GIORGIO PARISI NOBEL-DÍJA

Kondor Imre
nyug. egyetemi tanár

Giorgio Parisi 1948. augusztus 4-én született Rómában, kedvező anyagi körülmények között élő polgári családban. Már kisgyerekként kitűnt matematikai érdeklődésével, az iskolában mindig kiemelkedő teljesítményt nyújtott matematikából és természettudományokból. A római La Sapienza Egyetemre iratkozott be, ahol a matematikus és a fizikus szak között ingadozott, végül a fizika mellett döntött, de megtartotta érdeklődését a matematika iránt is.

Az első egyetemi év után felfedezte a Landau–Lifsic elméleti fizikai tankönyvsorozatot, a második év elejére megtanulta az első három kötet anyagát, *Dirac* kvantummechanikájával együtt. *Schrödingert, Fermit* és *Paulit* olvasott, megelőzte az évfolyamot, így nem is igen követte az előadásokat. Minthogy a második egyetemi éve 1968-ra esett, az egyetemi forrongások egyébként is szétzilálták a tanévet.

Az 1968-as év tapasztalatai lényegesen megváltoztatták a családi hagyományoknak megfelelő polgári, liberális kereszténydemokrata beállítódását, nézetei és kapcsolatai erősen balra tolódtak. Társadalmi elköteleződését és aktivitását a mai napig megőrizte.

A harmadik egyetemi évben került kapcsolatba a kutatómunkával. *Nicola Cabibbo* kevéssel korábban tért vissza Rómába a CERN-ből, az általa képviselt nagyenergiás részecskefizikai témák tűntek a kor vezető tudományos kérdéseinek, és Parisi is ehhez az irányzathoz csatlakozott. Ugyanakkor érdeklődött a statisztikus fizika problémái iránt is, ez a kettősség is végigkísérte pályáját. Értekezését Cabibbo vezetésével írta meg a mértékelméletekben bekövetkező spontán szimmetriasértés és a Higgs-bozon témaköréből. A szabályok által megengedett legrövidebb idő alatt, 1970-ben jutott el a dolgozata megvédéséig.

Első munkahelye a Frascati Nemzeti Laboratórium volt, ahová 1971 elején lépett be ösztöndíjasként. Ez az időszak a Frascati aranykora volt, ekkor kezdték el a világon egyedülálló berendezésen az elektron-pozitron annihilációs kísérleteket. A Frascatiban töltött évek alatt Parisi 1973–74-ben a New York-i Columbia Egyetemen dolgozott látogató kutatóként, 1976–77-ben az Institut des Hautes Études Scientifiques-ben Párizs mellett, 1977–78-ban az École Normale Supérieure-ben Párizsban.

1981-ben az elméleti fizika professzorává nevezték ki az Università di Roma II Tor Vergata egyetemen, majd 1992-től az Università di Roma I La Sapienza egyetem kvantumelméleti professzora lett.

A Google Scholar szerint tudományos cikkeinek száma 1061, a hivatkozások száma 91 429.

Az idők folyamán hét könyvet jelentetett meg:

Non-Perturbative Field Theory and QCD (társszerkesztők: R. Iengo, A. Neveu és P. Olesen) World Scientific, 1983.

Spin Glass Theory and Beyond: An Introduction to the Replica Method and its Applications (társszerzők: M. Mézard és M. A. Virasoro) World Scientific, 1987.

Statistical Field Theory, Addison–Wesley, 1988.

Lattice 90 (társszerkesztők: N. Cabibbo, L. Maiani, E. Marinari, G. Martinelli, R. Petronzio és R. Pettorino) North Holland, 1991.

Field Theory, Disorder and Simulations, World Scientific, 1992.

Quantum Mechanics (társszerzők: G. Auletta és M. Fortunato) Cambridge University Press, 2009.

Theory of Simple Glasses: Exact Solutions in Infinite Dimensions (társszerzők: P. Urbani és F. Zamponi) Cambridge University Press, 2020.

Pályája során számos kitüntetésben részesült: Feltrinelli-díj (1986), Boltzmann-érem (1992), Italgas-díj (1993), Dirac-érem és -díj (1999), az olasz miniszterelnök díja (2002), Enrico Fermi díj (2003), Heineman-díj (2005), Nonino-díj (2005), Galilei-díj (2006), Microsoft-díj (2007), Lagrange-díj (2009), Max Planck érem (2011), a *Nature* folyóirat életműdíja (2013), az Európai Fizikai Társaság Nagyenergiás és Részecskefizikai díja (2015), Onsager-díj (2016), Pomeranchuk-díj (2018), Wolf-díj (2021) és Nobel-díj (2021).

Tagja az Accademia dei Linceinek, a Francia Tudományos Akadémiának, az Olasz Tudományos Akadémiának és az Egyesült Államok Tudományos Akadémiájának, jelenleg az Accademia dei Lincei elnöke.

Széleskörű szerkesztői és tudományszervezői tevékenységet folytat. Növekvő tekintélyét az olasz felsőoktatás és kutatás elégtelen finanszírozásának kritikájára, és egy kedvezőbb helyzet követelésére használja fel.

Kondor Imre nyugalmazott egyetemi tanár a kondenzált Bose-rendszer, majd a kritikus jelenségek, később a rendezetlen rendszerek elméletével foglalkozott, ahol *C. De Dominicis*-szel közösen igazolta a spinüvegek Parisi-féle átlagtér-megoldásának stabilitását, és elindította a spinüvegek térelméletének felállítását. A 90-es évek végén csatlakozott az ökonofizika-irányzathoz. A statisztikus fizika módszereit alkalmazva bonyolult optimalizációs problémákat és a pénzügyi szabályozással összefüggő kérdéseket vizsgál.

Parisi kutatási területe rendkívül széles: a kvantumtérelmélettől kezdve a részecskefizikán és statisztikus fizikán át kiterjed a húrelméletre, rácstérelméletekre és spinmodellekre, a numerikus módszerek alkalmazására és továbbfejlesztésére, egészen a nagysebességű tömbprocesszorokon alapuló dedikált számítógépek tervezéséig, a káosz, a dinamikai rendszerek és a turbulencia vizsgálatáig, különböző rendezetlen rendszerek (növekedés, véletlen geometriai sokaságok, fehérje folding), de különösen a spinüvegek, illetve a 90-es évek közepe óta a valódi üvegek tanulmányozásáig, a különféle optimalizációs problémák és algoritmusok kutatásáig, immunológiai problémák és neuronhálók, valamint a gépi tanulás és mesterséges intelligencia kutatásáig, sőt az állatcsoportok kollektív viselkedésének leírásáig is.

Parisi igen barátságos, könnyen megközelíthető, mindenkit figyelmesen meghallgat. A vele folytatott beszélgetések mindenkit hatalmas mértékben inspirálnak, még ha érvelését sokszor nehéz is követni, mert rendkívül gyorsan, óriási ugrásokban gondolkodik. Az évek során igen sok munkatárssal és tanítvánnyal dolgozott együtt, a 70. születésnapjára társszerzőiről készült ábra 317 nevet tartalmaz. Tevékenysége más tudományokban is jelentős előrehaladást indukált, például a sztochasztikus folyamatok elméletében, operációkutatásban vagy az algoritmusok elméletében.

Korán felismerte, hogy a számítógépek elterjedése és hatékonyságuk hatalmas mértékű megnövekedése a numerikus fizikát a kísérleti és elméleti fizika mellé egyenjogú tudományággá fogja tenni. E gondolat a jegyében kezdeményezte Cabibbo a rácstérelméletek szimulációjára kifejlesztett szuperszámítógép megépítését, amiben Parisi központi tervezői szerepet játszott. Az így létrejött APE nevű 1 gigaflop sebességű tömbprocesszort utóbb 100 gigaflopig fejlesztették, egy időben számos példány épült belőle és kereskedelmi forgalomba is került.

Ugyancsak ebből a megfontolásból szervezte meg munkatársaival a JANUS együttműködést. A döntően olasz és spanyol kutatók által felépített, fizikailag Zaragozában található dedikált számítógépet kifejezetten a spinüvegek szimulációjára tervezték, és a szimulációk területén egyedülálló módon képes megközelíteni a valódi, laboratóriumi spinüvegminták dinamikáját és karakterisztikus hosszúságskáláit.

Parisi szerteágazó kutatási témái közül kiemelkedik a rendezetlen mágnesek egyik változatának, a spinüvegeknek a vizsgálata, ezért a továbbiakban erre a kérdéskörre fogok fókuszálni. A spinüvegekben az atomi mágnesek (spinek) között versengő, nagyságukra és előjelükre nézve is véletlenszerű kölcsönhatások működnek. Minthogy az ilyen belső konfliktus, az együttműködés és versengés, a serkentés és gátlás a legkülönbözőbb tudományos, műszaki, ökológiai, társadalmi, gazdasági és pénzügyi problémák lényeges eleme, a spinüvegek mindezen komplex rendszerek számára a legegyszerűbb iskolapéldát nyújtják, amelynek jól formalizálható keretei között e komplex rendszerek alapvonásai viszonylag egyszerűen vizsgálhatók.

A spinüveg-metafora rendkívül széles körben bizonyult megtermékenyítőnek, és a spinüvegek elméletében kifejlesztett modellek és módszerek olyan tudományágakba is behatoltak, amelyek képviselőinek már sejtelme sincs azokról az eredeti összefüggésekről, amelyek között ezek a módszerek kifejlődtek.

Az első spinüvegmintákat *Louis Néel,* Nobel-díjas fizikus javaslatára hozták létre abban a reményben, hogy a mágneses komponens kellő hígításával tanulmányozhatóvá válhat a mágneses kéttestprobléma. Ehhez a – mágneses szempontból teljesen inert – nemesfémek (arany, ezüst, réz) rácsában igen csekély koncentrációban mágneses ionokat (vas, mangán, nikkel) oldottak fel, és azt várták, hogy a mágneses komponens megfelelő hígításával elhanyagolhatóvá válnak a kollektív mágneses effektusok, és megmutatkozik két spin közvetlen kölcsönhatása. Ezen ötvözetek vizsgálata megmutatta, hogy ez a remény teljesen megalapozatlan: a két lokalizált spinen szóródnak a vezetési elektronok, ami hosszú távú, és a távolságtól oszcilláló módon függő kölcsönhatást indukál közöttük. A rácsban véletlenszerűen elszórt és egymással az előjelét váltogató RKKY kölcsönhatással összekapcsolt mágneses ionok ezeket az ötvözeteket egy sor nagyon szokatlan tulajdonsággal ruházzák fel, amelyekre lassan derült fény a kezdetben igencsak marginális probléma kísérleti vizsgálata során.

Adva volt tehát az ötvözetek egy lassan szaporodó csoportja, amelyek alkalmatlannak bizonyultak arra a célra, amelyre kifejlesztették őket, és egyéb alkalmazásukra sem látszott semmiféle remény. Viszont különös tulajdonságokat mutattak, ezért elszórtan mégis keltettek némi figyelmet. Eközben a kondenzált anyag fizikájában forradalmi előrehaladás következett be a fázisátalakulások akkorra már százéves problémájának megoldásával, ami a tudományos közösséget nagyon fogékonnyá tette a kollektív jelenségeket kísérő szinguláris, nem-analitikus viselkedés iránt. Ebben a kontextusban nyert jelentőséget *Cannella* és *Mydosh* mérése 1972-ben, amely azt mutatta, hogy a spinüvegek mágneses szuszceptibilitása a hőmérséklet függvényében törésspontot, vagyis nem-analitikus viselkedést mutat. Ez felvetette annak a gyanúját, hogy ezekben a véletlenszerű mágneses rendszerekben esetleg egy új típusú fázisátalakulás megy végbe, és az anyag szerveződésének egy egészen új fajtája áll elő. Ez hatalmas lökést adott a hasonló szerkezetű rendezetlen rendszerek vizsgálatának, és 1975-ben elvezetett a területen alapvető szerepet játszó Edwards–Anderson (EA) modell felállításához. A modell eltekint a nemesfém mátrix szerepétől és kizárólag a spinekre fókuszál. A legegyszerűbb esetben ezeket a spineket egy kétértékű változó reprezentálja: $s_i = \pm 1$. A spinek között valamilyen adott eloszlásból húzott $J_{i,k}$ véletlen kölcsönhatások működnek. A modell adott spinkonfigurációjában az energia

$$H = -\frac{1}{2}\sum_{i,\,k} s_i J_{i,\,k}\, s_k. \qquad (1)$$

Ez láthatóan a standard Ising-modell általánosítása véletlen csatolások esetére. Egyszerűsége dacára máig nem rendelkezünk általánosan elfogadott képpel arról, hogy a modellt például a 3-dimenziós rácsra helyezve milyen szerkezetet találunk alacsony hőmérsékleten. A statisztikus fizika szokásos stratégiáját követve *Sherrington* és *Kirkpatrick* (SK) még ugyanabban az évben (1975-ben) javasolták az EA modellnek megfelelő átlagtérmodell bevezetését, ahol is a spinek – feltevés szerint – egy teljes gráfon helyezkednek el, és a $J_{i,k}$ kölcsönhatások minden spinpárt ugyanolyan valószínűséggel kötnek össze pozitív vagy negatív csatolással. Egy ilyen gráf nem helyezhető el véges dimenzióban, ezért gyakran hivatkoznak az átlagtérelméletre végtelen dimenziós modellként.

Sherrington és Kirkpatrick a modellt az úgynevezett replikatrükk segítségével oldották meg. A replikatrükk színes előtörténete *Hardy, Littlewood* és *Pólya* 1934-ben megjelent *Inequalities* című könyvéig nyomozható vissza, később a polimerek statisztikus fizikájában alkalmazták, elsőként éppen *Edwards,* így természetes módon talált utat a spinüvegek elméletébe. A replikákra a következők miatt van szükség: az (1) modellben fellépő véletlen csatolások miatt a rendszer minden makroszkopikus jellemzője (belső energia, szabadenergia, entrópia, mágnesezettség stb.) függeni fog ezektől a véletlen változóktól, így maga is véletlen változó lesz. Azt várjuk azonban (és ezt szigorú matematikai meggondolások is bizonyítják), hogy a nagy részecskeszámok limeszében ezek a makroszkopikus mennyiségek függetlenné válnak a véletlen csatolások konkrét realizációjától, „önátlagolnak”. Ezért ahelyett, hogy a különböző termodinamikai mennyiségeket megpróbálnánk a véletlen csatolások függvényében kiértékelni (ami lehetetlen feladat volna) elegendő a termikus átlagolás után kapott mennyiségeket a véletlen csatolások szerint kiátlagolni. A Z állapotösszeg logaritmusát (ami egyszerűen függ össze a szabadenergiával) kiátlagolva abból az egész termodinamika meghatározható. Egy véletlen változó logaritmusát azonban nehéz átlagolni, ezért a $\ln Z$ helyett elképzeljük a rendszer n független másolatát (replikáját), ennek az állapotösszege Z^n lesz, aminek átlagolása könnyebben végrehajtható. Ebből a logaritmus átlaga az

$$\ln Z = \lim_{n=0} \frac{1}{n}\left(Z^n - 1\right)$$

azonosság segítségével kapható meg. Ezen eljárás sarkalatos pontja az, hogy a replikák számát jelölő n, amely eredeti értelmezése szerint természetes egész, valamiképpen kiterjesztendő a valós számokra, hogy a képletben szereplő limesz elvégezhető legyen. Diszkrét pontokon definiált függvény ilyen kiterjesztése (analitikus folytatása) azonban nem egyértelmű feladat, és további feltételek nélkül nem mindig vezet helyes eredményre.

Sherrington és Kirkpatrick figyelmen kívül hagyták ezt a nehézséget és végrehajtották a számolást, amelynek során egy ponton a szabadenergia egy $n \times n$ méretű rendparaméter-mátrix $q_{\alpha,\beta}$ függvényében állt elő. Sherrington és Kirkpatrick ezen mátrix legtermészetesebb parametrizációját választották, amennyiben feltették, hogy a mátrix minden nem-diagonális eleme ugyanaz a szám, miközben a diagonálisban csupa nullák állnak. Ezt a választást az a meggondolás motiválta, hogy a replikák segédmennyiségekként kerültek be az egész elméletbe, így semmiféle ok nincs arra, hogy megkülönböztetést tegyünk közöttük. Ezzel a parametrizációval Sherrington és Kirkpatrick olyan formulákhoz jutottak, amelyekben a replikaszámban való analitikus folytatás egyszerűen az n változó valós számmá történő átinterpretálásává vált, és az $n \to 0$ limesz elvégezhető volt.

Ezzel a replikaszimmetria feltevése elvezetett volna a spinüvegek átlagtérelméletének megoldásához. Az eljárás hibája azonnal kiütközött, amikor kiderült, hogy a rendszer entrópiája alacsony hőmérsékleten negatívvá válik. Pár évvel később *de Almeida* és *Thouless* megmutatták, hogy a replikaszimmetrikus megoldás sérti a termodinamikai stabilitás elvét, ezért elvetendő. Ezzel megindult a replikaszimmetriát sértő megoldások keresése, ami több csoport sikertelen próbálkozása után Parisit 1979-ben elvezette a helyes megoldásig.

Parisi megoldása példátlanul bonyolult volt, és formális, voltaképp nemlétező matematikai fogalmakkal (például 0×0 méretű mátrixokkal) operált. A replikák közötti szimmetria egészen elképesztő, végtelen sokszori sértését feltételezte, ezzel együtt végtelen sok rendparamétert vezetett be. Parisi elméletét megjelenésekor még a matematikai szigorra kevéssé érzékeny fizikusi körökben is kétely és idegenkedés fogadta. Az eljárás, amely azóta számos tudományágban megjelent, replikaszimmetria-sértés (replica symmetry breaking, RSB) néven terjedt el a rendezetlen rendszerek elméletében.

A fantasztikusan bonyolult, végtelen sok rendparamétert felvonultató megoldás fizikai jelentésének feltárása több évet váratott magára, míg végül 1983-ban maga Parisi állt elő az elmélet értelmezésével. Kiderült, hogy a spinüvegátmenet során a fázistér végtelen sok, egymástól makroszkopikus falakkal elválasztott részre (ergodikus komponensre, „völgyre”) bomlik, az elméletben fellépő végtelen sok rendparaméter ezek között a völgyek közti átfedéseket írja le. Az átfedések vizsgálata feltárta a völgyek ultrametrikus geometriáját, a megoldások olyasfajta szerveződését, mint amilyen egy nagy család utolsó generációjának tagjai között van, ahol az egyedek közti genetikai távolságot a legközelebbi közös ős definiálja. E képnek például az evolúció által létrehozott fajták közti viszonyokhoz való hasonlósága nyilvánvaló, ami lehetővé tette a spinüvegek elméletének megjelenését egy sor biológiai problémában.

A statisztikus fizika már a születésénél is küzdött az ergodicitás problémájával, vagyis az időbeli átlag és a sokaságra vett átlag közti viszony kérdésével. A fázisátalakulások során a rendszer szimmetriája sérül, bekövetkezik a fázistér felhasadása ergodikus komponensekre. A múlt század hatvanas éveiben a szokásos fázisátmenetek körében sikerült ezt a kérdést rendezni, de voltaképpen bámulatos, hogy a statisztikus fizika megtanulta kezelni az ergodicitás sérülését. A rendezetlen rendszerek elméletében, speciálisan a spinüvegekben kialakuló ergodicitássértés minden korábbinál súlyosabb kihívást jelentett a statisztikus fizika számára, amellyel Parisi heurisztikus megoldását szigorú matematikai alapokra helyezve *Michel Talagrand* birkózott meg, aki ehhez kidolgozta a sztochasztikus folyamatok elméletének egy egészen új fejezetét, amihez a motivációt Parisi megoldása adta.

Eddig a pontig ezen furcsa ötvözetek, a spinüvegek vizsgálata ugyan hatalmas elméleti fejlődést indukált, de gyakorlati alkalmazásokat nem mutatott fel. Ez a helyzet változott meg 1982–83-ban a bonyolult kombinatorikai optimalizációs problémák, illetve az asszociatívmemória-modellek és a spinüvegek közti kapcsolat felismerésével. Ez óriási lökést adott a mesterséges neuronhálók elméletének, hatékony optimalizációs algoritmusok bevezetését inspirálta, és széleskörű kapcsolatokat teremtett a statisztikus fizika és a számítógép-tudomány között. A statisztikus inferencia, adatbányászat, gépi tanulás és mesterséges intelligencia kutatásának területén mindenütt felbukkannak a spinüvegek elméletében kidolgozott fogalmak és módszerek. A spinüvegek elméletéből indultak ki az ökonofizika és szociofizika néven ismertté vált új tudományágak is, amelyek a társadalom és a gazdaság különböző folyamatait elemzik statisztikus fizikai módszerekkel. Egy semmiféle gyakorlati hasznot nem hajtó anyagcsalád vizsgálata tehát végeredményben sokezer milliárdos alkalmazásokhoz vezetett. E történetnek megszívlelendő tanulságai vannak a tudományfinanszírozás számára.

Hogy valamennyire érzékeltetni tudjuk a spinüveggondolatok fizikán kívüli alkalmazását, Mézard, Parisi és Virasoro előbb említett könyvét követve adjunk az (1) képletben fellépő mennyiségeknek egészen más jelentést. Gondoljunk el egy vállalatot, amelynek N alkalmazottja van, akiket két részleg között kell a vállalatvezetésnek elosztania. Az i munkatársnak adjunk egy s_i címkét, amely ±1 értéket vesz fel annak megfelelően, hogy i-t az egyik vagy másik részlegbe osztják be. Az alkalmazottak között azonban intenzív érzelmi kapcsolatok vannak, melyeket a $J_{i,k}$ csatolások írnak le; $J_{i,k} = +1$, ha i és k barátok, és −1, ha ellenségek. A vezetés érthető módon arra törekszik, hogy lehetőleg egymással baráti viszonyban álló munkatársak kerüljenek ugyanabba a részlegbe, és az ellenségek lehetőség szerint különböző részlegbe kerüljenek. A dolgot az teszi nehézzé, hogy előfordulhat, hogy három munkatárs kölcsönösen ellenséges viszonyban van, vagy az, hogy egy adott munkatársnak van két olyan barátja, akik egymás ellenségei. Az ilyen frusztrált helyzeteket nem lehet mindenkit kielégítő módon kezelni. A vezetés legfeljebb arra törekedhet, hogy a dolgozókat az itt társadalmi feszültségként interpretált H energiafüggvény minimumának megfelelő módon ossza el. Ha most feltételezzük, hogy a munkatársak között ugyanakkora valószínűséggel van baráti, mint ellenséges viszony, kiderül, hogy H minimumának megkeresése rendkívül nehéz feladat, amelynek megoldásához szükséges erőforrásigény (például számítógépidő) a dolgozók számával exponenciálisan emelkedik. Ráadásul a feladatnak megint csak exponenciálisan sok közel egyenértékű megoldása van, amelyek közül bármelyiket is választjuk, a dolgozók jelentős része boldogtalan lesz. Ha tiltakozásuk hatására a vezetés egy másik optimumot keres, az ugyanannyi munkatárs érdekeit fogja sérteni, legfeljebb másokét, mint az előbbi megoldásban.

Ha a különböző megoldások közti távolságot azzal jellemezzük, hogy hány munkatárs besorolását kell megváltoztatnunk, hogy az egyik optimumból a másikba jussunk, kiderül, hogy a megoldások egy családfa geometriáját mutatják: lesznek közeli optimumok, kissé távolabbiak, még távolabbiak stb., de soha nem fordul elő, hogy három különböző optimum között három különböző távolságot találjunk, mint ahogy az sem fordul elő, hogy ha valakinek van egy testvére és egy unokatestvére, akkor e testvérnek az unokatestvér másod-unokatestvére legyen. Az ilyen metrikával bíró tereket ultrametrikus térnek hívjuk, és a fentiek szerint a H függvény optimumai ultrametrikus geometriát mutatnak.

Vegyük észre, hogy bár a különböző élőlények közötti genetikai távolságoknak ugyanilyen ultrametrikus a szerkezete, ott a „családfákat” a természetes szelekció dinamikája hozza létre. Elgondolkoztató, hogy egy teljesen véletlen szerkezetű problémában ez a szerveződés mindenféle tervezés vagy kiválasztás nélkül megjelenik: az optimális megoldások ezen szerkezete a nagy számok határesetében spontán épül fel. Parisi ezen felismerését, és a modell egzakt megoldásának a megtalálását a Svéd Tudományos Akadémia Nobel-bizottsága a díj odaítélésének egyik döntő indokaként jelölte meg.

Amikor olyan valóságos komplex rendszereket tekintünk, mint amilyen egy élő sejt, az agy vagy a társadalom, mindig azt látjuk, hogy e rendszerekben nagyszámú elem, fehérje, idegsejt, vagy a társadalmat alkotó szereplők között állandó versengés és együttműködés van. Az ilyen rendszerek soha nincsenek egyensúlyban, ehelyett egy többé-kevésbé jól meghatározott munkapont körül ingadoznak, fluktuálnak. Ez az állapotuk hajlékony, a lehetséges optimális állapotok közötti átmenetek révén képesek a környezet változásaihoz alkalmazkodni anélkül, hogy elvesztenék önazonosságukat. Előfordulhat azonban, hogy az együttműködés és versengés, serkentés és gátlás, a fékek és ellensúlyok finom rendszere megsérül, az (1) képletben a csatolások eloszlása túlnyomó többségében pozitívvá válik, ami a sejt esetében rákhoz, az idegrendszerében őrülethez, a társadalom esetében diktatúrához vezet. Ezen a ponton a rendszer komplexitása lehanyatlik, a rendszer működése súlyosan sérül, vagy egyenesen megszűnik. A komplexitás elvesztése veszélyes. A társadalmi és politikai folyamatok elemzésében a spinüveg analógia megerősíti *Jacob Burckhardt* figyelmeztetését: *a komplexitás tagadása a zsarnokság lényege.*