

# ENTROPIJA – KVANTNO FIZIČKI ASPEKT

Dejan Raković

Organizam predstavlja svojevrsnu biohemijsku mašinu, koja funkcioniše zahvaljujući direktnim i povratnim molekularnim vezama: *molekularna signalizacija* služi za predaju *informacija*. Otuda je *Biofizika* neizbežno povezana sa *Teorijom informacija*, sa kojom je, opet, nerazdvojno povezana *Termodinamika*! Kako se pokazuje, informacija ( $I$ ) i entropija ( $S$ ) mere se na istom nivou recepcije, zbog čega važi *Zakon održanja*

$$I + S = \text{const},$$

što znači da je *entropija mera nedostatka informacije* u sistemu! To je i logično, s obzirom da se sa povećanjem entropije povećava degradacija sistema, odnosno smanjuje organizacija sistema i informacija koju ta organizacija nosi.

U *ravnotežnoj termodinamici* zatvorenih sistema entropija teži maksimumu ( $S \rightarrow S_{\max}$ , saglasno *Drugom zakonu termodinamike*), čime informacija teži minimumu ( $I \rightarrow I_{\min}$ ). U otvorenim **biološkim sistemima**, koji sa okolinom neprekidno razmenjuju masu i energiju, tendencija je *suprotna* – što znači da su oni **neravnotežni**, pa je potrebno razmotriti *neravnotežnu termodinamiku* bioloških sistema i procesa!

Otuda, *generalni biofizički tretman* bioloških sistema mora biti zasnovan na **neravnotežnoj termodinamici**, koja omogućava definisanje *kriterijuma stabilnosti* biofizičkih sistema! Ipak, treba dodati da je za kompletan *specifični biofizički tretman* bioloških sistema neophodno  *dodatno* formiranje *dinamičkih modela*.

## 1 NERAVNOTEŽNI PROCESI

U *neravnotežnom sistemu* sve njegove *karakteristike*, uključujući entropiju, *zavise od vremena*:

$$S = -k \sum_j p_j(t) \ln p_j(t), \quad (1)$$

gde su  $p_j$  - verovatnoće nalaženja sistema u stanjima sa energijom  $E_j$ , a  $k$  - Bolcmanova konstanta.

Pri kontaktu *dva podsistema*, koji recimo imaju *različite temperature*  $T'$  i  $T''$ , među njima dolazi do prenosa energije iz jednog podsistema u drugi, pri čemu je ukupna energija konstantna ( $E = E' + E''$ ). Pri tome je i entropija je (kao i energija) aditivna

$$S' + S'' = S. \quad (2)$$

*Promena entropije sistema*, pri prenosu energije iz jednog podsistema u drugi i preraspodeli verovatnoća  $p_j(t)$  i  $p_j''(t)$ , jednaka je

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial E'} \frac{dE'}{dt} = \left( \frac{\partial S'}{\partial E'} + \frac{\partial S''}{\partial (E - E'')} \right) \frac{dE'}{dt} = \left( \frac{\partial S'}{\partial E'} - \frac{\partial S''}{\partial E''} \right) \frac{dE'}{dt} = \left( \frac{1}{T'} - \frac{1}{T''} \right) \frac{dE'}{dt} \quad (3)$$

*Izmena entropije u vremenu* izražava se proizvodom *generalisanog fluksa* energije

$$J = \frac{dE'}{dt} \quad (4)$$

i *generalisane sile*

$$X = \frac{1}{T'} - \frac{1}{T''}, \quad (5)$$

odnosno,

$$\frac{dS}{dt} = XJ. \quad (6)$$

U *opštem slučaju* sistema karakterisanog mnogim ekstenzivnim promenljivim (koje, kao i energija i entropija, zavise od mase sistema i imaju aditivna svojstva), izmena entropije u vremenu predstavlja se sumom proizvoda *generalisanih sila* ( $X_j$ ) i *generalisanih flukseva* ( $J_j$ ):

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j X_j J_j. \quad (7)$$

Izmena entropije u *otvorenom sistemu* predstavlja sumu produkcije entropije unutar sistema ( $d_i S$ ) i fluksa entropije ( $d_e S$ ) usled razmene entropije sa okolinom:

$$dS = d_i S + d_e S. \quad (8)$$

U opštem slučaju, izraz (7) predstavlja tzv. funkciju disipacije ( $\sigma$ ) – brzinu produkcije entropije po jedinici zapremine! U zatvorenom sistemu ( $d_e S = 0$ ) je

$$\frac{d_i S}{dt} = \int \sigma dV \geq 0, \quad (9)$$

gde je, prema (7), *funkcija disipacije*

$$\sigma = \sum_j X_j J_j, \quad (10)$$

pri čemu su u (9–10) produkcija entropije, generalisane sile i generalisani fluksevi dati po jedinici zapremine (za razliku od onih u (7))!

U slučaju *bioloških* otvorenih sistema (ćelije i organizma), ovi sistemi se mogu tretirati kao *hemijski sistemi*, koji se nalaze na konstantnoj temperaturi ( $T$ ). U njima protiču *hemijske reakcije* i odigrava se *transport mase*.

*Generalisani fluks* za *hemijsku reakciju* je *brzina reakcije* ( $v$ ), tj. izvod *koordinate reakcije* ( $\xi$ ) po vremenu:

$$J_{hem} = v = \frac{d\xi}{dt}, \quad (11)$$

gde koordinata  $\xi$  izražava *stepen proticanja reakcije*:

$$\xi(t) = \xi(0) + \int_0^t v dt = \xi(0) + \int_0^t \frac{dn_\gamma}{v_\gamma}, \quad (12)$$

tu je  $n_\gamma$  - broj molova reagenta  $\gamma$ , a  $v_\gamma$  - *stehiometrijski koeficijent* reagenta  $\gamma$  u reakciji. Tok hemijske reakcije određuje se *razlikom hemijskih potencijala* reagenata i produkata, slično tome kako je fluks toplotne energije određen razlikom temperatura! Tako je *generalisana sila* za *hemijsku reakciju*

$$X_{hem} = -\frac{1}{T} \sum_\gamma v_\gamma \mu_\gamma \equiv \frac{A}{T}, \quad (13)$$

gde je  $\mu_\gamma$  - *hemijski potencijal* reagenta  $\gamma$ , a  $T$  - *temperatura* sistema. U sumi ( $\sum_\gamma$ ) doprinosi reagenata i produkata reakcije uzimaju se sa suprotnim znakom. Veličina

$$A = -\sum_{\gamma} \nu_{\gamma} \mu_{\gamma} \quad (14)$$

naziva se **srodstvo**. *Hemijski potencijal* ( $\mu_{\gamma}$ ) jednak je

$$\mu_{\gamma} = \left( \frac{\partial G}{\partial n_{\gamma}} \right)_{n'_{\gamma}, p, T} = \mu_{\gamma}^{\circ}(p, T) + RT \ln C_{\gamma}, \quad (15)$$

gde je  $G$  - Gibsova slobodna energija,  $C_{\gamma}$  - koncentracija reagenta  $\gamma$ , a  $\mu_{\gamma}^{\circ}$  - hemijski potencijal komponente  $\gamma$  za molarnu koncentraciju reagenta  $\gamma$ ; temperatura ( $T$ ) i pritisak ( $p$ ) sistema su konstantni, dok je  $R$  - gasna konstanta (8,314 J/mol·K).

## 2 KONJUGOVANI LINEARNI PROCESI U BLIZINI RAVNOTEŽE

Generalisani fluksevi  $J_i$  zavise od generalisanih sila, i obrnuto (na primer, brzina hemijske reakcije zavisi od srodstva, a fluks toplotne energije od razlike temperatura). U *linearnoj aproksimaciji* za konjugovane reakcije ( $L_{ij} \neq 0, i \neq j$ ) važi

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} X_j, (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (16)$$

gde su  $L_{ij}$  - fenomenološki koeficijenti.

U blizini ravnoteže koeficijenti  $L_{ij}$  obrazuju *simetričnu matricu* ( $L_{ij} = L_{ji}$ ; *Onzagerova teorema*), sa pozitivnim dijagonalnim koeficijentima ( $L_{ii} > 0$ ), pri čemu važi i uslov  $L_{ii}L_{jj} > L_{ij}^2$  (što je posledica pozitivne definitnosti funkcije disipacije u blizini ravnoteže,  $\sigma = \sum_j X_j J_j \geq 0$ ).

Uslov  $\sigma = \sum_j X_j J_j \geq 0$  važi za sumu u celini! Tako je moguće da je  $X_i J_i < 0$ , ako je ispunjen uslov  $\sum_{j \neq i} X_j J_j > |X_i J_i|$ , odnosno u *otvorenom sistemu sa konjugovanim fluksevima* moguć je fluks neostvariv u zatvorenom sistemu! Pri tome, *uslov konjugacije* je  $L_{ij} \neq 0, i \neq j$ . Znači, pod određenim uslovom ( $\sum_{j \neq i} X_j J_j > |X_i J_i|$ ) *produkcija entropije u otvorenom sistemu* (tj. njen deo  $\sum_{j \neq i} X_j J_j > 0$ ) omogućuje proticanje *procesa nemogućih u izolovanim sistemima* ( $X_i J_i < 0$ ) – što je izuzetno značajno za *biološke sisteme*!

Fluksevi  $J_j$  i sile  $X_j$  mogu biti kako *skalarni*, tako i *vektorski*. Međutim, u *izotropnim sistemima* nemoguća je konjugacija između skalarnih i vektorskih procesa ( $L_{sv} = L_{vs} = 0$ ). Ipak, u *anizotropnim sistemima* ovakva interakcija je moguća ( $L_{sv} \neq 0$ ): *konjugacija hemijskih* (skalarnih) i *difuzionih* (vektorskih) procesa u *membrani*!

Za *biologiju* su posebno značajne *konjugacije hemijskih reakcija međusobno*, kao i sa procesom *difuzije*!

*Konjugacija hemijskih reakcija u otvorenom sistemu* omogućava proticanje *endogenih reakcija* (zabranjenih u zatvorenim sistemima – pošto pri tim reakcijama raste slobodna energija)! Takvi procesi postoje u biologiji, npr. *pri sintezi proteina*, kada se obrazuju peptidne veze – sa izdvajanjem molekula vode (pošto vode ima u višku unutar ćelije, trebalo bi da se odigrava obrnuta reakcija – hidroliza peptidnih veza)! No, istovremeno teče i *egzogeni proces hidrolize adenzintrifosfata (ATF)*, pa je ukupna *funkcija disipacije pozitivna*! Uopšte, *konjugacija endogenih procesa sa hidrolizom ATF* ima *univerzalni značaj za biologiju* – pošto se posredstvom konjugacije

hemijskih procesa realizuje univerzalna uloga ATF kao donora slobodne energije, neophodne za proticanje endogenih procesa: ako bi ćelije i organizmi bili izolovani sistemi, ATF ne bi mogao da igra opisanu ulogu!

Tako, *neravnotežna termodinamika otvorenih sistema* već u *linearnoj aproksimaciji* dokazuje mogućnost proticanja procesa zabranjenih u zatvorenim sistemima!!! Ovo je od *fundamentalnog značaja za biologiju!*

Ćelija i organizam su *hemijske mašine*, koje funkcionišu kao posledica hemijskih reakcija i prenosa supstanci između ćelije (organizma) i okolne sredine, a takođe unutar ćelije (organizma)! *Fluks supstance* je vektor, dok je *brzina hemijske reakcije* – skalar. *Konjugacija hemijskih procesa i difuzionog prenosa supstance* može biti *direktna* samo u *anizotropnim* ćelijskim strukturama bez ravni i centra simetrije (*ćelijske membrane*, koje sadrže *hiralne* biopolimere). Međutim, značajnija je *indirektna konjugacija hemijskih procesa i difuzije*, kao posledica uslova *stacionarnih stanja linearnih sistema!* *Indirektna konjugacija* igra važnu ulogu u teoriji *aktivnog membranskog transporta* jona natrijuma i kalijuma u pravcu porasta njihovih koncentracija!

### 3 STACIONARNA STANJA KONJUGOVANIH LINEARNIH SISTEMA

Kako je već prethodno rečeno, *otvoreni sistem* može se naći u *stacionarnom neravnotežnom stanju!* U tom slučaju se produkcija entropije unutar sistema tačno *kompenzira* otcicanjem entropije u okolnu sredinu:

$$dS = d_i S + d_e S = 0. \quad (17)$$

Takvo stanje se ponekad naziva stanjem *protočne ravnoteže*, koje se veoma razlikuje od stvarnog ravnotežnog stanja!

*Stacionarno stanje* otvorenog sistema ostvaruje se ako su na sistem *nametnuta ograničenja*, koja fiksiraju konstantne vrednosti nekog skupa generalisanih sila (koje održavaju odgovarajuće generalisane flukseve u sistemu), pri čemu se ostale generalisane sile mogu menjati (dovodeći sistem, konačno, u stacionarno stanje – u kome iščezavaju odgovarajući generalisani fluksevi):

$$\begin{aligned} \{X_1, X_2, \dots, X_j\} = const &\Rightarrow J_i \neq 0 (i \leq j), \\ \{X_{j+1}, X_{j+2}, \dots, X_n\} \neq const &\Rightarrow J_i = 0 (i > j). \end{aligned} \quad (18)$$

*Entropija* takvog sistema *ne dostiže maksimum*, jer je funkcija disipacije (2.10) različita od nule!

Kao primer, uzmimo da sistem razmenjuje sa okolinom supstancu i energiju, ali je njegova masa konstantna: postoji toplotni fluks ( $J_T \neq 0$ ), ali nema masenog fluksa ( $J_M = 0$ ). Funkcija disipacije je

$$\sigma = J_T X_T + J_M X_M, \quad (19)$$

a linearne relacije su

$$\begin{aligned} J_T &= L_{11} X_T + L_{12} X_M \neq 0, \\ J_M &= L_{21} X_T + L_{22} X_M = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Smatrajući da je  $X_T = const$  (fiksirana je temperaturska razlika između sistema i okoline), kombinovanjem (19-20) dobija se

$$\sigma = L_{11} X_T^2 + (L_{12} + L_{21}) X_T X_M + L_{22} X_M^2. \quad (21)$$

Diferenciranjem (21) po  $X_M$  (pri  $X_T = const$ ), dobija se

$$\frac{\partial \sigma}{\partial X_M} = 2L_{22} X_M + (L_{12} + L_{21}) X_T = 2(L_{21} X_T + L_{22} X_M) = 2J_M = 0, \quad (22)$$

gde je za sistem blizu ravnoteže primenjena Onzagerova teorema ( $L_{12} = L_{21}$ ). Nalazeći i drugi izvod

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial X_M^2} = 2L_{22} > 0, \quad (23)$$

vidi se da je u stacionarnom stanju, u blizini ravnoteže, produkcija entropije ( $\sigma \equiv dS/dt$ ) minimalna (Prigožinova teorema)!

Ako je u prethodnom primeru i  $X_T \neq \text{const}$ , to je i  $J_T = 0$  (uz  $J_M = 0$ ) – pa je  $\sigma = 0$ , odnosno sistem dostiže pravo ravnotežno stanje (sa maksimumom entropije)!

Na primeru stacionarnog stanja otvorenog sistema sa razmenom supstance, pokazuje se da uslov stacionarnosti omogućava indirektnu konjugaciju hemijskih reakcija i prenosa inertne supstance.

Pošto je u stacionarnom stanju produkcija entropije minimalna ( $\sigma_{\min}$ ), to je varijacioni uslov stabilnosti stacionarnog stanja:

$$\delta\sigma = \delta_X \sigma + \delta_J \sigma = 2\delta_X \sigma > 0 \quad (24)$$

(zbog Onzagerove teoreme je  $\delta_X \sigma = \delta_J \sigma = \delta\sigma/2$ )<sup>1</sup> – odnosno, fluktuacija može izazvati samo višak produkcije entropije!

U prethodno razmotrenom primeru sistema koji razmenjuje sa okolinom supstancu i energiju ali ne i masu, bilo je  $J_M = 0$ , pa pri fluktuaciji  $\delta X_M$  imamo  $J_M = L_{22}\delta X_M$  (gde je  $L_{22} > 0$ ), odakle je

$$\delta_X \sigma = J_M \delta X_M = L_{22} (\delta X_M)^2 > 0, \quad (25)$$

odnosno ispunjen je uslov (24) stabilnosti stacionarnog stanja!

Za hemijske reakcije, uslov stabilnosti (2.24) ima oblik

$$\delta\sigma = 2\delta_X \sigma = 2 \sum_i v_i \frac{\delta A_i}{T} > 0. \quad (26)$$

Uzimajući da su u stacionarnom stanju, pri fluktuacijama  $\delta A_i$ , brzine reakcija  $v_i = \sum_j L_{ij} \delta A_j / T \equiv \delta v_i$  posledica tih fluktuacija – to se iz (26) dobija uslov stabilnosti stacionarnog stanja za hemijske reakcije

$$T\delta_X \sigma = \sum_i \delta v_i \delta A_i > 0. \quad (27)$$

Pokazuje se na primeru primene uslova stabilnosti stacionarnog stanja (27) za hemijsku reakciju



da je uslov stabilnosti ispunjen, a na primeru autokatalitičke hemijske reakcije, koja dovodi do povećanja koncentracije polazne supstance



da uslov stabilnosti nije ispunjen; međutim, u blizini ravnoteže,  $X+Y \rightleftharpoons 2X$ , uslov je ispunjen!

<sup>1</sup> Naime, korišćenjem (10) dobijaju se varijacije funkcije disipacije po generalisanim fluksevima ( $\delta_J \sigma$ , pri  $X_i = \text{const}$ ) i po generalisanim silama ( $\delta_X \sigma$ , pri  $J_i = \text{const}$ ):

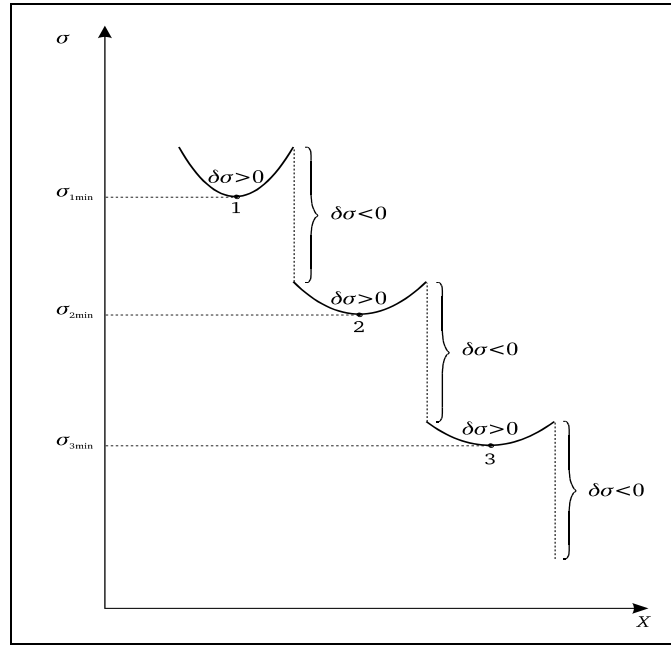
$$\begin{aligned} \delta_J \sigma &= \sum_i X_i \delta J_i = \sum_i \sum_j L_{ij} X_i \delta X_j, \\ \delta_X \sigma &= \sum_i J_i \delta X_i = \sum_i \sum_j L_{ij} X_j \delta X_i = \sum_j \sum_i L_{ji} X_i \delta X_j, \end{aligned}$$

odakle je  $\delta_X \sigma = \delta_J \sigma$ , pošto je  $L_{ij} = L_{ji}$ .

Na taj način, na primeru autokatalitičke reakcije, vidimo da *daleko od ravnoteže* mogu nastati *nestabilnosti disipativnog* (otvorenog) **sistema**, kada je

$$\delta\sigma = 2\delta X\sigma < 0 \quad (30)$$

Tada može doći do *faznog prelaza* usled *pojačanja fluktuacije* ( $\delta X$ ) do *makroskopskog nivoa*, kada može nastati *ново stabilno stanje*, odnosno *nova struktura* (v. Sl. 1).



SLIKA 1 Šematski prikaz stacionarnih stanja (1,2,3,...) u blizini ravnoteže, gde je produkcija entropije  $\sigma$  minimalna (u pitanju su lokalni minimumi u blizini kojih je  $\delta\sigma > 0$ ). Daleko od ravnoteže nastaju nestabilnosti disipativnog sistema ( $\delta\sigma < 0$ ), kada dolazi do pojačanja fluktuacije ( $\delta X$ ) do makroskopskog nivoa i faznog prelaza u novo stacionarno stanje (oblasti faznih prelaza prikazane su isprekidanim linijama, kada je  $\delta\sigma < 0$ ). Evolucioni razvoj dovodi do sve veće organizacije, čime se smanjuje produkcija entropije ( $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots$ ).

Oblast fizike koja izučava disipativne sisteme i njihovo uređenje naziva se *sinergetika*! U toj oblasti se izlazi *izvan granica* (neravnotežne) *termodinamike*, i neophodno je analizirati *konkretne dinamičke modele*! Ti modeli se pokazuju efikasnim i pri izučavanju *biološkog razvoja*: filogeneze i ontogeneze. Proučavanje disipativnih sistema dovelo je i do *proširenja teorije informacija*: pokazalo se da je neophodno proučavati ne samo količinu informacije, njen prenos i kodiranje, već i *prijem informacije*, moguć samo *pri postojanju nestabilnosti*. U tom smislu treba i shvatiti pojam "antientropičnosti" života!

#### 4 FON NOJMANOVA KVANTNOMEHANIČKA ENTROPIJA

U Kvantnoj mehanici stanja koja ne mogu biti opisana vektorima stanja  $|\psi\rangle$  odnosno tzv. čistim stanjima, nazivaju se mešanim stanjima (ili statističkim mešavinama) i opisuju se operatorom gustine mešanog stanja (ili statističkim operatorom)

$$\hat{\rho} = \sum_i |c_i|^2 |\psi_i\rangle\langle\psi_i| \equiv \sum_i |\psi_i\rangle p_i \langle\psi_i| \quad (31)$$

Za slučaj da svi  $p_i$  iščezavaju osim  $j$ -tog ( $p_i = \delta_{ij}$ ) dobija se

$$\hat{\rho} = |\psi_j\rangle\langle\psi_j| \quad (32)$$

operator gustine čistog stanja  $|\psi_j\rangle$ .

Uvodeći kompletan, ortonormirani bazis  $\{|\varphi_n\rangle\}$  ( $\sum_n |\varphi_n\rangle\langle\varphi_n| = 1$ ) svojstvenih stanja neke opservable,  $i$ -ti član ansambla može se prepisati kao

$$|\psi_i\rangle = \sum_n |\varphi_n\rangle\langle\varphi_n|\psi_i\rangle = \sum_n c_n^{(i)} |\varphi_n\rangle \quad (33)$$

Matrični element operatora  $\hat{\rho}$  između svojstvenih stanja  $n$  i  $n'$  je

$$\langle\varphi_n|\hat{\rho}|\varphi_{n'}\rangle = \sum_i \langle\varphi_n|\psi_i\rangle p_i \langle\psi_i|\varphi_{n'}\rangle = \sum_i p_i c_n^{(i)} c_{n'}^{(i)*} \quad (34)$$

Veličine  $\langle\varphi_n|\hat{\rho}|\varphi_{n'}\rangle$  formiraju elemente **matrice gustine**, čiji je trag ( $Tr\hat{\rho}$ ) jednak

$$\begin{aligned} Tr\hat{\rho} &= \sum_n \langle\varphi_n|\hat{\rho}|\varphi_n\rangle = \sum_i \sum_n \langle\varphi_n|\psi_i\rangle p_i \langle\psi_i|\varphi_n\rangle \\ &= \sum_i \sum_n p_i \langle\psi_i|\varphi_n\rangle\langle\varphi_n|\psi_i\rangle = \sum_i p_i = 1 \end{aligned} \quad (35)$$

odakle sledi:  $0 \leq \langle\varphi_n|\hat{\rho}|\varphi_n\rangle \leq 1$ .

Za jedno od stanja ansambla  $|\psi_i\rangle$ , samog po sebi čistog stanja, srednja vrednost operatora  $\hat{O}$  data je sa  $\langle\hat{O}\rangle_i = \langle\psi_i|\hat{O}|\psi_i\rangle$ , pa je za mešano stanje srednja vrednost operatora  $\hat{O}$  po ansamblu jednaka

$$\langle\hat{O}\rangle = \sum_i p_i \langle\psi_i|\hat{O}|\psi_i\rangle = Tr(\hat{\rho}\hat{O}) \quad (36)$$

pošto je

$$\begin{aligned} Tr(\hat{\rho}\hat{O}) &= \sum_n \langle\varphi_n|\hat{\rho}\hat{O}|\varphi_n\rangle = \sum_n \sum_i p_i \langle\varphi_n|\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|\hat{O}|\varphi_n\rangle \\ &= \sum_i \sum_{ni} p_i \langle\Psi_i|\hat{O}|\varphi_n\rangle\langle\varphi_n|\Psi_i\rangle = \sum_i p_i \langle\Psi_i|\hat{O}|\Psi_i\rangle \end{aligned} \quad (37)$$

Prema principu korespondencije, fon Nojman je uveo kvantnomehaničku entropiju kao srednju vrednost operatora  $-k\ln\hat{\rho}$ , odnosno prema (36)

$$S = -kTr(\hat{\rho}\ln\hat{\rho}) \quad (38)$$

koja se posle proračuna traga svodi na Šenonovu klasičnu entropiju

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \quad (39)$$

Za čisto stanje  $\hat{\rho} = |\psi_j\rangle\langle\psi_j|$  iz (39) se dobija (za  $p_i = \delta_{ij}$ )

$$S_{\psi_j} = 0, \quad (40)$$

odnosno, entropija čistog stanja iščezava (što je razumljivo, pošto čisto stanje daje maksimalnu moguću informaciju o kvantnom sistemu!), tj. nema nikakvog nedostatka informacije o sistemu!

Na osnovu (39) entropija mešanog stanja ne iščezava (što je razumljivo, jer mešano stanje daje samo verovatnu informaciju o stanju kvantnog sistema!), a u tzv. Šmitovom bazu u kome je operator gustine dijagonalan entropija se dobija iz dijagonalnih članova (38):

$$S_M = -k \sum_k \rho_{kk} \ln \rho_{kk} > 0 \quad (41)$$

Predstavljajući psihosomatsko stanje u generalno mešanom kvantnom stanju, opisanom matricom gustine:

$$\hat{\rho}_{S_{kv}}^{(k)} = \sum_i |c_{k_i}|^2 |\phi_v^{(k_i)}\rangle_{S_{kv} S_{kv}} \langle \phi_v^{(k_i)}| \equiv \sum_i p_{k_i} |\phi_v^{(k_i)}\rangle_{S_{kv} S_{kv}} \langle \phi_v^{(k_i)}| \quad (1)$$

fon Nojmanova kvantnomehanička entropija  $S = -k \text{Tr}(\hat{\rho} \ln \hat{\rho})$  redukuje se na Šenonovu klasičnu entropiju:  $S = -k \sum_i p_i \ln p_i$ .

Onda bi entropija čistog-zdravog stanja psihosomatskog sistema (opisanog jednim  $k_0$ -tim članom u superpoziciji, verovatnoće  $p_{k_0} = 1$ ) bila jednaka  $S_{k_0} = 0$  (pošto čisto kvantno stanje  $\hat{\rho}_{S_{kv}}^{(k_0)}$  daje maksimalnu moguću informaciju o kvantnom psihosomatskom sistemu!), dok bi entropija mešanog-poremećenog stanja psihosomatskog sistema (opisanog potpunom gornjom superpozicijom), bila  $S_{\hat{\rho}} > 0$  (jer mešano stohastičko stanje  $\hat{\rho}_{S_{kv}}^{(k)}$  daje nekompletnu informaciju o kvantnom psihosomatskom sistemu!).

Dakle, unutar našeg Hopfildovskog kvantno-holografskog okvira, psihosomatsko zdravo stanje jeste stanje minimalne entropije, dok psihosomatsko poremećeno stanje jeste stanje povećane entropije. Tako, primena psihosomatskih terapija smanjuje entropiju (degradaciju) tj. povećava informaciju (organizaciju) makroskopskog kvantnog psihosomatskog sistema.]

## Dopunska literatura

1. D. Raković, *Osnovi biofizike* (IASC & IEFPG, Beograd, 2008), Gl. 2 i Dod. D.1 i D.2; M. V. Vol'kenshtein, *Biofizika, Tom II Obschaya biofizika* (Nauka, Moskva, 1975); M. V. Vol'kenshtein, *Biofizika* (Nauka, Moskva, 1981), Gl. 9; I. Prigogine, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes* (Wiley, New York, 1967); G. Nicolis, I. Prigogine, *Selforganization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations* (Wiley, New York, 1977); H. Haken (ed.), *Synergetics* (Springer-Verlag, Heidelberg, 1982); i tamošnje reference [osnovna literatura iz termodinamike neravnotežnih (bio)procesu].