** Poniamo che  $P(L_{i+1})$  sia l'insieme delle *proprietà* (o “feature” misurabili) in  $L_{i+1}$ . Definiamo  $IE$  come:

$$IE = \frac{\#\{\text{proprietà emergenti non riducibili}\}}{\#\{\text{proprietà totali esaminate in } L_{i+1}\}}.$$

Una “proprietà emergente non riducibile” è *qualsiasi* feature di  $L_{i+1}$  che *non* si possa descrivere come un predicato  $P(x)$  *solo su*  $L_i$ . In altre parole, si tratta di una proprietà *generata* (parzialmente o totalmente) dalla fusione di stati micro, che sfugge a una definizione univoca *in*  $L_i$ .

### Esempio Operativo.

- In *biologia cellulare*, se analizzo 10 proprietà fenotipiche (morfologia, proteine espresse, velocità di crescita, ecc.), e scopro che 3 di queste non si ricavano univocamente da un unico pattern molecolare *prima del collasso*, allora  $IE = 3/10 = 0.3$ .
- In *fisica statistica*, analizzo 5 possibili parametri macro (T, P, magnetizzazione, entropia macroscopica, funzione di correlazione a lungo raggio). Se 2 non sono *ricostruibili* univocamente da microstati pre-collasso,  $IE = 2/5 = 0.4$ .

La sfida empirica è *distinguere* “veramente irriducibili” da “complessi ma riducibili,” richiedendo protocolli di verifica (vedi Appendice C).

## Limiti e Possibili Sviluppi

**Dipendenza dalla Misura e dalla Selezione di Proprietà.** La scelta di un “peso di probabilità”  $p(x)$  o di “quali proprietà macro si esaminano” può influenzare i valori di  $CC$  e  $IE$ . Potrebbero essere necessarie *convenzioni inter-disciplinari* per stabilire standard di misura (es. definire un protocollo comune in IA, fisica o biologia).

**Varianti Logaritmiche o Divergenze K-L.** Invece di  $\log\left(\frac{|\tau(x)|}{|\tau(D(L_i))|}\right)$ , un’alternativa è una *divergenza di Kullback–Leibler* tra la distribuzione “originale” degli stati micro e la distribuzione “fusa” degli stati macro. Ciò fornirebbe un concetto di “*distanza informativa*” tra  $L_i$  e  $L_{i+1}$ .

**Emergenza e Teorema 2.** Il *Teorema 2* afferma che, se si fonde almeno un paio di stati distinti, *esiste* una proprietà emergente.  $IE$  cerca di *quantificare quante* (o *quanto*) siano tali proprietà. In pratica, si devono testare *diverse* potenziali caratteristiche macro per stabilire quante “sfuggono” al riduzionismo micro.

**Integrazione con Category Theory.** In future ricerche, i “morfismi”  $\tau$  e le corrispondenti misure di collasso (mono vs. epi) potrebbero collegarsi a nozioni di “*limite colimit*” e “*equalizzatori*” in *Teoria di Categoria*. Uno *scenario* potrebbe definire un *funtore* che “componi” i passaggi  $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$  e valutarne la *perdita* di informazione come un *mancato isomorfismo* tra categorie.

## Conclusione Appendice C

L’adozione di un *coefficiente di collasso*  $CC$  e di un *indice di emergenza*  $IE$  fornisce un *primo spunto* per una *quantificazione* della (non) *iniettività* e della *novità macro*. Questi approcci restano a uno stadio embrionale e andranno calibrati a seconda dei contesti sperimentali (biologia, fisica, IA, scienze sociali). Cionondimeno, la possibilità di *misurare* il collasso e *stimare* l’emergenza in forme *numericamente comparabili* contribuirebbe a radicare la teoria RLA in una *dimensione* più solida e standard, favorendo confronti trasversali e ulteriori validazioni empiriche.

## References

- Adami, C., & LaBar, T. (2018). From entropy to information: Biased type selection and the evolution of complex life. *Entropy*, 20(12), 941.
- Aquinas, T. *Summa Theologiae*. (Opera sistematica originale; varie edizioni critiche dal XIII secolo. Edizioni moderne: Cambridge University Press, Blackfriars, ecc.)
- Anderson, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177(4047), 393–396.
- Awodey, S. (2010). *Category Theory* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Barendregt, H. (1984). *The Lambda Calculus: Its Syntax and Semantics* (Revised ed.). North-Holland.
- Barnes, J. (1982). *The Presocratic Philosophers*. Routledge.
- Benenson, Y., Paz-Elizur, T., Adar, R., Keinan, E., Livneh, Z., & Shapiro, E. (2001). Programmable and autonomous computing machine made of biomolecules. *Nature*, 414(6862), 430–434.
- von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller.
- Beresnev, I. & Lainscsek, C. (2021). Extending PDE meteorological models to unbounded domains. *Computational Environmental Sciences*, 5(2), 77–93.
- Berger, P. L., & Luckmann, T. (1966). *The Social Construction of Reality: A Treatise in the Sociology of Knowledge*. Anchor Books.
- Broad, C. D. (1925). *The Mind and its Place in Nature*. Routledge & Kegan Paul.
- Cardelli, L. (2005). *Brane Calculi: Interactions of Biological Membranes*. In A. Gordon (Ed.), *Computational Methods in Systems Biology* (pp. 257–280). Springer.
- Chalmers, D. J. (1996). *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*. Oxford University Press.
- Chomsky, N. (1956). Three models for the description of language. *IRE Transactions on Information Theory*, 2(3), 113–124.
- Church, A. (1936). An unsolvable problem of elementary number theory. *American Journal of Mathematics*, 58(2), 345–363.

- Dehaene, S., Changeux, J.-P., Naccache, L., Sackur, J., & Sergent, C. (2011). Conscious, preconscious, and subliminal processing: A testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 204–211.
- Descartes, R. (1984). *The Philosophical Writings of Descartes* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- Epstein, J. M., & Axtell, R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Brookings Institution Press.
- Faggin, F. (2021). *Silicon: From the Invention of the Microprocessor to the New Science of Consciousness*. Waterside Productions.
- Graves, A., Wayne, G., & Danihelka, I. (2016). Neural Turing Machines. *arXiv preprint arXiv:1410.5401*.
- Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38, 173–198.
- Golly: <http://golly.sourceforge.net/> (software open source per automi cellulari).
- Koestler, A. (1967). *The Ghost in the Machine*. Hutchinson.
- Kant, I. (1998). *Critique of Pure Reason* (The Cambridge Edition of the Works of Immanuel Kant). Cambridge University Press.
- Kim, J. (1999). Making sense of emergence. *Philosophical Studies*, 95, 3–36.
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1980). *Statistical Physics, Part 1* (3rd ed.). Pergamon Press.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- Lloyd, S. (2006). *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. Knopf.
- Magnasco, M. O. (1997). Chemical kinetics is Turing universal. *Physical Review Letters*, 78(6), 1190–1193.
- Minsky, M. (1988). *The Society of Mind*. Simon & Schuster.
- Mitra, A., & Stark, J. (2020). Multi-scale computational irreducibility in molecular automata. *Complex Systems*, 29(1), 1–18.

- Morin, E. (2008). *On Complexity*. Hampton Press.
- Morgan, C. L. (1923). *Emergent Evolution*. Henry Holt & Company.
- Noble, D. (2008). *The Music of Life: Biology Beyond Genes*. Oxford University Press.
- Paun, G. (2000). Computing with membranes. *Journal of Computer and System Sciences*, 61(1), 108–143.
- Polkinghorne, J. (1989). *Science and Providence: God's Interaction with the World*. New Science Library/Shambhala.
- Popper, K. R. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. Hutchinson.
- Ray, T. S. (1991). An approach to the synthesis of life. In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II*, SFI Studies in the Sciences of Complexity (Vol. X, pp. 371–408). Addison-Wesley.
- Rice, H. G. (1953). Classes of recursively enumerable sets and their decision problems. *Transactions of the American Mathematical Society*, 74(2), 358–366.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Searle, J. R. (1992). *The Rediscovery of the Mind*. MIT Press.
- Siegelmann, H. T., & Sontag, E. D. (1991). Turing computability with neural nets. *Applied Mathematics Letters*, 4(6), 77–80.
- Sipser, M. (2006). *Introduction to the Theory of Computation* (2nd ed.). Thomson Course Technology.
- Sperber, D. (1996). *Explaining Culture: A Naturalistic Approach*. Blackwell.
- Sutskever, I., Vinyals, O., & Le, Q. V. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. In *Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)* (pp. 3104–3112).
- Toffoli, T., & Margolus, N. (1987). *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*. MIT Press.
- Turing, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2(42), 230–265.



Winfree, E. (1998). *Simulations of Computing by Self-Assembly*. In *DNA Based Computers 2*, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science (pp. 213–242). American Mathematical Society.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.