

dell'esistenza, ancora oggi, di una forte aliquota di operai di fabbrica, con tutte le trasformazioni di cui parlavo sopra. Certo, l'operaiismo e la centralità operaia sono cose del passato. Più che parlare di centralità operaia, direi che la vera centralità è costituita da tutta la massa degli emarginati, dagli stessi operai che sentono questa emarginazione, da quelli cacciati dalle fabbriche e diventati disoccupati, nonché frustrati, dai giovani che invano cercano un lavoro, dalle donne discriminate dai posti di lavoro, dai poveri in genere, dai settori del Mezzogiorno ancora arretrati. Si tratta di una vasta parte della società che forse è maggioritaria. Posso capire che un partito riformatore non debba perdere i contatti con alcuni strati di ceti medio, ma è assai preoccupante che i giovani non riescano più a interessarsi come un tempo delle questioni politiche. Negli ultimi anni mi è sembrato di assistere a una specie di corsa al centro anche dei partiti riformatori e questo ha creato una certa disaffezione alla politica, non solo da parte dei giovani. Mi rendo conto che l'aggregazione di classi e settori disparati, anche con sensibilità e concezioni del mondo diverse, è abbastanza difficile e richiede un'articolazione ideologica e politica, ma richiede anche un progetto complessivo che riesca a riscuotere il massimo consenso possibile. Credo che bisogna avere il coraggio di mettersi alla testa di un vasto movimento per poter pesare sulla situazione politica del paese. È chiaro che non si tratta di proporsi di portare subito la società italiana al socialismo. Ma credo sia altrettanto chiaro che si debba cominciare, con un certo pragmatismo, a proporsi alcuni obiettivi qualificanti in quella direzione, attorno ai quali suscitare il più vasto consenso possibile di tutti i settori interessati. Ritengo, e concludo veramente, che l'ambiguità nei progetti politici, dovuta alla necessità di raccogliere voti in tutti gli strati sociali, possa andar bene per quei partiti che non si propongono grandi trasformazioni e intendono difendere l'esistente, ma non per quei partiti che intendono combattere per svolte decisive. Si è detto che il nostro paese va rassomigliando sempre più agli altri paesi dell'Europa occidentale. Io credo che sarebbe il caso che ciò avvenisse anche nelle modalità politiche attraverso le quali si accede al potere. Voglio dire che in quei paesi, se si è all'opposizione, lo si è coerentemente, per preparare l'alternativa e pertanto non siamo in presenza di forme di potere consociativo che vorrebbero essere, in qualche modo, solo uno sfogatoio alla situazione di monopolio pluridecennale del governo da parte di una sola forza politica.

ARMANDO BORRELLI

Il Poste Luglio - Ottobre 1986

R. Viviani, G. Parisi, S. Ruffo, A. Volpiani

IL COMPUTER: DA ABACO VELOCE A STRUMENTO CONCETTUALE

Una delle innovazioni più evidenti nell'ambito della ricerca scientifica e tecnologica contemporanea è rappresentata dall'uso sempre più esteso e sistematico dell'elaboratore elettronico (e.e.)¹.

Viene naturale chiedersi quali meccanismi abbiano contribuito ad un'affermazione così massiccia ed anche quale sia la reale portata innovativa dell'e.e. come strumento di ricerca.

Ad esempio, è innegabile che lo sviluppo tecnologico e gli interessi commerciali dell'industria informatica dal dopoguerra ad oggi abbiano contribuito non poco alla diffusione dell'e.e. Il settore della ricerca scientifica rappresenta il banco di prova privilegiato di tali innovazioni. Sarebbe però assai riduttivo tentare di ricondurre il processo di affermazione dell'e.e. a cause puramente esterne alla comunità scientifica, ad un rapporto di semplice committenza tra industria e ricerca.

Altrettanto parziale e superficiale risulterebbe un'analisi degli effetti indotti dall'uso dell'e.e. sull'organizzazione della ricerca se non si andasse più a fondo nell'analisi di cosa sta cambiando nei metodi e nei contenuti della ricerca scientifica. Ci proponiamo quindi di rintracciare all'interno del processo di affermazione dell'e.e. quegli elementi che possono rappresentare le premesse e i primi sintomi di una «rivoluzione scientifica».

L'uso di macchine per il calcolo non è certo una novità del nostro secolo. Già Pascal², più di tre secoli fa, aveva progettato e costruito una macchina capace di effettuare operazioni aritmetiche in modo automatico. Nel XIX secolo si fecero strada anche le prime idee di un uso di tali macchine per applicazioni scientifiche³.

Lo sviluppo delle moderne generazioni di e.e. ha fornito delle potenzialità di calcolo sempre crescenti. In una prima fase l'uso

di tali macchine si è limitato però all'esecuzione di calcoli matematici ordinari da un punto di vista concettuale, ma molto lunghi: dal calcolo numerico non ci si attendevano mai risultati che non fossero già comprensibili, almeno qualitativamente, nel contesto analitico di partenza. Un buon esempio di uso dell'e.c. come «kabaco veloce» è rappresentato dal calcolo dell'area racchiusa da una curva. Quest'ultima viene approssimata con una spezzata e si utilizzano successivamente le formule della geometria elementare per l'area del trapezio. Il risultato così ottenuto è tanto più preciso, quanto più sono piccole le lunghezze dei tratti della spezzata. Si tratta di un procedimento molto antico (risale ad Archimede), ma estremamente efficace. Se la curva è complicata o la precisione richiesta è molto alta, il numero dei tratti della spezzata può essere molto elevato (anche superiore al migliaio) ed i calcoli necessari molto tediosi. In questo caso un risultato approssimato si può facilmente ottenere «a mano» e l'e.c. serve soltanto per ottenere una maggiore precisione.

Solo recentemente (tanto per dare un riferimento, attorno agli anni '70) accanto all'uso «tradizionale» è venuto consolidandosi un nuovo modo di concepire le funzioni dell'e.c., che diviene il «creatore» stesso del fenomeno da studiare. Ad esempio, in un esperimento di «simulazione» (chiariremo in seguito questo termine) si considera un sistema con un elevato numero di particelle, dopo aver fissato in base a qualche criterio le leggi del moto (ovvero dopo aver scelto il modello), si studia l'evoluzione del sistema tramite l'e.c. Generalmente si è interessati alle proprietà per tempi di evoluzione molto lunghi e, spesso, i casi più rilevanti sono quelli in cui non esiste alcun modo semplice di predire, anche solo qualitativamente, il comportamento del sistema. A volte emergono risultati assolutamente imprevisti, la cui comprensione apre la strada ad un lungo lavoro di indagine teorica, basata spesso su pure intuizioni o analogie formali. In molte situazioni, in cui la teoria è bloccata dalla complessità matematica e l'esperimento è molto difficile da effettuare o da interpretare per la non desiderata interferenza di effetti spuri, l'e.c. rappresenta spesso la sola realtà con cui è possibile confrontarsi.

È interessante osservare come l'idea di questo uso «moderno» dell'e.c. sia nata contemporaneamente alla macchina stessa. Già J. von Neumann e S. Ulam, che avevano lavorato alla progettazione dei primi e.c. ed avevano avuto poi l'opportunità di usarli, avevano individuato ben altre potenzialità oltre al semplice calcolo. Ulam ricorda a tale proposito nella sua autobiografia⁴:

«Quasi subito dopo la guerra John [von Neumann] ed io avevamo cominciato a discutere sulla possibilità di usare l'elaboratore in modo euristico per tentare di ottenere qualche lume su problemi di matematica pura. Realizzando degli esempi ed osservando le proprietà di certi oggetti matematici si poteva sperare di ottenere degli elementi di risposta riguardo al comportamento di leggi generali».

Nonostante l'indubbio prestigio degli scienziati appena ricordati, le loro idee sull'uso dell'e.c. sono rimaste marginali per lungo tempo mentre l'impiego massiccio dell'e.c. è stato limitato, per molti anni, a settori dell'ingegneria, della meteorologia e della ricerca militare.

Attualmente, invece, in molti settori della ricerca scientifica l'e.c. è divenuto ormai molto più di un semplice strumento di calcolo⁵. La sua funzione «creatrice» è legata infatti alla possibilità di dare forma ad una realtà stilizzata, ricondotta ad una serie di algoritmi cui il ricercatore attribuisce appunto il valore di *simulazione* di un sistema reale.

Esagerando un po' si potrebbe sostenere, ad esempio, che ormai la fisica non è più divisa tra fisica teorica e sperimentale, bensì tra teorica, sperimentale e *simulazione*.

Quest'ultima rappresenta un mondo un po' a parte che a volte si inserisce tra teoria ed esperimento, altre volte è addirittura autonoma e fa nascere nuovi settori di ricerca e nuovi schemi interpretativi.

Tradizionalmente si pensa alla conoscenza scientifica come imperniata sull'*esperimento* in laboratorio che deve essere interpretato da una *teoria*, capace non solo di inglobare i dati dell'esperimento, ma anche di predire fenomeni nuovi, eventualmente con l'aiuto di un *modello fenomenologico* da analizzare, se necessario, anche con metodi numerici (v. fig. 1a).

L'e.c. fa la sua comparsa a questo livello, quando cioè il modello pone il problema della elaborazione di grossi calcoli non eseguibili a mano; il ricercatore in genere non si aspetta che l'e.c. possa aggiungere la benchè minima informazione a quanto è già contenuto nel modello e usa la macchina come un puro e semplice strumento di calcolo in grado di produrre numeri nel modo più veloce ed efficiente possibile.

Nella nuova visione l'accento si sposta sul *modello*, che va però inteso come realtà in cui assumono carattere dominante solo quegli aspetti che la *simulazione* può trattare. La *teoria* conserva una sua funzione: quella di indirizzare, facendo ampio uso di

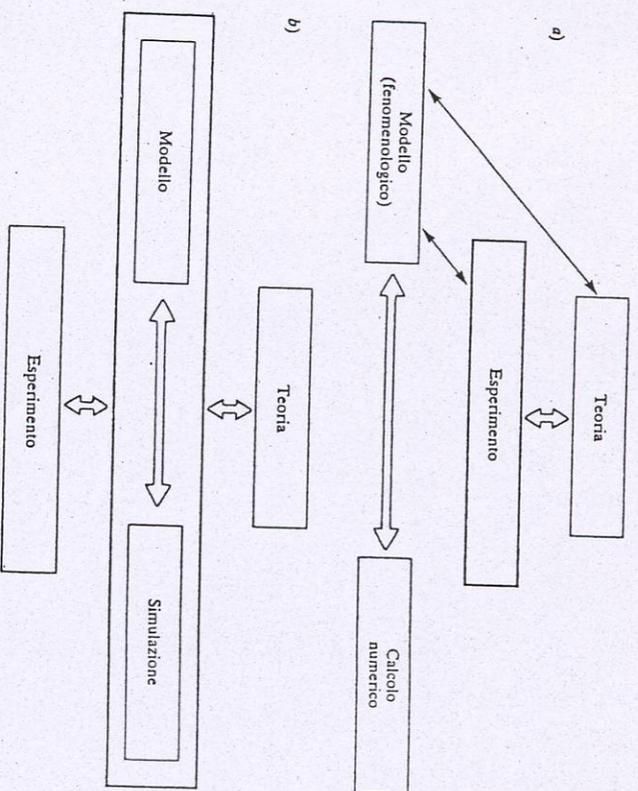


Fig. 1. - a) vecchio schema, b) nuovo schema.

analogie e congetture, l'elaborazione del modello, di suggerire le quantità da «misurare», e inoltre quella di verificare la consistenza e la non contraddittorietà dei risultati. Resta il fatto che la funzione predittiva della teoria viene sostituita dagli aspetti inattesi che affiorano nella simulazione e che non sono immediatamente deducibili dalle proprietà del modello. L'*esperimento* ha la funzione di verifica della *simulazione* ed in molti casi può essere effettuato solo grazie alle informazioni che da questa provengono (v. fig. 1b).

Rispetto ad una impostazione tradizionale siamo, quindi, di fronte ad una ridefinizione dell'importanza relativa dei vari oggetti di indagine, il cui effetto più evidente è la rottura di una linea di tendenza che può essere definita forse un po' impropriamente «*scienza dei principis*».

L'obiettivo centrale di quest'ultimo approccio è la schematizzazione di un problema attraverso le sue equazioni fondamentali, dopodiché il problema viene considerato sostanzialmente compreso. A questo atteggiamento se ne va sostituendo uno nuovo, secondo il quale un fenomeno non è più considerato compreso

una volta che se ne siano scritte le equazioni, ma solo dopo aver visto quali siano i singoli meccanismi rilevanti (che in molti casi rappresentano il «contenuto nascosto» delle equazioni). Il punto di partenza non è più tutto l'armamentario teorico del problema nei suoi aspetti più generali, ma il modello dal quale, attraverso la *simulazione*, si ricavano le informazioni sul fenomeno in esame. In altre parole il modello e la sua simulazione assumono le caratteristiche di un vero e proprio esperimento ideale (gedankenexperiment). A tale proposito c'è da sottolineare un ulteriore aspetto fondamentale; quasi sempre la simulazione viene effettuata in modo «addomesticato»; si tiene conto cioè solo di certi effetti selezionabili tramite la definizione del modello. Questo permette, a differenza di quanto avviene in un laboratorio reale, di *selezionare* il livello di complessità della realtà di cui il modello è immagine, costruendo letteralmente pezzo per pezzo il quadro interpretativo del fenomeno.

Il problema originario viene in qualche modo tagliato a fette, selezionato, semplificato e infine riprodotto dall'e.e., che in questo caso svolge la funzione di un cannocchiale puntato su una realtà costruita ad hoc (si potrebbe dire la realtà dell'e.e.), dove sopravvivono quelle leggi e quelle regole, che sono traducibili in algoritmi numerici e che sono ritenute rilevanti ai fini della comprensione della realtà. È in questo senso che ci sentiremmo di attribuire a questo nuovo quadro interpretativo la definizione di «scienza costruttiva», anche se tale termine potrebbe produrre degli equivoci. Per essere espliciti ci sembrano evidenti le differenze tra l'attuale costruttivismo e ad esempio il paradigma meccanicistico ottocentesco, il cui programma era in definitiva quello di ricondurre ogni teoria allo studio del comportamento dei suoi costituenti elementari. Il costruttivismo moderno è invece interessato alla ricerca e soprattutto alla osservazione proprio di quelle caratteristiche del fenomeno che non sono riconducibili a spiegazioni ultime ma che, al contrario, aprono l'orizzonte su aspetti non immaginabili del fenomeno stesso, un atteggiamento che potremmo definire «olistico». Comunque, tra gli scienziati, in genere, non è molto sentita l'esigenza di inquadrare la propria attività di indagine all'interno di uno schema epistemologico e culturale ben definito. La scelta a favore di questo approccio «olistico» avviene infatti nella maggior parte dei casi in modo puramente pragmatico: esistono dei problemi alla moda che interessano per qualche motivo la comunità scientifica, esistono gli strumenti per affrontarli, ci sono buone prospettive di ottenere

risultati rilevanti ed «estetici». Questo è sufficiente per operare una scelta.

A questo punto però viene spontaneo chiedersi se la simulazione non stia creando dei «simulacri dei fenomeni», una realtà cioè esistente solo nella mente dei ricercatori e nei circuiti dell'e.e. Il fatto è che spesso la realtà creata dall'e.e. va oltre la possibilità di controllo e di verifica che il ricercatore stesso ha a disposizione, se non quelle della corretta impostazione della simulazione; ma che, proprio per questo, non hanno valore di verifica. In un certo senso i risultati ottenibili con l'elaboratore risultano sbilanciati in avanti rispetto alle capacità interpretative dell'uomo. Come abbiamo già detto la simulazione si basa sulla intuizione e sulla congettura più che su una vera e propria costruzione logica e consistente del modello. In ogni caso il risultato ottenuto dalla simulazione, prima di poter essere controllato nei dettagli, impiega talvolta poco tempo a comparire pubblicato su una rivista internazionale e quindi ad acquistare valore, almeno temporaneo, di conoscenza scientifica. Non sono rari i casi in cui i risultati considerati assodati per molti anni si sono poi rivelati falsi. Per quanto riguarda la riproducibilità si deve notare che, spesso, per ottenere il risultato di una simulazione molto complessa sono necessarie molte ore di calcolo su grosse macchine (con ingenti spese), per cui difficilmente alcuni risultati hanno la possibilità pratica di venire riprodotti e quindi controllati.

Questa difficoltà è esasperata dallo stato attuale dei linguaggi di programmazione: il linguaggio più diffuso nella comunità scientifica (il Fortran) lascia molto a desiderare in quanto a chiarezza (la situazione non migliora purtroppo con gli altri linguaggi) e molto spesso un programma scritto da una persona è incomprensibile a un'altra. La frase tipica è: «faccio prima a riscrivere il programma che a capire il programma scritto da un altro». Di conseguenza mentre il modello che viene usato nelle simulazioni è descritto in grande dettaglio, e quindi sottoposto all'esame critico della comunità scientifica che ne può verificare la sensatezza, i programmi usati per la simulazione non sono quasi mai pubblicati, ed anche se lo fossero ciò non sarebbe molto utile.

Resta comunque il fatto che l'uso dell'e.e. ha modificato l'atteggiamento metodologico di molti ricercatori; è stato soprattutto grazie alla forza di convinzione dei risultati ottenuti dall'e.e. prima ancora che per una scelta epistemologica, che negli

ultimi anni si è assistito a una rivitalizzazione di interi settori di ricerca ritenuti fino a poco tempo fa marginali o poco «nobili» e al riconoscimento della necessità di affrontare i problemi fisici in tutta la loro complessità. Ad esempio nel settore della fisica per lungo tempo ha continuato a prevalere un atteggiamento «fondamentalista»: solo gli aspetti formalizzabili e descrivibili in un contesto teorico ben preciso sono ritenuti fisica, il resto (cioè il reale più complesso) diventa qualche altra cosa da relegare nelle discipline applicative in cui non c'è niente da capire ma solo da calcolare in quanto le equazioni fondamentali sono già state scritte⁶.

Ormai la nuova frontiera della fisica teorica consiste nel comprendere il comportamento (sia qualitativo e, se possibile, anche quantitativo) dei «sistemi complessi» che vanno dai materiali amorfi (quali il vetro), alle reti di neuroni, dai difetti dei cristalli, alle oscillazioni delle popolazioni in modelli del tipo preda-predatore. Si tratta di problemi estremamente difficili, per i quali i vecchi strumenti teorici non sono più sufficienti ed è necessaria la creazione di nuovi paradigmi: i risultati ottenuti dalle simulazioni con l'e.e. sono dei punti fermi in un mare di sabbie mobili, sui quali ci si può appoggiare per costruire una nuova teoria. Sembra che in effetti si inizi ad intravedere la sponda della «fisica darwiniana» di cui parla M. Cini in un recente articolo⁷.

Un altro tipico esempio è rappresentato dai sistemi dinamici non lineari; senza l'e.e. con molta probabilità questo settore di ricerca non si sarebbe mai sviluppato o, al massimo, sarebbe rimasto un settore marginale ed esotico della fisica-matematica. L'e.e. ha permesso di affrontare il problema in tutta la sua complessità e in pochi anni l'atteggiamento della comunità dei fisici e dei matematici verso vecchi problemi quali i fondamenti della meccanica statistica classica e la dinamica non lineare è completamente mutato⁸.

A questo proposito è rilevante l'esempio del teorema di Kolmogorov-Arnold-Moser⁹, che nonostante avesse dimostrato l'infondatezza di certe «convinzioni» riguardo al problema ergodico, ha avuto riconoscimento solo dopo che gli esperimenti numerici ne avevano rese «esplicite» le conseguenze¹⁰. È quindi importante sottolineare come nella creazione di questa «realtà scientifica» dell'e.e. abbia contribuito in modo non poco rilevante non solo la possibilità di isolare le caratteristiche salienti del fenomeno, ma anche quella di visualizzarle attraverso varie tecniche grafiche

(plotter, video-grafici, etc.), che permettono di trasmettere informazione scientifica sotto forma di immagini, prima ancora che sotto forma di formule. In una recente intervista B. Mandelbrot (il matematico pignalone dei frattali) rispondendo ad una domanda sul rapporto tra mondo reale ed il realismo dell'elaborazione grafica dell'e.e. afferma¹¹: «Le immagini elaborate dal computer sono forme complesse, difficili da descrivere. La computer grafica è stata fondamentale per il mio lavoro scientifico. Ricordo che in principio tutti erano molto scettici riguardo a quello che stavo facendo. Mi prendevano un po' per un forsennato. Ebbene li ho convinti con le immagini».

Questo uso «moderno» dell'e.e. non ha avuto come unica conseguenza la nascita di nuovi settori di ricerca, ma anche la formazione di nuove figure scientifiche difficilmente catalogabili nel vecchio schema scienziato teorico/scienziato sperimentale. Inevitabilmente ciò ha portato anche a grossi contrasti nella comunità scientifica.

Da un lato troviamo chi è sempre più convinto di trovarsi di fronte ad una rivoluzione scientifica paragonabile a quella che vide l'affermarsi del metodo sperimentale. Tra questi una delle figure di maggior spicco è senz'altro il premio Nobel 1982 per la fisica, K. G. Wilson. Questi si sta facendo promotore di un grosso progetto di «informatica scientifica» paragonabile a quella industriale¹². Necessità prioritarie previste in questo progetto sono:

- 1) La formazione e l'educazione all'uso intensivo dell'e.e., sostenute soprattutto dalle università;
- 2) La creazione di un «network» di comunicazione fra ricercatori di discipline diverse;
- 3) Il superamento dei linguaggi di programmazione convenzionali (Fortran, Pl1, Pascal) con l'introduzione di linguaggi più ambiziosi;
- 4) L'ottimizzazione del rendimento della tecnologia esistente.

Wilson ritiene che la comunità dei fisici sia l'unica attualmente in grado di svolgere una funzione guida nella realizzazione di questo progetto: «Per condurre a buon fine queste ricerche, occorre spingere la tecnologia al limite estremo, come per la fisica delle alte energie» (Ref. 12 p. 1007).

La simulazione numerica è il terreno su cui si devono confrontare la ricerca scientifica fondamentale e quella industriale:

«La grande informatica scientifica è attualmente di importanza vitale per la ricerca fondamentale. È anche una delle chiavi di

sopravvivenza per l'industria ad alta tecnologia. Notoriamente è nelle simulazioni numeriche di fenomeni fisici complessi che è più forte la domanda del calcolo. Un gran numero di problemi che si pongono per la grande informatica scientifica sono comuni ai laboratori di ricerca industriale (riserve di petrolio, spazio, industria chimica, ecc.), ai laboratori governativi (come Los Alamos o Livermore) e alle Università. Tanto più cresce la potenza degli elaboratori, tanto più assumerà importanza la simulazione numerica, sia nella ricerca fondamentale che in quella applicata» (Ref. 12 p. 1007).

Al di là di una adesione al punto di vista di Wilson resta il fatto che l'attività di fisico teorico puro (che fa solo calcoli con carta e penna) tende a diminuire, ed una fetta sempre più grossa di tempo viene spesa davanti ad un terminale di un elaboratore, mentre già esistono non poche persone che si occupano *solo* di simulazione. La comunità scientifica nel suo complesso è in corso di ristrutturazione e non si capisce ancora quale sarà il suo assetto definitivo. In ogni caso in un futuro vicino la simulazione diverrà un elemento basilare della formazione di un fisico. Ed un buon «simulatore» dovrà sottostare ad un tirocinio tecnico analogo a quello di un buon sperimentatore, dovrà cioè adattare l'elaboratore alle proprie esigenze attraverso speciali linguaggi e modifiche dell'hardware. Come uno sperimentatore di alto livello non si limita ad usare gli strumenti fornitigli dalla tecnologia corrente, ma li modifica adattandoli ai suoi scopi scientifici e suggerisce la costruzione di prototipi che abbiano le caratteristiche desiderate, così si comporterà (ed in parte già lo sta facendo) la comunità dei «simulatori».

Alcuni esempi dell'inizio della vita autonoma di tale comunità vengono dal mondo degli elaboratori dedicati e da quello dei super-elaboratori. I primi sono elaboratori altamente specializzati in certe operazioni che permettono di raggiungere in calcoli specialistici velocità di esecuzione superiori di un fattore 10-100 rispetto ai più grandi elaboratori versatili esistenti¹³. I super-elaboratori si stanno d'altronde orientando verso un accrescimento delle possibilità di eseguire più operazioni in parallelo, l'ideale per studi quali l'integrazione di equazioni differenziali alle derivate parziali, che si incontrano in diversi campi di ricerca¹⁴. Tutti questi si possono considerare indizi del fatto che la simulazione sta diventando una branca autonoma sì da dover richiedere strumenti tecnologici che ottimizzano i suoi scopi. Ci sembra che si stia ripetendo per la simulazione quanto è accaduto per alcuni

settori di punta della fisica sperimentale (ad esempio le alte energie); prima si usa quello che c'è sul mercato, poi si richiede che il mercato si adatti alle proprie esigenze. Stavolta però la posta in gioco è molto più alta. Non sono naturalmente ancora chiare le caratteristiche e le funzioni della comunità dei simulatori come non è ancora del tutto definito, a nostro avviso, quali settori delle scienze esatte saranno coinvolti in questa operazione; anche se è chiaro che alcuni settori dell'informatica, della matematica e della fisica si stanno muovendo coerentemente su questa strada. Come casi di cooperazione, Wilson stesso fa l'esempio dell'introduzione di nuovi sistemi di programmazione e linguaggi che consentono una maggiore flessibilità (ad esempio manipolazione di simboli e non solo di numeri) ed intellegibilità dei programmi, che dovrebbe permettere l'individuazione della struttura logica di un programma anche con un'analisi sommaria.

Cerchiamo comunque di schematizzare quali potrebbero essere le caratteristiche generali di queste nuove «figure professionali», che saranno il prodotto dell'interazione di alcuni gruppi guida della comunità scientifica:

1) *Capacità di collaudare efficacemente nuovi algoritmi e procedure su problemi specifici.* Dove per collaudare si intende un ampio spettro di attività che va dall'applicazione diretta di una tecnica di calcolo alla risoluzione di un problema fino al livello della modellizzazione di un fenomeno e di un adeguamento della tecnica nell'analisi del modello.

2) *Capacità di sviluppare autonomamente nuovi algoritmi.* Tali sviluppi nascono sempre dallo studio di modelli particolari, ma finiscono per ampliare l'orizzonte della procedura di calcolo nel suo complesso, spesso stravolgendo il significato inizialmente attribuitogli.

3) *Capacità di sintetizzare tecniche, procedure, strumenti di calcolo di diversa provenienza su un problema specifico.* Ad esempio l'uso della manipolazione algebrica, del calcolo numerico e della simulazione si possono combinare in un algoritmo che affronti un problema specifico in modo che l'efficacia totale non sia banalmente la somma dell'efficacia delle singole tecniche.

4) *Rapida valorizzazione degli sviluppi tecnologici tramite una loro applicazione specifica nelle procedure di calcolo.* Naturalmente la nascita di queste nuove capacità professionali implica anche un riarrangiamento ed una ridefinizione degli altri ruoli all'interno delle comunità scientifiche.

Le nuove competenze che abbiamo schematizzato si stanno

affacciando in un ampio arco di discipline. Hanno un grosso peso, oltre che in fisica, in economia (econometria, modellizzazione sociale), biologia (biologia molecolare, ingegneria genetica), chimica (liquidi, dinamica molecolare, cinetica chimica), matematica (sistemi dinamici, dimostrazione di teoremi). Le posizioni tipo quelle di K. G. Wilson non sono certo condivise da tutta la comunità scientifica. Alcuni ritengono, ad esempio C. A. Truesdel¹⁵, senza mezzi termini, che il computer «rovina la ricerca e minaccia l'umanità». Altri, in modo meno catastrofico, contestano nettamente la validità dei floni di ricerca che utilizzano l'e.e. come principale strumento di indagine; citiamo tra questi il premio Nobel per la fisica 1977 P. W. Anderson¹⁶. «Per rendere conto di un fenomeno è sufficiente scriverne convenientemente il sistema di equazioni e poi il gioco è fatto! Ecco quella che chiamo sindrome da "macchina incantata", perché per fare questo essi i fisici hanno bisogno di una sola cosa: un elaboratore. Questi fisici credono che l'interpretazione di tutti i fenomeni fisicamente interessanti scaturisca da un elaboratore di sogno» (Ref. 16, p. 98).

Egli inoltre aggiunge: «In realtà, cosa è accaduto dal 1947, anno in cui sono divenuto un fisico? Veramente un sacco di cose, ma la macchina incantata non vi ha giocato che un ruolo trascurabile» (Ref. 16 p. 100). E ancora: «Vedo attorno a me della gente, ed è numerosa, che calcola il comportamento di atomi particolari su delle superfici particolari in configurazioni particolari, persuasi di risolvere i meccanismi della catalisi e della corrosione. Niente affatto! La mia sensazione è che questi dovrebbero sviluppare prima di tutto una teoria e cercare in seguito di chiarire i punti oscuri grazie al calcolo. Fintanto che si limiteranno come prima cosa a calcolare non faranno che della fisica sperimentale, e per di più la più primitiva possibile, quella delle "esperienze di pesca con la lenza". (Ref. 16, p. 101). In realtà si tratta di un atteggiamento estremamente polemico che non trova un riscontro preciso nella prassi scientifica dello stesso Anderson. Ad esempio egli stesso, poco prima dell'articolo citato, ha pubblicato su una rivista più specialistica i risultati di alcune simulazioni con l'e.e. da lui stesso effettuate, che rappresentavano l'unica pezza d'appoggio di una approssimazione teorica proposta nello stesso articolo¹⁷.

Alcuni soffrono certamente della sindrome da «macchina incantata» e molti fanno le «esperienze di pesca con la lenza». Vi è quindi un gran numero di lavori prodotti con l'ausilio dell'e.e.,

molti banali, altri addirittura sbagliati, vi sono grandi entusiasmi e dure reazioni da parte di alcuni scienziati con una visione un po' elitaria ed aristocratica della scienza che, a parer loro, avanzerebbe solo per «grandi idee». Ma non è certo la prima volta che queste cose accadono nel mondo della scienza.

Ogni volta che appare un nuovo strumento di una qualche rilevanza fanno la loro comparsa i «pescatori con la lenza» ed i «nostalgici».

Il problema però non è quello di schierarsi pro o contro l'e.c., che spesso viene visto come una sorta di feticcio da adorare o da esorcizzare, ma di cercare di comprendere cosa sta cambiando nella ricerca scientifica. A nostro parere l'e.c. è uno «strumento concettuale» che si inserisce coerentemente nel processo in atto di ridefinizione dell'attività scientifica.

Del resto, se da un lato l'e.c. ha il pregio di evidenziare aspetti nuovi e difficilmente intuibili di un modello, dall'altro è anche vero che talvolta ciò può portare a interpretazioni parziali o addirittura sbagliate se non si ha neppure l'idea, basata su qualche approccio analitico, di quale comportamento si voglia evidenziare. Per altro in molti settori scientifici la teoria è troppo indietro rispetto ai problemi ed ai livelli di spiegazione che la comunità scientifica si pone.

Ad esempio molti settori della fisica-matematica sono rimasti arretrati rispetto alle linee di ricerca che si sviluppano con l'uso dell'e.c. Di molte equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari, di cui si studiano le soluzioni all'e.c., non sono nemmeno dimostrati teoremi di esistenza e unicità delle soluzioni. Più in generale la matematica non riesce a rispondere in modo esauriente alle richieste che le vengono poste dalle altre scienze (fisica, chimica, biologia). Alle domande di tipo diverso da quello tradizionale, ad esempio, più qualitative che quantitative, i matematici spesso non riescono a dare risposta. Da Newton in poi, questa è la prima volta che la matematica è in ritardo e non riesce ad indirizzare lo sviluppo di discipline nascenti. Si pensi ad esempio a quanto accade con la meccanica quantistica che trovò tutto il suo apparato formale già pronto nel programma di Hilbert. Ora invece ci sembra che accada proprio il contrario: di fronte ad una sempre maggiore domanda di comprensione di sistemi reali complessi cominciano a formarsi nuove comunità che un po' schematicamente definiremo «matematici sperimentali». In questa categoria metteremo molti fisici teorici e fisici matematici (ad esempio quelli che si occupano di sistemi dinami-

ci, calcoli Monte Carlo...); analisi numerici, cultori di problemi combinatori, informatici ecc. Probabilmente molti matematici arricceranno il naso domandandosi cosa abbiano in comune con tutti questi nuovi (strani) arrivati. La matematica non è forse la scienza della dimostrazione logica? ed allora cosa può avere a che fare con essa un oggetto costituito di circuiti stampati?

Vediamo un po' cosa si intende per dimostrazione matematica. Abituamente sotto tale termine si indica una serie di concatenazioni logiche (corrette) che partendo da certe ipotesi portino ad un risultato (tesi) non evidente a priori. Una dimostrazione per considerarsi tale deve essere controllabile e riproducibile ed i vari passaggi intermedi abbastanza «standard» (almeno per gli esperti del settore). A questo punto cosa vieta di poter «dimostrare» un teorema con l'e.c. (naturalmente riducendo il problema in termini opportuni)?

Ciò è già successo per il problema dei quattro colori in cui la dimostrazione è stata ricondotta al controllo di un numero molto elevato di condizioni, ognuna delle quali di per sé abbastanza semplice¹⁸. La loro verifica a questo punto poteva essere effettuata solo dall'e.c., richiedendo per un calcolo con «carta e penna» un elevato numero di anni di lavoro di un matematico.

Qualcuno potrebbe sentirsi un po' in imbarazzo e chiedersi se questa sia una vera dimostrazione. A nostro avviso questo aspetto assume connotazioni ancora più generali. L'uso dell'e.c. in matematica pura, per esempio in aritmetica, solleva delicati problemi concettuali che sono alla base dei suoi stessi fondamenti logici. Nel 1931 Gödel¹⁹ ha dimostrato che gli assiomi di partenza dell'aritmetica sono incompleti in quanto esistono delle affermazioni che sono «vere» (nel senso che non sono falsificabili) ma che non sono dimostrabili a partire dagli assiomi e non è possibile determinare quali siano queste affermazioni.

Per poter dimostrare tutte le affermazioni «vere» è necessario introdurre nuovi assiomi. Per evitare inconsistenze logiche, è assolutamente necessario che i nuovi assiomi siano anche loro delle proposizioni «vere», ma dato che non è possibile dimostrare la «verità» di una proposizione non deducibile dai vecchi assiomi (se il contrario fosse vero, la proposizione in questione sarebbe deducibile e non sarebbe necessario introdurla come nuovo assioma), questa strada non sembra essere percorribile.

Tuttavia l'e.c., mentre ha tuttora grandi difficoltà a dimostrare teoremi, può facilmente dimostrare la falsità di un'affermazione aritmetica, cercando di trovare il contro esempio. Essendo

questo un compito ripetitivo l'e.e. può essere molto più veloce e quindi efficace degli esseri umani. Proposizioni matematiche importanti, la cui dimostrazione non è stata trovata nonostante gli sforzi di generazioni di matematici, possono essere assunte a nuovi assiomi, se il calcolatore non riesce a dimostrarne la falsità. Questo scenario non è così improbabile come sembra: già adesso molti «teoremi» vengono dimostrati assumendo la verità di altri teoremi fondamentali non dimostrati.

La matematica può quindi trasformarsi in una scienza sperimentale come la fisica; l'e.e. gioca il ruolo dell'apparato sperimentale e i nuovi assiomi giocano il ruolo delle leggi naturali: essi vengono scelti in maniera euristica e rimangono validi fino a quando un esperimento non ne dimostri la falsità.

ROBERTO LIVI · GIORGIO PARISI
STEFANO RUFFO · ANGELO VULPIANI

¹ Abbiamo preferito il termine «laboratore elettronico» piuttosto che quello più comune di «calcolatore» in quanto, come sarà più evidente in seguito, gli aspetti centrali della nostra analisi riguardano proprio quelle caratteristiche di tale macchina che vanno oltre i puri e semplici calcoli.

² Per una breve analisi storica si veda il saggio di P. Vallignani nel volume collettivo a cura di R. Leverro *Che cos'è l'informatica*, Milano, Mazzotta, 1977.

³ C. Babbage, già nel 1822, proponeva l'uso di macchine calcolatrici per la compilazione di tavole astronomiche (C. Babbage, «Mem. Astron. Soc.», 1, 309, 1822).

⁴ S. M. Ulam, *The Adventures of a Mathematician*, New York 1976.

⁵ Un esempio di tale tipo di approccio è dato dallo studio della generazione della turbolenza: W. Franceschini e C. Tebaldi, «J. Stat. Phys.», 21, 707, 1979. C. Boldrighini e W. Franceschini, «Comm. Math. Phys.», 64, 159, 1979. E. R. Maschke e B. Saramito, «Phys. Scr.», T2-2, 410, 1982.

⁶ Quest'atteggiamento è ben sottolineato, ad esempio, da R. Feynman (premio Nobel per la fisica) nelle sue lezioni (Capitolo 31 del volume 2 de *La fisica di Feynman*, Inter European Editions, 1975): «I fisici hanno sempre l'abitudine di prendere il più semplice esempio di qualunque fenomeno e di chiamarlo "fisica", lasciando che gli esempi più complicati diventino materia per altri campi, mettiamo matematica applicata, elettrotecnica, chimica o cristallografia. Perfino la fisica dello stato solido è quasi fisica a metà, perché si preoccupa troppo di sostanze speciali».

⁷ M. Cini, *È possibile una fisica darwiniana?* «S. E.», 33, 1986.

⁸ Si pensi ad esempio alla riscoperta dei sistemi dinamici non lineari e della meccanica classica, ritornati ad interessare la comunità dei fisici dopo quasi un secolo di oblio.

⁹ Si veda ad esempio L. Galgani e A. Scotti, «Riv. Nuovo Cimento», 2, 182, 1972.

¹⁰ Non è esagerato dire che i fisici, almeno a «livello di massa», più che da raffinati teoremi siano stati convinti dalle prime simulazioni numeriche dell'inconsistenza di certe idee credute vere (ma non dimostrate).

¹¹ B. Mandelbrot, «Genius», 10 (luglio 1985), p. 30.

¹² K. G. Wilson, «Research», 14, n. 146, p. 1004, 1983.

¹³ Per dare un'idea della potenzialità degli e.e. dedicati (S.P.C. special purpose computer) diciamo che l'S.P.C. costruito a Santa Barbara per calcoli Monte Carlo di

modelli di ferromagneti ha un costo (in materiali) di solo 2000 dollari ed una velocità di calcolo 25 volte superiore a quella ottenibile sullo stesso problema con un grosso computer; si vedano per dettagli H. Hilhorst et al., «J. Stat. Phys.», 34, 987, 1984; R. B. Pearson et al., «J. Comput. Phys.», 51, 241, 1983.

¹⁴ R. D. Levine, «Le Scienze», 163, p. 52 (marzo 1982); D. Conne e J. C. Sire, «Research», 14, 1084, 1983.

¹⁵ C. A. Trusdell, *La nuova ragione*, a cura di P. Rossi, Bologna 1983.

¹⁶ P. W. Anderson, «Research», 11, n. 107 (gennaio 1980).

¹⁷ D. J. Thouless, P. W. Anderson and R. G. Palmer, «Phil. Mag.», 35, 593, 1977.

¹⁸ Per un'esposizione divulgativa si veda: K. Apple e W. Haken, «Le Scienze», gen. 1978, p. 54.

¹⁹ Una trattazione non troppo tecnica è data in D. R. Hofstadter, *Godel, Escher, Bach*, Milano, Adelphi, 1984.