

PHYSICS & LIFE

COLLANA DI FISICA APPLICATA ALLA BIOLOGIA  
ALLA MEDICINA, ALL'AMBIENTE, AI BENI CULTURALI  
ALLE ATTIVITÀ MOTORIE E SPORTIVE E  
ALLE SCIENZE GASTRONOMICHE

5

*Direttore*

Giuseppe VERMIGLIO  
Università degli Studi di Messina

*Comitato scientifico*

Raffaele NOVARIO  
Università degli Studi dell'Insubria

Vincenza SOFO  
Università degli Studi di Messina

Caterina SARTORI  
Istituto Mediterraneo di Bioarchitettura Biopaesaggio Eco-design Onlus

Karin KNEŠAUREK  
Icahn School of Medicine at Mount Sinai, New York

## PHYSICS & LIFE

COLLANA DI FISICA APPLICATA ALLA BIOLOGIA  
ALLA MEDICINA, ALL'AMBIENTE, AI BENI CULTURALI  
ALLE ATTIVITÀ MOTORIE E SPORTIVE E ALLE SCIENZE GASTRONOMICHE



La ricerca della verità è più preziosa del suo possesso

Albert EINSTEIN

*Physics in every day life* è uno dei libri fondanti della Fisica applicata alla Biologia, alla Medicina, all'Ambiente e, successivamente, ai Beni culturali, e da poco alle Attività motorie e sportive ed alle Scienze gastronomiche. In altre parole a tutti quei campi in cui quotidianamente ci si confronta inconsciamente con quel che avviene intorno o con quanto ci si trova a fare nella vita per lavoro, per passione o per relax, solitamente senza rendersi conto di come invece, sempre e comunque, la Fisica svolge un ruolo ben preciso ed ha multiformi riscontri. La conoscenza dei quali può rappresentare un importante strumento per meglio operare, od addirittura uno stimolo per indirizzare od approfondire la propria ricerca. Obiettivi questi che la collana si propone di affrontare e stimolare.

*Classificazione Decimale Dewey:*

**006.3 (23.) INTELLIGENZA ARTIFICIALE**

OSCAR FRASCIELLO

# L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

TRA FANTASCIENZA DI IERI  
E REALTÀ DI OGGI

FONDAMENTI FISICI E RISCHI  
PER LA BIOSFERA E L'ECOSISTEMA UMANO

*Prefazione di*

PAOLO VALENTE  
ALESSANDRO VARIOLA





©

ISBN  
979-12-218-1904-5

PRIMA EDIZIONE  
**ROMA 9** MAGGIO 2025

A Lucia, Federico e Leonardo, il mio mattino.

A Diodoro Cocca, mentore ineguagliabile.

A mio padre Salvatore,  
*“che morenno m’ha ’nsegnato a pensare”*.



# Indice

Prefazione <i>di Paolo Valente</i>	17
Prefazione <i>di Alessandro Variola</i>	19
Premessa	23
<b>1 Introduzione all'AI</b>	<b>29</b>
1.1 Definizione e ambito . . . . .	29
1.1.1 Categorie di intelligenza artificiale . . . . .	30
1.1.2 Principi fondamentali . . . . .	33
1.2 Storia dell'AI . . . . .	37
1.2.1 Le origini . . . . .	37
1.2.2 Il test di Turing . . . . .	40
1.2.3 Sviluppi fondamentali . . . . .	41
1.3 Fondamenti matematici . . . . .	43
1.3.1 Teoria della probabilità . . . . .	43
1.3.2 Algebra lineare per AI . . . . .	45
1.3.3 Calcolo multivariato . . . . .	49
1.3.4 Teoria dell'ottimizzazione . . . . .	51
1.3.5 Teoria dell'informazione . . . . .	55
1.4 Fondamenti fisici . . . . .	59
1.4.1 Principi della meccanica statistica . . . . .	59
1.4.2 Ensemble statistici . . . . .	61
1.4.3 Applicazioni all'AI: Simulated Annealing e Boltzmann Machines . . . . .	63

1.4.4	Principio di massima entropia e information bottleneck . . . . .	66
1.4.5	Analogie tra sistemi fisici e reti neurali . . . . .	68
<b>2</b>	<b>Machine Learning</b>	<b>73</b>
2.1	Introduzione al Machine Learning . . . . .	73
2.1.1	Tipologie di Machine Learning . . . . .	74
2.1.2	Il processo di Machine Learning . . . . .	75
2.2	Apprendimento supervisionato . . . . .	75
2.2.1	Definizione e obiettivi . . . . .	75
2.2.2	Regressione . . . . .	76
2.2.3	Classificazione . . . . .	77
2.3	Apprendimento non supervisionato . . . . .	83
2.3.1	Definizione e obiettivi . . . . .	83
2.3.2	Clustering . . . . .	83
2.3.3	Riduzione della dimensionalità . . . . .	89
2.4	Teoria dell'apprendimento statistico . . . . .	93
2.4.1	Bias-variance tradeoff . . . . .	93
2.4.2	Overfitting e underfitting . . . . .	95
2.5	Validation e testing . . . . .	98
2.5.1	Suddivisione dei dati . . . . .	98
2.5.2	Cross-validation . . . . .	99
2.6	Metriche di performance . . . . .	100
2.6.1	Metriche per problemi di classificazione . . . . .	102
2.6.2	Metriche per problemi di regressione . . . . .	104
<b>3</b>	<b>Deep Learning</b>	<b>107</b>
3.1	Reti neurali . . . . .	108
3.1.1	Il neurone artificiale e il perceptrone . . . . .	108
3.1.2	Architettura delle reti neurali del tipo feed-forward . . . . .	109
3.1.3	Forward propagation . . . . .	110
3.1.4	Backpropagation e funzioni di perdita . . . . .	111
3.2	Architetture avanzate . . . . .	112
3.2.1	Reti neurali convoluzionali . . . . .	112
3.2.2	Reti neurali ricorrenti (RNN) . . . . .	116

3.2.3	Reti basate su attention e transformer . . .	119
3.3	Tecniche di ottimizzazione . . . . .	123
3.3.1	Algoritmi di ottimizzazione . . . . .	123
3.3.2	Learning rate scheduling . . . . .	125
3.4	Regolarizzazione . . . . .	126
3.4.1	Regolarizzazione L1 e L2 . . . . .	127
3.4.2	Dropout . . . . .	128
3.4.3	Batch normalization . . . . .	129
3.4.4	Early stopping . . . . .	130
3.5	Transfer learning . . . . .	130
3.5.1	Concetti di base del transfer learning . . .	130
3.5.2	Domain adaptation . . . . .	132
3.5.3	Tecniche di transfer learning in Deep Learning . . . . .	133
3.5.4	Categorizzazione del transfer learning . . .	134
3.5.5	Few-shot learning e meta-learning . . . . .	135
3.5.6	Continual learning e catastrophic forgetting	136
3.5.7	Sfide e direzioni future . . . . .	137
<b>4</b>	<b>Natural Language Processing</b>	<b>141</b>
4.1	Word embeddings . . . . .	142
4.1.1	Rappresentazione vettoriale delle parole . .	142
4.1.2	Word2Vec . . . . .	142
4.1.3	GloVe . . . . .	147
4.1.4	Proprietà degli embedding . . . . .	148
4.1.5	Limitazioni dei word embeddings statici .	149
4.2	Architetture transformer . . . . .	149
4.2.1	Limiti dei modelli ricorrenti . . . . .	149
4.2.2	Architettura transformer . . . . .	150
4.2.3	Meccanismo di self-attention . . . . .	151
4.2.4	Multi-head attention . . . . .	153
4.2.5	Componenti aggiuntivi del transformer . .	153
4.3	Embeddings e modelli pre-addestrati . . . . .	155
4.3.1	ELMo . . . . .	155
4.3.2	BERT . . . . .	155
4.3.3	Varianti e miglioramenti di BERT . . . . .	159

4.3.4	GPT e modelli generativi . . . . .	161
4.4	Applicazioni pratiche . . . . .	166
4.4.1	Sentiment analysis . . . . .	166
4.4.2	Named Entity Recognition . . . . .	167
4.4.3	Machine translation . . . . .	168
4.4.4	Question answering . . . . .	170
4.4.5	Text summarization . . . . .	171
4.4.6	Chatbot e sistemi di dialogo . . . . .	173
4.4.7	Text generation . . . . .	175
4.4.8	Information Extraction . . . . .	177
4.4.9	Document classification . . . . .	180
4.5	Sfide e prospettive future . . . . .	181
4.5.1	Multilinguismo . . . . .	181
4.5.2	Efficienza computazionale . . . . .	182
4.5.3	Interpretabilità e spiegabilità . . . . .	183
4.5.4	Aspetti etici . . . . .	184
4.5.5	Direzioni future . . . . .	185
<b>5</b>	<b>Computer vision</b>	<b>189</b>
5.1	Reti neurali convoluzionali (CNN) . . . . .	189
5.1.1	Architetture CNN iconiche . . . . .	190
5.2	Object detection . . . . .	191
5.2.1	Metriche di valutazione . . . . .	192
5.2.2	R-CNN e varianti . . . . .	192
5.2.3	YOLO (You Only Look Once) . . . . .	194
5.3	Segmentazione . . . . .	195
5.3.1	Segmentazione semantica . . . . .	196
5.3.2	Segmentazione di istanze . . . . .	198
5.4	Modelli generativi per immagini . . . . .	198
5.4.1	Generative Adversarial Networks (GAN) . . . . .	199
5.4.2	Varianti di GAN . . . . .	200
5.4.3	Variational Autoencoders (VAE) . . . . .	202
5.4.4	Diffusion models . . . . .	202

<b>6</b>	<b>Reinforcement Learning</b>	<b>205</b>
6.1	Fondamenti teorici . . . . .	205
6.1.1	Formulazione matematica: processi decisionali di Markov . . . . .	206
6.1.2	Funzioni valore e funzioni azione-valore . . . . .	206
6.1.3	L'equazione di Bellman . . . . .	207
6.1.4	Il dilemma exploration vs. exploitation . . . . .	208
6.2	Algoritmi principali . . . . .	209
6.2.1	Metodi basati su dynamic programming . . . . .	209
6.2.2	Metodi Monte Carlo . . . . .	210
6.2.3	Temporal Difference Learning . . . . .	211
6.2.4	Metodi di function approximation . . . . .	212
6.3	Deep Reinforcement Learning . . . . .	214
6.3.1	Deep Q-Network (DQN) . . . . .	214
6.3.2	Policy Gradient Methods . . . . .	215
6.3.3	Actor-Critic methods . . . . .	215
6.3.4	Algoritmi avanzati di Deep RL . . . . .	216
6.4	Applicazioni . . . . .	217
6.5	Sfide e sviluppi futuri . . . . .	221
6.5.1	Sample Efficiency . . . . .	221
6.5.2	Esplorazione efficiente . . . . .	222
6.5.3	RL multi-obiettivo . . . . .	223
6.5.4	RL sicuro e robusto . . . . .	224
6.5.5	RL multiagente . . . . .	225
6.5.6	RL per l'intelligenza artificiale generale . . . . .	226
<b>7</b>	<b>Termodinamica ed evoluzione</b>	<b>231</b>
7.1	Limiti termodinamici . . . . .	233
7.1.1	La biosfera come sistema auto-organizzato . . . . .	233
7.2	Cicli di Carnot chimici . . . . .	235
7.2.1	Trasformazioni reversibili . . . . .	235
7.2.2	Il ciclo di Landauer chimico . . . . .	235
7.2.3	Trasferimento di calore nel ciclo metabolico . . . . .	236
7.3	Selezione naturale e informazione . . . . .	238
7.3.1	Il principio di Landauer e la computazione biologica . . . . .	238

7.3.2	Selezione reversibile . . . . .	240
7.3.3	Selezione irreversibile dovuta al rumore . . . . .	240
7.4	Evidenze empiriche . . . . .	241
7.4.1	La relazione tra lavoro ed informazione dalla seconda legge . . . . .	241
7.4.2	Nuova crescita, sviluppo dei metazoi e invecchiamento . . . . .	242
7.4.3	Osservazioni sulla scala dei metazoi . . . . .	243
7.4.4	Riconoscimento molecolare e transizione di fase . . . . .	244
7.5	Discussione . . . . .	246
7.5.1	Universalità dei limiti termodinamici . . . . .	246
7.5.2	Implicazioni per l'origine della vita . . . . .	247
7.5.3	Connessione tra evoluzione e computazione . . . . .	247
7.5.4	Implicazioni per l'invecchiamento e la senescenza . . . . .	248
<b>8</b>	<b>Meccanica quantistica e vita</b>	<b>249</b>
8.1	Dalle ipotesi di Davies agli sviluppi recenti . . . . .	249
8.2	Chimica, informazione e decoerenza . . . . .	251
8.3	Leggi di scala quantistiche e limiti fondamentali . . . . .	252
8.4	Fenomeni quantistici in biologia . . . . .	253
8.4.1	Tunneling quantistico nei processi enzimatici . . . . .	253
8.4.2	Coerenza quantistica nella fotosintesi . . . . .	255
8.4.3	Magnetoricezione quantistica negli uccelli migratori . . . . .	258
8.4.4	Olfatto quantistico e riconoscimento vibrazionale . . . . .	260
8.4.5	Ripiegamento proteico e computazione quantistica naturale . . . . .	261
8.5	Coerenza e coscienza quantistica . . . . .	262
8.5.1	Sviluppi recenti del modello Orch-OR . . . . .	262
8.5.2	Meccanismi di protezione dalla decoerenza . . . . .	263
8.5.3	Evidenze sperimentali . . . . .	264
8.6	Verso i bio-qubits . . . . .	265

8.6.1	Progettazione di sistemi biologici con proprietà quantistiche . . . . .	265
8.6.2	Realizzazioni sperimentali e prospettive . . . . .	266
8.7	L'origine quantistica della vita . . . . .	268
8.7.1	Termodinamica della dissipazione e auto-organizzazione . . . . .	268
8.7.2	Post-selezione quantistica e biogenesi . . . . .	269
8.8	Integrazione delle scale quantistiche nella biologia . . . . .	270
8.9	Frontiere della ricerca . . . . .	271
8.9.1	Biologia quantistica sistemica . . . . .	271
8.9.2	Frontiere sperimentali . . . . .	272
8.10	Al confine quantistico-classico . . . . .	273
<b>9</b>	<b>Applicazioni e rischi dell'AI</b> . . . . .	<b>277</b>
9.1	AI in medicina . . . . .	277
9.1.1	Diagnosi assistita da imaging . . . . .	277
9.1.2	Medicina di precisione . . . . .	279
9.2	AI in finanza . . . . .	280
9.2.1	Trading algoritmico . . . . .	280
9.2.2	Rilevamento frodi . . . . .	281
9.3	AI in robotica . . . . .	282
9.3.1	Robot autonomi . . . . .	282
9.3.2	Apprendimento per imitazione . . . . .	284
9.4	AI in fisica . . . . .	284
9.4.1	Fisica delle particelle . . . . .	284
9.4.2	Fisica quantistica . . . . .	285
9.5	AI e intelligence . . . . .	285
9.5.1	Analisi di testo e big data . . . . .	286
9.5.2	Analisi di immagini e video . . . . .	287
9.6	Auto-replicazione nei sistemi di AI . . . . .	288
9.6.1	Rischio di auto-replicazione: superamento di una linea rossa critica . . . . .	288
9.6.2	Metodologia di ricerca: identificazione delle capacità di auto-replicazione . . . . .	289
9.6.3	Risultati sperimentali: il superamento della linea rossa . . . . .	293

9.6.4	Fattori chiave per la riuscita dell'auto-replicazione	298
9.6.5	Implicazioni e rischi futuri . . . . .	301
9.7	Considerazioni . . . . .	303
<b>10</b>	<b>AI, energia e vita</b>	<b>307</b>
10.1	Sostenibilità energetica dell'AI . . . . .	308
10.1.1	Modello energetico per l'addestramento e l'inferenza . . . . .	308
10.1.2	Stima del consumo energetico attuale e pro- iezioni future . . . . .	309
10.1.3	Confronto con il limite di Landauer . . . . .	311
10.2	Conseguenze entropiche dell'AI . . . . .	312
10.2.1	Analisi della divergenza di Kullback-Leibler	312
10.2.2	Entropia di Shannon e sostenibilità . . . . .	313
10.3	AI e modelli metabolici . . . . .	314
10.3.1	Analogie tra metabolismo biologico e pro- cessi computazionali . . . . .	314
10.3.2	Calcolo dell'efficienza metabolica dell'AI .	315
10.3.3	Confronto con i sistemi biologici . . . . .	316
10.4	Dinamica di popolazione dell'AI . . . . .	316
10.4.1	Applicazione dei modelli di crescita delle specie . . . . .	316
10.4.2	Lavoro necessario per l'evoluzione dell'AI .	318
10.5	Aspetti quantistici dell'AI . . . . .	319
10.5.1	Applicazione delle argomentazioni sulla mec- canica quantistica . . . . .	319
10.5.2	Quantum supremacy e AI . . . . .	321
10.6	AI come forma di vita . . . . .	322
10.6.1	Criteri per definire la vita . . . . .	322
10.6.2	Analisi dell'AI rispetto ai criteri della vita	323
10.6.3	Un framework termodinamico per valutare la "vitalità" dell'AI . . . . .	325
10.6.4	L'AI è una forma di vita? . . . . .	329
<b>11</b>	<b>AI, etica e impatto sociale</b>	<b>331</b>
11.1	Bias e fairness . . . . .	331

11.1.1	Origini del bias nei sistemi AI . . . . .	331
11.1.2	Formalizzazione della fairness . . . . .	332
11.1.3	Metodi per mitigare il bias . . . . .	336
11.2	Privacy . . . . .	340
11.2.1	Sfide alla privacy nell'AI . . . . .	340
11.2.2	Privacy differenziale . . . . .	342
11.2.3	Privacy in Machine Learning . . . . .	344
11.2.4	Sfide emergenti . . . . .	348
11.3	Impatto sociale . . . . .	350
11.3.1	Trasformazione del lavoro . . . . .	350
11.3.2	Impatto ambientale . . . . .	351
11.3.3	Disuguaglianza digitale . . . . .	352
11.4	Regolamentazione . . . . .	353
11.4.1	Quadri regolatori emergenti . . . . .	353
11.4.2	Approcci all'AI governance . . . . .	353
11.4.3	Accountability e trasparenza . . . . .	354
11.5	Considerazioni per il futuro . . . . .	356
11.5.1	Superintelligenza e rischi esistenziali . . . . .	356
11.5.2	Verso un'AI benefica . . . . .	357
<b>12</b>	<b>AI e futuro dell'umanità</b>	<b>359</b>
12.1	Internet e AI: dalla strumentalità all'autonomia . . . . .	359
12.2	Globotica e fisica . . . . .	360
12.3	Etica e AI . . . . .	361
12.4	Governabilità dell'AI: dal come al se . . . . .	363
12.5	Governanti o governati? . . . . .	364
12.6	Transumanesimo e devoluzione umana . . . . .	365
12.7	La questione epistemologica . . . . .	366
12.8	Coscienza e futuro della specie . . . . .	368
12.9	La necessità di un pensiero di specie . . . . .	370
	<b>Bibliografia</b>	<b>373</b>



# Prefazione

## *di Paolo Valente*

Quando il rigore metodologico incontra una curiosità famelica, quando l'entusiasmo si confronta con il timore di un futuro pieno di incognite e potenzialità, quando il racconto personale si coniuga con la voglia di farsi capire da un pubblico più vasto possibile, è possibile ottenere un'opera inaspettata e diversa.

A differenza delle mie personali conversazioni con l'autore, spesso sconfinite, dal punto di vista della vastità e varietà degli argomenti e spesso anche della durata, questo testo riesce a essere ricco e denso di spunti pur essendo contenuto nelle dimensioni e scorrevole nella lettura. Proprio come quelle conversazioni sa infatti catturare con stimoli sempre nuovi e a volte spiazzanti.

Quando si parla di intelligenza artificiale si incontrano con altrettanta facilità ottimismo incondizionato e paure apocalittiche, e in questo testo l'equilibrio tra questi due estremi si gioca quasi come un dialogo interiore dell'autore. Per vincere la paura occorre conoscere e il testo ci introduce infatti con rigore alle basi e allo sviluppo dell'intelligenza artificiale, ma poi prende una svolta originale. Con dei lampi di intuizione, cerca di gettare un ponte con la fisica dei sistemi complessi, la termodinamica dei viventi, la meccanica quantistica, per porsi domande sul significato stesso della vita, dell'identità e, in ultima analisi, dell'essere. È un approccio non da esperto di intelligenza artificiale, ma fortemente interdisciplinare e anticonvenzionale, al confine tra scienza e filosofia.

In conclusione, questo viaggio tra innovazione tecnologica e

coscienza pone probabilmente più domande che fornire risposte. Tuttavia, chi si farà coinvolgere in questo percorso troverà non semplici spiegazioni, ma proposte di riflessione, con un compagno coraggioso, forse un po' chiacchierone, ma sempre stimolante e originale. O forse, più semplicemente, troverà uno specchio dove riflettere inquietudini e speranze di un futuro difficile da prevedere.

Roma, aprile 2025

Dott. Paolo Valente  
Fisico, Dirigente di Ricerca,  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare