

Informația ca noțiune fizică

(traducere și adaptare după Jérôme Segal, *Le Zéro et le Un. Histoire de la notion scientifique d'information au 20^e siècle*, Paris, Éditions Syllepse, 2003)

Către definiții cantitative ale informației

Între 1922 și 1935, fixând datele, inevitabil, arbitrar, oamenii de știință și inginerii introduc în propriile lor domenii de cercetare noțiunea de informație. La început, a fost vorba mai degrabă de reînusușirea unui cuvânt din limbajul curent ca „inteligența” la inginerul de telecomunicații Harry Nyquist în 1924, ori direct a cuvântului „informație” la Gilbert Newton Lewis în 1930 sau la Ronald Aylmer Fisher începând cu anul 1922.

Acești trei oameni de știință vin din trei medii foarte diferite. Primul a fost un inginer american de telecomunicații, de origine suedeză, celălalt fizician, născut în Statele Unite, iar ultimul e unul dintre reprezentanții Școlii statistice britanice, devotat cauzei eugeniste. Fisher a fost, probabil, cel care a căutat pentru prima dată un fundament pentru folosirea noțiunii de „informație”, plasând-o în cadrul teoriei sale a estimării statistice, fondată pe noțiunea de verosimilitudine (plauzabilitate). Ulterior, definirea noțiunii de „informație” ca și concept științific a devenit chestiune centrală, iar publicarea teoriilor lui Dennis Gabor sau Claude Shannon, în anii '40, au constituit o etapă importantă. În aceste două teorii, „noțiunea” era prezentată sub un plus de mare rigoare, cu ajutorul unei teorii matematice, dar mai ales a unei abstractizări foarte înalte care face din referința la un sistem fizic concret doar un accesoriu.

Pentru că oamenii de știință care au participat la această conceptualizare aparțin unor trei discipline distincte, le vom prezenta lucrările în cadrul problematicii la care fiecare se raportează, ceea ce nu înseamnă în nici un caz că nu există raporturi directe între cele trei discipline, care sunt fizica (de la teoria cinetică a gazului la mecanica cuantică), statistica aplicată la genetică (și în particular la genetica populațiilor) și telecomunicațiile. În plus, vom mai evoca de-a lungul expunerii noastre atât concepția bayesiană a probabilităților din fizică, cât și locul legii termodinamicii în scrierile statisticianului R. A. Fisher. Prezentarea acestor lucrări în ansamblul celor realizate în epoca respectivă în domeniile amintite permite contextualizarea mai bună a teoriilor științifice care, la o primă vedere, pot apărea în afara istoriei.

Problema care se pune atunci este de a ști dacă nu există comunicare indirectă între aceste trei discipline științifice marcate, de exemplu, în grade diferite, de un nou avânt al calcului probabilităților și înscrise într-un context cultural mai larg. De aceeași manieră în care istoricul Thomas Kuhn a analizat descoperirea simultană a legii conservării energiei, între 1842 și 1847, de către patru oameni de știință care nu comunicau între ei, vom arăta cum, în trei câmpuri științifice distincte, s-a ajuns la o definiție științifică a noțiunii de informație.

Împărțirea pe trei domenii de cercetare se opune, de exemplu, la ceea ce propune istoricul științelor W. Aspray într-un articol despre „conceptualizarea științifică a informației: o anchetă”. El distinge cinci domenii diferite: termodinamica, știința comenzii și a comunicării/comunicației ca nouă ramură a ingineriei electrice, fiziologia sistemului nervos, dezvoltarea behaviorismului ce a condus la considerarea creierului drept un organ de tratare a informației și, în sfârșit, studiul funcțiilor recursive în logica matematică.

Indiferent de viziunea adoptată, pentru a fi punctuali, trebuie demonstrat că teoria informației, care cunoscuse începând cu sfârșitul anilor '40 o formidabilă expansiune în domenii extrem de diferite ale cunoașterii, se sprijină pe o conceptualizare ce începe din anii '20 în domenii clar diferențiate. Vom arăta astfel cum, chiar dacă Shannon pare a se prezenta în descendența directă a lucrărilor realizate în domeniul telecomunicațiilor, teoria sa matematică a comunicației este de asemenea influențată de către publicațiile

anilor '20 din fizică și din statistică. E suficient a ne gândi aici la analogia dintre informație și entropie sau la considerarea mesajului ca o variabilă aleatorie (temă posibil foarte importantă încă pentru Wiener).

Această primă conceptualizare a noțiunii de informație exclude în întregime dimensiunea semantică a informației și, mai cu seamă, contribuie la apropieri inedite între domenii a priori îndepărtate. De aceea, amintita diviziune în trei părți – fizică, statistică și telecomunicații – urmărește în mod clar să pună în valoare partea novatoare a acestor apropieri. Vom vedea, de asemenea, că unul dintre obiectivele axiomatizării teoriei informației, și cu atât mai mult ale ciberneticii, îl constituie abolirea separării celor trei domenii.

Noțiunea de informație după teoria cintetică a gazelor: Lewis, Szilárd și Smoluchowski

„Un surplus de entropie înseamnă întotdeauna o pierdere de informație și nimic mai mult”. Iată ce se poate citi în numărul din 6 iunie 1930 a revistei *Science*. Autorul, Gilbert N. Lewis (1875-1946) își consacră articolul „simetriei timpului în fizică” și înțelege să demonstreze că ipoteza ireversibilității nu este necesară în fizică (nici chiar în chimie), ipoteza unei cauzalități temporare fiind după el consecința unei regretabile confuzii între sensul curent al cuvântului „timp” și cel științific. Se poate nota deja aici că se regăsește această problematică a utilizării de către oamenii de știință a unui cuvânt din limbajul obișnuit, bineînțeles împreună cu cuvântul „informație”, în discuțiile despre legitimitatea teoriei informației. Pentru folosirea cuvântului de către Lewis, de care este vorba aici, dacă se face referirea cea de-a 11-a ediție a *Enciclopediei Britanice* (1910-1914), cuvântul „informație” înseamnă deja „comunicare a cunoașterii” (cu un al doilea sens juridic). Dar trebuie văzut în ce context a fost posibilă introducerea acestui cuvânt în fizică.

Pentru a arăta că reversibilitatea timpului poate fi presupusă, Lewis alegea patru discipline: mecanica, termodinamica, teoria radiației și electromagnetismul. În mecanică, limitându-se la teoriile newtoniene, i-a fost suficientă doar o coloană de text din articol pentru a-și convinge cititorul, la fel ca și în cazul teoriei radiației, unde se folosește de teoria cuantică a luminii a lui Einstein, pentru a-și atinge scopul. Pentru el, nici cazul teoriei electromagnetice nu constituie o sursă de mari dificultăți întrucât el recomandă utilizarea teoriei potențialului așteptat și amintește că tratamentul matematic al ecuațiilor lui Maxwell oferă întotdeauna două soluții simetrice, fizicienii arogându-și dreptul – tot după el – de a elimina de fiecare dată soluția care intră în conflict cu „concepția lor comună a cauzalității”.

Termodinamica este cea asupra căruia expozeul său se restrânge, cu naturalețe asupra discuției celui de-al doilea principiu. Nu e ceva extraordinar că el rescrie istoria acestui principiu prin formularea lui Gibbs, cea care înlocuiește deja cuvântul „imposibilitate” prin „improbabilitate” în formularea lui Clausius, potrivit căreia e imposibil ca entropia să scadă. După aceea, el face aluzie la paradoxurile lui Loschmidt și Poincaré-Zermelo referitoare la *teorema H* a lui Boltzmann, chiar dacă nu le citează numele, și ajunge la o interesantă viziune subiectivă asupra entropiei: „**Creșterea entropiei survine atunci când se trece de la o distribuție continuă la o distribuție necunoscută. Pierderea care este întotdeauna caracteristică proceselor ireversibile este o pierdere de informație**”.

Pentru a ajunge la acest rezultat teoretic, el pleacă de la experimente de gândire. *Gedankenexperimentele* au jucat și joacă încă un rol important în construcția fizicii moderne. De exemplu, J. D. van der Waals (1837-1923) putuse astfel explica în 1911 al doilea principiu al termodinamicii pornind de la probabilitățile condiționale ale lui Bayes. El imaginase fenomene de difuzie într-o cameră închisă și, utilizând

probabilitățile bayesiene, concluziona că acceptându-se principiile elementare ale calculului probabilităților, entropia trebuia să crească semnificativ pentru un sistem închis.

În ceea ce-l privește, Lewis pleacă de la exemplul amestecului jocului de cărți și utilizează o experiment de gândire calchiat pe cel al *demonului lui Maxwell*, cu trei molecule de gaz diferite, pentru a arăta că în virtutea principiului recurenței, fenomenele de difuzie nu sunt ireversibile. El scrie că în acest experiment în care moleculele pot fi urmărite în mod individual îți poți „atribui privilegiul demonului lui Maxwell”. Nu se va zăbovi aici în detaliu asupra acestui celebru experiment de gândire, întrucât „*Demonul lui Maxwell*” este binecunoscut în literatura de specialitate.

E în general admis că în 1929, odată cu un articol încă celebru al ungarului Leo Szilard (1898-1964), se poate asista la o primă exorcizare a demonului: dacă el însuși este cel care poate măsura viteza unei molecule pe care o observă, el are nevoie de a fi „instruit” sau „informat” asupra acesteia, iar ceea ce poate fi calificat drept „informație” corespunde unui cost energetic și entropic. Ori, după cunoștința noastră, fizicienii sau istoricii se referă de fiecare dată la traducerea engleză a articolului, dar aceasta se află, după cum vom vedea, la originea anumitor confuzii.

Instalat la Berlin după 1919, fizicianul ungar nu folosește decât două surse în articolul său: publicația sa precedentă din *Zeitschrift für Physik*, în 1925, și textul unei conferințe a fizicianului polonez Marjan Smoluchowski (1872-1917). În articolul său „Despre extensia termodinamicii la fenomenele de fluctuație”, Szilard anunță deja într-o notă din josul paginii noua orientare a cercetărilor sale. Arătând că nu există mijloc sigur pentru a face să scadă entropia unui sistem închis, el precizează: „E ușor de conceput valoarea unei reflecții care trimite deja la demonul lui Maxwell, contra interpretării actuale a celui de-al doilea principiu al termodinamicii care, date fiind prin urmare fenomenele de fluctuație, impune o validitate restrânsă: Dacă un demon aflat în serviciul nostru ar fi capabil să ghicească [*erraten*] de fiecare dată valorile unui parametru fluctuant și ar fi capabil de intervenții apropiate (prin însușire de informație), atunci s-ar putea cu siguranță construi, servindu-ne de serviciile lui, o mișcare perpetuă (un perpetuum mobile) de tipul doi. Noi, ca ființe umane, nu putem în ultimă instanță ghici valoarea parametrului, dar putem să o măsurăm și am putea astfel, cu rezultatul fiecărei măsurări, să pregătim o intervenție apropiată. Aceasta ridică problema de a ști dacă, în acest fel, noi nu ajungem la o contradicție cu interpretarea strictă și dogmatică a celui de-al doilea principiu al termodinamicii.

Interpretarea „strictă și dogmatică” la care el se referă poate fi citită în formularea generală a celui de-al doilea principiu potrivit căreia nu se poate ajunge niciodată la o scădere a entropiei. Calificativul „dogmatic” folosit de Szilard poate lăsa impresia că există o altă interpretare a acestui principiu, mai puțin cunoscută, care n-ar veni în contradicție cu experimentul descris. E vorba atunci de interpretarea statistică a celui de-al doilea principiu care permite desigur a ține cont de fenomenele de fluctuație.

Printre altele, există aici o introducere la problema măsurii. Fiecărei măsurii îi corespunde un cost în materie de entropie, iar acțiunea măsurării propriu-zise modifică starea sistemului studiat. Dacă nu există cheltuială de energie, verbul „a măsura” se poate înlocui prin „a ghici”. Acesta din urmă este cuvântul utilizat de Szilard cu privire la demonul său, pentru *erraten*, care înseamnă deci a prevedea un rezultat fără nici un fel de măsurare, chiar dacă „a măsura” ar presupune o interferență, dând seama astfel de o stare de lucruri ireversibil schimbată. Măsurarea este cea care permite accesul la valorile parametrelor și care, prin aceasta, determină mijloacele de acțiune. În lucrarea sa din 1929, Szilard ajunge la o cuantificare a costului acestei măsurări în termeni de energie și de creștere a entropiei: el arată că acest din urmă cost echivalează cu $k \log 2$ [J/K] și în aceasta constă creditul esențial ce poate fi acordat publicației sale din 1929, alături de

scoaterea în evidență a rolului esențial jucat de „memorarea” realizată de aparatul de măsură. Restul e pe larg conținut în scrierile lui Smoluchowski.

Revenind la opera fizicianului polonez, trebuie spus că este evident anterioară celei a lui Szilard din moment ce acesta din urmă își susține teza la Universitatea din Berlin în 1922, adică la cinci ani după moartea lui Smoluchowski.

Marjan Smoluchowski își face studiile la Universitatea din Viena unde primește diploma de doctor în 1895. Așa cum se stipulează în prefața *Operele* sale editate în 1924, el urmează „mai ales învățătura profesorilor Exner și Stefan, inițiindu-se sub coordonarea lor în arta cercetării științifice; dar nu a avut niciodată ocazia de a pătrunde în intimitatea intelectuală a lui Boltzmann”. Părăsind Viena, el începe trei sejururi determinante pentru formarea sa: la Paris din noiembrie 1895 până în iulie 1896 în laboratorul lui G. Lippmann, când nu este la cursurile lui Poincaré sau ale lui Hermite, la Glasgow din septembrie 1896 până în aprilie 1897 primit de către Lord Kelvin și, în fine, la Berlin din mai până în august 1897 pe lângă E. Warburg.

Lucrările sale asupra mișcării browniene sunt un pic umbrite de cele pe care Einstein le-a condus independent în aceeași perioadă (1905-1906), deși ei și-au adus în mod egal contribuția la acceptarea ipotezei atomiste demonstrând că pătratul liberului parcurs mijlocit de agregate ar fi cel calculabil și nu viteza, cum se credea până atunci. Teoria lui Smoluchowski putea nu numai să ia în discuție coliziunile dintre particulele „browniene” și moleculele înconjurătoare, dar și să trateze cazul în care moleculele sunt supuse unei forțe cvasi-elastice.

De-abia în lucrarea sa din 1912, publicată în *Physikalische Zeitschrift*, Smoluchowski face pentru prima dată legătura între problema demonului lui Maxwell și cea a mișcării browniene. Aceste fenomene aleatorii opuneau un proces mecanic de funcționare contra celui de-al doilea principiu al termodinamicii, dar nu făceau prin aceasta necesar apelul la capacitatea de distincție a demonului. Printre diferitele procese automate pe care le imaginează în locul demonului, poate fi notat cazul unei roți dințate neînvrăndindu-se decât într-un singur sens și legată la un fir de torsiune. Acest exemplu este deja cel a lui Louis-Georges Gouy (1854-1926), pe care Smoluchowski nu-l citează totuși și care, încă din 1888, într-un articol apărut în *Journal de Physique*, imaginează un fenomen în cadrul căruia, din cauza mișcării browniene, al doilea principiu ar fi violat. S-ar datora aceasta mai degrabă faptului că demonul lui Maxwell „triază” moleculele sau întrucât nu s-a gasit un William Thomson care să califice drept „demon” mecanismul lui Gouy, decât faptului că articolul în chestiune a rămas prea puțin cunoscut? F. Bonsack aduce în 1961 argumente pentru cea de-a doua ipoteză. Care este pe de altă parte, raportat la subiectul expresiei „demonul lui Maxwell”, rolul „demonului” imaginat în 1812 de Laplace, această „(...) inteligență care, la un moment dat, ar cunoaște toate forțele de care natura este animată și starea respectivă a ființelor care o compun (...)”?

Dar e timpul revenirii la Smoluchowski și la discuția al cărei text corespondent este reprodus după articolul din 1912. El adaugă „[că] n-ar fi exclus că acțiunea inteligenței” (*Das Wirken*) provoacă o „compensare” a scăderii entropiei prin disiparea de energie, chiar dacă el precizează că o atare inteligență „depășește cadrul fizicii”. Asemenea cuvinte, care se regăsesc în numeroase scrieri ale acestei perioade (chiar mai mult, în interpretările paradoxurilor mecanicii cuantice), sunt în mod particular importante întrucât, așa cum a demonstrat-o G. G. Granger, numeroase teorii vizând explicarea unor pretense „fenomene paranormale” se sprijină la fel de mult pe noțiunea de informație (ca intermediară între materie și conștiință).

Invitat în 1913 la Göttingen prin fundația Wolfskehl la o conferință organizată de către Hilbert despre teoria cinetică a gazului, Smoluchowski își precizează – în cadrul intervenției sale – ideile asupra

importanței observației pe care *demonul* trebuie să o facă. Se găsește în actele conferinței la care participase alături de Planck, Debye, Nernst, Sommerfeld și Lorentz (1914), că „ființa inteligentă” trebuie să fie „cu exactitate instruită” (*unterrichtet*) asupra moleculei pe care o observă. Cartea cu actele conferinței pare să fi avut o largă difuzare și ea este cea pe care Szilárd o citează în pagina a doua a articolului său. Ori, atunci când în ediția originală a articolului lui Szilárd textul lui Smoluchowski ocupă două treimi de pagină, acesta este redus la un mic paragraf în traducerea englezească, restul presupunându-se deci ca fiind scris de către Szilárd. Se întâmplă ca pasajul vizat să fie chiar cel citat mai sus referitor la studiul lui Smoluchowski despre demonul lui Maxwell.

Mai mult, participiul german *unterrichtet* („instruit”) e tradus în engleză prin *informed* („informat”), lăsând să se creadă că Szilárd utilizează cuvântul *informiert* („informat”) care exista efectiv în epocă cu sensul cunoscut azi. De fapt, Smoluchowski este cel care scrie și nimeni nu vorbește de informație! E vorba aici de erori mai mult decât regretabile care fac, de exemplu, ca în istoria lor a soluțiilor date la problema demonului lui Maxwell, Lef și Rex să omită această referință la Smoluchowski (expunerea în chestiune publicată în 1914) din lista celor 223 de surse pe care le indică. Aceasta nu este încă prea jenant, dar atunci când se citește în *Dictionary of Scientific Biography* din articolul despre Szilárd că... „Rezultatul muncii sale îl condusesse la faimoasa sa publicație din 1929 care stabilea conexiunea dintre entropie și informație și anunța astfel teoria modernă a ciberneticii” ... este îndreptățită mirarea, la fel ca și când Lanouette, biograful fizicianului ungar, scrie „Szilárd a văzut elementele cheie ale teoriei informației cu trei decenii înainte ca ea să devină populară”, fără ca măcar numele fizicianului polonez, Smoluchowski (care, murind în 1917, nu a avut „șansa” de a emigra în Statele Unite), să fie menționat în cele 500 de pagini ale biografiei.

E interesant de a examina, sub acest aspect, locul dat acestei publicații a lui Szilárd în ceea ce se denumeste abuziv „autostrăzi ale informației”. Pe pagina de întâmpinare (*homepage*) privind fizicianul american de origine ungară, se poate citi încă de la început textul următor: „Fiți bineveniți la pagina de internet *Leo Szilárd* unde fizicianul și «conștiința științei» Leo Szilárd (1898-1964) reînvie în spațiul informațional. Ideile lui Leo Szilárd includ acceleratorul linear, cyclotronul, microscopul electronic, teoria informației și reacția nucleară în lanț. De egală importanță era și insistența sa asupra faptului că oamenii de știință acceptă o responsabilitate morală pentru consecințele muncii lor. În scrierea sa din 1929 despre demonul lui Maxwell, Szilárd identifică unitatea sau «bitul» de informație. **Word Wide Web**-ul pe care navigați actualmente și ordinatoarele care fac acest lucru posibil demonstrează importanța ideii lui Szilárd multă vreme neapreciată”.

Acest lucru e pur și simplu fantezist și seamănă mai mult cu un mit fondator, așa cum sunt cele privitoare la rețeaua **Internet**. Nu este vorba despre „bit” în articolul lui Szilárd, iar formula $k \log 2$ pe care el o dă e fără îndoială mai puțin importantă pentru teoria informației ce avea să vină decât expresia teoremei H a lui Boltzmann.

Iată deci pentru ce s-a preferat să se înceapă această prezentare a diferitelor definiții cantitative ale informației din fizică prin lucrarea publicată de Lewis și să fie utilizate referințele date de Szilárd cu scopul de a prezenta un pic mai pe larg opera lui Smoluchowski, adesea rău cunoscută. Punctul de vedere manifestat în acest articol, referitor la presupusa nerecunoaștere în istoriografia tradițională a importanței operei lui Smoluchowski se află de altfel confirmat de către editorul unui volum în onoarea fizicianului polonez (ceea ce nu trebuie să mire!), dar și de către istoricul american al fizicii cuantice Max Jammer. Acesta scrie în *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*: „Concepția lui Smoluchowski despre o inteligență care se află fără întrerupere în situația de cunoaștere a stării instantanee a unui sistem dinamic și

este astfel capabilă de a invalida cea de-a doua lege a termodinamicii, fără să facă vreun lucru, era probabil prima speculație logică de neînălțurat privind intervenția fizică a spiritului asupra materiei”.

Nu istoria mecanicii cuantice preocupă totuși aici, precum pe Jammer, ci studiul proceselor stohastice. În celebrul său articol din 1943 despre „Probleme stohastice în fizică și în astronomie”, astronomul de origine indiană Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) recapitulează starea cunoștințelor în acest domeniu. El rezumă aportul studiilor lui Smoluchowski asupra mișcării browniene astfel: „(...) prim exemplu al unui caz în care era posibil de a studia în detaliu, deopotrivă teoretic și experimental, tranzițiile între natura ireversibilă la nivel macroscopic a difuziei și natura reversibilă la nivel microscopic a fluctuațiilor moleculare”.

Mai mult, Chandrasekhar îi recunoștea lui Smoluchowski câteva priorități teoretice hotărâtoare, precum ar fi introducerea conceptului de „probabilitate după acțiune” (*Wahrscheinlichkeitsnachwirkung*) pe care îl găsim clar definit în 1916, după mai bine de zece ani de muncă în acest domeniu. Acest nou tip de probabilități, care va deține un loc esențial în teoria măsurii, se referă la cazul observațiilor repetate și se compară cu definiția lanțurilor Markov (după numele matematicianului sovietic, 1856-1922) din 1907, lanțuri care permit modelarea fenomenelor de evoluție aleatorie. Chandrasekhar consacră de altfel un alt articol, exclusiv fizicianului polonez, în 1986.

Acesta este sensul în care scrierile lui Smoluchowski participă la apropierea care se observă la începutul secolului între fizica stohastică ce se orginează, după cum am arătat, în teoria cinetică a gazului, și teoria matematică a probabilităților care își află cât de cât axiomatizarea în lucrările lui Borel, apoi ale lui Kolmogorov. Din punct de vedere filosofic, problema ireversibilității timpului e cea care este comună celor două discipline.

O asemenea apropiere se continuă atât cu lucrările lui Norbert Wiener (1894-1964) referitoare la o primă unificare a problemelor matematice și fizice în jurul mecanicii statistice și a modelării mișcării browniene, cât și cu lucrările lui Johannes von Neumann (1903-1957) privind ipoteza ergotică și *Fundamentele matematice ale mecanicii cuantice*, după cum vom vedea mai târziu. În cartea publicată în 1932, von Neumann va reansambla într-o teorie a măsurii esența rezultatelor a diferite teorii despre mișcarea browniană și despre demonul lui Maxwell ajungând astfel, printre altele, la expresia entropiei legate de o măsură:

$$\sum_{n=1}^{\infty} w_n \ln w_n$$

Mișcarea browniană ca și concept unificator?

Norbert Wiener, matematician și fizician

N. Wiener își începuse cercetările prin câteva studii asupra fundamentelor matematicii, prin studierea logicii (sub influența lui Russell) și, în aceeași măsură, a filosofiei (în mod special, concepția bergsoniană despre timp). El scrie în 1958, în primul volum al revistei *Cybernetica*, un articol retrasând întreaga sa carieră științifică în care declară că a ales să se intereseze îndeaproape în matematică de analiză, căutând mereu fenomene fizice în a căror modelare putea să-și utilizeze direct lucrările de matematică. În urma colaborării sale din 1920 cu R. M. Fréchet (1878-1973) de la Strasbourg, el începe să publice despre mișcarea browniană.

În 1918, fizicianul german Walter Schottky avea să propună o explicație pentru zgomotul de granulație întâlnit în tuburile cu vid: era vorba de fluctuații ale numărului de electroni emis prin efect termoionic.

Wiener propunea o apropiere între acest zgomot și mișcarea browniană pe care o studiasse schematizând traseul moleculelor prin cel pe care îl face un balon împins din toate direcțiile spre mijlocul unei mulțimi. Lucrând, după 1919, la departamentul de matematică al lui *Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.)*, el va ataca problema proprietăților matematice ale acestor traiectorii și definește, pentru a duce la bun sfârșit acest studiu, „integrala stohastică”. Urmând această analiză a lui Wiener, F. Hausdorff va introduce noțiunea de dimensiune a unei curbe, aflată la originea dezvoltării teoriei fractalilor a lui B. Mandelbrot.

După P. R. Masani, fără îndoială cel mai bun biograf și comentator al său, s-ar părea că publicarea de noi studii despre fenomenele de turbulență (G. Taylor, în 1920), ca și demonstrarea teoremei ergodicității de către von Neumann și Birkhoff, sunt cele care i-au dat ideea de a pune analiza mișcării browniene ca paradigmă pentru studiul fenomenelor stohastice. Din 1924 până în 1930, acest lucru l-a condus în matematică spre propunerea unei teorii generalizate a analizei armonice.

La începutul anilor '30, mișcarea browniană beneficia deci de o formalizare matematică, iar importanța teoriilor fizice care o descriau fusese deja demonstrată (de exemplu, prin măsurarea numărului lui Avogadro de către J. Perrin sau prin experimentele suedezului T. Svedberg). Aplicând sfaturile lui Bertrand Russell ce constau pentru Wiener în a rămâne la frontierele fizicii și matematicii, Wiener explică și anumite rezultate ale mecanicii cuantice, cum ar fi – de pildă – faptul că pătratul amplitudinii funcției de undă reprezintă o probabilitate de prezență, prin formalismul ce se aplică la mișcarea browniană.

El reia, de asemenea, studiile despre turbulență introducând în 1938 noțiunea de „haos omogen”. Influențat de axiomatizarea probabilităților a lui Markov și Kolmogorov, care plasaseră procesele stohastice în centrul teoriei lor, Wiener definește acest nou tip de haos prin raport cu o măsură aplicabilă mulțimilor. Utilizează aici aplicația integralei Furier – ceea ce mai făcuse deja și care îi permisesese să definească funcțiile referitoare la mulțimi – utilizând o topologie care autoriza extinderea calculului integral la aceste noi funcții.

Astfel, în perioada interbelică, studiul mișcării browniene deține un loc important pentru Wiener. Se poate vorbi, totuși, de unificarea diferitelor domenii ale științei în jurul acestei teme de studiu? Ceea ce interesează aici este mai mult faptul că un fenomen ca mișcarea browniană devine paradigmatic în baza posibilității definirii sale matematice și a capacității sale euristice. Nu se știe de fapt dacă el conservă mai degrabă o realitate fizică sau dacă joacă rolul unei pre-axiome matematice. Teoriile matematice precum cea a seriilor lui Fourier sunt cele care permit stabilirea de legături între fenomene fizice aparent neafiate în vreun raport oarecare, dar aici Wiener pare să aplice atât matematicilor, cât și fizicii, teoriile referitoare la mișcarea browniană. De altfel, în 1958, el precizează că faptul de a fi fost la *M.I.T.* îi permisesese spiritual să apere importanța aplicațiilor teoriilor sale la problemele de inginerie și, în acest sens, teoria sa generală a analizei armonice poate fi considerată ca matematică și fizică, servind totodată tehnica.

Printre altele, la începutul anilor '30, pe vremea dezvoltării studiilor stohastice, Wiener se va consacra și câtorva reflecții de natură filosofică, promovând o concepție care să așeze fizica mai aproape de metafizică. De pe această poziție, el ia atitudine față de problema *naturii sufletului* reacționând la un articol de-l prietenului său J. B. S. Haldane (1892-1964), iar această poziție o va dezvolta mai târziu în justificarea analogiilor propuse de cibernetică. El scria următoarele despre subiectul articolului geneticianului și statisticianului britanic amintit mai sus (articol intitulat *Mecanica cuantică ca bază a filosofiei*): „*Nu pot vedea diferențe esențiale între un materialism care subînțelege sufletul ca fiind un tip complicat de particule materiale și un spiritualism care presupune că particulele au un suflet primitiv*”.

Aceasta arată, dacă mai era necesar, cum toate aceste domenii sunt legate între ele, nu numai la nivelul concepțiilor filosofice, ci și la cel al teoriilor științifice.

Noțiunea de informație și mecanica cuantică: Johannes von Neumann

Axându-și munca pe teoria spațiului a lui Hilbert, în 1932 von Neumann consacră „fundamentelor matematice ale mecanicii cuantice” o carte apărută la Editura Springer, în colecția referitoare la „temele fundamentale ale științelor matematice”. Înțelege astfel să ia parte la polemica epocii și să se situeze contra ipotezei variabilelor ascunse, susținută printre alții de către Einstein. Interesându-se mai precis de „formulele statistice ale mecanicii cuantice”, el le apropie pe acestea de cele pe care le regăsim în termodinamică și anunță în introducere că: „O analiză mai profundă arată că binecunoscutele dificultăți izvorâte din mecanica clasică, referitoare la „ipoteza de dezordine” necesară termodinamicii în justificare, ar putea fi aici aplanate”.

Pentru a realiza acest lucru, sprijinindu-se pe experimente de gândire cărora le precizează caracterul aventuros, el își propune să determine entropia unui ansamblu de stări cu ajutorul unui operator statistic U , introdus în cadrul unui studiu despre măsură și reversibilitate care permitea diferențierea efectului măsurării de efectul timpului asupra sistemului studiat. După ce a luat în socoată existența mișcării browniene, continuându-și analiza critică despre experimentele de gândire, von Neumann se interoghează asupra posibilității de a dispune de un perete semi-permeabil pentru sistemele cuantice. El califică acest perete drept „demon al lui Maxwell și face trimitere la publicația lui Szilard din 1929. Pentru a calcula entropia asociată operatorului U , imaginează un experiment de compresiune care-i permite să ajungă la expresia următoare pentru cazul unor M molecule: $-M k \text{ Spur } (U \ln U)$ (*Spur* reprezentând urma lăsată de un operator linear, iar k constanta lui Boltzmann) și care în cazul unui operator cu valori proprii distincte $w_1, w_2, \dots, w_n$ dă expresia:

$$\sum_1^n w_x \ln w_x$$

Această expresie îi permite atunci să demonstreze valoarea ipotezei unei ireversibilități legată de măsură, dar bineînțeles că nu este vorba aici de informație, ci avem de-a face cu prima expresie a costului entropic asociat unei observații fizice a gazului cu un număr oarecare de molecule. Mai e vorba aici și de o teorie a măsurii, ținând cont în același timp de teoriile cuantice și termodinamice, întrucât ni se arată după aceea că rezultatul său poate fi interpretat cu ajutorul numărului de complexiuni introdus de Boltzmann și reluat de Planck. De altfel, se poate reaminti aici cum Planck, generalizând cercetările lui Boltzmann, introdusese expresia $S = k \log W$ din perspectiva următorului punct de vedere: „Pentru că entropia este o mărime aditivă, iar probabilitatea W este o mărime multiplicativă, eu am formulat pur și simplu $S = k \log W$, unde k reprezintă o constantă universală”.

Până la urmă, această apropiere formală dintre mecanica cuantică și termodinamică este cea care-i permite lui von Neumann să ajungă la o nouă expresie a interpretărilor în același timp matematice și fizice. Plecând de la teoreme matematice destul de anevoioase despre proprietățile pe care trebuie să le verifice operatorii, el va ajunge la o teorie generală a măsurii și numeroși fizicieni vor vedea aici, pe drept cuvânt, o analiză fizică și cantitativă a noțiunii de informație. Fizicianul Léon Brillouin (1889-1969), unul dintre teoreticienii mecanicii cuantice, va scrie în 1956, în cartea sa *Science and Information Theory*, cu privire la acest text al lui von Neumann: „J. von Neumann examinează de asemenea cazul observatorului care uită informația și arată că acest proces semnifică deopotrivă o creștere de entropie”. După cunoștința noastră, von Neumann nu utilizează cuvântul „informație” în scrierile din această perioadă, dar noțiunea de măsură pe care o definește în ultimul său capitol poate fi foarte bine considerată, a posteriori, ca un caz al achiziționării de informație.

Printre alții, fizicianul german Pascual Jordan (1902-1980), co-fondator al mecanicii cuantice cu Born și Heisenberg, insistă, în articolul pe care îl consacră în 1949 „procesului de măsurare în mecanica cuantică”, asupra faptului că studiul realizat de von Neumann demonstrează că „(...) termodinamica este implicată în observațiile din mecanica cuantică și că acest lucru e în armonie cu un fapt arătând ireversibilitatea legată de observație (...)”. În fond, e exact că, prin munca sa, von Neumann nu numai că „apropie” două domenii ale fizicii, ci le și „unifică” în jurul aceleași interogații privind măsura. Se poate tot așa considera că ar avea loc, ca o consecință, „unificarea” cunoașterii în jurul noțiunii științifice de informație? E încă devreme a o spune, chiar dacă am evocat deja aici texte publicate după cel de-al doilea război mondial. În această primă parte vizând apariția noțiunii științifice de informație, se cuvine să ne mai interesăm și de alte axe de cercetare: lucrările realizate în statistică și în domeniul telecomunicațiilor.