

**4° Seminario  
della Fondazione Perspektiven**

*Novacella (Bressanone), giugno 1994*

**4. Seminar  
der Stiftung Perspektiven**

*Neustift bei Brixen, Juni 1994*

EUGENIO SARTI

**Gödel, Shannon  
e la crisi della scienza**

# GÖDEL, SHANNON E LA CRISI DELLA SCIENZA

Eugenio Sarti

Questo discorso si compone di tre parti ineguali. Nella prima cercherò di mostrare *dall'interno* – cioè dal punto di vista degli scienziati – come la crisi delle nostre scienze esatte sia stata rivelata dalle grandi scoperte scientifiche della prima metà del '900, e come essa consista *nella perdita di senso* della scienza e della tecnologia sviluppate negli ultimi quattro secoli – o, se vogliamo essere precisi, nello scoprire l'assenza di senso di ciò che si è fatto. Nella seconda parte, più breve, tenterò d'indagare quali sviluppi di pensiero, quali scelte hanno portato i nostri predecessori ad imboccare siffatto vicolo cieco: e già questa parte sarà in qualche misura più rozza e incompleta della prima perché motivazioni, che mi convincessero del tutto, non ne ho trovate nella bibliografia, ed io, non storico né filosofo di mestiere, sono evidentemente troppo inferiore al compito di individuarle. La terza parte, poi, sarà quasi soltanto problematica: come si possono utilizzare queste notizie sulla natura della crisi per delineare una radicale, autentica via d'uscita? Qualche tentativo di risposta potrà scaturire dal nostro conversare insieme.

Della crisi della scienza si è incominciato a parlare seriamente all'inizio del '900, quando la pubblicazione quasi contemporanea della teoria della relatività ristretta di Einstein e della *Traumdeutung* di Freud ha incrinato la solidissima immagine di un sapere incrollabilmente fondato sulla conoscenza sperimentale, e in perenne sviluppo per lineare accrescimento, che aveva dominato la cultura scientifica del XIX secolo. Si scoprì allora che l'immagine della realtà fisica (e psichica) poteva cambiare radicalmente in conseguenza di nuovi, più raffinati metodi di indagine sperimentale e di analisi dei risultati. Poi, nel 1926-27, è stata la volta della meccanica quantistica di Werner Heisenberg e del suo *principio d'indeterminazione*: la misura sperimentale non poteva essere resa indefinitamente precisa, la conoscenza del mondo fisico ha una perfettibilità limitata. Ma il peggio doveva ancora venire.

Il peggio, secondo me, è rappresentato dalla *teoria dell'informazione* e dal *teorema di incompletezza* di Gödel: fra i molti segni che si possono allineare per descrivere la crisi delle nostre scienze, questi due mi paiono i più espressivi, paradigmatici. Essi negano in radice i due cardini su cui si è retta tutta la costruzione della nostra scienza matematica e naturale: la prima nega che l'esperienza sensibile sia fonte unica di conoscenza, il secondo che il ragionamento logico deduttivo sia unico strumento per la sua elaborazione. C'è una

specie di ironia in questa vicenda: la distruzione non è venuta da nemici esterni, retrogradi demolitori di ciò che è nuovo, ma dall'interno. Kurt Gödel e Claude Shannon sono grandi maestri della logica e della matematica che, applicando con genio e rigore gli strumenti della scienza, ne hanno dimostrato l'interna contraddittorietà. Un altro aspetto un poco paradossale è che la crisi sembra non percepita dagli stessi scienziati che l'hanno rivelata: la loro visione del mondo appare come irrimediabilmente ingabbiata nei limiti che essi stessi constatano e contestano. Pare che, per accorgersene, occorra un non-scienziato come io sono, un tecnico soltanto un poco capace di leggere il linguaggio scientifico, ma abituato a guardare le cose con un altro atteggiamento intellettuale.

Il teorema di Gödel è famoso anche se, mi sembra, chi ne parla tende a restringere le sue conseguenze alla logica matematica. È significativo, in questo senso, l'affascinante libro di Douglas Hofstadter<sup>1</sup>, che ne porta una dimostrazione leggibile, con un po' di pazienza, anche dai non specialisti: il brillantissimo ragionamento di Hofstadter resta come imbrigliato all'interno del suo stesso schema logico. Ecco la vicenda, come è raccontata da Marcello Cini<sup>2</sup> in un libro recentissimo ed importante, a mio parere, anche perché il suo autore è un *addetto ai lavori*, un fisico teorico (come del resto è addetto ai lavori Hofstadter, che è un logico-matematico). Bertrand Russell e Alfred Whitehead, nei *Principia Mathematica* del 1910-13, si erano proposti «di formalizzare in modo logicamente ineccepibile e completamente coerente ogni ragionamento matematico». Era l'estrema, più rigorosa applicazione dell'idea guida delle nostre scienze esatte, che la matematica possa descrivere in modo perfetto tutto il conoscibile: la realizzazione del disegno di Cartesio e Leibniz, di una *logica formale onnilaterale* ordinante in sé tutto il conoscibile (la locuzione è di Husserl), ma anche il suo radicale superamento, il sogno di costruire un puro linguaggio indipendente dall'oggetto da significare e comunicare. Si trattava di realizzare un meccanismo col quale, a partire da un sistema assegnato di assiomi e regole di inferenza, fosse possibile costruire proposizioni e decidere se fossero vere o false.

Precisiamo: non interessa, qui, una particolare matematica, un particolare sistema di assiomi e di regole, ma il modo generale di costruire una matematica, indipendentemente dal sistema di assiomi e (almeno in parte) di regole. Forse un esempio potrà aiutare a capire questo atteggiamento alquanto astratto. La geometria di Euclide è una delle più grandi e belle costruzioni dell'ingegno umano. Essa è fondata su un certo numero di postulati, tutti molto "intuitivi", ossia vicini all'esperienza quotidiana, ad eccezione del quinto. È il famoso postulato delle parallele: nella forma originaria esso dice che due rette, intersecate da una terza, s'incontrano dalla parte in cui la somma degli angoli formati dalle intersezioni è minore di due angoli retti. Fare a meno del quinto postulato di

Euclide è stato uno dei grandi sogni dei matematici. Hanno tentato di *dimostrarlo*, ossia derivarlo dagli altri postulati, trasformarlo in *teorema*: inutilmente. I grandi matematici della prima metà dell'800 – Gauss, Lobacevskij, Riemann – hanno seguito invece una via diversa: hanno costruito geometrie *non euclidee*, fondate su postulati diversi dal quinto di Euclide. Il meccanismo era il medesimo di Euclide, la base assiomatica diversa, il risultato completamente diverso. Ciò che ci interessa sono le proprietà fondamentali del meccanismo, indipendentemente dalla base di assiomi alla quale è applicato e dai risultati che produce.

Esso dovrebbe essere *completo e coerente*. Ciò vuol dire che di ogni *proposizione formulabile* dovrebbe consentir di decidere la verità o falsità, e che non dovrebbe esser possibile provare la contemporanea verità di due proposizioni in contraddizione fra loro. Dimostrare che un sistema costruito secondo i *Principia Mathematica* godeva di queste due proprietà è stato l'impegno della logica matematica nei due decenni successivi. E invece, nel 1931 Kurt Gödel dimostrò che in qualunque sistema assiomatico si possono formulare proposizioni, delle quali gli strumenti propri del sistema non sono in grado di decidere la verità o falsità; che se esistesse un sistema completo – in cui ogni possibile proposizione fosse decidibile – esso sarebbe anche incoerente, ossia conterrebbe delle contraddizioni; e infine che, paradossalmente, se si potesse dimostrare la coerenza di un sistema, questo sarebbe incoerente.

Era la sconfitta della logica deduttiva come strumento primo ed essenziale per costruire la conoscenza: il ragionamento deduttivo aveva dedotto la sua propria insufficienza. Lo nota lo stesso Hofstadter che cita (ma contesta) un'osservazione di J.R. Lucas: vi sono operazioni logiche che la mente umana può fare anche se non sono ammesse dal teorema di Gödel<sup>3</sup>. Il ragionamento di Hofstadter non va oltre. Ma la frontiera del ragionamento deduttivo, già gli antichi Greci la conoscevano bene. Hofstadter lo mostra con arguzia, anche se poi sembra preoccupato di *aggirare* i limiti del ragionamento deduttivo piuttosto che *accettarli*. Il paradosso coerenza-incoerenza del teorema di Gödel, dice, non è che una variazione sul tema del paradosso di Epimenide: *io mento*. Se accettate questa proposizione per vera dovete dedurre che ho detto la verità, quindi non sto mentendo, quindi la mia proposizione è falsa; ma se poi ammettete che sia falsa, ossia che io *non mento* ma sono sincero, allora non ho detto una bugia, quindi la mia proposizione è vera.

Ma noi sappiamo come uscire da queste trappole. Se io vi dico che mento, alla fine voi risolvete il dilemma se credermi o no guardandomi in viso e *decidendo* che io, questa volta, merito o non merito d'essere creduto; e questa decisione la prendete per vie interiori che hanno apparenza diversa dai percorsi logici deduttivi. Potrebbero essere logico-deduttive? Certamente sì: noi siamo anche capaci di produrre deduzioni logiche inconsapevoli (oppure rivestiamo a *posteriori* di giustificazioni di tipo deduttivo il risultato di procedimenti d'altro



tipo). Ma Gödel ha dimostrato che i procedimenti *non possono essere sempre deduttivi*: che si danno problemi logici non risolvibili per via deduttiva.

Uno dei meriti di Gödel è di avere prodotto dimostrazioni *costruttive*, ossia di avere costruito proposizioni non coerenti o indecidibili: così il suo risultato è immediatamente calato nella realtà pratica. Che è anche quanto ci mostra il paradosso di Epimenide: questi problemi appartengono alla vita comune. Nella vita comune noi usiamo anche procedere per via non deduttiva ma *intuitiva*. Il guaio della via intuitiva è che noi non la sappiamo descrivere, modellare (quindi, adesso, non la sappiamo riprodurre sui *computer*), non ce ne sentiamo *intellettualmente padroni*. Ed allora la amputiamo dall'ordine della razionalità per relegarla in quello del sentimento, e la escludiamo dal metodo scientifico.

Della portata rivoluzionaria del concetto di informazione, invece, mi pare che non si parli ancora molto. Vi accenna di sfuggita, con garbo e prudenza, René Thom in un libro bello e difficile<sup>4</sup> – difficile soprattutto per il formalismo matematico, che è inaccessibile anche a qualche cultore delle matematiche: sembra voler provare che il linguaggio matematico *non è universale* –. Scrive dunque Thom, alla fine di un discorso tutto centrato sull'importanza dell'informazione nelle trasformazioni biologiche: «Mentre, nell'osservazione degli esseri viventi, l'aspetto teleologico degli organi e dei comportamenti ci appare immediatamente, [...] l'aspetto deterministico e meccanicistico ci sfugge, perché si tratta di un effetto di durata molto lunga, a carattere statistico, solidale con l'evoluzione e i cui fattori decisivi [...] sono, verosimilmente, molto tenui».

Naturalmente la parola *teleologico* non ha, per Thom, il medesimo significato che per la metafisica: la sua scienza non conosce la metafisica, egli non può affermare nulla circa l'ordine cui questa teleologia appartiene; per dirla col linguaggio di Gödel, questa è una questione *indecidibile*. Inoltre Thom ammette senza riserve la presenza e l'importanza degli aspetti che lui chiama meccanicistici, delle relazioni causa-effetto. D'altra parte si deve anche dire che l'effetto delle modificazioni “casuali” (o che noi chiamiamo tali per un'assoluta necessità di schematizzazione) in sistemi dall'informazione fortemente ridondante, come sono i sistemi biologici, è molto discusso. Ciò nonostante l'affermazione di Thom appare sconvolgente, e Thom sembra non avere il coraggio di dichiararne la portata. Non arriva ad ammettere, la prudenza accademica di Thom, che il concetto di informazione, su cui è tessuto tutto il suo libro, contraddice radicalmente al dogma fondamentale del pensiero scientifico moderno, quale è sviluppato da Galileo al positivismo ed è espresso nel principio di oggettività: *nell'universo non esiste una teleologia, se esiste non è riconoscibile* (il che, dal punto di vista delle scienze sperimentali, vuol dire che non esiste), e in tutti i modi essa non interessa la scienza. Dice Georges Monod in un libro ambizioso<sup>5</sup>: «La pietra angolare del metodo scientifico è il postulato dell'oggetti-

vità della Natura, vale a dire il rifiuto *sistematico* a considerare la possibilità di pervenire a una conoscenza 'vera' mediante qualsiasi interpretazione dei fenomeni in termini di cause finali, cioè di 'progetto'». Poi Monod riconosce la contraddizione fra questa impostazione e l'evidenza di un 'progetto' nell'evoluzione biologica, e si propone di risolverla, ma il suo lavoro è una notevole dimostrazione di quanto ciò sia difficile. A me sembra *scientificamente* discutibile che si conservi, come postulato, un'ipotesi messa in dubbio dall'evidenza sperimentale.

Che le trasformazioni della natura siano attuazioni di un fine piuttosto che effetti di una causa, è verità pacifica (e malvolentieri confessata) proprio per coloro che più radicalmente l'hanno messa in dubbio: gli studiosi dell'evoluzione biologica. È pacifico, per i biologi, che la costruzione di ogni organismo vivente è governata dall'informazione racchiusa nel suo codice genetico, quindi precedente la sua nascita; che questa informazione è di per sé completa, cioè idonea a produrre un organismo perfetto in ogni sua parte; che, poi, l'ambiente in cui l'organismo si sviluppa lo modifica perché vi aggiunge le sue proprie informazioni, o meglio sostituisce in parte l'informazione originaria, agendo su di essa come un *disturbo* e apportandovi, il più delle volte, disordine; che l'informazione, eventualmente modificata in modo geneticamente stabile, è poi trasmessa alla discendenza. È ugualmente pacifico che il contributo ereditario è di gran lunga maggiore di quello "casuale" dell'ambiente. Si accetta senza difficoltà che ogni attività organizzata nell'universo – la vita di un alveare come la formazione di un cristallo – è preceduta, presieduta, controllata dall'informazione, e ordinata alla sua realizzazione.

Il concetto di entropia dell'informazione, introdotto negli anni '40 da Shannon per analogia con la termodinamica, non fa poi che tradurre in formule l'esperienza di tutti noi, che nel ricevere un messaggio vediamo come la sua informazione si possa essere deteriorata rispetto a quella trasmessa, non arricchita: qualcosa, di quello che l'interlocutore ci voleva dire, può essere andato perduto, mai invece la trasmissione potrà aggiungere qualcosa che l'interlocutore avrebbe potuto dire, ma non ha detto.

Questo accade nei mezzi di trasmissione fisici: noi lo constatiamo in quelli artificiali – il telefono – e non abbiamo ragioni per pensare che non accada anche in quelli naturali, come i codici genetici. Nella trasmissione fra gli uomini accade anche qualcosa di diverso. La prima versione di questo testo è stata tradotta in tedesco. I traduttori hanno incontrato qualche mia frase non abbastanza chiara: l'hanno dovuta *capire* e, quando l'hanno capita, l'hanno scritta in tedesco meglio dell'originale italiano. In questa stesura ho riutilizzato le loro espressioni. Oppure: sull'interpretazione de *L'Infinito* sono stati scritti interi libri che sorprenderebbero molto il povero Leopardi. Forse non sono tutte interpretazioni legittime, ma è pur vero che il grande fascino della poesia risiede anche nella sua illimitata capacità di significazione, ben oltre il mero signi-

ficato delle parole e l'intenzione esplicita del poeta. Intendo dire che l'uomo è capace di integrare l'informazione che ha ricevuto, e lo fa con un procedimento intuitivo, non deduttivo. L'uomo è capace di produrre *entropia negativa* (dell'informazione: resterebbe da vedere se ne fosse capace anche nel senso termodinamico): constatazione piuttosto ovvia, dal momento che l'attività intellettuale consiste nel produrre informazione. Potremo anche interpretare l'enorme ricchezza d'informazione dei codici genetici come risultato della produzione *naturale* di entropia negativa, ma allora, con coerenza di ricercatori, dovremo pure domandarci *chi o che cosa* produce questa entropia negativa, dal momento che l'attuale modello causale dell'universo non ci fornisce alcuna indicazione in proposito. Non ci è lecito rispondere che questo non riguarda la scienza.

Qui la prudenza accademica impone a me una precisazione, che mi eviti d'essere scomunicato da qualche collega. La teoria dell'informazione, come la termodinamica, è una scienza statistica. Non afferma l'impossibilità che un'informazione si arricchisca per via, dice che è estremamente improbabile. Presappoco come è improbabile che se mettiamo una pentola calda nel frigorifero, la pentola si scaldi di più e gli oggetti attorno si raffreddino. In questo senso il punto di vista statistico è più "umano" di quello deterministico: tiene conto dell'incertezza del sapere sperimentale. Lascia a noi di decidere, alla fine, se una cosa è *realmente così come appare*. Del rapporto fra le due impostazioni fondamentali della scienza moderna, quella deterministica di Newton e quella termodinamica, probabilistica di Lazare Carnot, parla a lungo Antonino Drago<sup>6</sup>, un fisico, dunque anche lui un *addetto ai lavori*. Lo menziono particolarmente volentieri perché molte delle cose che dico qui sono scaturite dal conversare con lui. Dopo questa precisazione possiamo anche concederci l'affermazione piuttosto drastica, che l'ordine dell'universo non si accresce per giustapposizioni casuali: il caso, per la teoria dell'informazione, non è creatore.

Di nuovo uno dei fondamenti della nostra scienza è messo in discussione dagli stessi fondamenti della scienza: l'evidenza sperimentale e logica, che ad ogni mutamento ordinato deve presiedere un'informazione ordinatrice, demolisce l'interpretazione meccanicistica e causale (come sistema di cause ed effetti) dei fenomeni evolutivi, e le sostituisce un'interpretazione teleologica (come sistema di mezzi ordinati a un fine) analoga – se mi si concede di trasferire all'ordine fisico, *ex analogia*, un concetto proprio della metafisica – a quella propria del Medioevo che l'epoca moderna aveva respinto con sdegno. Ancora una volta devo essere preciso fino alla noia. Non si tratta, né per Thom né per noi, di disconoscere l'importanza delle catene causa-effetto: si tratta di riconoscere che tali catene sono ordinate al conseguimento di un fine.

Così possiamo dire che la spiegazione meccanicistica e causale è svuotata di senso: l'universo fisico è governato da una teleologia *che lo precede* (in senso logico, ma per la nostra scienza il senso *cronologico* è indistinguibile da quello logico) e che governa i suoi meccanismi interni – sia che noi li descri-



viamo con modelli deterministici sia con modelli statistici –. Questa teleologia *non appartiene* al modello generale del mondo fisico, all'interno del quale è stata scoperta. Per chiarezza non dirò che sia di ordine *meta-fisico*: dirò piuttosto *extra-fisico*, intendendo che per cercarne le origini bisogna trascendere la rappresentazione dell'universo fisico che la scienza ha sviluppato da Galileo in poi, che noi intimamente consideriamo nostra e che tendiamo a identificare con l'unica conoscenza possibile. Questa finalità, all'universo galileiano, non può esser data che dall'esterno. Ma allora la conoscenza del mondo fisico non può essere raggiunta dai metodi di ricerca attuali, che sono orientati a cogliere i nessi di causalità ma non le finalità *in sé*: chi voglia trovare un senso a ciò che lo circonda e al suo stesso essere, deve indagare oltre le *attuali* frontiere della scienza. Un rigoroso processo logico deduttivo, correttamente applicato al dato sperimentale, ha dimostrato l'incoerenza – la contraddittorietà – dell'assunto fondamentale che la conoscenza dell'universo possa essere esaurita all'interno degli schemi concettuali, logici e sperimentali nei quali è stata sviluppata. La conoscenza dell'universo è *incompleta* nel senso di Gödel: la teoria dell'informazione ha posto una questione assolutamente fondamentale – quale sia il fine a cui tende l'universo – che non è decidibile all'interno del sistema logico in cui è formulata.

Per farci un'idea della portata di questo discorso possiamo giocare un poco di fantasia. Proviamo per un momento a porci nella prospettiva evoluzionistica. Per la verità Thom mette in dubbio anche l'idoneità dell'evoluzionismo a descrivere lo *scenario* di quel che potrebbe essere accaduto fra i nostri antenati: il dogma della aleatorietà delle mutazioni biologiche, dice, sembra contraddire il principio meccanico di azione e reazione. Thom contesta il meccanicismo con un argomento meccanicistico: continua l'ironia delle contraddizioni dimostrate con argomentazioni contraddittorie. Tolleriamo anche noi di sentirci in contraddizione, e proviamo ad ammettere che la vita sia nata dal formarsi di una prima molecola autoreplicante nel brodo primordiale: dovremo dedurre che tutta l'informazione contenuta nella straordinaria varietà delle specie viventi doveva essere racchiusa, *prima* che esse nascessero, nel brodo primordiale. Si obietterà subito che un'informazione così complessa non poteva essere contenuta in una struttura così semplice. Personalmente non trovo l'obiezione molto forte: potrebbe essere un problema di *codifica* dell'informazione; ma se accettiamo l'obiezione, subito la teoria dell'informazione ci costringe a concludere che tutta l'informazione sull'organizzazione delle specie è apportata loro gradualmente, da agenti esterni che agiscono come *ordinatori*, durante la loro formazione. L'evoluzione non ci appare più come *creatrice* ma come *creatura*. La descrizione evoluzionistica può essere interpretata come un racconto (approssimativo) di quello che avviene nel mondo biologico; ma la teoria dell'informazione ci dice che quanto avviene ha un *perché*, e che questo *perché* abita fuori dal modello evoluzionistico.



Possiamo fare ancora un passo indietro. Possiamo ammettere l'ipotesi cosmologica di un universo *chiuso* (ossia non modificabile dall'esterno), originato da un'unica esplosione primordiale: allora tutta l'informazione necessaria alla sua costruzione doveva essere contenuta nel grumo di materia-energia – non lo so chiamare altrimenti – che il *big bang* sta ancora proiettando attorno a noi. Cioè doveva precedere l'esistenza dell'universo fisico, come noi ora lo sappiamo concepire. Se poi riteniamo invece che l'universo sia sempre aperto ad influenze esterne (ed anche questa ipotesi è accettata dalla comunità dei cosmologi), dobbiamo ammettere che queste contengano anche l'informazione proveniente da un *ente ordinatore*, la cui natura sfugge all'*attuale* indagine scientifica.

Fin qui arriva il linguaggio della fisica. Più oltre, il credente può riconoscere in queste teorie cosmologiche, nate da una fisica rigorosamente sperimentale, affascinanti rappresentazioni dell'atto creatore, adeguate alla cultura d'oggi come l'universo tolemaico era adeguato alla grande cultura medievale: l'universo come progressiva attuazione – ed anche deterioramento: il peccato? – di un messaggio creatore di straordinaria bellezza e complessità. È un merito non trascurabile del concetto molto tecnico di informazione, ma non è il punto su cui fermarci ora.

Il punto è che la radicale revisione dei principi della conoscenza scientifica, che fisici e matematici hanno compiuto nella prima metà del XX secolo, ha dimostrato la loro radicale inconsistenza. La scienza ha raggiunto da sé l'evidenza della propria insufficienza, della propria incompletezza. Ha scoperto che non può reggersi su se stessa. Hofstadter, che molto riflette su questi *strani anelli* che si contraddicono da sé (ma non arriva a trarre la conclusione ultima delle sue riflessioni) cita più volte uno scanzonato detto americano: *non ci si può sollevare da terra appendendosi ai cordoni dei propri stivali*. La crisi della nostra scienza è determinata da una sua radicale debolezza interna, dalla sua mancanza di radici. Un grande albero cresciuto rigoglioso per quattro secoli, che all'improvviso si è scoperto senza radici.

Dal punto di vista teoretico questa non è una grande scoperta: Gödel e Shannon hanno soltanto messo in luce un difetto originario e antico, che altri avevano già mostrato senza bisogno di teoremi. Citare Husserl<sup>7</sup> è d'obbligo per la lucidità e la precisione con cui egli analizza l'origine della crisi, senza necessità di riferirsi al teorema di Gödel – che probabilmente non conosceva ancora, perché è di pochissimo anteriore alla conferenza dalla quale è scaturito il suo libro – né tanto meno Shannon che era di là da venire. Husserl fa risalire la crisi della scienza alla sua stessa nascita: egli ripercorre l'itinerario intellettuale che, dalla centralità dell'uomo, attraverso la fisica di Galileo e la matematica e la logica di Cartesio e Leibniz, è arrivato fino all'*occultamento* del senso delle scienze naturali. L'umanità del Rinascimento, che aveva svalutato i modi

di esistenza propri del Medioevo e rivendicava la piena libertà di plasmare se stessa, aveva necessità di ritrovare nella filosofia – alla maniera dell'uomo classico – il principio unificatore del sapere e della prassi. Galileo identifica questo principio nella conoscenza matematica del mondo: «Galileo parti dunque dal mondo praticamente comprensibile, in cui la geometria, nella sfera tradizionale del mondo sensibile circostante, contribuisce a un'univoca determinazione, e si disse: ovunque si è giunti ad elaborare una simile metodica, grazie ad essa è stata superata anche la relatività dell'apprensione soggettiva, che in fin dei conti è essenziale del mondo empirico-intuitivo. Perché in questo modo noi attingiamo una verità *identica, irrelativa*, e chiunque sia in grado di comprendere e di praticare questo metodo, se ne può convincere. *Così dunque conosciamo veramente un essente in sé*, anche se soltanto a partire da ciò che è dato empiricamente e nella forma di un'approssimazione, che dev'essere costantemente migliorata, alla forma ideale geometrica, la quale funge da polo-guida»<sup>8</sup>. La descrizione matematica non è per Galileo, come invece è per noi, una rappresentazione della realtà sensibile adeguata alle nostre necessità di conoscerla e manipolarla, un *modello* essenzialmente strumentale. Esiste, per Galileo, una *causalità esatta universale* che abbraccia tutta la realtà pensabile; essa è attingibile per mezzo del ragionamento matematico-deduttivo e può essere conosciuta, in modo illimitatamente preciso, con operazioni di misura strumentale<sup>9</sup>.

Per Galileo la matematica è dunque il modo assoluto di conoscere la realtà: tutta la realtà sensibile e pensabile, il suo senso ultimo. Ma questo ufficio supremo della matematica è messo in discussione dai puri matematici. «Per quanto riguarda il versante della matematica il modello epistemologico [...] fondato sull'intimo legame fra il linguaggio di questa e i concetti del mondo fisico, entra in crisi alla fine dell'Ottocento, soprattutto ad opera del filone di pensiero della scuola tedesca della fine del secolo, che attraverso figure come Cantor, Dedekind, Frege, trova in David Hilbert il suo personaggio più rappresentativo. La concezione "assiomatica" che da questo filone trae origine rivendica un'autonomia della matematica che implica la sua separazione totale sia dall'intuizione che dalle scienze sperimentali, e conduce alla perdita di ogni riferimento a contenuti esterni»<sup>10</sup>. Per la verità questa trasformazione è incominciata già al tempo di Galileo, ad opera degli algebristi come François Viète che contrapponevano la *logistica speciosa* alla *logistica numerosa*, il calcolo delle formule a quello dei numeri: anch'essa potrebbe essere vista come un vizio d'origine della nostra scienza. A prima vista è una liberazione della matematica dal suo ufficio di ancella delle scienze fisiche: in realtà è lo svuotamento del suo senso, del suo valore di chiave della conoscenza *metafisica* del creato. Così, con una simmetria che è una specie di contrappasso, la matematica subisce la stessa sorte della fisica che, affrancata dal medievale asservimento alla metafisica, in realtà si ritrova priva di senso. La matematica è ridotta a pura tecnica, è insieme *idealizzata e tecnicizzata*. L'accostamento delle

due parole, che è di Husserl, suona duro per noi che usiamo contrapporre le idee astratte alla tecnica materiale, e merita che vi riflettiamo ancora un momento. Liberata dai riferimenti alla realtà materiale, la matematica è stata trasferita nel mondo della pura astrazione; ma con questo essa è stata ridotta al puro esercizio di costruire splendide argomentazioni, affascinanti prove di abilità tecnica. Come tecnica, la matematica è la madre di tutte le tecniche che, nei secoli successivi, cambieranno il volto del mondo. Ma in questo modo l'intera scienza, che orgogliosamente l'uomo del Rinascimento aveva fondato sulla matematica, perde il suo valore di pura conoscenza, si tecnicizza, si fa capace di dare all'uomo soltanto strumenti di discutibile utilità materiale.

Così la vicenda è conclusa. A leggerla e raccontarla, questa storia suscita due impressioni opposte fra loro. La prima è di un meccanico, ineluttabile succedersi di avvenimenti, concatenati l'uno all'altro da un rigido rapporto di causa a effetto. Questa catena può essere inseguita a ritroso nel tempo. Friedrich Muckermann, in un libro poco noto in Italia<sup>11</sup>, attribuisce l'origine del processo nientemeno che ad Alberto Magno – il rifondatore della matematica europea – e a Tommaso d'Aquino. «Furono essi che elaborarono Aristotele fecondato dalla scienza della natura; che misero in relazione con le concezioni cristiane la corrente della millenaria civiltà umana; che consapevolmente formarono del principio umano il fondamento dell'attività culturale». Indubbiamente si può riconoscere in Alberto Magno il padre della nostra matematica, e si può far risalire alla logica fermissima di Tommaso quel voler definire ogni cosa in modo univoco, chiaro e distinto, quel volere tutto logicamente deducibile che da Cartesio in poi è la caratteristica forse più evidente della nostra cultura europea nel confronto con altre culture. Ma Alberto Magno ha ereditato la matematica dagli Arabi e questi dai Greci, Tommaso ha rinnovato Aristotele... Di nuovo siamo tentati dal meccanicismo che coglie i legami logici ma non le finalità, non le responsabilità.

La seconda delle due impressioni è, all'opposto, che l'uomo del Rinascimento abbia commesso un vertiginoso peccato di superbia: abbia sostituito a Dio dapprima se stesso e poi un idolo, la matematica. O più esattamente una collezione di idoli, di cui la matematica è il capostipite. Muckermann chiude il suo discorso sulla scienza con un giudizio senza appello: «Il principio umano, una volta riconosciuto e apprezzato, si sciolse orgogliosamente dalle sue relazioni verso l'Essere increato per proclamare la sua assoluta signoria e incarnare un sempre più sfrenato individualismo». Forse queste parole, scritte nel mezzo della seconda guerra mondiale, ci sembrano troppo dure e sbrigative. Tuttavia, se ammettiamo che la storia sia fatta dagli uomini, dobbiamo pensare che qualcuno, in qualche momento, abbia compiuto delle scelte e le abbia sbagliate. Chi, quando, con quale consapevolezza e reale libertà di scegliere altrimenti, è poi difficilissimo dire. Gli storici non ci aiutano molto, non amano molto questo tipo di domande: i libri di storia si scontrano col più comune dei luoghi co-



muni della storiografia positivista, *la storia non si fa con i se*. Ne dovremo riparlare, ma non è poi molto importante se a noi interessa guardare avanti e non indietro.

Neppure per la nostra esperienza personale il non-senso del conoscere scientifico è una straordinaria novità. Nessuno di noi si sente gratificato dall'idea di possedere la medesima razionalità di un *computer* – i *computer*, si sa, sanno soltanto dedurre. D'altra parte io credo che ogni mente credente, da Galileo in poi, abbia avvertito il conflitto fra l'immagine teleologica del mondo, che gli suggerisce la fede, e quella meccanicistica della nuova scienza: il conflitto fra scienza e fede, ciascuno può averlo risolto nella sua coscienza – dando priorità all'una o all'altra immagine – ma a me non sembra sia mai stato risolto sul piano oggettivo, nonostante la buona volontà di qualche teologo.

Ma che la scienza abbia scoperto d'essere senza radici mi pare importante dal punto di vista storico e da quello pratico. Vuol dire che la nostra scienza ha concluso la sua evoluzione, è arrivata alla sua fine naturale, il sistema di pensiero che l'ha generata ha esaurito le sue possibilità, sia buone sia cattive. D'ora in poi la nostra scienza cambierà radicalmente, oppure sopravviverà a se stessa. Certo potrà anche sopravvivere, si è data altre volte la lunga sopravvivenza del cadavere mesmerizzato<sup>12</sup> d'una cultura. Potrà anche produrre altri risultati spettacolari, ma si è preclusa da sé la possibilità di dire cose *realmente* nuove per l'uomo. Da cinquant'anni, in qualche modo, questa cultura scientifica sta sopravvivendo nella maggioranza degli scienziati, che pure conoscono benissimo Gödel e Shannon. È legittimo domandarsi: fino a quando? A quale prezzo? Gli sconvolgimenti dell'Occidente dal 1930 in poi potrebbero anche essere interpretati, con drammaturgica fantasia, come tragici conati di sopravvivenza.

Dovremmo domandarci se la crisi della scienza sia anche la crisi – *terminale* – della nostra civiltà, la fine della nostra epoca. Se il titolo di Guardini, *fine dell'epoca moderna*<sup>13</sup>, sia profetico oltre le intenzioni di Guardini. Evidentemente dipende da che cosa intendiamo per civiltà. Personalmente direi di sì, e non credo per umore catastrofico. Forse piuttosto per deformazione professionale: non darei torto a chi m'accusasse di sopravvalutare l'importanza, nel tessuto culturale, delle cose di cui mi occupo per mestiere. Ma ancora mi conforta Husserl quando nota l'esclusività con cui la nostra visione complessiva del mondo ha accettato di essere determinata dalle scienze positive. Se l'epoca moderna, dal Cinquecento in poi, è stata contrassegnata dalla straordinaria evoluzione delle scienze della natura (e della tecnologia che da esse è germogliata), a me pare del tutto ragionevole che la sua fine sia causata e rappresentata dalla perdita di senso delle scienze della natura.

Dal punto di vista operativo mi pare poi importantissimo che, ora, questa fine sia leggibile anche dagli strumenti del mondo scientifico, sia penetrata

— pur con tante riserve — in quell'ambiente che ama definirsi *la comunità scientifica*. Fra i molti libri scritti, con sostanziale concordia di interpretazioni, sulle vicende della nostra scienza, ne ho citati due, quello di Antonino Drago e quello recentissimo di Marcello Cini: essi mi sembrano particolarmente significativi perché vengono da membri della comunità scientifica. Questa presa di coscienza, in sé, suggerisce qualche idea sul come aprire un'uscita di sicurezza, e la partecipazione di scienziati consapevoli mi sembra indispensabile per varcarla.

Proviamo a riassumere. Il Rinascimento, nell'orgogliosa affermazione dell'autonomia dell'uomo, ha costruito una nuova scienza della natura fondata esclusivamente su se stessa. Cardini di questa scienza sono il metodo deduttivo ed il principio di causalità. Coerentemente utilizzati fino alle estreme conseguenze, questi due cardini hanno denunciato una crisi, che era già nel fondamento originario. Ora questa crisi sembra giunta alla conclusione non più eludibile.

Che cosa può attendersi, ora, la nostra scienza? Grande è la tentazione di dire in fretta, sconsolatamente: nulla. Vorrebbe dire che in cuor nostro pensiamo che l'unico modo *autentico* di far scienza della natura è quello europeo degli ultimi secoli, che non ve ne sono mai stati e non ve ne possono essere altri, nella nostra o in altre culture. Ancora saremmo vittime della tentazione meccanicistica. Ma soprattutto questo atteggiamento sarebbe profondamente *antiscientifico*, molto vicino a quello dei tardivi difensori dell'universo tolemaico.

L'atteggiamento corretto, invece, mi pare suggerito involontariamente proprio da Shannon e Gödel. Se nella natura esiste una teleologia, che cosa può fare uno scienziato onesto se non indagarla, cercar di scoprire a che cosa tende e quale ordine vuol produrre? Se il metodo logico-deduttivo ha dimostrato d'essere insufficiente, che cosa può fare una mente razionale se non andare *oltre* i limiti della logica deduttiva? Non negare i procedimenti deduttivi, ma utilizzare in ugual misura, anche nell'indagine scientifica, gli altri procedimenti che abitano nella nostra mente ed hanno uguale e forse più nobile diritto di cittadinanza: quei procedimenti peculiari della mente umana che i *computer* non conoscono, che la nostra scienza non sa modellare e forse per questo tende ad ignorare — ad escludere dalla categoria del razionale — e che invece producono livelli di conoscenza superiori alla conoscenza deduttiva. Recuperare il valore dell'intuizione — dell'*andar dentro* alle cose — che può arrivare ad intendere la realtà fisica nel suo significato di *simbolo* di quella metafisica.

A me sembra che un compito affascinante attenda i cultori della scienza non ancor nata: *andare oltre* le frontiere *essenziali*, che la nostra scienza si è imposta nel tardo Rinascimento. Ritrovare l'impostazione *teleologica* che la cultura dell'Occidente, forse unica al mondo, ha abbandonato. Cercar di capire il *perché* delle cose, cogliere le finalità nascoste nelle catene apparentemente

ineluttabili di cause ed effetti, scoprire se l'ineluttabilità sia reale o apparente. Dal punto di vista della fede, cercare nelle cose create l'intenzione e l'azione del loro creatore.

Vorrà dire, questo, ricostruire l'unità del sapere? Evidentemente non ancora: siamo ancora pienamente entro l'ordine *fisico*, la metafisica è ancora lontana da noi, il salto di qualità ancora paurosamente alto. Ma, forse, accettare la fine della scienza galileiana significa rimuovere l'ostacolo più forte alla ricerca dell'unità, questo non sapere o non voler vedere altro che i rapporti di causalità, rifiutarsi di arrivare ai *perché* delle cose. Significa invertire il cammino: se prima le vie della fisica e della metafisica apparivano irrimediabilmente divergenti — fino al punto che l'una negasse l'esistenza dell'altra —, ora esse diventano *obiettivamente* convergenti. Mi piace pensare che questa crisi della scienza fisica sia catartica per tutta la nostra cultura: che, assieme alla concezione meccanicistica dell'universo, noi ci avviando ad abbandonare quell'autocentrismo che l'ha generata ed è responsabile della straordinaria ed insieme terribile creatività dei secoli passati. Questa parrebbe, a me, la via obbligata per ricostruire *nell'uomo* l'unità del sapere.

Potranno ancora valere i nostri potentissimi metodi d'indagine sperimentale? Io lo spero ma ne dubito. Una prima ragione del mio dubbio è che essi sembrano ordinati a scoprire i rapporti causa-effetto, non mezzo-fine. Almeno finora sono stati usati così, e non sappiamo se siano idonei ad altro. Forse altri strumenti li dovranno integrare o sostituire, che noi neppure sappiamo pensare. Una seconda ragione mi sembra più sostanziale. Io non posso immaginare quale sarà il modo di procedere della nuova scienza, ma mi parrebbe ragionevole che esso dovesse consistere più nel *meditare* sulle conoscenze già possedute che nello *sperimentare* per accrescerle. I secoli passati, e soprattutto il nostro, hanno accumulato un'enorme quantità di materiale di lavoro. Se pensiamo alle relazioni causa-effetto come a relazioni d'ordine, ed al *fine* come all'oggetto della vera conoscenza, potremo anche dire che la scienza del passato si è dedicata ad *ordinare* questo materiale, che ora è da *conoscere*. Questo materiale bene ordinato è la preziosa eredità che la scienza passata consegna alla futura.

A queste due ragioni se ne aggiunge una terza, non legata alle scoperte di Gödel e Shannon ma, se mai, al principio d'indeterminazione che sembra mettere in discussione la validità dei metodi nel loro stesso campo di applicazione. Il *paradiso perduto* di Marcello Cini è il paradiso delle certezze metodologiche. Il suo libro mostra, con grande ricchezza di argomentazioni ed esempi, come la crisi delle scienze sia anche una crisi dei metodi: i metodi sperimentali sono ordinati alla conoscenza *oggettiva* della realtà fisica, ma il grande dibattito nato dal principio d'indeterminazione mette in dubbio che una conoscenza oggettiva sia possibile.



Infine ci possiamo domandare: come si potrà produrre questa straordinaria rivoluzione, con quali forze e quali strumenti, visto che la maggior parte dei poteri del mondo nemmeno comprende l'innovazione e perciò difende il vecchio ordine? È ragionevole sperare che una minuscola pattuglia di studiosi "illuminati" (ché tali potrebbero chiamarsi, con una certa dose di vanità, coloro che pensano a queste cose) riesca a cambiare un corso di avvenimenti che sembra ineluttabile? Di nuovo il punto di vista meccanicistico, il brutale bilancio delle forze, indurrebbe allo scoraggiamento. Per me, invece, è ragionevole sperare. Paradossalmente mi aiuta, ancora una volta, uno strumento del mio mestiere: la mia speranza è sostenuta — per via intuitiva, non logico-deduttiva! — da un'idea, quella di *biforcazione*, che è familiare alla nostra esperienza comune, che il modo di vedere positivistico aveva espulso dalla vita pratica e relegato, se mai, nella letteratura romantica, e che viceversa la nostra disprezzata matematica ha profondamente rivalutato.

Parlavo di un punto di vista meccanicistico. Noi siamo ancor quasi incorreggibilmente abituati a pensare secondo il principio di azione e reazione: la causa deve essere proporzionata all'effetto che si vuole ottenere. Per muovere grandi masse occorrono grandi forze, per fare le grandi rivoluzioni occorrono i popoli interi. E invece questo non è *sempre* vero: si danno situazioni limite, momenti e luoghi in cui si presentano due vie divergenti, e un piccolissimo atto di scelta può produrre conseguenze radicalmente diverse.

Quello delle biforcazioni è uno dei temi più amati, oggi, della meccanica non lineare. Chi vuole spiegare che cosa sia una biforcazione senza scrivere formule matematiche ricorre a un paragone, che qui è particolarmente calzante. Andiamo a camminare in montagna e guardiamo le gocce di pioggia che ci cadono attorno. Fin che siamo nel fondo della valle sappiamo che tutte seguiranno pressappoco la stessa traiettoria: finiranno in un medesimo ruscello, poi in un ruscello più grosso, poi nell'Isarco, poi nell'Adige. Ma se ci avviciniamo allo spartiacque le cose cambiano: gocce molto vicine possono rotolare per versanti diversi, per cammini lontanissimi. Al Passo del Brennero, una piccola folata di vento può spedire le nostre gocce nell'Adriatico o nel Mar Nero. Azioni piccolissime possono produrre grandissimi cambiamenti. La storia degli organismi biologici è piena di questo genere di avvenimenti. René Thom ne parla molto: ogni modificazione genetica è una biforcazione, lo spostamento di un atomo nel genoma può produrre vita o morte, mostri o fiori meravigliosi.

Anche la storia degli uomini è piena di biforcazioni. Parliamo per esempi: se l'attentato di Sarajevo fosse fallito, o quello a Hitler del 20 luglio '44 fosse riuscito, come sarebbe ora l'Europa? Subito un positivista ci opporrebbe il suo *ma la storia non si fa con i se*. Occorre davvero essere molto positivisti per non porsi problemi di questo genere. Non ci è difficile pensare al Rinascimento come al grande crocevia in cui i nostri padri avrebbero potuto prendere strade diverse da quella che, poi, hanno seguito. Ma sarebbero stati capaci, i

pur intelligentissimi uomini del Rinascimento, di intendere ed usare il sottile gioco di *stabilità strutturale* (è il titolo di René Thom) che, con piccoli spostamenti, avrebbe portato loro e noi per un'altra storia? Qualcuno pensa di sì: «Se pensiamo agli uomini che fan corona a Galileo, alla ferma fede del Keplero, alla gravità gentile di Federico Cesi, alla francescana letizia di don Benedetto Caselli, alla ferma saggezza dell'arcivescovo Ascanio Piccolomini, gente ancora partecipe dell'antica serena cristianità medievale, è chiaro che essi vedevano nelle nuove conquiste un trionfo della verità cristiana»<sup>14</sup>. Sarebbe stato dunque possibile inserire l'universo di Copernico e Keplero in una concezione cristiana del mondo, produrre una nuova fisica *metafisicamente* corretta? Evitare il dramma del processo a Galileo e la schizofrenia che per quattro secoli ha tormentato la cultura europea? Chi o che cosa avrebbe tradito questa possibilità, questa speranza?

Ancor più chiaro mi sembra che noi oggi siamo in uno di questi crocevia, in cui si deve scegliere. Sembra che due vie passino vicinissime fra loro, una diretta verso l'autodistruzione e l'altra verso la speranza: forse un piccolo, consapevole spostamento può farci passare dall'una all'altra. La matematica ci potrebbe suggerire il momento in cui farlo e gli strumenti adatti: il nostro grandioso armamentario scientifico ci darebbe qualche vantaggio sui nostri predecessori, ci aiuterebbe a scegliere con maggiore lucidità e saggezza. E con questo riscatterebbe un poco il suo fallimento. La nota di ottimismo che conclude i libri di Muckermann e di Guardini, e che senza questo riferimento apparirebbe un poco ingenua, ora diventa profetica.

Questo è dunque il segno di speranza, con cui concluderei il discorso se un discorso come questo ammettesse una conclusione: se, nelle biforcazioni, piccole azioni possono produrre grandi risultati, non ci dobbiamo preoccupare del fatto d'essere pochi e deboli. Ci possiamo liberare dal principio di azione e reazione: dall'errore, che sembra di casa nell'impostazione meccanicistica, per cui i grandi cambiamenti si fanno soltanto con le grandi guerre. Occorreva un po' di teoria dei sistemi non lineari per farci scoprire nuovamente che questa è una mistificazione. Deboli forze, usate con sapienza, possono cambiare il mondo.

## Note

<sup>1</sup> DOUGLAS R. HOFSTADTER, *Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid*, Londra 1979; trad. italiana: *Gödel, Escher, Bach, un'Eterna Ghirlanda Brillante*, Milano 1984.

<sup>2</sup> MARCELLO CINI, *Un paradiso perduto*, Milano 1994. La citazione che segue è a p. 59.

<sup>3</sup> Op. cit., p. 508: «Mi pare che il Teorema di Gödel dimostri che il meccanicismo è falso, cioè che le menti non possono essere equiparate a macchine». Citazione da J.R. LUCAS, *Minds, Machines, and Gödel*, in: A.R. ANDERSON, ed., *Minds and Machines*, 1961. Il libro di Hofstadter contiene lunghe citazioni da questo articolo, in cui Lucas sostiene in modo piuttosto convincente che l'intelligenza artificiale è irrealizzabile.

<sup>4</sup> RENÉ THOM, *Stabilité Structurale et Morphogénèse. Essai d'une théorie générale des modèles*, Parigi 1972; trad. italiana: *Stabilità strutturale e morfogenesi. Saggio di una teoria generale dei modelli*, Torino 1980. La citazione è a p. 309 dell'edizione italiana.

<sup>5</sup> GEORGES MONOD, *Le hazard et la nécessité, essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*; trad. italiana: *Il caso e la necessità, saggio sulla filosofia naturale della biologia contemporanea*, Milano 1970, p.29 (l'edizione italiana non indica luogo né data di quella francese).

<sup>6</sup> ANTONINO DRAGO, *Le due opzioni: per una storia popolare della scienza*, Molfetta 1991.

<sup>7</sup> EDMUND HUSSERL, *Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie. Husserliana*, vol VI, L'Aia 1954; trad. italiana: *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, Milano 1961.

<sup>8</sup> Cit., p. 59 della traduzione italiana. I corsivi sono nel testo.

<sup>9</sup> Mi pare che ci sia un paradosso (o, se vogliamo, una contraddizione) in questa assoluta dedizione di Galileo al metodo sperimentale-deduttivo. Chiunque faccia un poco di ricerca scientifica sa che il primo accostarsi a un'idea nuova è di tipo intuitivo. Un'ipotesi viene in mente, essa sembra interessante: s'incomincia a verificarla, spesso inventando anche il metodo di verifica, con un procedimento che assomiglia assai più a quello dell'artista che a quello descritto nelle riviste scientifiche (Hofstadter sottolinea l'affinità fra l'invenzione del ricercatore e le invenzioni di Bach). Soltanto dopo, e soprattutto al fine di convincere il lettore, si riveste il risultato d'una giustificazione deduttiva. Talvolta mi domando se la sua tristissima vecchiaia, Galileo l'abbia trascorsa non tanto nell'umiliazione per aver dovuto abiurare da quanto credeva vero, quanto nel conflitto – forse non esplicito, ma neppure evitabile – fra l'esperienza personale di ricercatore e la teoria che aveva professato.

<sup>10</sup> MARCELLO CINI, cit., p. 55.

<sup>11</sup> FRIEDRICH MUCKERMANN, *Der Mensch im Zeitalter der Technik*; trad. italiana: *L'uomo nell'età della tecnica*, Brescia 1950. L'edizione italiana non porta luogo né data dell'edizione originale tedesca; la prefazione è datata da Crozant, Francia, 1942. Le citazioni sono alle pp. 21 e 22 dell'edizione italiana.

<sup>12</sup> Per chi non la ricordasse, la locuzione viene da un racconto di Edgar Poe.

<sup>13</sup> ROMANO GUARDINI, *Das Ende der Neuzeit, Ein Versuch zur Orientierung*, Basilea 1950; traduzione italiana in: *La fine dell'epoca moderna. Il potere*, Brescia 1954.

<sup>14</sup> GIORGIO DE SANTILLANA, *Galileo e la sua sorte*, in: AA.VV., *Fortuna di Galileo*, Bari 1964.



