

ENTROPIA ȘI LEGILE PROCESELOR PSIHO-FIZICE

I. Cosma

Catedra de Fizica, Universitatea Tehnica, 3400 Cluj-Napoca, str. C. Daicoviciu 15.

Rezumat

În lucrare se prezintă o modelare entropică a legii fundamentale a proceselor de percepție prin senzații și stări mentale a realității obiective, ca relație între intensitatea senzației și intensitatea fizică a fluxului de stimuli, pe de o parte și gradul de dezordine energetică din sistemul de senzori specifici fiecărui organ de simț, pe de alta parte.

Introducere

Legea fundamentală a psihofizicii, numită legea lui Bouguer-Weber-Fechner, precizează că la nivelul organelor de simț între creșterea intensității senzației și creșterea intensității excitantului există o relație logaritmică, adică prima crește în progresie aritmetică atunci când a doua crește în progresie geometrică. Explicarea acestei legi empirice, destul de evidente, este posibil să se facă pe baze entropice pornind de la noțiunile de termodinamică clasică și statistică prezente în interacțiunile de la nivelul fiecărui organ de simț. Așa cum legea entropiei poate preciza evoluția oricăror procese ireversibile, tot așa și procesele senzoriale sunt guvernate

de legea creșterii entropiei, după care sensul proceselor naturale către o entropie mai mare este determinat prin tranziții către stările cele mai probabile. Domeniul de aplicabilitate al legii entropiei este atât de larg și șansa de a fi contrazisă atât de mica, încât, ea ocupa rangul de a fi cea mai generală și utilă lege din toate științele incluzând și domeniul științelor biologice, ale vieții, în general.

Simțuri, stimuli, senzații și observabile fizice.

Realitatea înconjurătoare aflată în interacțiune prin simțurile noastre cu creierul uman este reflectată specific funcție de energia schimbată prin stimulii fizici între lumea înconjurătoare și senzorii specifici fiecărui organ de simț [1]. Reflectarea psihică sau percepția este deci legată de calitatea și cantitatea energiei stimulilor și va reprezenta observabila din universul fizic pe care generalizând-o o vom numi mărimea fizică. Ideea unanim acceptată a existenței unei legături directe între intensitatea senzației și cea a stimulilor se poate elucidă, credem, doar prin descrierea în limbajul mecanismelor și interacțiunilor prin care fiecare ființă este supusă influențelor exterioare sau interioare, la nivelul simțurilor.

Exceptând atracția Pământului asupra corpului nostru care este o interacțiune gravitațională, toate celelalte, la nivel celular, sunt interacțiuni electromagnetice. În mod specific, percepțiile ce le avem prin simțurile de gust, miros, pipăit și auz sunt cauzate de interacțiuni electrice de scurtă distanță între atomii sau moleculele unor celule senzori și moleculele sau atomii din imediata vecinătate care transmit sistemelor celulare cantități cuantificate de energie. În cazul pipăitului și gustului contactul direct între atomii ai stimulului fizic și atomii ai celulelor senzoriale este evident și ușor

de descris. În cazul mirosului corpul pe care îl percepem, trimite prin sublimare sau evaporare un număr nu prea mare de molecule care ajunse la nărilor noastre vor excita în mod specific senzorii olfactivi fapt conștientizat prin senzația de miros.

Lanțul interacțiunilor ce determină auzul este mult mai complex. Când ascultam profesorul, radioul sau orice sursă de sunete ascultătorul este imersat în aer, un mediu considerat continuu, dar discret la nivel atomic. Sursa de sunet transmite aerului compresiuni periodice care se propagă până la ureche și apoi până la timpanul ascultătorului care va prelua prelua cuantificat energie de vibrație și o va ceda sub formă de impulsuri electrice, curenți ionici, ce se propagă prin nervul auditiv la creier unde are loc senzația auditivă. Calitățile acestei senzații: tăria, înălțimea, timbrul și stereofonia sunt determinate de observabilele fizice ale undelor sonice: intensitatea energetică (W/m^2), frecvența, spectrul și defazajul dintre undele ce ajung la cele două urechi. Auzul complectat prin vorbire, adică prin scoaterea de sunete articulate, cu o semnificație specifică, asociată lucrurilor și faptelor este esențial în toate sistemele de intercomunicații socioumane.

Pentru simțul văzului stimulul este lumina care vine la ochii noștri de la lucrurile sau imaginile pe care le privim. Lumina, ca undă electromagnetică, are un caracter discret, fiind formată din trenuri de undă, numite fotoni, cu energia proporțională cu frecvența. Aceasta trecând prin sistemul optic al ochiului este focalizată pe retina sub forma unei imagini reale a corpului pe care îl privim. Undele electromagnetice cu frecvențele cuprinse între $4 \cdot 10^{14}$ și $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz. prin componenta electrică, influențează substanțele fotosensibile (iodopsina și rodopsina) din celulele retiniene producând perturbații ce se propaga sub formă de pulsuri electrochimice ce

transmit creierului informații asupra iluminării, formei și culorii corpului pe care îl privim.

Notificarea în lista simțurilor din manualele de anatomie și fiziologie, doar a cinci simțuri, este considerăm noi incompletă. Aici se poate avea în vedere, ca fundamentală și senzația de cald și rece care, spre deosebire de pipăit, trebuie descrisă microscopic prin aceea ca încălzirea (răcirea) este o manifestare macroscopică a mișcării dezordonate a atomilor și moleculelor ce compun sistemul (corpul). Atingând un corp mai cald decât corpul nostru se face un transfer cuantificat de energie vibratorie (fononică) către atomii și moleculele din celulele puse în contact cu atomii și moleculele ce alcătuiesc corpul. La atingerea unui corp mai rece transferul este invers iar senzația este de frig. Undele electromagnetice ca raze calde din domeniul infraroșu pun în mișcare atomii și moleculele, iar la nivel celular avem senzația de cald atunci când ne expunem razelor solare. Deci, avem și un simț termic diferit de cel tactil.

Există o întreagă clasă de incredibile fenomene pe care omul le simte prin diverse senzații. Astfel senzațiile de foame, de sete, de frică, sau cele legate de sex, fac parte din simțurile primare sau dintre instincte. Există, însă, și simțuri ce se formează și se perfecționează în timpul vieții sau a exersării unei meserii așa cum ar fi de exemplu simțul mersului, al răsturnării și echilibrului, al stereoscopiei sau cele ale orientării și măsurii sau chiar cel al bunului simț etc. Adesea unele algoritme sau corelații efectuate sistematic la nivel mental vor determina un simț al intuiției care este clasat în limbajul de zi cu zi tot în categoria simțurilor [2].

Prin toate aceste simțuri și senzații, în corpul și în mintea noastră, este percepută realitatea fizică înconjurătoare. În deosebi prin simțul văzului, percepem aproximativ 80% din informația ce vine din exterior spre

creier. Universul fizic este, deci, reflectat în mintea noastră prin senzații și percepții corelate cu natura fizică și complexitatea stimulului ce conține informații diverse despre sursa de la care provine. Stimulii cei mai comuni și cei mai complexi și diversificați sunt fasciculele de lumina ce provin, prin reflexie, de la corpurile și imaginile pe care le privim. De aceea, caracteristicile universului fizic simțite sau observate sunt numite generic **observabile**. Prin simțul văzului corpurile pot fi percepute, comparate și recunoscute, iar prin modificarea poziției relative, a mișcării repetate a unora, evenimentele au o succesiune percepută mental. Aceste percepții se reflectă în mintea noastră ca trei caracteristici obiective ale universului fizic, ale materiei. Aceste caracteristici sau observabile primare numite **mărimi fundamentale** sunt dimensiunile geometrice pe care le percepem prin **lungime**, cantitatea de materie ce intră în interacțiune gravitațională cu Pământul, ca **masa** și duratele la care se succed evenimentele, ca **timp**. Aceste trei mărimi, împreună cu observabila legată de senzația de cald și rece ca temperatură, cu observabila legată de interacțiunile coulombiene, ca **sarcină electrică** (cantitate de electricitate) și cu observabila legată de percepția interacțiunilor electromagnetice prin stimuli luminoși ca **intensitate luminoasă**, formează un sistem coerent, optim și minim necesar pentru a descrie comportarea universului fizic prin mintea omenească. Alte observabile ce determină în creierul nostru reflectări mentale mai adecvate a fenomenelor existente în univers sunt transpuse în nenumărate **mărimi derivate**, care rezultă din "amestecarea", prin reguli fizico-matematice raționale, a celor fundamentale. Reflectarea comparativă a fiecăreia dintre mărimile fizice fundamentale sau derivate duce implicit la alegerea sau stabilirea pe baza formulelor de definiție a **mărimilor unitate**. Printr-o logica decimalizantă, mărimile de ori ce fel și unitățile lor de măsură, astfel

definite, împreună cu multipli și submultipli lor formează un **Sistemul Internațional de Mărimi și Unități de Măsură**. Acest sistem, cu răspândire globală în știință și practică, admite însă și o serie de unități tolerate cu folosință largă, consacrată istoric.

Entropia și procesele psihofizice

Entropia definită ca funcție termodinamică de stare prin relația $dS=dQ/T$ este o mărime rațional-reală a cărei înțeles nu este palpabil precum temperatura, volumul, presiunea etc. Ca și semnificația clasică și cea statistică, este mult mai ascunsă simțurilor și judecății noastre fiind legată de diversitatea cea mai probabilă a stărilor de distribuție după energia a componentilor unui sistem (corp) aflat într-o stare de echilibru. Altfel spus, distribuția cea mai probabilă a componentilor sistemului după energiile pe care le au la un moment dat înseamnă o "dezordine" termodinamicii sensul proceselor naturale către o entropie mai mare este deter maxima apreciată, tocmai, prin conceptul fizic de entropie. Conform principiului al 2-lea al minat de legile probabilității către "ordinea" sau starea cea mai probabilă. Astfel legea creșteri entropiei este legea de evoluție cea mai probabilă, iar șansa de a fi contrazisă este atât de improbabilă încât acest principiu ocupă rangul de cea mai generală și utilă lege din toate științele.

În cazul simțurilor sistemele celulare aflate sub acțiunea stimulilor fizici nefiind, deci, izolate au loc procese mecanice, termice, electrice și magnetice, schimbându-se energia internă. Având în vedere că o stare de excitație constantă poate fi considerată o stare de echilibru în care bilanțul energiilor primite și cedate este nul, principiul conservării energiei nu este

contrazis, așa cum de fapt, precizează principiul conservării energiei-masei din fizica relativistă [3].

Tăria senzației este răspunsul fiziologic la numărul excitărilor prin care receptorii senzoriali, ținta, absorb stimulat energia stimulilor elementari, proiectil, care își ating ținta. Din punct de vedere entropic o stare de excitație globală, existentă la un moment dat, poate fi privită ca o "încălzire" a sistemului de senzori discernabili (nominalizați) care au fost activați. Fiecare stare globală poate fi realizată printr-o diversitate mare de moduri de distribuție a energiilor absorbite de receptorii senzoriali. Adică, unei stări de excitație globale îi corespunde un număr foarte mare de microstări ce pot realiza starea senzorială dată. Numărul acestor microstări sau complexiuni ce realizează starea globală a unui sistem cu N senzori discernabili va fi dat de numărul permutărilor cu repetiție, distincte, numit adesea impropriu și probabilitate termodinamică [4]. Adică:

$$p = \frac{N!}{n_1!n_2!n_3!\dots}$$

unde n_1, n_2, \dots, n_i reprezintă numărul de senzori excitați diferit din punct de vedere energetic. Acest număr al permutărilor reprezintă o frecvență probabilistică a microstărilor virtuale sau o măsură a dezordinii aleatoare de distribuție a energiilor la nivelul componentelor senzoriali discernabili. Să luăm spre exemplificare un caz idealizat în care ar exista doar $N=3$ senzori care sub bombardamentul stimulilor fizici elementari ar putea fi excitați între nivelele energetice separate printr-o energie ϵ de ordinul 1eV (acesta este ordinul energiei de excitație în atomii ce formează macromoleculele acizilor ribo și dezoxiribonucleici din celulele vii [5]). Stările globale de energie în care se va afla sistemul celor trei senzori vor fi:

$E_0=0$; toți senzorii neexcitați, cu $p_0=3!/3!=1$ un singur mod de aranjare;

$E_1=\varepsilon$; un senzor excitat, cu $p_1=3!/2!1!=3$ permutări distincte;

$E_2=2\varepsilon$; doi senzori excitați cu $p_2=3!/1!2!=3$ permutări distincte;

$E_3=3\varepsilon$; toți cei trei senzori excitați cu $p_3=3!/3!=1$ un singur mod de aranjare.

Cele patru stări energetice ce pot apărea se realizează prin: $1+3+3+1=8$ complexiuni sau moduri de excitare distincte a celor trei senzori identificabili. Se observă că stările E_1 sau E_2 se realizează fiecare prin câte trei moduri. Adică probabilitatea termodinamică de apariție a acestor stări este maximă, de $3/8=0,375=37,5\%$. În aceste cazuri putem zice că dezordinea de aranjare energetică este cea mai favorabilă. Probabilitatea ca cele 2 stări sau subsisteme energetice să coexiste în același timp va fi egală cu produsul probabilităților: $(3/8)(3/8)=9/64\approx 0,14=14\%$.

Din cele prezentate mai sus, rezultă că la stabilirea echilibrului în sistemul de senzori, atât entropia cât și probabilitatea de stare cresc până ajung maxime. Diferențial aceasta înseamnă că $dS=0$ și de asemenea ca $dp=0$, în sensul că pentru cele două subsisteme energetice din care este compus sistemul dat avem:

$$dS=dS_1+dS_2=0 \quad \text{și} \quad dp=p_2 dp_1+p_1 dp_2=0$$

Sau în valori absolute:

$$dS_1=dS_2 \quad \text{și} \quad dp_1/p_1=dp_2/p_2$$

Prin împărțire și generalizare avem:

$$\frac{dS_1}{dp_1} = \frac{dS_2}{dp_2} = \dots = \frac{dS}{dp} = k \quad \text{sau:} \quad dS = k \frac{dp}{p}$$

Ultima ecuație, prin integrare, ne dă ecuația lui Boltzmann, ce leagă entropia S a sistemului, de gradul de dezordine energetic, exprimat prin frecvența statistică a microstărilor p .

$$S=k \ln p, \quad (1)$$

sau între două stări considerate în echilibru:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln(p_2/p_1) \quad \text{sau} \quad p_2 = p_1 \exp(\Delta S/k) \quad (1')$$

Ultimile relații precizează că la trecerea de la o stare de excitație la alta, entropia sistemului variază precum logaritmul ponderii termodinamice celei mai probabile, adică a diversității maxime a modurilor de distribuție după energii a senzorilor, corespunzătoare celor două stări.

Distribuția senzorilor după energii.

În timpul unei senzații de egală tărie, sau intensitate, sistemul de senzori excitat se află într-un echilibru dinamic sub bombardamentul cu stimuli energetici. Aceasta înseamnă că, prin ciocniri inelastice, sistemul de senzori primește energie electromagnetică care parțial este retransmisă spre sistemul de efectori (actuatori) fiziologici sub formă de curenți electrochimici, iar restul este disipată sub formă de căldură. Considerând că într-un sistem cu N senzori "încălzit" la echilibru cu exteriorul, vom avea n senzori excitați ce vor avea un supliment de energie ϵ , față de ceilalți $N-n$, neexcitați. Numărul de complexiuni (aranjări după energii) va fi dat de permutările:

$$P_n = \frac{N!}{n!(N-n)!} = \frac{N^N}{n^n (N-n)^{N-n}}$$

unde s-a folosit formula lui Stirling $n! \approx (n/e)^n$ pentru numere mari. Prin logaritmare se obține:

$$\ln p_n = N \ln N - n \ln n - (N-n) \ln (N-n)$$

Diferențiind, condiția, $\delta(\ln p) = 0$, precizează că starea cea mai probabilă se va realiza pentru:

$$[\ln n - 1 - \ln(N-n) + 1] \delta n = 0.$$

numărul tranzițiilor δn într-un sens și în sens contrar sunt egale. Însușind la ultima relație, termenul identic nul, $[(E_2 - E_1) / \beta] \delta n = 0$ și ținând cont, că $E_2 - E_1 = \varepsilon$, avem:

$$\ln n - \ln(N-n) + \varepsilon / \beta = 0.$$

Această condiție se transformă într-o lege boltzmaniană de distribuție a senzorilor dată de relația:

$$n = (N-n) \exp(-\varepsilon / \beta). \quad (2)$$

În caz general, între populațiile oricăror două nivele energetice egal distanțate, avem:

$$n_2 = n_1 \exp(E_1 - E_2) / \beta = n_1 \exp(-\varepsilon / \beta). \quad (3)$$

Această relație ne indică faptul că și celulele unui sistem senzorial la echilibru dinamic cu fluxul de stimuli sunt împărțite din punct de vedere energetic conform distribuției boltzmaniene.

Folosind ultima relație se poate afla valoarea maximă, cea mai probabilă, a lui $p_{(n)}$:

$$\ln p_{\max} = N \ln \frac{N}{N-n} - n \ln \frac{n}{N-n}$$

Deoarece, practic, $N/N-n = 1$ primul termen se va anula, iar notând, $p_{\max} = p$, avem:

$$\ln p = n \ln \frac{N-n}{n} \Rightarrow p = \left(\frac{N-n}{n} \right)^n. \quad (4)$$

Așadar, numărul maxim al microstărilor energetice sau dezordinea cea mai probabilă crește, practic, exponențial cu numărul componenților excitați.

Entropia și nivelul senzațiilor

În timpul unei senzații de tărie constantă sistemul de senzori se află în echilibru dinamic cu exteriorul, primind energie electromagnetică prin stimuli specifici și transmițând mai departe spre efectorii cerebrali, partea nedisipată sub forma de caldură, tot sub forma de energie electromagnetică. Scriind pentru două stări de echilibru diferite ,adică, pentru două senzații de tărie diferită valorile cele mai probabile ale ponderii termodinamice, conform cu relația (4) și ținând cont și de relația (2) avem:

$$\ln p_1 = n_1 \ln \frac{N - n_1}{n_1} = n_1 \frac{\varepsilon}{\beta_1} \quad \text{și} \quad \ln p_2 = \frac{N - n_2}{n_2} = n_2 \frac{\varepsilon}{\beta_2}.$$

Deoarece, în cele două stări de "încălzire" energiile libere, F_1 și F_2 , sunt proporționale cu energiile interne, $U_1 = n_1 \varepsilon$ și $U_2 = n_2 \varepsilon$, și cu tăriile senzațiilor, notate cu Z_1 respectiv Z_2 , vom avea:

$$\ln p_2 - \ln p_1 = n_2 \frac{\varepsilon}{\beta_2} - n_1 \frac{\varepsilon}{\beta_1} = F_2 - F_1 = \text{const.}(Z_2 - Z_1).$$

Din ultima relație rezultă că creșterea tăriei, sau nivelului, senzației în cele două cazuri va fi:

$$\Delta Z = \text{const.} \ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{\text{const}}{\log e} \log \frac{p_2}{p_1} = k' \log \frac{p_2}{p_1} \quad (5)$$

Unde, operând într-o logică zecimală, logaritmi naturali au fost transformați în logaritmi zecimali. Luând valoarea constantei $k'=10$ și

folosind notația consacrată, N_s , nivelul creșterii (atenuării) senzației produsă de stimuli de același fel va fi dat de relația:

$$N_s = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

În concluzie, pentru o creștere de la simplu la dublu a nivelului senzației, este nevoie ca stimuli să producă în sistemul senzorial o creștere de zece ori a ponderii termodinamice adică a entropiei. Este semnificativ, faptul, că astfel legea psiho-fizică, empirică, a lui Weber-Fechner, pentru acustică, conform căreia intensitatea senzației acustice $I_o = k \ln I/I_0$, este complet precizată, de o lege mai generală, exprimată prin ecuația (6), valabilă pentru tăria sau mai precis pentru nivelul de creștere al oricărui tip de senzații, care crează și "energie informațională" [6].

Bibliografie

- 1 *** Proceeding of International Conference on Thinking Science for Teaching: the Case of Physics, Sept. 22-27, 1995, Rome, Italy.
2. D. S. Saxon, W. B. Fretter, Physics for Liberal Students, New York , (1971).
3. Louis de Broglie, Physique et Microphysique, Paris, (1947).
4. N. Georgescu-Roegen, Legea Entropiei și Procesul Economic, București, (1979).
5. Albert Szent-Gyorgyi, Introduction to a Submolecular Biology, New York, (1960).
6. Octav Onicescu, Energie Informationlle, Comtes Rendus, ser. A, (1966).