

# Informatica e Logica della Scoperta

Mario Alai  
Liceo Scientifico "A. Righi", Cesena  
Via Curiel 41  
47023 Cesena,  
alai@criad.unibo.it

## SOMMARIO

*La questione, assai dibattuta dagli epistemologi, se esista o no una logica della scoperta scientifica, troverebbe automaticamente una risposta positiva se si costruissero programmi informatici in grado di compiere scoperte. E' quanto hanno tentato di fare, con incoraggianti risultati, sia il gruppo di H. Simon, sia gli studiosi della tradizione di A. Turing. Ai programmi informatici manca però capacità di individuare autonomamente i metodi e le direzioni di ricerca, capacità che invece caratterizza i più brillanti scopritori umani. Per questo nessun programma ha compiuto finora, né parrebbe poter compiere in futuro, nuove scoperte di carattere teorico. Si argomenta tuttavia che ciò non esclude l'esistenza né di una logica della scoperta, né di una basilare analogia tra procedimenti mentali e procedimenti informatici.*

## 1. La logica della scoperta

Esiste una logica della scoperta scientifica? Il processo di scoperta è irrazionale, dipendente da convinzioni arbitrarie, caso e fortuna, o razionale? Se poi è razionale, obbedisce solo ad una sorta di genialità intuitiva, o a una logica discorsiva e argomentativa? E se segue una logica, quest'ultima può esser formalizzata in regole esplicite? E può dar luogo ad algoritmi che conducano automaticamente all'obiettivo?

Da sempre gli epistemologi sono divisi su tali questioni. Sia Francesco Bacone sia John Stuart Mill hanno creduto nell'esistenza di una logica della scoperta, identificata con la logica induttiva e guidata da regole e strumenti metodologici: per Bacone, in particolare, le tavole della presenza, dell'assenza e dei gradi, e per Mill i canoni della concordanza, della differenza, dei residui e delle variazioni, che attraverso il confronto di analogie e disanalogie dei fenomeni permetterebbero di scoprirne le cause.<sup>1</sup>

Anche Peirce, alla fine del secolo scorso, e Hanson, nel nostro, hanno creduto a una logica della scoperta, da non identificarsi però con la logica induttiva (considerata, come quella deduttiva, un aspetto della giustificazione), ma con la logica *abduttiva*. Si tratterebbe cioè del tipo di logica per cui, ad esempio, se constatiamo un fenomeno sorprendente  $F$ , e se riflettiamo che qualora valesse l'ipotesi  $H$ ,  $F$  risulterebbe spiegato, possiamo concludere che  $H$  è probabilmente vera.<sup>2</sup> A sua volta Imre Lakatos, discepolo di Popper, ha sostenuto l'esistenza di potenti strategie euristiche, dettate da quelle che sono le opzioni fondamentali (o "nucleo") dei programmi di ricerca scientifici.<sup>3</sup>

I neopositivisti, al contrario, non credevano a regole che ci possano guidare nella scoperta: ipotesi e teorie vertono infatti su entità non osservabili, come elettroni, forze, virus, ecc., sicché

<sup>1</sup> Vedi [1], pp.545-795 e [15].

<sup>2</sup> Vedi [17], vol. V p.117, vol. VI p.358, vol. VII p.122, e [10], pp.104-112.

<sup>3</sup> Vedi [12].

non possono esser derivate dai dati osservabili, ma sono *inventate* per spiegarli. Se tali regole esistessero, del resto, problemi lungamente studiati, come quello delle cause del cancro, sarebbero ormai da tempo risolti. L'invenzione delle ipotesi può esser dovuta al genio, alla fatalità o alla fortuna, come nel caso leggendario della mela di Newton, o in quello storico del chimico Kekulé, che ebbe l'idea della struttura ad anello della molecola di benzolo vedendo in sogno dei serpentelli che si mordevano la coda. Ma dal punto di vista epistemologico, non interessa tanto l'*origine* dell'ipotesi (ciò che riguarda semmai lo storico o lo psicologo), quanto la sua *giustificazione*; e il processo della giustificazione, per l'appunto, a differenza di quello della scoperta, ammette una logica rigorosa, la cui indagine costituisce il compito dell'epistemologo.<sup>4</sup>

Molto simile la posizione di Popper: anche se la scienza è essenzialmente una ricerca della verità, quest'ultima ci è nascosta, e non vi sono fonti, regole o vie che ne garantiscano la scoperta. Leggi e teorie non sono che ipotesi, congetture, ragionati tentativi d'indovinare, e la logica può guidarci, al massimo, alla scoperta della loro falsità.<sup>5</sup> Per Feyerabend, addirittura, non si danno regole di alcun genere, e l'idea stessa di un metodo scientifico è da respingere: qualunque metodo può andar bene qualche volta, nessun metodo può andar bene ogni volta.<sup>6</sup>

## 2. I programmi di Simon

In questo dibattito l'intelligenza artificiale si è inserita da ultima, ma già con la pretesa di portarvi una parola decisiva. Ipotesi di base dell'intelligenza artificiale è che il funzionamento della mente umana sia essenzialmente analogo a quello di una macchina calcolatrice, e quindi che tutte le funzioni mentali siano riproducibili meccanicamente.<sup>7</sup> Se è così, anche il processo di scoperta dovrebbe esser riproducibile dalle macchine attraverso appositi programmi informatici; ma se è riproducibile da una macchina, significa che segue un algoritmo; se segue un algoritmo ha una logica, e se ha una logica è un processo razionale.

Tra i pionieri dell'informatica applicata alla scoperta scientifica sono il premio Nobel Herbert Simon, logico, economista ed epistemologo, ed il suo gruppo, autori di un programma significativamente chiamato *Bacon*.<sup>8</sup> Il programma era costruito ad imitazione dei procedimenti psicologici della mente umana, impiegando regole come le seguenti:

1. Se trovi che una grandezza ha valore costante, inferisci che essa mantenga sempre quel valore.
2. Se trovi che i valori di due grandezze crescono insieme, vedi se il rapporto tra essi è costante.
3. Se trovi che i valori di una grandezza crescono al diminuire dell'altra, vedi se il loro prodotto è costante.

(Strettissima, come si nota, è l'analogia col principio di uniformità della natura di Newton e Mill e coi metodi induttivi di Bacone e Mill, specie con quelli dei gradi e delle variazioni concomitanti).

Apparentemente, *Bacon* ebbe successo, riuscendo a riscoprire la legge di Boyle (secondo cui il prodotto della pressione e del volume di un gas è costante), la terza legge di Keplero (secondo cui il quadrato del periodo di rivoluzione di un pianeta è proporzionale al cubo della sua

<sup>4</sup> Vedi ad es. [11], pp. 25-36.

<sup>5</sup> Vedi [18].

<sup>6</sup> Vedi [7].

<sup>7</sup> Vedi [19], pp. 78-80. Altri titoli recenti, utili per orientarsi in queste tematiche assai complesse ed oggetto di una vasta letteratura, sono [2], [3], [5], [9], e [21].

<sup>8</sup> Vedi [13].

distanza media dal sole), e la legge di Galileo sulla caduta dei gravi (secondo cui l'accelerazione è costante e la velocità proporzionale al tempo trascorso dall'inizio del moto).

In realtà, l'importanza di questi risultati è limitata dal fatto che si tratta di leggi puramente empiriche e non esplicative. *Bacon* parte cioè da un corpo di dati e ne ricerca i rapporti costanti, senza scoprire parametri o concetti che non vi siano già implicati, e senza rapportarli ad una diversa e più profonda descrizione della realtà. In questo modo, non è in grado di *scoprire le cause*, ossia di *spiegare* le regolarità che gli sono sottoposte, ciò che invece caratterizza le scoperte più importanti ed ammirevoli, come quella della gravitazione universale o dei quanti d'energia, dell'ossigeno o del DNA.

Simon e il suo gruppo non si sono però fermati qui, producendo programmi via via più avanzati, come cinque nuove versioni di *Bacon* ed i programmi *Glauber*, *Stahl* e *Dalton*.<sup>9</sup> Oltre a impiegare euristiche sempre più potenti, questi programmi sono in grado di utilizzare ciascuno le scoperte dei precedenti come dati per le proprie ricerche. *Bacon<sub>4</sub>*, ad esempio, strutturato per cercare i divisori comuni, partendo dai dati sulla distanza e sulla forza elabora il concetto di massa gravitazionale, e ritrova la legge di gravitazione; oppure, partendo dalle temperature e dalle masse, calcola il calore specifico e scopre la legge di Black. *Glauber* cerca di costruire classi, e nell'analisi delle reazioni chimiche arriva a concetti come quelli degli acidi, dei sali e degli alcali. *Dalton* costruisce veri e propri modelli strutturali, come la teoria atomica della materia, anche se per farlo ha bisogno che gli si forniscano le nozioni di atomo e di molecola.

Questi programmi non scoprono dunque delle pure regolarità empiriche, ma vere e proprie leggi teoriche, ipotizzando strutture sottostanti ai dati, in grado di causare e spiegare i fenomeni osservabili. Per farlo, tuttavia, essi devono sapere a priori *cosa* e *come* cercare, una conoscenza che naturalmente manca ai ricercatori in carne ed ossa. Proprio l'individuazione delle giuste direzioni di ricerca è anzi solitamente l'aspetto più arduo di una scoperta; non sorprende, pertanto, che nessuno di questi programmi abbia compiuto alcuna *nuova* scoperta, o fornito conoscenze di utilità pratica. E' dunque ancor poco quel che essi ci dicono sulla meccanizzabilità della ricerca e sull'esistenza di una logica della scoperta scientifica.

### 3. I programmi della tradizione di Turing

Una tradizione di ricerca differente è quella degli allievi di Alan Turing, logico, matematico e pioniere dell'informatica. Secondo quanto spiega Donald Gillies,<sup>10</sup> la tradizione di Turing si differenzia da quella di Simon per un approccio *logico* e non *psicologico*: essa non cerca cioè di riprodurre le inferenze umane, informali e intuitive, ma utilizza esclusivamente procedimenti logici formalizzati; i suoi programmi sono infatti formulati in *Prolog*, il linguaggio che trascrive il calcolo dei predicati e delle relazioni.

Questa caratteristica rende il metodo di ricerca più flessibile e generale, in quanto più "meccanico", e se vogliamo anche più "stupido": nessuna persona intelligente ragionerebbe in tal modo, anzitutto perché le conoscenze di sfondo ci permettono di scegliere, per ogni contesto, strumenti più potenti da aggiungere al puro calcolo dei predicati; e poi perché con quei metodi la soluzione anche dei più semplici problemi richiederebbe tempi insostenibilmente lunghi. Ma i programmi informatici possono sfruttare la rapidità del *computer* nel compiere confronti ed inferenze, e le loro meccaniche *routine* si sono già dimostrate di utilità pratica, ad esempio nella costruzione dei *sistemi esperti*.

I sistemi esperti sono programmi che racchiudono la competenza dell'esperto umano in un determinato settore, in grado all'occorrenza di sostituirlo. Essi sono però tutt'altro che facili da costruire: in anni ed anni di esperienza, gli specialisti acquistano raffinate abilità pratiche (come l'abilità nel compiere diagnosi mediche, nel controllare l'invecchiamento di un formaggio, o nel

<sup>9</sup> Su Bacon e su tutti questi sviluppi successivi, vedi [14].

<sup>10</sup> In [8].

valutare la qualità delle mescole in metallurgia), che essi non riescono però a trasmettere ad altri in modo esplicito e completo per mezzo di spiegazioni o regole da seguire. Per tradurre tali capacità in regole esplicite incorporabili nei sistemi esperti si è dunque tentato di sottoporre gli specialisti a lunghe e sistematiche interviste con personale qualificato; ben presto ci si è tuttavia resi conto che ciò richiedeva tempi eccessivamente lunghi, senza peraltro dare risultati sufficientemente affidabili. Questo *collo di bottiglia*, come lo chiama Feigenbaum,<sup>11</sup> è stato finalmente superato grazie a programmi costruiti per ricavare induttivamente le regole volute. In medicina, ad esempio, un simile programma può confrontare migliaia di diagnosi positive e negative di una malattia coi rispettivi sintomi, ricavandone le numerose e complesse regole in cui si compendia la capacità di effettuare la diagnosi esatta. Il primo sistema esperto così costruito, *Mycin*, constava di oltre 400 regole del tipo della seguente:

Regola 85. SE:

1. la localizzazione della coltura è il sangue, e
2. la configurazione dell'organismo è gramnegativa, e
3. la morfologia dell'organismo è a bastoncino, e
4. il paziente ospitante è a rischio,

ALLORA: ci sono indicazioni probanti (0,6) che l'identità dell'organismo sia *Pseudomonas aeruginosa*.<sup>12</sup>

Ancora una volta appare chiara l'analogia con l'induzione baconiana e milliana, in particolare con la tavola della presenza e il canone della somiglianza (sintomi connessi alle diagnosi positive), e la tavola dell'assenza e il canone della differenza (sintomi connessi alle diagnosi negative).

Questa efficacia nella ricerca induttiva ha permesso a *Golem*, un programma della tradizione di Turing, di risolvere un problema che per una trentina d'anni aveva eluso gli sforzi dei biologi molecolari: quello di ricostruire la struttura tridimensionale delle proteine a partire dalla sequenza degli aminoacidi. Le regole ricavate da *Golem* erano di questo tipo:

Regola 12

C'è un residuo  $\alpha$ -elica nella proteina A alla posizione B se:

1. il residuo in B-2 non è prolina,
2. il residuo in B-1 non è né aromatico né prolina,
3. il residuo in B è grande, non aromatico e non lisina,
4. il residuo in B+1 è idrofobico e non lisina,
5. il residuo in B+2 non è né aromatico né prolina,
6. il residuo in B+3 non è né aromatico né prolina, e o piccolo o polare, e
7. il residuo in B+4 è idrofobico e non lisina.<sup>13</sup>

Poiché tali regole non erano precedentemente note, e costituiscono la soluzione di un serio problema scientifico, si può ammettere che *Golem* abbia scoperto delle *nuove* leggi di natura. Da questo punto di vista, la tradizione di Turing segna indubbiamente un punto di vantaggio su quella di Simon.

Anche qui vanno tuttavia sottolineati due limiti evidenti. In primo luogo, regole come quelle appena trascritte non sono altro che generalizzazioni empiriche, come quelle prodotte dalla prima versione di *Bacon*: semplici correlazioni tra proprietà date, senza spiegazioni e senza la scoperta di nuove proprietà. In secondo luogo, anche questi programmi, come quelli di Simon,

---

<sup>11</sup> Vedi [6], citato in [8], p. 34.

<sup>12</sup> [8], p.33; cfr. [4].

<sup>13</sup> [8], p. 64; cfr. [16], p. 655.

richiedono ampie conoscenze di sfondo ed orientamenti preliminari, ed in particolare di sapere quali proprietà analizzare e con quali proprietà correlarle.

#### 4. Alcune valutazioni

Così stando le cose, sembrerebbe di poter concludere che le macchine non possono, da sole, scoprire alcunché, dato che ogni scoperta richiede orientamenti e conoscenze di sfondo, e queste non possono provenire che dall'uomo. La scoperta non può dunque venir meccanizzata, la ricerca non ha una logica, e la mente non si può assimilare a una macchina.

Si tratterebbe però di una conclusione affrettata. Anzitutto, infatti, da questo punto di vista non viene meno l'analogia tra menti e macchine, poiché nemmeno le persone possono compiere scoperte senza orientamenti preliminari e conoscenze di sfondo. E' pur vero che le persone sono in grado di trovare esse stesse i corretti orientamenti e distinguere le informazioni di sfondo rilevanti, ma nulla vieta che, in condizioni appropriate, anche le macchine possano arrivare a queste basi del processo di scoperta tramite un procedimento preliminare ed altrettanto meccanico; anche questo richiederebbe naturalmente presupposti e conoscenze di sfondo, che però potrebbero esser frutto di un procedimento precedente, e così via. Nulla impedisce cioè di pensare che ogni scoperta possa esser ottenuta meccanicamente, e che l'intelligenza sia rappresentabile come una catena di procedimenti meccanici, l'uno a base dell'altro.

Si potrebbe anche obiettare che gli orientamenti e le conoscenze di sfondo su cui si basano le persone non sempre bastano a indirizzare univocamente tutte le mosse della ricerca; al contrario, spesso lasciano aperte opzioni alternative, tra le quali sono l'intuito, il caso o la fortuna che s'incaricano di scegliere: di qui il peso che tali fattori hanno nell'effettiva storia delle scoperte (ed anche delle mancate scoperte, naturalmente!)

Ma di nuovo, ciò non significa che la scoperta non sia meccanizzabile, perché nemmeno nei programmi di ricerca ad ogni passaggio del procedimento la posizione successiva viene individuata immediatamente ed univocamente. In molti casi la scelta avviene per *tentativi ed errori* (un processo che può essere anche assai lungo, ma il computer è in grado di esaurire in tempi accettabili): l'ordine dei tentativi può allora esser determinato arbitrariamente, o lasciato al caso, poiché quel che conta è solo il controllo che viene poi svolto sulla riuscita o meno di ciascun tentativo, proprio come nel metodo popperiano *delle congetture e confutazioni*. Allo stesso modo, che il processo della scoperta non sempre conduca a conclusioni certe ed univoche non significa che non sia un processo logico: da un lato, infatti, l'inferenza logica non è sempre certa (non lo è nella logica induttiva), e dall'altro la conclusione non è sempre una proposizione categorica, ma può essere una disgiunzione di diverse alternative, anche assai numerose.

Ancora, se si afferma che sono il genio o l'intuito dello scienziato a decidere tra le opzioni che restano aperte a ciascun passaggio della ricerca, ciò significa che tale decisione ha caratteri di razionalità (dopo tutto, non chiamiamo geniale un ricercatore che sia semplicemente fortunato, e non parliamo di intuito per qualcuno in possesso di doti medianiche, ma appunto, per qualcuno dotato di profonda razionalità). Inoltre, anche se al momento possiamo non essere in grado di analizzare tale razionalità in regole esplicite, non è escluso che lo si possa fare in seguito con ulteriori dati a disposizione e più raffinati strumenti di analisi.

La recente storia della scienza ha mostrato che non vi sono metodi o criteri di razionalità accettati in tutte le epoche, ed alcuni epistemologi (primo fra tutti Feyerabend) ne hanno tratto la conclusione che non v'è un metodo scientifico, e che agli scienziati non si debba richiedere l'osservanza di alcuna regola o criterio. Dudley Shapere ha però argomentato che la mancanza di un metodo universalmente ed eternamente applicabile non significa che in ciascuna epoca non sia possibile individuare criteri in base ai quali distinguere tra decisioni razionali e irrazionali, tra buona e cattiva scienza. Infatti è solo alla luce dell'insieme delle nostre conoscenze, ed in particolare di ciò che sappiamo dalle più avanzate ricerche scientifiche, che in ciascun momento

possiamo decidere quali siano i presupposti che è razionale accettare, i metodi più fruttuosi, le prescrizioni cui attenerci. Il progresso stesso della scienza e l'evolversi della nostra conoscenza di sfondo conducono quindi in modo assai naturale ad un'evoluzione dei presupposti, criteri e metodi della ricerca. Ma non v'è dubbio che in ciascun'epoca sarebbe irrazionale non attenersi ai migliori criteri al momento disponibili.<sup>14</sup>

Tutto ciò si applica naturalmente anche al problema della logica della scoperta: possiamo ammettere che sia guidata da regole, pur riconoscendo che esse non ci sono date a priori, poiché con l'allargarsi e l'approfondirsi delle nostre conoscenze si evolve e migliora anche la nostra comprensione delle regole e dei criteri da seguire. Addirittura, data la fortissima specializzazione della ricerca, si può pensare che solo quei pochi scienziati che padroneggiano tutte le più avanzate conoscenze in un certo settore siano in grado di procedere secondo i migliori criteri di razionalità.

Questo potrebbe allora riconciliare l'idea che il processo di ricerca è razionale e guidato da regole, col fatto che non si possono costruire programmi in grado di anticipare i grandi scienziati sulla via delle scoperte (ad eccezione forse delle pure scoperte empiriche, che utilizzano concetti e strategie già consolidate, e richiedono soprattutto tempo e pazienza). Programmi del genere, infatti, dovrebbero incorporare le migliori regole, quelle seguite dagli specialisti; ma come si è visto, sovente gli stessi specialisti non hanno una conoscenza esplicita, ma solo pratica, di tali regole, e nemmeno con l'aiuto di esperti intervistatori è facile giungere a codificarle esplicitamente (il problema del "collo di bottiglia" di Feigenbaum). Si è anche visto che il problema è stato aggirato con programmi che trovano le regole per induzione sulle decisioni assunte dagli specialisti; ma nel caso degli scienziati, ciò significherebbe desumere le regole della scoperta dalle scoperte effettivamente compiute; e dunque, programmi in possesso degli strumenti metodologici per compiere scoperte in un determinato settore potrebbero esistere solo dopo che tali scoperte fossero in gran parte già avvenute.

In conclusione, si può mantenere l'ipotesi che il processo di scoperta abbia una logica e sia riproducibile meccanicamente, e quindi anche l'ipotesi dell'analogia tra mente e *computer*, pur ammettendo che siccome la macchina ha bisogno di ricevere in maniera esplicita ciò che ad ogni fase della ricerca è noto solo praticamente ed implicitamente, essa resterà sempre di un passo indietro rispetto ai ricercatori umani, almeno per le scoperte di tipo teorico-esplicativo.

(Ciò vale almeno fin che durerà una situazione come l'attuale, in cui una macchina da un lato non può conoscere, in estensione e in profondità, quanto può conoscere un umano, e dall'altro solo raramente ed in misura assai limitata sa migliorare i propri metodi di ricerca alla luce delle conoscenze via via acquisite. S'immagini per contro un futuro fantastico (ma non impossibile) in cui (a) siano stati costruiti dei *computer* in grado di contenere tutte le nozioni potenzialmente rilevanti ad un dato argomento che può possedere un umano, di incrementare tali nozioni con la ricerca, di migliorare i propri metodi di ricerca alla luce delle nozioni acquisite, di scambiarsi e tramandarsi la conoscenza; (b) tali macchine siano state istruite, più o meno come si formano gli studenti di una disciplina scientifica, portandole al livello delle conoscenze condivise dagli scienziati praticanti; e (c) in seguito, per qualche accidente storico, gli umani abbiano per un certo periodo cessato di tramandarsi il sapere e di sviluppare la ricerca. Ebbene, in tale situazione gli umani resterebbero indietro rispetto alle macchine nelle conoscenze e nei metodi; gli scienziati che volessero imitare le scoperte dei *computer* dovrebbero prima apprenderne le conoscenze e carpirne metodi e criteri; ma nel frattempo le macchine procederebbero a scoprire nuove verità e ad aggiornare i metodi, lasciando gli umani sempre un passo indietro).

---

<sup>14</sup> Vedi ad esempio [20]. Altri epistemologi contemporanei hanno svolto considerazioni in parte analoghe.

## Bibliografia

- [1] F. Bacone, *Novum Organum*, in *Scritti filosofici*, UTET, Torino 1975.
- [2] E. Boncinelli, *Il cervello, la mente e l'anima. Le straordinarie scoperte sull'intelligenza artificiale*, Mondadori, Milano 1999.
- [3] E. Carly, *Cervelli che parlano. Il dibattito su mente, coscienza e intelligenza artificiale*, Bruno Mondadori, Milano 1997.
- [4] R. Davies, B.G. Buchanan, E.H. Shortliffe, "Production Systems as a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program, *Artificial Intelligence* 8, 1977, pp. 15-45.
- [5] M. Di Francesco, *Introduzione alla filosofia della mente*, Nuova Italia Scientifica, Roma 1996.
- [6] E.A. Feigenbaum, *The Art of Artificial Intelligence: 1. Themes and Case Studies of Knowledge Engineering*, Computer Science Dept. Report STAN-CS-77-621, Stanford University, Stanford CA 1977.
- [7] P.K. Feyerabend, *Against Method. Outline of an Anarchist Theory of Knowledge*, New Left Books, London 1975, tr. it. *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*, Feltrinelli, Milano 1979.
- [8] D. Gillies, *Artificial Intelligence and Scientific Method*, Oxford U.P., Oxford 1996, tr.it. *Intelligenza artificiale e metodo scientifico*, Cortina, Milano 1998.
- [9] A. Goldman, *Philosophical Applications of Cognitive Science*, Westview, Boulder, Col. 1993, tr. it. *Applicazioni filosofiche della scienza cognitiva*, Il Mulino, Bologna 1996.
- [10] N.R. Hanson, *Patterns of Scientific Discovery*, Cambridge U.P., Cambridge 1958, tr. it. *I modelli della scoperta scientifica*, Feltrinelli, Milano 1978.
- [11] C.G. Hempel, *Philosophy of Natural Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1966, tr. it. *Filosofia delle scienze naturali*, Il Mulino, Bologna 1968.
- [12] I. Lakatos, "Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes", in I. Lakatos, A. Musgrave eds., *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge U.P., Cambridge 1970, tr. it. *Critica e crescita della conoscenza*, Feltrinelli, Milano 1976, pp. 164-276.
- [13] P. Langley, "Bacon 1: A General Discovery System", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National Conference of the Canadian Society for Computational Studies*, 1978.
- [14] P. Langley, H.A. Simon, G.L. Bradshaw, J.M. Zytkov, *Scientific Discovery. Computational Explorations of the Creative Processes*, MIT Press, Cambridge Mass. 1987.
- [15] J.S. Mill, *Sistema di logica raziocinativa e induttiva*, Astrolabio-Ubaldini, Roma 1968.
- [16] S. Muggleton, R.D. King, M.J.E. Sternberg, "Protein Secondary Structure Prediction Using Logic-Based Machine Learning", *Protein Engineering* 5/7, 1992.
- [17] C.S. Peirce, *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Harvard U.P. Cambridge 1931-1958.
- [18] K. Popper, *Conjectures and Refutations*, Routledge, London 1969, tr. it. *Congetture e confutazioni*, Il Mulino, Bologna 1972.
- [19] P. Scaruffi, *La mente artificiale. Realtà e prospettive della "macchina pensante"*, Angeli, Milano 1991.
- [20] D. Shapere, "The Scope and Limits of Scientific Change, in D. Shapere, *Reason and the Quest for Knowledge*, Reidel, Dordrecht 1984, pp. 261-271, parzialmente tradotto in M. Alai, (a cura di) *Filosofia della scienza del Novecento*, Armando, Roma 1998, pp. 193-201.
- [21] P. Thagard, *Mind: Introduction to Cognitive Science*, MIT, Cambridge, Mass. 1996, tr. it. *La mente. Introduzione alla scienza cognitiva*, Guerini, Milano 1998.