

Mi az élet?*

ELŐSZÓ

A tudósról azt hiszik, hogy csak *bizonyos* tárgyköröket ismer alaposan és részletesen, s ezért elvárják tőle, hogy ne írjon olyasmiről, aminek nem mestere. Ezt *noblesse oblige* (a nemesség kötelez – *ford.*) dolgának tekintik. A jelen esetben szeretnék lemondani a *noblesse*-ről, ha ezzel egyáltalában rendelkezem, s meg óhajtók szabadulni az ezzel járó obligációtól, kötelezettségtől. Mentségeim a következők.

Az egységes, mindent magába foglaló tudomány iránti erős vágyat ősapáinktól örököltük. A legmagasabb fokú oktatási intézményeknek maga a neve is arra utal, hogy már az ókortól kezdve és sok évszázadon át csupán az *egyetemességnek* adtak teljes hitelt. De a tudomány különböző ágainak az utolsó száz év során mind szélességben, mind mélységben való növekedése furcsa dilemma elé állított bennünket. Világosan érezzük, hogy csak most kezdünk elég megbízható anyagot összeszedni ahhoz, hogy minden ismeretünket egységes egésszé olvasszuk, másrészt azonban szinte lehetetlenné vált, hogy egyetlen agy többet legyen képes átfogni belőle, mint egy kicsiny specializálódott részét.

A dilemmából nem látok más kiutat (attól félve, hogy igazi célkitűzésünket örökre elveszítjük szem elől): közülünk valakinek vállalkoznia kell a tények és elméletek szintézisére, noha ezek közül egyeseket csak másodkézből és tökéletlenül ismer – s fennáll a kockázat, hogy bolondot csinálunk magunkból.

Ennyit mentségemre.

A nyelvi nehézségek nem elhanyagolhatók. Az anyanyelv jól szabott ruha, s az ember sohasem érzi egészen jól magát, ha nem használhatja, és más nyelvvel kell helyettesítenie. Köszönetemet fejezem ki dr. Inksternek (Trinity College, Dublin), dr. Pdraig Browne-nak (St. Patrick's College, Maynooth) és utoljára, de nem utolsóként S. C. Roberts úrnak. Nagy nehézséget okozott nekik, hogy az új ruhát rám szabják, s még nagyobb nehézséget okoztam azzal, hogy néha vonakodtam egyes „eredeti” kifejezéseimről lemondani. Ha egyesek túléltek barátaim gyógykezelését, azt az én számlámra kell írni, nem az övékére.

A sok alfejezeti címet eredetileg lapszéli összefoglalónak szántam, s minden fejezet *egyvégtében* olvasandó végig.

Köszönetemet fejezem ki dr. C. D. Darlingtonnak és az *Endeavour* (Imperial Chemical Industries Ltd.) kiadójának a képtáblákért. Az eredeti képszoveget megtartottam, noha a jelen összefüggésben nem lényeges.

E. S.

Dublin, 1944. szeptember

Homo liber nulla de re minus quam de morte cogitat; et eius sapientia non mortis sed vitae meditatio est.

Nincs semmi, amin a szabad ember kevesebbet gondolkozik, mint a halál; bölcsessége abból áll, hogy nem a halálon, hanem az életen elmélkedik.

Spinoza: *Ethica*. P. IV. Prop. 61

* Az eredeti mű: *What is life?*

I. Fejezet

A klasszikus fizikus megközelítési módja

Cogito ergo sum.

Gondolkodom, tehát vagyok.

DESCARTES

1. A kutatás általános jellege és célkitűzése

A jelen könyvecske egy előadássorozat nyomán keletkezett, amelyet egy elméleti fizikus tartott körülbelül négyszáz főnyi hallgatóság előtt. A létszám nem csökkent lényegesen, noha a hallgatókat az elején figyelmeztettem, hogy a tárgykör nehéz, s az előadások nem nevezhetők népszerűnek, annak ellenére sem, hogy a fizikusok legfélelmetesebb fegyverét, a matematikai levezetéseket nem nagyon alkalmazom. Ennek nem az volt az oka, hogy a tárgykör elég egyszerű ahhoz, hogy matematika nélkül is el lehessen magyarázni, hanem éppen az, hogy túlságosan bonyolult volta miatt nem lehetett matematikával hozzáférni. Az előadások másik jellemző vonása, amely legalábbis a népszerűség látszatát váltotta ki, az előadónak az a célkitűzése volt, hogy azt az alapeszmét, amely a biológia és fizika fölött lebeg, mind a fizikusok, mind a biológusok számára érthetővé tegye.

Az egész vállalkozás lényege ugyanis, a témák sokrétűsége ellenére, egyetlen alap gondolat kifejtése – egy kis észrevétel egy nagy és fontos kérdéshez. Hogy ne tévesszük el utunkat, hasznos lesz a tervet igen röviden előre körvonalazni.

A nagy és fontos, nagyon sokat vitatott kérdés a következő: hogyan tud a fizika és kémia számot adni azokról az *időben és térben* lefolyó eseményekről, amelyek az élő szervezetek térbeli határfelületén belül végbemennek?

Az az előzetes válasz, amelyet ez a könyvecske kifejt, az alábbiakban foglalható össze:

az a kétségtelen tény, hogy a mai fizika és kémia nem képes ezekről a folyamatokról számot adni, egyáltalában nem indokolja, hogy kételkedjünk abban, hogy ezek a tudományok képesek róluk számot adni.

2. A statisztikus fizika. Az alapvető strukturális különbség

A fenti mondat nagyon semmitmondó megjegyzés volna, ha csak azt a reményt fejezné ki, hogy a jövőben sikerül majd elérni azt, ami a múltban nem sikerült. Jelentése azonban sokkal pozitívabb ennél, azt jelenti ugyanis, hogy az eddigi sikertelenséget bőven meg tudjuk magyarázni.

Ma már, hála a biológusok, elsősorban a genetikusok leleményes kutatásainak, amelyeket az utóbbi harminc-negyven év során végeztek, elég sokat tudunk az élő szervezetek valódi anyagi szerkezetéről és működéséről ahhoz, hogy pontosan megmondhassuk, a mai fizika és kémia miért nem tud magyarázatot adni arra, mi történik az élő szervezetek belsejében térben és időben.

Az atomoknak az élő szervezetek életfontosságú részeiben való elrendeződése és az atomrendszerek közti kölcsönhatások alapvető módon különböznek azoktól az atomrendszerektől, amelyek a fizikusok és kémikusok kísérleti és elméleti kutatásainak eddig tárgyai voltak. Ámde az a különbség, amelyet éppen az imént alapvetőnek neveztem, mindenki számára kicsinynek tűnhet, kivéve azokat a fizikusokat, akiket tökéletesen átitatott annak a tudata, hogy a fizika és kémia

törvényei tisztán statisztikus jellegűek.¹ A statisztikus szemponttal kapcsolatos ugyanis az az állítás, hogy az élő szervezetek életfontosságú részeinek struktúrája egészen más, mint amelyeket a fizikusok és kémikusok a laboratóriumokban ténylegesen, vagy az íróasztalon elméletileg valaha vizsgáltak.² Szinte elképzelhetetlen, hogy az így fölfedezett törvények és szabályszerűségek közvetlenül alkalmazhatók legyenek olyan rendszerek viselkedésére is, amelyek szerkezete nem olyan, mint amelyeken a törvények és szabályszerűségek alapulnak.

A nem fizikustól nem várható, hogy megértse – nem is szólva arról, hogy a fontosságát értékelje – azt a különbséget, amely az általam az imént oly absztrakt módon megfogalmazott „statisztikai struktúrában” fennáll. Hogy állításomba életet és színt leheljek, hadd vegyem előre azt, amit később jóval részletesebben elmagyarázok majd, tudniillik azt a tényt, hogy az élő sejt legfontosabb részét – a kromoszómaszálat – nyugodtan nevezhetjük *aperiodikus kristálynak*. A fizikában mindaddig csak *periodikus kristályokat* tanulmányoztunk. Az egyszerű fizikus elméje számára ezek nagyon érdekes és bonyolult tárgyak. A kristály az egyik legizgalmasabb és legösszetettebb anyagi struktúra, amely elméjét töprengésre készíti. Ámde az aperiodikus kristályokhoz képest a periodikus kristályok igen egyszerűek és érdektelenek. A struktúrák közti különbség olyan nagy, mint a közönséges tapéta, amelyen ugyanaz a mintázat ismétlődik szabályos periodicitással, és egy mesteri kézimunka, mondjuk egy Raffaello-falikárpit között, amelyen nincs érdektelen ismétlődés, hanem minden részletre kiterjedő, összefüggő, értelmes minta van rajta, amelyet a nagy művész rajzolt.

Amikor a periodikus kristályt az egyik legösszetettebb kutatási tárgynak neveztem, csupán a fizikusokra gondoltam. A szerves kémia ugyanis, amely egyre bonyolultabb molekulákkal foglalkozik, sokkal közelebb jutott az „aperiodikus kristályhoz”, amely véleményem szerint az élet hordozóanyaga. Nem meglepő tehát, hogy a szerves kémikusok nagy és fontos lépéseket tettek előre az élet problémájának területén, míg a fizikusok gyakorlatilag semmilyen előhaladást sem értek el.

3. A naiv fizikus megközelítési módja

Miután igen röviden fölváztuk általános alapeszménket – vagy inkább kutatásunk végcélját hadd ismertessem a támadás arcvonalát.

Először azt fejtem ki, amit úgy nevezhetnénk: „a naiv fizikus elképzelése az élő szervezetekről”. Ezen azokat az elgondolásokat értem, amelyek annak a fizikusnak az elméjében merülnek föl, aki megtanulván a fizikát, s speciálisan tudományának statisztikai megalapozását, elkezd az élő szervezetekről, viselkedésükről és funkcióikról gondolkozni, s lelkiismeretesen fölteszi magának a kérdést: vajon annak alapján, amit tanult, viszonylag egyszerű, világosan érthető, szerény tudománya alapján, hozzászólhat-e érdemben a kérdéshez.

Kiderül, hogy igenis hozzászólhat. A következő lépésben az elméleti előrejelzéseket össze kell hasonlítani a biológiai tényekkel. Ekkor kiderül – noha az elgondolások egészükben meglehetősen értelmeseknek látszanak hogy komoly módosításokra van szükség. Ezzel a módszerrel fokozatosan közeledik a helyes állásponthoz, vagy szerényebben megfogalmazva, ahhoz, amelyet én helyesnek vélek.

¹ Ez az állítás kissé túl általánosnak tűnhet. Tárgyalását könyvünk végére, a 67. és 68. szakaszra kell halasztanunk.

² Ezt a szempontot hangsúlyozzák a szerzők két nagyon gondolatébresztő közleményben. Lásd F. G. Donnan: „La science physico-chimique décrite d'une façon adéquate les phénomènes biologiques?” (*Scientia*, 24. k. 78. sz. 1918, 10. o.) és „The mystery of life” (*Smithsonian Report for 1929*, 309. o.)

Még ha igazam volna is ebben, nem tudom, hogy az én megközelítési módom a legjobb vagy legegyszerűbb-e? Csak annyit mondhatok, hogy az enyém ez volt. A „naiv fizikus” én magam voltam. Én pedig nem találtam jobb s egyszerűbb utat a cél felé, mint az általam megtett kanyargós utat.

4. Miért olyan kicsinyek az atomok?

A „naiv fizikus elgondolásai” kifejtésének jó módszere, ha abból a furcsa, szinte nevetséges kérdésből indulunk ki: miért olyan kicsinyek az atomok? Kezdetként rögzítsük le, hogy valóban nagyon kicsinyek. A mindennapi életben szereplő bármely anyagdarabka óriási számú atomot tartalmaz. Sok példát gondoltak ki arra, hogyan lehetne ezt a tényt az előadások hallgatóságával megértetni. Ezek egyike sem hatásosabb, mint Lord Kelvin példája. Tegyük föl, hogy egy pohár víz minden molekuláját meg tudnánk jelölni, majd öntsük a pohár tartalmát az óceánba, s keverjük össze alaposan, hogy a megjelölt molekulák a világnak mind a hét nagy tengerében egyenletesen elkeveredjenek. Ha most az óceánból bárhol egy pohár vizet merítünk, abban körülbelül száz jelzett molekulát találunk.³

Az atomok valóságos mérete⁴ a sárga fény hullámhosszának $\frac{1}{5000}$ és $\frac{1}{2000}$ része között van.

A fény hullámhosszával való összehasonlítás fontos, inert a hullámhossz durva közelítéssel megadja annak a legkisebb anyagszemcsének a nagyságát, amely mikroszkópban még éppen felismerhető. Látható tehát, hogy az ilyen anyagszemcse sok ezermillió atomot tartalmaz.

Miért olyan kicsinyek az atomok?

A kérdés kétségtelenül a probléma megkerülése, mert valójában nem az atomok nagyságára irányul. Az élő szervezetek, pontosabban saját testünk nagyságával kapcsolatos. Az atom valóban kicsiny, ha saját mindennapi hosszmértékünkhöz, a yardhoz vagy méterhez mérjük. Az atomfizikában az úgynevezett angström (rövidítve Å) egységet használjuk, amely a méter 10^{10} -ed része, tízes számrendszerben kiírva, 0,000 000 000 1 méter. Az atomok átmérője 1 és 2 Å között van. Nos, a mindennapi egységek (amelyekhez viszonyítva az atomok olyan kicsinyek) szoros kapcsolatban állnak testünk méreteivel. Egy történet szerint a yard bevezetése egy angol király tréfás kedvének köszönhető, aki, amikor tanácsosai megkérdezték, mekkora legyen a hosszúság egysége, kinyújtotta oldalvást a karját, és ezt mondotta: „Legyen a mellkasom közepétől az ujjam hegyéig számított távolság az egység, ez majd egészen jól megfelel.” Akár igaz, akár nem, a történetnek a mi szempontunkból komoly jelentősége van. A király természetesen a saját testével összehasonlítható egységet választott, tudva azt, hogy bármely más hosszúság alkalmazása nagyon

³ Persze a pontos szám nem száz lesz (még akkor sem, ha ez lenne a számítás pontos eredménye). Lehet, hogy a talált szám 88, 95, 107 vagy 112 lesz, de nagyon valószínűtlen, hogy a szám olyan kevés legyen, mint 50, vagy olyan sok, mint 150. 100 négyzetgyökével egyező nagyságrendű, tehát 10 körüli „eltérés”, illetve „ingadozás” (fluktuáció) várható. A statisztikusok ezt úgy fejezik ki, hogy a megjelölt molekulák várható száma 100 ± 10 . Ez a megjegyzés a jelen pillanatban figyelmen kívül hagyható, de később hivatkozunk majd rá mint a statisztikai \sqrt{n} törvény egyik példájára.

⁴ A mai vélemény szerint az atomoknak nincs éles határfelületük, úgyhogy az atomok „nagysága” nem nagyon jól definiált fogalom. Azonosíthatjuk (vagy ha úgy tetszik, helyettesíthetjük) szilárd testben vagy folyadékban a középpontok távolságával; de a gázállapotban nem, mert ekkor a távolság normál nyomáson és hőmérsékleten kereken tízszer akkora, mint szilárd vagy cseppfolyós állapotban.

kényelmetlen volna. Bármennyire nagyra tartja is a fizikus az angström egységet, inkább azt mondja, hogy új ruhájához hat és fél yard szövetre, nem pedig 65 milliárd angström szövetre van szüksége.

Miután megállapítottuk, hogy kérdésünk tulajdonképpen két hosszúság arányára – testünk és az atom nagyságának arányára – irányul, s mert kétségtelenül az atom független léte az elsődleges, látható, hogy kérdésünket valójában így kell föltenni: miért oly nagy testünk az atomhoz képest?

Jól el tudom képzelni, hogy sok jó eszű fizikus- vagy kémikushallgató sajnálkozik azon, hogy érzékszerveink, amelyek lestünk többé-kevésbé lényeges részét alkotják, s ezért (a fentebb említett arány nagysága miatt) maguk is számtalan atomból állanak, túlságosan durvák ahhoz, hogy egy atom lecsapódását észleljék. Az atomokra vonatkozó hipotéziseink erősen különböznek durva érzékszerveink közvetlen észleleteitől, s közvetlenül nem ellenőrizhetők.

Így kell-e ennek lennie? Van-e ennek valami belső oka? Visszavezetjük-e ezt a helyzetet valamiféle első elvre, hogy megbizonyosodjunk róla és megértsük, miért nem fér össze semmi más a természet igazi törvényeivel?

Nos, éppen ez az a kérdés, amelyet a fizikus képes tökéletesen tisztázni. A válasz minden kérdésre igenlő.

5. Egy szervezet működése egzakt fizikai törvényeket követel meg

Ha a dolog *nem* így lenne, ha szervezetünk olyan érzékeny volna, hogy egyetlen vagy akár néhány atom észlelhető hatással lenne érzékszerveinkre – te jó ég, micsoda élet lenne az! .Csak egyet szeretnék hangsúlyozni: az ilyen szervezetben aligha fejlődhetne ki az a rendszeres gondolkodás, amely miután előző fokozatok hosszú sorozatán haladt át, végezetül egyéb fogalmakon kívül az atom fogalmának a megalkotásához vezet.

Noha csak ezt az egy pontot választjuk ki, az alábbi megfontolások lényegében nemcsak az agyra és az érzékelő rendszerre érvényesek, hanem más szervek működésére is. De számunkra testünkben az az egyetlen igazán fontos dolog, hogy érzünk, gondolkozunk és érzékelünk. A gondolkodásért és érzékelésért felelős fiziológiai folyamat szempontjából az összes többi csak mellékes szerepet játszik, legalábbis emberi szempontból, ha a tisztán objektív biológia szempontjából nem is. Ezenkívül munkánkat nagyban megkönnyíti olyan folyamat kutatásának a kiválasztása, amelyet szubjektív események kísérnek, noha a szoros párhuzamosság igazi természetét nem ismerjük. Véleményem szerint ez a természettudományok határán, s valószínűleg az emberi értelem határán is túl fekszik.

Így az alábbi kérdéssel kerülünk szembe: az olyan szervnek, mint agyunk, s a hozzá csatlakozó érzékelő rendszernek miért kell szükségképpen óriási számú atomból állnia, hogy ezáltal változó fizikai állapota szoros és benső kapcsolatba kerüljön magasan fejlett gondolkodásunkkal? Miért nem *fér* össze az agy gondolkodási funkciója olyan érzékelő mechanizmussal, legyen ennek akár egészéről, akár közvetlenül a környezettel kölcsönhatásba lépő részéről szó, amely kellően finom és érzékeny ahhoz, hogy egyetlen külső atom becsapódását is jelezze?

Ennek az az oka, hogy amit gondolkodásnak nevezünk, (1) rendszerezett dolog, és (2) csak olyan anyagra, azaz észleletekre vagy tapasztalatokra alkalmazható, amelyekben bizonyos fokú rendszerezettség van. Ennek két következménye van. Először a fizikai szervezetnek, hogy szoros megfelelésben legyen a gondolkodással (mint ahogyan a saját agyam és gondolkodásom között ez van), igen jól rendezett szervezetnek kell lennie. Ez annyit jelent, hogy a benne lejátszódó folyamatoknak szigorú fizikai törvényeknek kell eleget tenniük, legalábbis igen nagy fokú pontossággal. Másodsor, azok a fizikai benyomások, amelyekkel e jól szervezett rendszerre más

külső testek hatnak, nyilvánvalóan a megfelelő gondolat észlelésének és tapasztalásának felelnek meg, ezek alkotják előbbi elnevezésem szerint a gondolat anyagát. Ezért a rendszerünk és más rendszerek közti fizikai kölcsönhatásoknak szintén bizonyos fokú rendszerezettséget kell tartalmazniok, azaz bizonyos pontossággal szigorú fizikai törvényeknek kell eleget tenniük.

6. A fizikai törvények atomstatisztikán alapulnak, s ezért csak közelítő érvényűek

De miért nem teljesülhet mindez csupán mérsékelt számú atomból álló és már egy-két atom becsapódására érzékeny szervezetek esetében?

Mert ismeretes, minden atom állandóan tökéletesen rendezetlen hőmozgást végez, amely – hogy úgy mondjuk – ellene dolgozik a rendezett viselkedésnek, s nem teszi lehetővé, hogy a kisszámú atom részvételével végbemenő események fölismerhető törvények szerint folyjanak le. A statisztikai törvények csak óriási számú atom együttes hatásával kezdenek érvényre jutni, s ekkor az atomhalmazok viselkedését az atomok számának növekedésével egyre növekvő mértékben kormányozzák. Az események így válnak valóban rendezett természetűekké. Mindazok a fizikai és kémiai törvények, amelyekről ismeretes, hogy fontos szerepet játszanak a szervezetek életében, ilyen statisztikai jellegűek. Minden más elképzelhető törvényszerűséget és rendezettséget az atomok szüntelen hőmozgása állandóan megzavar, és lehetetlenné teszi érvényesülésüket.

7. A fizikai törvények pontossága a jelenségekben részt vevő atomok nagy számával kapcsolatos. Első példa (paramágnesség)

Hadd próbáljam meg ezt néhány példával szemléltetni, amelyeket a sok sok ezer lehetséges példa közül többé-kevésbé találomra választottam ki – s az olvasó szempontjából, aki most hall ezekről a dolgokról először, talán nem is a legjobban; pedig ez a dolog a mai fizikában és kémiában ugyanolyan alapvető, mint például a biológiában az a tény, hogy az élő szervezetek sejtekből állnak, vagy mint Newton törvényei a csillagászatban, vagy akár az 1, 2, 3, 4, 5, ... egész számok a matematikában. Akinek egészen új a dolog, nem várhatja, hogy a következő néhány oldal alapján tökéletesen megérti és értékelni tudja az ún. „statisztikus termodinamikát”, amelynek kifejlesztése Ludwig Boltzmann és Willard Gibbs neves fizikusok érdeme.

Ha hosszúkás kvarccsövet oxigéngázzal töltünk meg, s mágneses térbe tesszük, azt tapasztaljuk, hogy a gáz mágneseződik.⁵ A mágneseződés annak a következménye, hogy az oxigénmolekulák kis mágnesek, s az iránytűhöz hasonlóan a mágneses térrel párhuzamosan állnak be. De ne gondoljuk, hogy minden molekulapárhuzamosan rendeződik. Ha ugyanis kétszeresre növeljük a mágneses térerősséget, az oxigéngáz mágnessége is megkétszereződik, s az arányosság igen nagy térerősségekig megmarad. A mágneseződés ugyanolyan ütemben nő, mint az alkalmazott térerősség.

Ez a tisztán statisztikus törvények nagyon világos példája. Annak az irányításnak, amelyet az erőter igyekszik létesíteni, állandóan ellene dolgozik a hőmozgás, amely véletlenszerű orientálódást törekszik előidézni. Ennek a küzdelemnek csupán az az eredménye, hogy a dipólusok tengelyei és az erőter közti szögek között a hegyesszögek száma a tompaszögekéhez képest egy kissé megnő. Noha az egyes atomok irányítása állandóan változik, átlagban (óriási számuk következtében) a térerősség irányába eső és azzal arányos irányítottsági túlsúly lép föl. Ez a szellemes magyarázat P. Langevin francia fizikustól származik. A következő módon ellenőrizhető.

⁵ Azért választunk gázt, mert ez egyszerűbb, mint ha szilárd testet vagy folyadékot választanánk. Az a tény, hogy a mágneseződés ebben az esetben rendkívül gyenge, nem változtat semmit az eredeti megfontolásokon.



1. ábra. Paramágnesség

Ha az észlelt gyöngé mágnesség valóban ellentétes hatások eredménye, amelyek egyike a mágneses tér, amely minden molekulát párhuzamosan igyekszik irányítani, a másik a hőmozgás, amely irányítottságukat rendezetlenné teszi, úgy a mágneseződés a hőmozgás csökkentésével, vagyis a térerősség növelése helyett a hőmérséklet csökkentésével növelhető. A kísérlet igazolja ezt a következtetést. Eszerint a mágneseződés fordítottan arányos az abszolút hőmérséklettel, egyezően az elmélettel (Curie-törvény). A korszerű berendezésekkel az is lehetségessé vált, hogy a hőmérséklet csökkentésével a hőmozgást olyan jelentéktelenre csökkentjük, hogy a mágneses tér irányító hatása, ha nem is teljesen, de legalább elegendő mértékben érvényesüljön ahhoz, hogy a „telítési mágnesezés” komoly törtrészét létre tudja hozni. Ebben az esetben már nem várható, hogy a térerősség megkétszerezése megkettőzi a mágneseződést, hanem az utóbbi a térerősség növekedésével egyre lassabban nő, közeledve az ún. „telítéshez”. Ezt a következtetést a kísérlet szintén kvantitatíve igazolja.

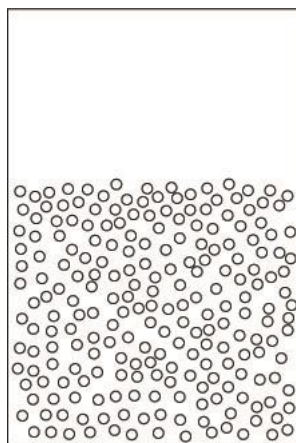
Ez a viselkedés teljesen azoknak a molekuláknak a nagy számával kapcsolatos, amelyek együttesen idézik elő az észlelhető mágneseződést. Ellenkező esetben az utóbbi egyáltalában nem lenne állandó, hanem egyik másodpercről a másikra rendszertelenül ingadozna, tanúskodván a hőmozgás és az erőtér közti küzdelemről.

8. Második példa (Brown-féle mozgás, diffúzió)

Ha egy lezárt üvegedény alsó részét apró cseppecskékből álló köddel töltjük meg, azt tapasztaljuk, hogy a köd felső határa egy bizonyos sebességgel süllyed, s a sebességet a levegő viszkozitása, valamint a cseppek nagysága és fajsúlya határozza meg. Ha azonban mikroszkóp alatt egyetlen cseppet megfigyelünk, nem azt látjuk, hogy állandó sebességgel süllyed, hanem nagyon rendszertelen mozgást végez. Ez az ún. Brown-féle mozgás, amely csak átlagban felel meg a szabályos süllyedésnek.

Nos, a cseppek nem atomok ugyan, de elég kicsinyek és könnyűek ahhoz, hogy ne legyenek teljesen érzéketlenek az ütközésekre az őket kalapácsszerűen állandóan ütögető molekulákkal. A molekulák tehát állandóan beleütköznek a cseppekbe, s ezek a gravitációs erő hatását csak átlagban tudják követni.

Ez a példa jól mutatja, milyen bolondos és rendszertelen tapasztalatokra tennénk szert akkor, ha érzékszerveink csupán néhány molekula ütközésére is érzékenyek lennének. Vannak olyan baktériumok és egyéb apró élőlények, amelyekre ennek a jelenségnek nagy hatása van. Ezek mozgását a környezet termikus szeszélyei szabják meg; nincs más választásuk. Ha volna némi saját helyváltoztatási lehetőségük, el tudnának ugyan jutni egyik helyről a másikra, de csak nehezen, mert a hőmozgás úgy lökdösné őket ide-oda, mint a viharos tenger az apró csónakot.



2. ábra. Süllyedő köd

A Brown-féle mozgáshoz igen hasonló jelenség a *diffúzió*. Töltsünk meg egy edényt folyadékkal, például vízzel s oldjunk föl benne valamilyen színező anyagot, például kálium-permanganátot, de nem egyenletes töménységben, hanem úgy, ahogyan azt a 4. ábra szemlélteti. Itt a karikák az oldott anyag (kálium-permanganát) molekuláit ábrázolják, s a töménység balról jobbra felé csökken. Ha a rendszert magára hagyjuk, igen lassú „diffúziós” folyamat kezdődik, a kálium-permanganát balról jobbra vándorol, vagyis a nagyobb töménységű helyekről a kisebb töménységűek felé tart mindaddig, amíg egyenlően el nem oszlik az egész vízmennyiségben.

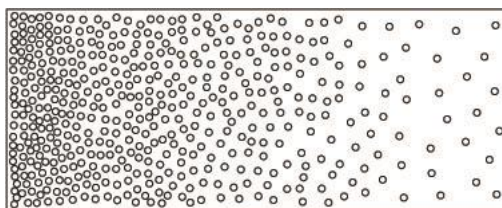


3. ábra. Süllyedő folyadékcsepp Brown-féle mozgása

A folyamat elég egyszerű és látszólag nem különösebben érdekes. Mégis különös az, hogy egyáltalában nincs szó arról, mint ahogy azt az ember hajlamos lenne hinni, hogy valamilyen erő hajtja el a molekulákat a sűrűbben elfoglalt helyekről a ritkábbak felé – mint ahogyan sűrűn lakott terület népessége oda igyekszik menni, ahol több a hely. A kálium-permanganát-molekulákkal semmi ilyesmi sem történik. Valamennyiük a többitől egészen függetlenül viselkedik, amelyekkel különben nagyon ritkán találkozik. Mindegyiküknek ugyanaz a sorsa, akár zsúfolt, akár üres részben vannak, ugyanis állandóan beléjük ütköznek a vízmolekulák, s ennek következtében meg nem határozható irányba fokozatosan elmozdulnak, hol a nagyobb, hol a kisebb töménységű helyek felé, néha ferdén. A mozgást gyakran hasonlították bekötött szemű személynek nagy területen való

mozgásához, amikor az illető „sétálni” szeretne, de kitüntetett irány nélkül, s így állandóan változtatja irányát.

Hogy a kálium-permanganát-molekuláknak ez a rendezetlen vándorlása, amely mindegyiküknél ugyanolyan, mégis szabályos áramlást hoz létre a kisebb töménységű helyek felé, s végezetül egyenletes eloszlást idéz elő, az első pillantásra zavarba ejtőnek látszik – de csak az első pillantásra. Ha a 4. ábrán közel állandó töménységű vékony metszeteket képzelünk el, akkor azok a kálium-permanganát-molekulák, amelyek egy adott pillanatban a kérdéses metszetben tartózkodnak, rendezetlen vándorlásuk következtében egyenlő valószínűséggel vándorolnak balra is, jobbra is. Ez igaz. De éppen ennek a következménye, hogy a két szomszédos metszetet elválasztó síkot balról több molekula lépi át, mint jobbról, egyszerűen azért, mert bal oldalon több molekula végez rendezetlen mozgást, mint jobb oldalon. Mindaddig, amíg ez marad a helyzet, az egyenleg balról jobb felé irányuló áramlást mutat, egészen az egyenletes eloszlás eléréséig.



4. ábra. Diffúzió balról jobb felé változó töménységű oldatban

Ha ezeket a megfontolásokat matematikai nyelvre lefordítjuk, a diffúzió egzakt törvénye az alábbi parciális differenciálegyenlettel fejezhető ki:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho.$$

Nem zavarom az olvasót azzal, hogy elmagyarázom ezt a képletet, noha jelentése közönséges nyelven elég egyszerű.⁶ Annak oka, amiért itt a szigorú, „matematikailag egzakt” törvényt emlegetjük, az, hogy fizikai pontosságát minden speciális alkalmazásnál kétségbe kell vonni. Minthogy a törvény tisztán a véletlenül alapszik, érvényessége csak közelítő. Amennyiben, s többnyire ez az eset, igen jó közelítés, ez csak a jelenség létrehozásában közreműködő nagyszámú molekula következménye. Minél kisebb a molekulák száma, annál nagyobbak a várható véletlenszerű eltérések – s ezek kedvező körülmények között észlelhetők is.

9. Harmadik példa (a mérési pontosság határai)

Az utolsó példa, amelyet közlünk, hasonlít a másodikhoz, de különleges érdeklődésre tarthat számot. A fizikusok gyakran használnak hosszú, vékony fonalra egyensúlyi helyzetben felfüggesztett könnyű testeket gyöngye erők mérésére, amelyek kitérítik ezeket az egyensúlyi helyzetből, az elektromos, mágneses vagy gravitációs erőket úgy alkalmazva, hogy a fonalat függőleges tengely körül elcsavarják. (A könnyű testet persze a speciális esetnek megfelelően kell választani.) E nagyon gyakran alkalmazott „torziós mérleg” pontosságának tökéletesítésére irányuló erőfeszítés során különös korlátba ütköztek, amely önmagában is érdekes. Amikor egyre könnyebb

⁶ Azaz: a töménység bármely pontban olyan sebességgel nő (vagy csökken), amely arányos infinitezimális környezetének töménységi többletével (vagy hiányával). A hővezetés törvénye pontosan ugyanígy szól, csupán a „töménység” szót kell a „hőmérséklettel” helyettesíteni.

testeket és egyre vékonyabb fonalakat választottak, hogy a mérleggel egyre gyöngébb erőket tudjanak mérni, a végső határt akkor érték el, amikor a felfüggesztett test észrevehetően érzékennyé vált a környező molekulák hőmozgásától eredő ütközésekre, s meg nem szűnő, rendezetlen „táncba” kezdett az egyensúlyi helyzet körül, hasonlóan a második példa remegő folyadékcseppjéhez. Noha ez a viselkedés nem szab abszolút korlátot a mérleggel végezhető mérések pontosságának, gyakorlatilag mégis korlátozza. A hőmozgás nem befolyásolható hatása verseng a mérendő erő hatásával, s az észlelt egyes kitéréseket jelentőség nélkülivé teszi. Ezért sok észleltre van szükség, hogy ezáltal kiküszöböljük a Brown-féle mozgásnak a műszerre gyakorolt hatását. Azt hiszem, ez a példa különösen sokatmondó jelen kutatásunk szempontjából. Érzékszerveink ugyanis lényegében műszerek. Jól látható, mennyire haszontalanokká válnának, ha túlságosan érzékenyek volnának.

10. A \sqrt{n} szabály

Egyelőre elég a példákából. Csupán annyit teszek még hozzá, hogy azon fizikai vagy kémiai törvények között, amelyek az élő szervezetben vagy annak a környezettel való kölcsönhatásaiban fontos szerepet játszanak, egyetlenegy sincsen, amelyet ne választhattam volna példaként. A részletes magyarázat esetleg bonyolultabb, de a lényeges pont mindig ugyanaz lenne, úgyhogy ismertetésük egyhangúvá válnék.

Szeretnék azonban még egy nagyon fontos kvantitatív állítást tenni bármely fizikai törvény várható pontatlansági fokával kapcsolatban, azaz kifejezni az ún. \sqrt{n} törvényt. Először egy egyszerű példával szemléltetem, majd általánosítom.

Ha azt mondom, hogy egy bizonyos gáznak adott nyomáson és hőmérsékleten meghatározott sűrűsége van, s ha ezt azáltal fejezem ki, hogy egy adott térfogatban (amelynek nagysága egy bizonyos kísérletben lényeges) az adott viszonyok között éppen n molekula van, akkor biztos, hogy amennyiben az állítást egy bizonyos időpillanatban ellenőrizni tudnánk, pontatlannak bizonyulna, s az eltérés éppen \sqrt{n} nagyságrendű lenne. Ha tehát $n = 100$, úgy az eltérés körülbelül 10, a relatív hiba tehát 10%-os. Ha azonban $n = 1$ millió, az eltérés 1000 körül, tehát 0,1%-os relatív hiba várható. A fizika és a fizikai kémia törvényei $1/\sqrt{n}$ nagyságrendű valószínű relatív hibával pontatlanok, ahol n azoknak a molekuláknak a száma, amelyek együttműködése megvalósítja a kérdéses törvényt – létrehozva érvényességét azokban a térbeli, időbeli vagy tér- és időbeli tartományokban, amelyek bizonyos megfontolások vagy speciális kísérletek szempontjából lényegesek.

Ebből megint látható, hogy az élő szervezeteknek viszonylag nagy méretű struktúrával kell rendelkezniük ahhoz, hogy részesüljenek a kellően fontos törvények előnyeiben, mind belső életük, mind a külvilággal való kölcsönhatás tekintetében. Ellenkező esetben az együttműködő részecskék száma túlságosan pontatlan lenne. Különösen a négyzetgyökvonás jelent szorongató követelményt. Mert noha a millió elég nagy szám, az egy az ezerhez pontosság nem éppen lenyűgözően jó, ha arról van szó, hogy egy dolog a „természettörvény” rangját igényli magának.

II. Fejezet

Az öröklődés mechanizmusa

*Das Sein ist ewig; denn Gesetze
Bewahren die lebend'gen Schätze,
Aus welchen sich das All geschmückt.*

GOETHE

11. A klasszikus fizikus várakozása távolról sem magától értetődő, hanem téves

Arra a következtetésre jutottunk tehát, hogy az élő szervezeteknek s a bennük végbemenő lényeges folyamatoknak rendkívül „sok atomos” struktúrájúaknak kell lenniök, s meg kell őket védeni az ellen, hogy véletlenszerű, „egyatomos” események túlságosan fontossá válhassanak. A „naiv fizikus” szerint ez lényeges, mert ekkor – hogy úgy mondjuk – az élő szervezetnek kellően pontos fizikai törvények állnak rendelkezésre, amelyekből meríthet csodálatosan szabályos és jól rendezett működésének megszervezésekor. Hogyan egyeznek a biológiai tényekkel ezek a biológiai szempontból a priori (vagyis tisztán fizikai szempontból) levont következtetések?

Első pillantásra az ember hajlamos arra gondolni, hogy következtetéseink valamivel többek, mint magától értetődők. Egy biológus, úgy harminc évvel ezelőtt, azt mondhatta, hogy noha egy népszerű előadónak jogában áll hangsúlyoznia az élő szervezetekben és bárhol másutt a statisztikus fizika fontosságát, a dolog valójában nem egyéb elcsépelet közhelynél. Hiszen nemcsak bármely magasabb fajhoz tartozó felnőtt egyed teste, hanem az ezt alkotó sejtek maguk is „csillagászati” számú s legkülönbélebb atomokból tevődnek össze. S minden biológiai folyamat, amelyet akár a sejten belül, akár a környezetjel való kölcsönhatás során észlelünk, úgy tűnik – illetve így tűnt harminc esztendővel ezelőtt –, hogy olyan óriási számú atomra és egyszerű atomi folyamatokra terjed ki, hogy a fizika és fizikai kémia minden fontos törvénye a statisztikus fizikának a „nagy számokra” vonatkozó, igen szigorú követelményei esetében is megmarad. E követelményeket éppen az imént szemléltettem a \sqrt{n} szabállyal.

Ma már tudjuk, hogy ez a vélemény *téves* volt. Mint rögtön látjuk majd, az élő szervezet igen rendezett és törvényeknek eleget tevő eseményeiben domináló szerepet játszanak hihetetlenül kicsiny atomcsoportok, amelyek sokkal kisebbek annál, hogy egzakt statisztikai törvények legyenek rájuk érvényesek. Ezek vezérlik azokat az észlelhető, makroszkopikusan megnyilvánuló sajátságokat, amelyeket a szervezet fejlődése során szerez meg, ezek határozzák meg működésének fontos jellemzőit; s mindezekben igen éles és igen szigorú biológiai törvények nyilvánulnak meg.

Azzal kell kezdenem, hogy rövid összefoglalást adok a biológia, pontosabban a genetika helyzetéről – azaz olyan tárgykörben kell összegezmem a tudomány mai állapotát, amelynek nem vagyok mestere. Ezen nem segíthetek, s előre is elnézést kérek a biológusoktól összefoglalóm dilettáns jellegéért. Azért is elnézést kell kérnem, hogy a ma uralkodó felfogást többé-kevésbé dogmatikusan ismertetem. Szegény elméleti fizikustól nem várható, hogy szakszerű összefoglalót adjon a kísérleti bizonyítékokról, amelyek valóban hallatlan találmánysággal kivitelezett nagy számú hosszú és szépen egymásba szövődő szaporítási kísérletből állnak, s az élő sejten végzett közvetlen megfigyelésekről, amelyeket a modern mikroszkópia minden rafinériájának igénybevételével végeztek el.

12. Az öröklődés kódja (kromoszómák)

Használjuk a szervezet „sémája” (*pattern*) kifejezést abban az értelemben, ahogyan a biológus azt „négydimenziós sémának” nevezi, amin nemcsak a felnőtt-szervezet vagy bármely más speciális állapot struktúráját és működését érti, hanem az egyedfejlődés egész történetét, a megtermékenyített petesejtől kezdve egészen az ivarérettségig, amikor a szervezet szaporodni kezd. Nos, ezt az egész négydimenziós sémát egyetlen sejt, a megtermékenyített petesejt struktúrája szabja meg. Sőt ismeretes, hogy a sejt egészének csupán egy kis része, a sejtmag szerkezete a döntő. A sejtmag a sejt közönséges „nyugvó állapotában”, rendszerint a sejtben eloszló kromatinhálóból⁷ áll. De a sejtosztódás (mitózis és meiózis, lásd alább) életfontosságú folyamataiban többnyire fonál alakú, kromoszómáknak nevezett részecskékből áll, amelyek száma 8 vagy 12, illetve az emberben 48. De ezeket a szemléltető számértékeket inkább 2x4, 2x6, ..., 2x24, ... alakban kellett volna írnom, s két kromoszómasorozatot kellett volna mondanom, hogy a kifejezést a biológusok szerinti értelemben használjam. Mert noha az egyes kromoszómák alakjuk és nagyságuk szerint világosan elkülönülnek és megkülönböztethetők egymástól, a két sorozat majdnem tökéletesen azonos. Mint rögtön látjuk majd, az egyik sorozat az anyától (petesejt), a másik az apától (megtermékenyítő ondósejt) származik. Ezek a kromoszómák, illetve valószínűleg csupán a vázként szolgáló tengelyfonal, amit a mikroszkóp alatt kromoszómaként látunk, tartalmazzák valamilyen kód : formájában az egyed jövőbeli fejlődésének és ivarérett állapotban való működésének teljes sémáját. Minden teljes kromoszómasorozat a teljes kódot tartalmazza; ezért a megtermékenyített petesejtben, amely a jövőbeni egyed legkorábbi stádiuma, két kódmásolat van.

Amikor a kromoszómafonalak struktúráját kódban – rejtjelekkel – írt írásnak nevezzük, arra gondolunk, hogy a Laplace által kigondolt mindentudó értelem, amely minden okozati összefüggést azonnal felfog, e struktúrából meg tudná mondani, hogy a kérdéses pete megfelelő körülmények között fekete kakassá, pettyes tyúkká, léggé vagy kukoricánövénnyé, rhododendronná, bogárrá, egérré vagy nővé fejlődik-e. Ehhez hozzátehetjük, hogy a petesejtek külseje sokszor nagyon hasonló; de még akkor is, amikor nem hasonlítanak, például a madarak és hüllők viszonylag óriási tojásai, illetve petéi esetében, a különbség nem annyira a lényeges struktúrában, hanem a tápanyagok tekintetében nyilvánul meg, amelyek mellékelésének oka az utóbbi esetekben nyilvánvaló.

De a kódírás kifejezés természetesen túlságosan szűk jelentésű. A kromoszómastruktúra közreműködik annak a fejlődésnek a létrehozatalában is, amelynek vonalát tartalmazza. A törvényhozást és a végrehajtó hatalmat – vagy hogy másik hasonlattal éljünk: az épülettervezőt és kivitelezőt – egyesítik magukban.

13. A test növekedése számtartó sejtosztódással (mitózis)

Hogyan viselkednek a kromoszómák az ontogenezis⁸ során?

Az élő szervezet növekedése sorozatos sejtosztódásokkal történik. A sejtek ezen osztódását mitózisnak nevezik. Az osztódás a sejt életében nem olyan gyakori, mint ahogy az ember gondolná, figyelembe véve a testünket alkotó sejtek óriási számát. A növekedés kezdetben gyors. A pete két „leánysejt” osztódik, amelyek a következő lépcsőben négy, majd 8, 16, 32, 64, ... sejtből álló

⁷ A szó jelentése: „olyan anyag, amely szint vesz föl”, például a mikroszkóptechnikában használatos színező eljárások során.

⁸ Ontogenezisnek nevezzük az egyedfejlődést, annak élettartama során, szemben a Biogenezissel, a fajoknak a geológiai korszakok során való fejlődésével.

generációt hoznak létre. Az osztódás gyakorisága nem ugyanakkora a növekvő test minden részében, s ez megszakítja a fenti számok szabályosságát. De a gyors sejtszámszorodásból könnyen kiszámítható, hogy átlagban már 50–60 egymás utáni osztódás is elegendő ahhoz, hogy létrehozza a felnőtt ember összes sejtjét⁹, illetve – figyelembe véve a sejtek cserélődését az élet folyamán – e számnak körülbelül a tízszeresét.

Testem tehát mindössze az ötvenedik, illetve hatvanadik „leszármazottja” eredeti petémnek.

14. A mitózis során minden kromoszóma megkétszereződik

Hogyan viselkednek a kromoszómák a mitózis során? Megkétszereződnek – mindkét sorozat, a kódnak mindkét másolata megkétszereződik. A folyamatot alaposan tanulmányozták mikroszkóp alatt, s nagyon érdekes, de túlságosan bonyolult ahhoz, hogy itt részletesen ismertessem. A lényeges az, hogy a két „leánysejt” hozományul két további teljes, a szülősejttel tökéletesen azonos kromoszómasorozatot kap. A testi sejtek tehát kromoszómakincsüket tekintve tökéletesen azonosak.¹⁰

Bármilyen kevésbé értjük a dolgot, csak arra gondolhatunk, hogy a szervezet működésében nagyon fontos szerepe van annak a ténynek, hogy minden sejtben, még a kevésbé fontosakban is, megvan a kódszöveg teljes (kettős) másolata. Az újságok nemrégiben azt írták, hogy az afrikai hadjáratban Montgomery tábornok nagy súlyt fektetett arra, hogy hadseregének minden egyes katonája a legapróbb részletekig értesülve legyen minden tervéről. Amennyiben ez igaz (csapatainak nagyfokú értelmessége és megbízhatósága következtében ez el is képzelhető), úgy pompás hasonlatot szolgáltat a mi esetünkhöz, amikor a kérdéses tény szó szerint igaz. A legmeglepőbb tény a kromoszómasorozat kettőssége, amely a számtartó osztódás, a mitózis során megmarad. Hogy ez a genetikai mechanizmus egyik leglényegesebb vonása, azt a legmeggyőzőbben bizonyítja a szabálytól való egyetlen eltérés, amelynek tárgyalására most térünk rá.

15. Számcsökkentő osztódás (meiózis) és megtermékenyítés

Röviddel az egyedfejlődés megkezdődése után a sejtek egy csoportja tartalékolódik arra, hogy belőlük később az ún. ivarsejtek, azaz a ondó-, illetve petesejtek fejlődjenek ki, amelyekre szükség van az ivarérett egyedek szaporodásához. „Tartalékoláson” azt értjük, hogy közben nem szolgálnak más célt, s sokkal kevesebb számtartó osztódáson mennek át, mint a többi sejt. A kivételes vagy számcsökkentő osztódás (az ún. meiózis) során az ivarérettség elérésekor az ivarsejtek e tartalékolt sejtekből képződnek, rendszerint röviddel az egyesülés (párvás) előtt. A meiózis során a szülősejt két kromoszómasorozata egyszerűen két egyszeres sorozatra válik szét, s a leánysejtekbe, azaz az ivarsejtekbe ezekből egy-egy sorozat jut. Ez más szóval annyit jelent, hogy a meiózishoz a kromoszómák száma nem kettőzödik meg, mint a mitózishoz, számuk állandó marad, úgyhogy minden egyes ivarsejt csupán a készlet egyik felét – azaz a kód egy és nem két teljes másolatát – kapja meg, az emberben tehát csak 24 kromoszómát, nem $2 \times 24 = 48$ -at.

Az olyan sejteket, amelyek csak egy kromoszómasorozatot tartalmaznak, haploidoknak nevezzük (a görög *ἀπλοῦς* = egyszeres szóból). Az ivarsejtek tehát haploidok, a közönséges testi sejtek viszont diploidok (a görög *διπλοῦς* = kétszeres szóból). Ritkán olyan egyedek is léteznek,

⁹ Közelítőleg száz-, illetve ezerbillió sejt.

¹⁰ A biológusoktól elnézést kérek, hogy ebben a rövid összefoglalóban figyelmen kívül hagytam a mozaikok különleges esetét.

amelyek minden sejtjében három, négy... általában több kromoszómasorozat fordul elő; ezeket triploidoknak, tetraploidoknak..., illetve poliploidoknak nevezzük

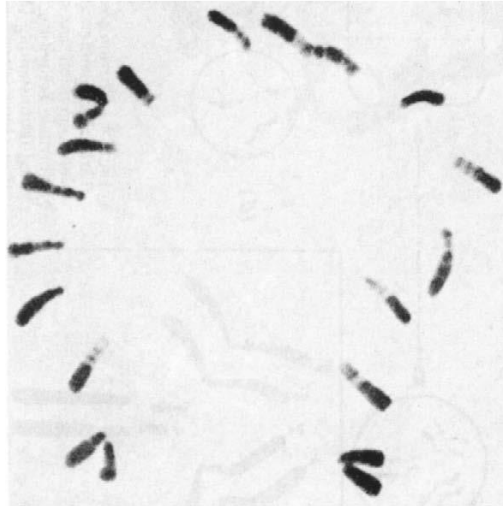
Az egyesülés (párasz) során a hím ivarsejt (ondósejt) és a női ivarsejt (petesejt), mindkettő haploid, egyesül, és a megtermékenyített petesejtet alkotja, amely tehát diploid. Egyik kromoszómasorozata az anyától, a másik az apától származik.

Az I. képtáblán látható fényképek mikroszkóp alatti kromoszómákat ábrázolnak. Átengedésükért köszönetét mondom az Imperial Chemical Industries Limitednek és dr. C. D. Darlingtonnak, akinek *The Handling of Chromosomes* című könyvében az érdeklődő olvasó sok hasonló és páratlan szépségű felvételt találhat. A 4. képtáblán vázlatos áttekintést adok a számtartó osztódás (mitózis), a számcsökkentő osztódás (meiózis) és egyesülés (megtermékenyítés) alapvető folyamatairól a *Drosophila (ecetmuslica)* esetében, amely olyan nagy szerepet játszik a modern genetikában, s (haploid) kromoszómaszáma 4. A négy különböző kromoszómát a különféle vonalkázással különböztettem meg. Az (a) részben diploid testi sejt kromoszómasorozatát mutatjuk be nagyítva. Ez csupán a (b)-(d) rajzok megértéséhez szükséges, amelyek csökkentett léptékűek, s tisztára vázlatos jellegűek. Lelkiismeretem megnyugtató véget kötök, hogy a meiózis esetében mind az ismertetésben, mind a rajzban olyan egyszerűsítést alkalmaztam, amely a mi szempontunkból lényegtelen¹¹.



Páros kromoszómák két Tradescantia-faj virágor-nyasejtjeiben; fent hat pár, rögzített és megfestett sejtben, len: tizenkét pár ultraibolya fényben fényképezett sejtben. (Nagyítás 1000-szeres)

¹¹ A meiózis valójában nem a kromoszómaszám kétszereződése nélküli osztódás, hanem egymást azonnal követő, szinte egybefolyó két osztódás, de csak az egyiknél van kromoszómaszám-kétszereződés. Ennek egyszerűen az a következménye, hogy nem két, hanem négy haploid ivar- sejt képződik egyszerre.



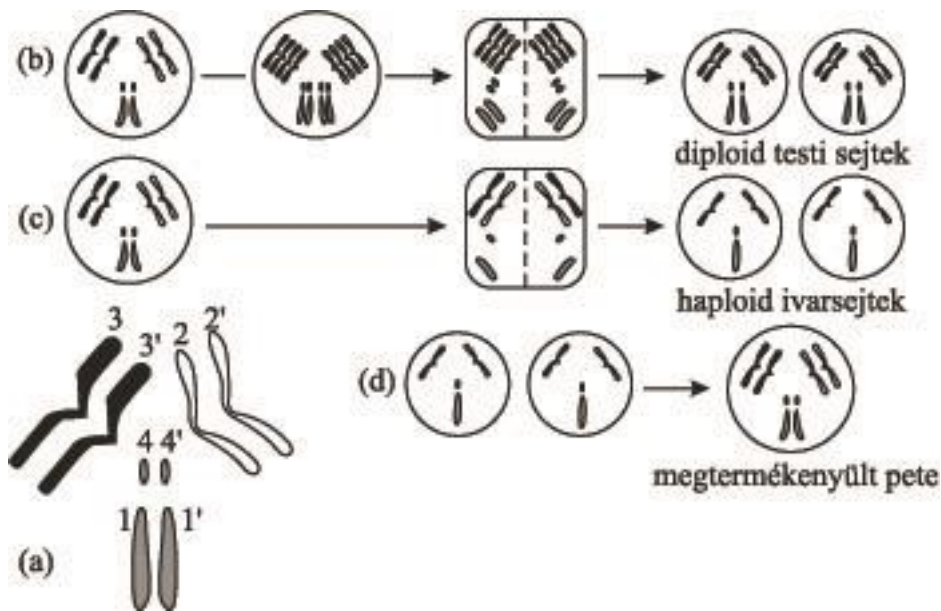
Hidegkezeléssel redukált megdermedt kromoszómák Fritillaria pudica virágporszemcésiben. A halvány részek élettelenek. (Nagyítás 1800-szoros)



Tizenkét kromoszómapár a Fritillaria chitralensis liliomfaj virágpor-anyasejtjében. A hurkok találkozási pontjai a párok közti kereszteződések helyei. (Nagyítás 1600-szoros)



A Drosophila melanogaster nyálmirigysejtjének nyugvó magja. A gének nyolc szaporodási cikluson mennek át, s egyenként 256 gént tartalmazó lapos lemezkesorozatot alkotnak. A nagyobb gének sötétebb színű foltok alakjában láthatók. (Nagyítás 1500-szoros)



(a) *Drosophila* testi sejtjének 2×4 kromoszómája. A különböző vonalkázás a négy homológ párt jelöli, s a további, igen vázlatos ábrákon ugyanezt a jelölést alkalmazzuk

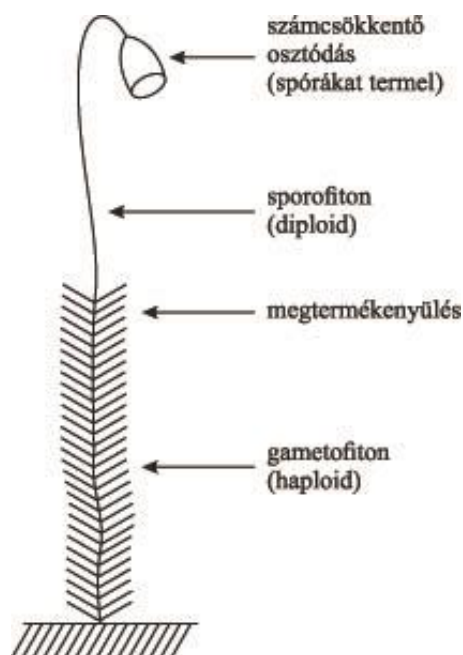
(b) Diploid testi sejt normális osztódása (mitózis)

(c) Diploid testi sejtekből számcsökkentő osztódás (meiózis) útján haploid ivarsejtek képződnek

(d) Megtermékenyülés (egyesülés). A haploid hím- és női ivarsejt egyesülve megtermékenyült diploid petévé alakul

16. Haploid egyedek

Még egy másik pont is helyesbítést igényel. Noha a mi szempontunkból nem feltétlenül szükséges, valóban érdekes, mert azt bizonyítja, hogy minden egyes kromoszómasorozat a „sémának” meglehetősen teljes kódszövegét tartalmazza.



5. ábra. A generáció cserélődése

Vannak esetek, amikor a meiózis nem következik be rövidesen a megtermékenyülés után, s a haploid sejt (az „ivarsejt”) közben sok számtartó osztódáson megy át, s ennek eredményeképpen teljes haploid egyed képződik. Ez a helyzet a hűn méhvel, a herével, amely szűznemzés útján, vagyis a királynő meg nem termékenyült, azaz haploid petéből fejlődik ki. A herének nincs apja! Minden testi sejtje haploid. Ha tetszik, óriásira nőtt ondósejtnek is nevezhetnénk. Mint ismeretes, a herének éppen ez az egyetlen feladata az életben. Ez azonban talán kissé groteszk szempont. Az eset ugyanis nem egyedülálló. Vannak olyan növénycsaládok, amelyekben a meiózis során képződött és ebben az esetben spórának nevezett ivarsejtek a földre hullnak, s ott, akárcsak a mag, a diploidhoz hasonló nagyságú, valódi haploid növényé fejlődnek. Az 5. ábrán vázlatosan ábrázoltunk egy az erdeinkben jól ismert mohát. Az alsó leveles rész a haploid növény, az ún. *gametofiton*, mert felső végén nemi szervek és ivarsejtek (tudományos kifejezéssel *gaméták – ford.*) fejlődnek, amelyek kölcsönös megtermékenyüléssel a szokásos módon létrehozzák a diploid növényt, a levél nélküli szárat, tetején a spóratokkal. A növény e részét *sporofitonnak* nevezik, mert számcsökkenő osztódással a felső tokban ez hozza létre a spórákat. Amikor a tok kinyílik, a spórák leesnek a földre, leveles szárat fejlesztenek stb. A jelenségsort értelemszerűen a generációk cserélődésének nevezzük. Ha éppen akarjuk, az általános esetet, az ember és az állatok esetét hasonlóan foghatjuk föl. De ekkor a „gametofiton” rendszerint igen rövid életű, egysejtű generáció, ondósejt vagy petesejt, a konkrét esettől függően. Testünk a sporofitonnak felel meg. „Spóráink” a tartalékolt sejtek, amelyekből számcsökkenő osztódással kifejlődik az egysejtű generáció.

17. A számcsökkenő osztódás rendkívüli fontossága

A fontos, valóban végzetteli esemény az egyed szaporodási folyamatában nem a megtermékenyülés, hanem a számcsökkenő osztódás. Az egyik kromoszómasorozat az apától, a másik az anyától származik. Ezt sem a véletlen, sem a végzet nem változtathatja meg. Minden ember¹² örökségének felét anyjának, másik felét apjának köszönheti. Hogy az egyik vonás uralkodik, illetve a másikat eltorzítja, annak más az oka, amire később még visszatérünk. (A nem a legegyszerűbb példa az egyik vonás uralkodására.)

Ha azonban örökségünk eredetét a nagyszülőnkig követjük, a helyzet más. Fordítsuk figyelmünket apai kromoszómasorozatomra, pontosabban az egyik kromoszómára, mondjuk, hogy az ötödikre. Ez pontos másolata annak az ötös számú kromoszómának, amelyet apám vagy apjától, vagy anyjától örökölt. Az eredmény 50 : 50 százalékos alapon dőlt el 1886 novemberében az apám testében végbemenő számcsökkenő osztódás során, amely létrehozta az ondósejtet, amellyel néhány nappal később engem nemzett. Pontosán ugyanez mondható el apai sorozatom 1, 2, 3, ..., 24-es számú kromoszómájáról és *mutatis mutandis* anyai kromoszómáim mindegyikéről is. Sőt, mind a 48 lehetséges kimenetel egymástól tökéletesen független. Még ha tudnám is, hogy 5-ös számú apai kromoszómám Josef Schrödinger nagyapámtól származik, a 7-es számú kromoszóma egyaránt származhatna akár tőle, akár feleségétől, leánynevén Marie Bognertől.

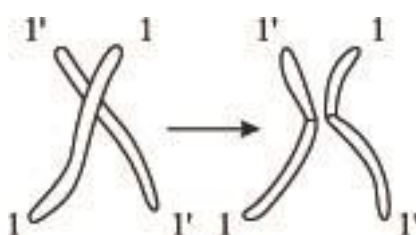
18. Kereszteződés. A tulajdonságok lokalizációja

De a tiszta véletlen még tágabb lehetőséget nyújt a nagyszülői örökségnek a leszármazottban való összekeveredésére, mint a fenti leírás alapján látszik. Ebben hallgatólagosan feltettem, illetve

¹² Legalábbis minden nő. A terjengősség elkerülésére összefoglalómból kihagytam a nemmeghatározás és a nemekhez kapcsolódó tulajdonságok (például az ún. színvakság) érdekes körét.

kifejezetten azt állítottam, hogy egy bizonyos kromoszóma egészében vagy nagyapámtól, vagy nagyanyámtól származik, vagyis hogy az egyes kromoszómák osztatlanul öröklődnek.

Ez a valóságban nincs, vagy nem mindig van így. A két „homológ” kromoszóma, mielőtt a számcsökkentő osztódás során, mondjuk apám testében, szétvált volna, szoros érintkezésben állott egymással. Ennek során néha egészen nagy részek kicserélődnek a 6. ábrán szemléltetett módon. (A 2. képtáblán még szorosabb és többszörös érintkezés mikrofényképe látható.) A folyamatot „kereszteződésnek” nevezzük, s ennek következtében az illető kromoszóma kérdéses részében székelő két tulajdonság az unokában szétválk, aki az egyikben nagyapját, a másikban nagyanyját követi. A kereszteződés folyamata, amely sem nem nagyon ritka, sem nem nagyon gyakori, rendkívül értékes adatokat szolgáltatott a tulajdonságoknak a kromoszómákban való lokalizációjára vonatkozóan. A teljes beszámolóhoz olyan fogalmakat kellene használnunk, amelyek bevezetése csak a következő fejezetben történik meg (például heterozigóta, dominancia stb.). De mivel ez meghaladná könyvecském keretét, mindjárt a döntő pontra szeretnék rámutatni.



6. ábra. Kereszteződés. balra: egymással érintkező két homológ kromoszóma. Jobbra: a két kromoszóma a részek kicserélődése és elválása után

Ha nem volna kereszteződés, két tulajdonság, amelyért ugyanaz a kromoszóma felelős, mindig együttesen öröklődne; egyetlen leszármazott sem örökölné csupán egyiküket a másik nélkül. De két tulajdonság, amelyek különböző kromoszómákban székelnek, vagy 50 : 50 százalékkal eshetőséggel válna szét, vagy mindig szétválna – az utóbbi akkor következne be, ha ugyanazon őshomológ kromoszómáiban székelnek, amelyek sohasem találkozhatnak.

Ezeket a szabályokat és eshetőségeket a kereszteződés megzavarja. Ezért a kereszteződés valószínűségét úgy lehet meghatározni, hogy megfelelően megtervezett, nagyméretű szaporító kísérletekben gondosan feljegyzik a leszármazottak százalékos összetételét. A statisztika elemzésében azt a helyesnek látszó munkahipotézist fogadjuk el, hogy az ugyanabban a kromoszómában székelő két tulajdonság közti „köteléket” a kereszteződés annál ritkábban szakítja el, mennél közelebb vannak egymáshoz. Ekkor ugyanis kisebb az esély arra, hogy kicserélődési pont legyen köztük, míg a kromoszómák két ellentétes végén székelő tulajdonságokat minden kereszteződés szétválasztja. (Ugyanez érvényes ugyanazon őshomológ kromoszómáiban székelő tulajdonságok újraegyesülésére.) A „kötelékstatisztika” alapján tehát várható, hogy minden kromoszómán belül megkapjuk a „tulajdonságok térképét”.

A sejteseket a kísérletek igazolták. Abban az esetekben, amikor teljes kísérleteket végeztek (főleg, de nem kizárólag a *Drosophilával*), a megvizsgált tulajdonságok valóban annyi csoportra bonthatók, a csoportok közti kötelékek nélkül, ahány különböző kromoszóma volt (a *Drosophila* esetében négy). Minden csoporton belül lineáris tulajdonságtérkép rajzolható meg, amely kvantitatíve számot ad a csoporton belüli kötési fokról, úgyhogy nem sok a kétely, hogy a tulajdonságok valóban lokalizáltak, és vonal mentén lokalizáltak, ahogyan ezt a kromoszóma fonalszerű alakja sejteti engedi.

Az öröklődés mechanizmusának itt megrajzolt képe persze még eléggé üres és színtelen, sőt egy kissé naiv is. Nem mondtuk meg ugyanis pontosan, mit értünk tulajdonságon. Az élő szervezet sémája, amely egységes „egész”, nem darabolható föl különálló „tulajdonságokra”. Nos, mi bármely speciális esetben lényegében azt állítjuk, hogy két ős valamilyen pontosan meghatározott szempontból különböző volt (például az egyiknek kék, a másiknak barna szeme volt), s hogy a leszármazott e tekintetben vagy az egyiket vagy a másikat követi. A kromoszómában e különbség székhelyét lokalizáljuk. (A székhelyt szakmai nyelven *locus*nak vagy, ha a kromoszóma feltételezett anyagszerkezetére gondolunk, *gén*nek nevezzük.) Véleményem szerint alapvetőbb fogalom a tulajdonságok közti különbség, mint maga a tulajdonság, annak ellenére, hogy ez az állítás látszólag nyelvészeti és logikai ellentmondást tartalmaz. A tulajdonságok közti különbségek ugyanis elkülönülő, diszkrét jellegűek, mint erről a következő fejezetben szó lesz. Ebben a mutációról beszélünk majd, s remélem, hogy az eddig közölt száraz séma több életet és színt nyer.

19. A gén maximális nagysága

Éppen az imént vezettük be a gén elnevezést egy meghatározott öröklődő vonás feltételezett anyagi hordozójára. Most két pontot kell hangsúlyoznunk, amelyek kutatásunk szempontjából rendkívül fontosak. Az első a hordozó nagysága – pontosabban maximális nagysága. Ez más szavakkal azt jelenti: milyen kicsiny térfogatig követhető a lokalizáció? A második pont a gének állandósága, amelyre az öröklődési séma tartósságából lehet következtetni.

A nagyságot illetően két egészen független becslés ismeretes. Az egyik genetikai bizonyítékokon (szaporítási kísérletek), a másik sejttani (citológiai) bizonyítékokon (közvetlen mikroszkópi észlelés) alapszik. Az első elvileg elég egyszerű. Miután a fentebb leírt módon egy speciális kromoszómában bizonyos számú (nagy léptékű) tulajdonságot lokalizáltunk (például a *Drosophila* ecetmuslicában), a becsült nagyságot úgy kapjuk meg, hogy a kromoszóma mért hosszát elosztjuk a tulajdonságok számával, s az eredményt megszorozzuk a keresztmetszettel. Különbözőnek persze csak az olyan tulajdonságokat tekintjük, amelyeket a keresztezések adott esetben elválasztani képesek, úgyhogy nem lehetnek ugyanazon (mikroszkópi vagy molekuláris) struktúra következményei. Másrészt világos, hogy becslésünk csupán a maximális térfogatot adhatja meg, mert a genetikai analízissel szétválasztott vonások száma a kutatások folytatódásával állandóan nő.

A másik becslés, noha mikroszkópi vizsgálaton alapszik, valójában sokkal kevésbé közvetlen. A *Drosophila* egyes sejtjei (mégpedig a nyálmirigyekéi) valami oknál fogva erősen megnagyobbodtak. Ilyenek a kromoszómák is. A fonalon harántirányú fekete sávokból álló zsúfolt mintázat különböztethető meg (lásd a 3. képtáblát). C. D. Darlington észrevette, hogy a sávok száma (az ő esetében 2000), noha lényegesen nagyobb, mégis hasonló nagyságrendű, mint ahány gént a kérdéses kromoszómában a szaporítási kísérletekben lokalizáltak. A sávok szerinte a valóságos géneket (vagy válaszfelületüket) jelzik. A kromoszómának normális méretű sejtben mért hosszát a gének számával (2000) osztva, a gének térfogatára 3000 Å oldalélű kockát kapott. A becslések pontatlanságát tekintetbe véve ezt a számértéket tekinthetjük az első módszerrel kapott méretnek is.

20. Kis számok

A statisztikus fizikának az általam felsorolt tényekre való kihatásait – vagy talán inkább azt kellene mondanom, hogy e tények kihatását a statisztikus fizikának az élő sejtben való alkalmazására –

teljességében csak később tárgyalom. De hadd hívjam föl rá a figyelmet, hogy 300 Å a folyadékban vagy szilárd testben csupán az atomok távolságának 100-, illetve 150-szerese, úgyhogy egy gén bizonyára nem tartalmaz egymillió vagy néhány millió atomnál többet. Ez a szám messze túlságosan kicsiny a \sqrt{n} törvényszempontjából ahhoz, hogy a statisztikus fizika, vagyis a fizika szerinti rendezett és törvényszerű viselkedést vonjon maga után. Túlságosan kicsiny még akkor is, ha minden atom ugyanolyan szerepet játszana, mint egy gázban vagy folyadékcseppben. Márpedig a gén minden valószínűség szerint nem éppen homogén folyadékcsepp. Valószínű, hogy nagy fehérjemolekula, amelyben minden atomnak, minden gyöknek, minden heterociklikus gyűrűnek külön szerepe van, amely kissé különbözik attól, amelyet a többi atom, gyök vagy gyűrű játszik. Legalábbis ez a vezető genetikusok, így Haldane és Darlington véleménye, s rövidesen hivatkozunk olyan genetikai kísérletekre, amelyek majdnem teljes bizonyossággal igazolják ezt.

21. Állandóság

Térjünk most rá a második nagyon fontos kérdésre: mekkora fokú állandósággal találkozunk az öröklődő tulajdonságoknál, s mekkorát kell ezért tulajdonítanunk azoknak az anyagoknak, amelyek ezeket hordozzák?

A válasz erre minden különösebb vizsgálódás nélkül megadható. Maga az a tény, hogy öröklődő tulajdonságokról beszélünk, azt bizonyítja, hogy állandóságukat majdnem abszolútnak tartjuk. Nem szabad ugyanis elfelejtenünk, hogy amit a szülő átörökít gyermekére, nem pontosan ez vagy az a tulajdonság, horgas orr, rövid ujj, hajlam a reumára, vérzékenység, dikroitikus látás stb. Ilyen vonásokat célszerű az öröklődés törvényeinek tanulmányozása végett kiválasztani. De tulajdonképpen a „fenotípus” egész (négydimenziós) „sémája”, az egyed látható és nyilvánvaló természete az, ami lényeges változások nélkül nemzedékeken át ismétlődik, évszázadokon át állandó – de tízezer éveken belül már nem s ezt viszi magával minden öröklésnél annak a két sejtnek az anyagszerkezete, amely egyesülve a megtermékenyült petesejtet alkotja. Ez igazi csoda, amelynél csak egy dolog nagyobb, amely ugyan szorosan kapcsolódik hozzá, de más síkon van. Arra gondolok, hogy mi, akiknek egész léte tökéletesen ilyen csodálatos kölcsönhatásokon alapszik, képesek vagyunk arra, hogy komoly tudásra tegyünk szert ezen a téren. Lehetségesnek tartom, hogy tudásunk majdnem a teljes megértésig hatolhat előre – ez az első csoda. A második alighanem túlesik az emberi értelem határán.

III. Fejezet Mutációk

*Und was in schwankender Erscheinung schwebt
Befestigt mit dauernden Gedanken.*

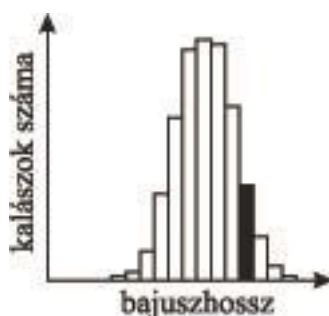
GOETHE

22. „Ugrásszerű” mutációk – a természetes kiválasztódás alapja

Azok az általános tények, amelyeket felsoroltunk a génstruktúra tartósságának bizonyítékaként, talán túlságosan is ismertek előttünk ahhoz, hogy meglepőnek vagy meggyőzőnek lássuk őket. Ha nem volnának kivételek a gyermekek és szülők közti hasonlóság tekintetében, meg lennénk fosztva nemcsak azoktól a szép kísérletektől, amelyek föltárták előttünk az öröklődés aprólékos mechanizmusát, hanem a természet nagy, milliószeres kísérletétől is, amely a fajokat a természetes kiválasztódással és a legalkalmasabb életben maradásával kovácsolja ki.

Vegyük ezt a legutóbbi fontos dolgot a lényeges tények közlése kiindulási pontjának – ismét elnézést kérve, és emlékeztetve arra, hogy nem vagyok biológus.

Ma már határozottan tudjuk, hogy Darwin tévedett, amikor azokat a kicsiny, folytonos, véletlenszerű változásokat, amelyek a leghomogénebb népességben is előfordulnak, tekintette a természetes kiválasztódás anyagának. Bebizonyosodott ugyanis, hogy ezek a változások nem öröklődők. A dolog elég fontos ahhoz, hogy röviden szemléltessük. Ha tiszta fajtájú árpa növényt veszünk, s kalászonként megmérjük a bajusz hosszát, majd az eredményt statisztikailag ábrázoljuk, a 7. ábrán látható harang alakú görbét kapjuk, ahol a bizonyos hosszúságú bajusszal bíró kalászok számának és hosszúságának összefüggését tüntettük föl. Az ábra tehát azt jelenti, hogy egy közepes hosszúság van többségben, s ettől mindkét irányban bizonyos gyakorisággal eltérések fordulnak elő. Most válasszunk ki egy kalászcsoportot (az ábrán feketítéssel jelölve), ahol a bajuszok jóval hosszabbak az átlagnál, és számuk elég nagy ahhoz, hogy a szántóföldön elvetve új termést adjanak. Ugyanazt a statisztikát elkészítve Darwin azt várta volna, hogy a görbe jobbra tolódik. Ez annyit jelent, hogy a bajuszok átlagos hosszának kiválasztódás következtében való növekedésére számított volna. Ha valóban tiszta fajtájú árpával dolgozunk, nem ez a helyzet. A kiválasztott magokkal kapott új termés statisztikai görbéje azonos az első görbével, s ugyanez lenne a helyzet, ha különlegesen rövid bajuszu kalászokat választottunk volna ki vetőmagként. A kiválasztásnak itt nincs hatása, mert a kicsiny, folytonos változások nem öröklődnek. Ezek nyilvánvalóan nem az öröklődés anyagszerkezetén alapulnak, hanem véletlenszerűek. De mintegy negyven évvel ezelőtt de Vries holland tudós fölfedezte, hogy még tökéletesen tiszta fajtájú szaporításokban is az egyedek igen kis száma, például több tízezer közül kettő vagy három, kicsiny, de „ugrásszerű” változásokat mutat. Az „ugrásszerű” kifejezés itt nem azt jelenti, hogy a változás nagyon jelentékeny, hanem hogy nem folytonos: diszkontinuitás van olyan értelemben, hogy a változatlan és kissé megváltozott formák között nincs átmeneti forma. De Vries mutációnak nevezte el az új formát. A lényeges vonás a diszkontinuitás. Ez a fizikust a kvantumelméletre emlékezteti – két szomszédos energiaszint között nincsenek közbeeső szintek. A fizikus hajlamos lenne arra, hogy de Vries mutációs elméletét a biológia kvantumelméletének nevezze. Később látjuk majd, hogy ez jóval több tiszta formalitásnál. A mutációk valóban a génmolekula kvantumugrásainak következményei. De a kvantumelmélet mindössze két éves volt, amikor de Vries 1902-ben közzétette fölfedezését. Nem csoda, hogy még egy nemzedékbe tellett, amíg fölfedezték a bensőséges kapcsolatot a kettő között!



7. ábra. Tiszta fajtájú árpa bajusz hosszainak statisztikai eloszlása. (Nem valóságos kísérlet nyomán, csak szemléletes céljára kitalálva)

23. A mutációk tökéletesen öröklődnek

A mutációk ugyanolyan tökéletesen öröklődnek, mint az eredeti, változatlan jellemzők. Példaként megemlítjük, hogy a fenti első árpatermésben néhány kalász bajuszának hossza jóval a 7. ábra szerinti változékonyságon kívül esik, például egyáltalában nincsen bajusz. Ezek de Vries-féle mutációt alkothatnak, s ekkor tökéletesen hűen szaporodnak, vagyis minden leszármazottjuk egyaránt bajusz nélküli lesz.

A mutáció tehát határozottan az öröklött készletben való változás, s az öröklődés anyagában végbemenő változással kell magyarázni. Tulajdonképpen a fontos szaporítási kísérletek nagy része, amelyek az öröklődés mechanizmusát föltárták előttünk, a keresztezéssel nyert utódok gondos elemzéséből állott. A keresztezés előre kigondolt terv szerint történt, mutált (egyes esetekben többszörösen mutált) egyedeket nem mutáltakkal vagy másképpen mutáltakkal keresztezve. Viszont a hű szaporodás miatt a mutációk alkalmas anyagok, amelyeken a természetes kiválasztódás dolgozhat, s előidézheti a fajok Darwin által leírt kialakulását, amennyiben kiküszöböli az alkalmatlanokat, s a legerősebb marad életben. Darwin elméletében a „kicsiny véletlenszerű változások” helyett egyszerűen „mutációkat” kell mondani (mint ahogyan a kvantumelméletben is a folytonos energiaátvitelt „kvantumugrásokkal” kell helyettesíteni). Minden más tekintetben Darwin elméletén csak kis módosításokat kellett végrehajtani, legalábbis ha helyesen értelmezem a biológusok többségének nézeteit.¹³

24. Lokalizáció. Recesszivitás és dominancia

Most néhány alapvető tény és fogalmat kell összefoglalnunk a mutációk köréből, ismét egy kissé dogmatikusan, anélkül hogy rámutatnánk, hogyan erednek a kísérleti bizonyítékokból.

Várható, hogy ha egy meghatározott mutációt észlelünk, azt az egyik kromoszóma egy meghatározott környezetében bekövetkező változás váltotta ki. Így is van. Fontos annak hangsúlyozása, hogy csak egy kromoszómában végbemenő változásról van szó, a homológ kromoszóma megfelelő helyén nincs változás. A 8. ábra ezt vázlatosan szemlélteti, a kereszt a mutált helyet jelöli. Az a tény, hogy csak az egyik kromoszóma változott meg, akkor nyilvánul meg, amikor a mutált egyed (gyakran „mutánsnak” hívják) nem mutált egyeddel keresztezik. Ekkor ugyanis az utódoknak pontosan a fele mutáns jellegű, a másik fele normális. Éppen ez várható a mutánsban a

¹³ Nagy vitát váltott ki az a kérdés, hogy a természetes kiválasztódást elősegíti-e (amennyiben nem teszi fölöslegessé) a mutációk kifejezett hajlama arra, hogy hasznos, illetve kedvező irányba menjenek végbe. Személyes véleményem ebben a kérdésben nem fontos, de hangsúlyoznom kell, hogy az „irányított mutációk” lehetőségét a következőkben figyelmen kívül hagytam. Nem térhetek itt ki a „kapcsoló” gének és a „poligének” kölcsönhatásaira sem, bármilyen fontosak legyenek is ezek a kiválasztódás és az evolúció valódi mechanizmusa tekintetében.

két kromoszómának a számcsökkenő osztódás során végbemenő elválásának következményeképpen – mint ezt igen vázlatosan a 9. ábra szemlélteti. Ez olyan „családfa”, amely minden egyedet (három egymás utáni nemzedékben) egyszerűen a kérdéses kromoszómapárral ábrázol. Kérem, figyeljék meg, hogy amennyiben mindkét kromoszóma megváltoznék a mutánsban, minden utód ugyanazt a (vegyes) örökséget kapná, amely különbözne mindkét szülő kromoszómáitól.

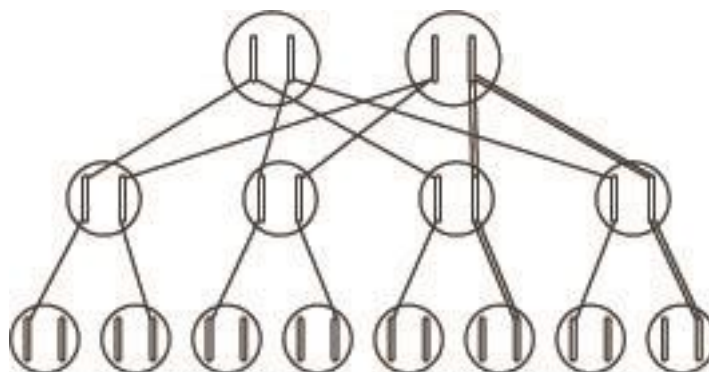
De a kísérletezés ezen a területen nem olyan egyszerű, mint a mondottakból hinnénk. Bonyolulttá teszi a második fontos tény, tudniillik az, hogy a mutációk igen gyakran lappangók. Mit jelent ez?

A mutánsban a „kódszöveg két másolata” nem azonos többé; két különböző szöveget vagy változatot képviselnek, mindenesetre ugyanazon a helyen. Talán célszerű rögtön hangsúlyozni, hogy noha nagy a kísértés, mégis tökéletesen helytelen volna az eredeti változatot „ortodoxnak”, a mutánst pedig „eretneknek” tekinteni. Elvileg egyenjogúaknak kell őket tekintenünk, mert a normális jellemzők szintén mutációkból keletkeztek.

Valójában az történik, hogy az egyedi „séma” általában vagy az egyik, vagy a második változatot követi, amely lehet a normális vagy a mutáns változat. Azt a változatot, amelyet a séma követ, dominánsnak, a másikat recesszívnek (lappangó) nevezzük. Más szavakkal kifejezve: egy mutációt dominánsnak vagy recesszívnek nevezünk aszerint, hogy rögtön megváltoztatja-e a sémát, vagy sem.



8. ábra. Heterozigóta mutáns. A kereszt a mutált gént jelöli



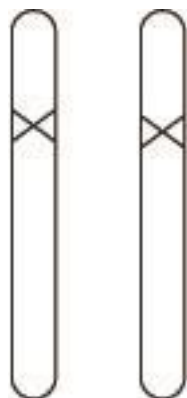
9. ábra. Mutáció öröklődése. Az egyszeres vonalak a közönséges, a kétszeresek a mutált kromoszómák átadását jelölik. A harmadik generáció be nem jelölt kromoszómái a második nemzedék nemi párjaitól származnak, amelyeket nem jelöltünk be a rajzba. Nem rokonoknak, mutációktól menteseknek feltételeztük őket

A recesszív mutációk még gyakoribbak, mint a dominánsak, s nagyon fontosak, noha először egyáltalában nem nyilvánulnak meg. A sémát csak akkor befolyásolják, ha mindkét kromoszómában jelen vannak (lásd a 10. ábrát). Ilyen egyedek akkor jöhetnek létre, ha két egyenlő recesszív mutáns kereszteződik. Ez kettős ivarú növényeknél lehetséges, sőt ott önként (spontán) bekövetkezik. Egy könnyű eszmefuttatás azt mutatja, hogy ebben az esetben az utódok egynegyede ilyen típusú lesz, s kívülről láthatóan megnyilvánul bennük a mutált séma.

25. Némi szakmai nyelvezet bevezetése

Azt hiszem, világosabb lesz a dolog, ha itt néhány szakkifejezést elmagyarázok. Arra, amit a „kódszöveg egyik változatának” neveztem – legyen szó akár az eredetiről, akár a mutánsról –, az *allél* nevet fogadták el. Ha a változatok különbözők, mint a 8. ábrán, az egyed a kérdéses hely tekintetében heterozigótának nevezik. Ha egyenlők, mint a nem mutált egyedben vagy a 10. ábrán, akkor homozigótának hívják őket. A recesszív allél tehát csak akkor befolyásolja a sémát, ha az egyed homozigóta, a domináns allél pedig mindig ugyanazt a sémát idézi elő, akár homozigóta, akár heterozigóta egyedről van szó.

A szín gyakran domináns a színhiányhoz (vagy fehérhez) képest. Például a borsó virága csak akkor fehér, ha a kérdéses kromoszómák közül mindkettőben megvan a „fehér színt előidéző recesszív allél”, ha a „fehér szín tekintetében homozigóta”. Ekkor hűen szaporodik, s minden utóda fehér lesz. De egy „piros allél” (a másik fehér; „heterozigóta”) a virágot pirossá teszi, s ugyanez a helyzet két piros allél esetében is („homozigóta”). Az utóbbi két esetben a különbség csak az utódokban jelentkezik, amikor a heterozigóta piros virágú egyednek néhány fehér utóda lesz, a homozigóta piros virágú egyedek pedig tulajdonsághűen szaporodnak.



10. ábra. Homozigóta mutáns, amely heterozigóta mutánsok önmegtermékenyülése (lásd 8. ábra) vagy kettejük kereszteződése során képződött utódok egynegyed részében bekövetkezik

Az a tény, hogy két egyed külső megjelenésében tökéletesen azonos lehet, pedig örökségük különböző, annyira fontos, hogy kívánatos pontos megkülönböztetésük. A genetikusok ezt úgy fejezik ki, hogy a fenotípus ugyanaz, a genotípus különböző. Az előbbi bekezdések tartalma tehát ebben a rövid, de erősen szakmai fogalmazású állításban foglalható össze:

Recesszív allél a fenotípust csak akkor befolyásolja, ha a genotípus homozigóta.

A továbbiakban alkalmanként használjuk ezeket a szakkifejezéseket, de ahol szükséges, az olvasó emlékezetébe idézzük jelentésüket.

26. A beltenyésztés káros hatása

A recesszív mutációk, amíg csak heterozigóták, természetesen nem szolgáltatnak alapot a természetes kiválasztódáshoz. Ha károsak, mint a mutációk gyakran, mégsem küszöbölődnek ki, mert lappangók. Ezért egész sor kedvezőtlen mutáció halmozódhat föl anélkül, hogy rögtön kárt okozna. De félig átöröklődnek az utódokra, s ennek fontos következménye van az emberre, a marhára, a baromfira és minden más olyan fajra, amelynek jó egészségi viszonyai közvetlenül fontosak számunkra. A 9. ábrán feltettük, hogy a hím egyed (mondjuk konkrétan, hogy én magam) a káros recesszív mutációt heterozigóta módon hordozza, úgyhogy az nem nyilvánul meg. Tegyük föl, hogy feleségem mentes tőle. Ekkor gyermekeink fele (második vonal) szintén tartalmazza őket – ismét heterozigótaként. Ha valamennyien ismét nem mutált társakkal házasodnak össze (a rajzról az áttekinthetőség kedvéért kihagyva), átlagban unokáink egynegyed része hasonlóan jár.

A káros tulajdonság megnyilvánulására mindaddig nincs veszély, amíg két egyenlően befolyásolt egyed nem kereszteződik. Ekkor, mint könnyen belátható, a gyermekek egynegyed része homozigóta lévén, ezekben a káros tulajdonság megnyilvánul. Az önmegtermékenyítésen kívül (ez csak kettős ivarú növényeknél lehetséges) a legnagyobb veszély a fiam és leányom közti házasság volna. Minthogy mindkettejünkél egyenlő az esély, hogy a lappangó tulajdonság bennük van, illetve nincs bennük, az ilyen vérfertőző házasságok negyedrésze veszélyes lenne annyiban, hogy a gyermekek negyedrésszében megnyilvánulna a káros tulajdonság. A vérfertőzésből született gyermek veszélyességi tényezője tehát 1:16.

Hasonló módon kimutatható, hogy első unokatestvéri rokonságban levő két unokám („tisztaszületésűek”) utódjainak veszélyességi tényezője 1 : 64. Ezek az esélyek nem látszanak túlságosan veszedelmeseknek, s a második esetet általában eltűrik. De ne feledjük el, hogy csak az őspár („én és a feleségem”) egyike egyetlen lappangó hibájának következményeit elemeztük. A valóságban nagyon valószínű, hogy mindketten egynél több hasonló lappangó hibában szenvednek. Ha valaki tudja, hogy benne egy bizonyos hiba lappang, azzal kell számolnia, hogy az első unokatestvéreknél 1 : 8 a veszély eshetősége! A növényekkel és állatokkal végzett kísérletek arra engednek következtetni, hogy a viszonylag ritkán előforduló komoly hibákon kívül egész sor kisebb káros hatással kell számolni, amelyek veszélyeshetőségei egyesülnek, s ezáltal lerontják a beltenyésztet utódainak összességét. Minthogy nem vagyunk hajlandók a testi hibákat azokkal a durva módszerekkel kiküszöbölni, ahogyan a spártaiak jártak el Taigetosz hegyén, különösen szigorúan kell felfogni ezeket a dolgokat az ember esetében, ahol a legéletrevalóbbak természetes kiválasztódása nagyrészt korlátozott, sőt az ellenkezőre is fordulhat. Minden nemzet egészséges fiatalsága mai tömegmészárlásának a kiválasztódással ellentétes hatását aligha ellensúlyozza az a megfontolás, hogy kezdetlegesebb viszonyok között a háborúnak pozitív kiválasztó hatása volt annyiban, hogy az életrevalóbb törzsek maradtak meg.

27. Általános és történeti megjegyzések

Az a tény, hogy a recesszív heterozigóta állt a domináns teljesen a háttérbe szorítja, s észrevehető hatást egyáltalában nem vált ki, meglepő. Legalább annyit meg kell említeni, hogy e viselkedés alól vannak kivételek. Ha homozigóta fehér oroszlánszájat szintén homozigóta piros oroszlánszájjal keresztezünk, a közvetlen utódok mind közbenső, azaz rózsaszínűek (és nem pirosak, mint várható lenne). A vércsoportoknál van egy ennél sokkal fontosabb eset, amikor két állat hatása egyidejűleg nyilvánul meg – de erre most nem térhetünk ki. Nem lepődnék meg azon, ha kiderülne, hogy a

recesszivitásnak fokozatai vannak, s azoknak a vizsgálatoknak az érzékenységtől függ, amelyekkel a „fenotípust” tanulmányozzuk.

Talán most van itt az ideje, hogy néhány szót szóljunk a genetika történetéről. Az elmélet gerince, hogy azok a tulajdonságok, amelyekben a szülők különböznek, az egymás utáni nemzedékekre öröklődnek, s a recesszív-domináns tulajdonságok fontos megkülönböztetése Gregor Mendeltől, a világhírű Ágoston-rendi apáttól (1822–84) származik. Mendelnek fogalma sem volt mutációkról és kromoszómákról. A brünni (Brno) kolostorkertben kerti borsóval végzett kísérleteket, amelyből többféle változatot termesztett ki, keresztezve azokat, s megfigyelve az utódokat az első, második, harmadik ... nemzedékben. Azt lehetne mondani, hogy a természetben készen található mutánsokkal kísérletezett. Eredményeit a *Naturforschender Verein in Brünn* társaság kiadványában már 1866-ban leköszölte. Úgy látszott, hogy senkit sem érdekel különösebben az apát hóbortja, s bizonyára senkinek sem volt a leghalványabb fogalma sem arról, hogy az apát fölfedezése a tudomány egészen új ágának a vezérszögévé lesz a 20. században, amely könnyen napjaink legfontosabb ágává válhat. Cikkéről elfeledkeztek, s csak 1900-ban fedezték föl újra, egymástól függetlenül és egyidőben Correns (Berlin), de Vries (Amszterdam) és Tschermak (Bécs).

28. A mutáció ritka voltának szükségessége

Mindeddig a káros mutációkra irányítottuk figyelmünket, amelyek száma nagyobb. Határozottan le kell azonban rögzítenünk, hogy előnyös mutációkkal is találkozhatunk. Ha az önkéntes (spontán) mutáció egy kis lépés a faj fejlődése útján, úgy az az érzésünk, hogy valamely változás eléggé véletlenszerű „kísérletéről” van szó, ahol fennáll a kockázat, hogy hatása káros lesz. Ebben az esetben automatikusan kiküszöbölődik. Ezzel nagyon fontos ponthoz értünk. A mutációk csak akkor szolgáltathatnak megfelelő anyagot a természetes kiválasztódás munkájához, ha ritkán fordulnak elő. Ez is a helyzet. Ha a mutációk olyan gyakoriak volnának, hogy komoly eshetőség lenne arra, hogy ugyanabban az egyedben mondjuk egy tucat mutáció következzen be, akkor a károsak általában fölényben lennének az előnyösközőkhöz képest, s a faj, ahelyett hogy a kiválasztódás útján tökéletesednék, vagy változatlan maradna, vagy kipusztulna. A gének nagyfokú állandóságáról eredő viszonylagos konzervativizmus lényeges. A helyzet hasonló, mint egy nagy gyár műhelyeinek termelésében. Ha jobb termelési módszereket akarunk kifejleszteni, addig még ki nem próbált újításokkal kell kísérletezni. De ha meg akarunk győződni arról, hogy az újítások tökéletesítést vagy rontást okoznak-e, egyesével kell őket bevezetni, a termelő mechanizmus egyéb részeit változatlanul hagyva.

29. Röntgensugarakkal kiváltott mutációk

Most rátérünk a genetikai kutatások egyik legeredetibb sorozatának ismertetésére, amely elemzésünk legfontosabb sajátosságának bizonyul majd.

Az utódok mutációinak százalékos arányszáma, az ún. mutációs ráta a kicsiny természetes mutációs ráta sokszorosára növelhető a szülőknek röntgen- vagy gamma-sugarakkal való besugárzásával. Az így keletkezett mutációk semmiben (kivéve a mutációk nagyobb számában) sem különböznek a spontán mutációktól, s az embernek az az érzése, hogy minden „természetes” mutáció kiváltható röntgensugarakkal. A *Drosophila* esetében a nagy tenyészetekben sok speciális mutáció állandóan visszatér. Ezek helyét a 18. szakaszban ismertetett módon lokalizálták a kromoszómában, s külön neveket adtak nekik. Még ún. „többszörös alléleket” is találtak – azaz a normális, nem mutált változaton kívül két vagy több különböző „változatot” vagy „szöveget” – a

kromoszómakód ugyanazon helyén. Ez nemcsak két, hanem három vagy még több lehetőséget jelent ugyanazon a „helyen”. Ezek párosával „domináns-recesszív” viszonyban állanak egymással, amikor a két homológ kromoszóma megfelelő helyén egyszerre fordulnak elő.

A röntgensugarakkal kiváltott mutációkkal kapcsolatos kísérletek azt a benyomást keltik, hogy minden konkrét „átmenetnek”, a normális egyedről egy speciális mutánsra, vagy megfordítva, megvan a maga „röntgensugár-tényezője”. Ez azt adja meg, hogy ha a szülőket az utódok létrehozása előtt egységnyi röntgensugárdózissal sugározzák be, a keletkezett utódok hány százaléka mutáns a kérdéses módon.

30. Az első törvény. A mutáció egyetlen esemény

A röntgensugárzás által kiváltott mutációs rátát megszabó törvények rendkívül egyszerűek és felvilágosító erejűek. A következőkben N. V. Tyimofjevnek a *Biological Reviews* 9. kötetében. 1934-ben megjelent cikkének gondolatmenetét követem. Ebben főleg a szerző saját szép kutatómunkájáról van szó. Az első törvény a következő:

(1) *A növekedés pontosan arányos a sugárdózissal, úgyhogy valóban beszélhetünk (ahogyan én tettem) növekedési tényezőről.*

Az egyszerű arányossághoz annyira hozzá vagyunk szokva, hogy hajlamosak vagyunk alábecsülni ennek az egyszerű törvénynek a messzeható következményeit. Hogy jobban megértsük ezeket, emlékeztetek arra, hogy valamely áru ára nem mindig arányos a mennyiségével. Normális időkben a boltvezetőt esetleg annyira elragadtatja, hogy hat narancsot vásároltunk tőle, hogy ha később úgy döntünk, hogy egy egész tucatot vásárolunk, ezért nem kéri a hat narancs árának kétszeresét. Áruhiány idején az ellenkező következhet be. A jelen esetben arra következtetünk, hogy a sugárdózis első fele, amely mondjuk minden ezredik utódban mutációt idéz elő, a többit egyáltalában nem befolyásolja, sem a mutáció szempontjából kedvező, sem kedvezőtlen irányban. Ellenkező esetben ugyanis a második féldózis nem idézne elő ismét minden ezredik utódban mutációt. A mutáció tehát nem főlhalmozódott hatás eredménye, amelyet sorozatos kicsiny, egymás hatását erősítő sugárzások hoznak létre. A besugárzás közben egy kromoszómában egyetlen eseménynek kell bekövetkeznie. Milyen eseménynek?

31. A második törvény. Az esemény lokalizációja

Erre a második törvény ad választ:

(2) *Ha a sugarak minőségét (hullámhosszát) tág határok között, a lágy röntgensugaraktól az egészen kemény gamma-sugarakig változtatjuk, a növekedési tényező állandó marad, amennyiben a dózist ún. r-egységekben adjuk meg.* Ez annyit jelent, hogy a dózist megfelelően választott szabványanyag egységnyi térfogatában azon idő alatt és azon a helyen képződött ionok teljes számával mérjük, ahol a szülők a besugárzás hatásának ki voltak téve.

Szabványanyagként a levegőt választották, nemcsak az egyszerűség kedvéért, hanem azért is, mert a szerves szövetek olyan elemekből állnak, amelyek átlagos atomsúlya egyezik a levegőével. Az ionizáció mennyiségére vagy hasonló folyamatok (gerjesztések) mértékére a szövetekben alsó korlátot¹⁴ egyszerűen úgy kapunk, hogy a levegőben bekövetkezett ionizációk számát megszorozzuk a két anyag sűrűségének arányával. Eléggé magától értetődő, s a kritikusabb vizsgálat is igazolja, hogy a mutációt előidéző egyetlen esemény éppen az ionizáció (vagy más

¹⁴ Alsó korlát azért, mert az egyéb folyamatok ionizációs módszerekkel nem mérhetők ugyan, de előidézhetnek mutációkat.

hasznos folyamat), amely a csírasejt valamely „kritikus” térfogatrészében következik be. Mekkora ez a kritikus térfogat? Nagysága az észlelt mutációs rátából az alábbi okoskodással becsülhető. Ha $50\,000\text{ ion/cm}^3$ nagyságú dózis 1 : 1000 arányban létesít csupán mutációt egy speciális ivarsejtben (amely a besugárzott körzetben van), ebből arra következtethetünk, hogy a kritikus térfogat, a „célterület”, amelyet az ionizációnak „el kell találnia”, hogy mutáció következzen be, mindössze $\frac{1}{1000}$ része az $\frac{1}{50000}$ köbcentiméternek, azaz egy-ötvenmilliomod köbcentiméter. A számértékek nem éppen pontosak, de csak szemléltetés céljára használjuk őket. A valódi becslést illetően M. Delbrücköt követjük, a Delbrück, N. W. Tyimofejev és K. G. Zimmer¹⁵ által írt cikk szerint, amely egyúttal a következő két fejezetben kifejtett elmélet fő forrásműve is. Szerinte a térfogat olyan kockáéval egyenlő, amelynek oldaléle tíz átlagos atomtávolság, azaz csupán $10^3 = 1000$ atomot tartalmaz. Ennek az eredménynek a legegyszerűbb értelmezése az, hogy a kérdéses mutáció képződésének meglehetősen nagy az esélye akkor, ha az ionizáció a kromoszóma egy konkrét pontjától körülbelül „10 atomnyinál” nem nagyobb távolságra következik be. Ezt rövidesen egy kissé részletesebben tárgyaljuk.

A Tyimofejev-cikk tartalmaz egy gyakorlati utalást, amelyet nem tudok magamban tartani, noha persze nincs kapcsolata jelen vizsgálódásunkkal. A mai életben az ember igen sokszor ki van téve a röntgensugarak hatásának. A közvetlen veszélyek, égések, a röntgensugárzástól eredő rák, természetlenség, jól ismeretesek. A védelemről ólomárnyékolással, ólomköténnyel stb. gondoskodnak. Különösen azoknak az ápolónőknek és orvosoknak a védelmét biztosítják, akiknek rendszeresen kell röntgenkezeléseket végezniük. A fontos az, hogy ha az egyéneket közvetlenül fenyegető veszélyt sikerül is elhárítani, még mindig fennáll az a közvetett veszély, hogy a csírasejtben kicsiny káros mutációk képződnek – olyasfajta mutációk, mint amelyekről a beltenyésztés kedvezőtlen eredményei kapcsán beszéltünk. Drasztikusan, noha talán kissé naivul kifejezve, az első unokatestvérek közti házasság ártalmasságát erősen növelheti az a tény, hogy a nagymama hosszú ideig röntgenlaboratóriumban dolgozott. Ez nem olyan dolog, ami miatt bárkinek is a maga személyében aggódnia kellene. De minden olyan lehetőség, amely alkalmas arra, hogy az emberiséget nem kívánatos lappangó mutációkkal fokozatosan megfertőzze, kell hogy érdekelje a közösséget.

¹⁵ *Nachr. a. d. Biologie d. Ges. d. Wiss. Göttingen*, 1. k. 189. o. 1935

IV. Fejezet

Kvantummechanikai bizonyítékok

*Und des Geistes höchster Feuerflug
Hat schon am Gleichnis, hat am Bild genug.*

GOETHE

32. Az állandóságot a klasszikus fizika képtelen megmagyarázni

A bámulatosan finom, röntgensugaras műszerekkel tehát (amelyek, mint a fizikusok tudják, harminc évvel ezelőtt lehetővé tették a kristályok atomszerkezetének részletes feltárását) a biológusoknak és fizikusoknak nemrégiben sikerült együttes erőfeszítéssel csökkenteni a mikroszkopikus szerkezet felső határát, amely szerkezet a felelős az egyed meghatározott makroszkopikus tulajdonságaiért – a „gén nagysága” az, amiről szó van –, s a felső határt jóval a 19. pontbeli becslés alá csökkentették. A statisztikus fizika szempontjából hogyan békíthető össze egymással az a két tény, hogy a génszerkezet látszólag csupán viszonylag kisszámú atomból áll (ezres nagyságrendben, vagy talán még kevesebb is), s hogy ennek ellenére rendkívül szabályos és törvényszerű tevékenységet fejt ki – mégpedig olyan állandósággal, amely a csodával határos.

Domborítsuk ki ismét részletesebben ezt a valóban meglepő helyzetet. A Habsburg-dinasztia több tagjának alsó ajka csúnyán eltorzult („Habsburg-ajak”). Öröklődését a Bécsi Császári Akadémia gondosan tanulmányozta, s az eredményelvet a család támogatásával, történelmi portrékkal együtt, közzétette. A tulajdonság a normális ajakforma valódi mendeli „alléljának” bizonyult. Ha figyelmünket a család egy 16. századi tagjának arcképére s 19. századi utódjának arcképére irányítjuk, teljes biztonsággal feltételezhetjük, hogy az abnormális tulajdonságért felelős génszerkezet nemzedékeken át hűen öröklődött a nem túlságosan nagy számú sejtosztódások mindegyike során. Sőt a felelős génszerkezetben szereplő atomok száma valószínűleg ugyanakkora nagyságrendű, mint a röntgensugarakkal vizsgált esetekben. A gén az egész idő alatt 98 F fok körüli hőmérsékletű volt. Hogyan érhető, hogy a hőmozgás rendezetlenségét előidéző tendenciája ellenére évszázadokon át változatlan maradt?

A fizikus a múlt század végén képtelen lett volna válaszolni erre a kérdésre, ha csak azoknak a természettörvényeknek az alapján vonta volna le következtetéseit, amelyeket meg tudott magyarázni, s valóban jól értett. A statisztikai helyzetre vonatkozó rövid gondolkodás után talán ezt válaszolta volna (helyesen, mint majd látjuk): ezek az anyagi szerkezetek csak molekulák lehetnek. Ezeknek az atomtársulásoknak a létezésére és néha igen nagy stabilitására vonatkozóan a kémia akkoriban már sok adatot összegyűjtött. A tudás azonban tisztán empirikus volt. A molekula természetét még nem értették meg – az atomok erős kölcsönös kötése, amely a molekula alakját megtartja, mindenki előtt tökéletes rejtély volt. A válasz tulajdonképpen helyes. De korlátozott értékű, ha a rejtélyes biológiai stabilitást csupán a szintén rejtélyes kémiai stabilitásra vezetik vissza. Az az érvelés, hogy külsőleg hasonló két tulajdonság ugyanazon az alapelven alapszik, mindaddig kétes, amíg maga az elv ismeretlen.

33. A kvantumelmélet képes a magyarázatra

A magyarázatot ebben az esetben a kvantumelmélet szolgáltatja. Jelen tudásunk szerint az öröklődés mechanizmusa szoros kapcsolatban áll a kvantumelmélettel, sőt mi több, azon alapszik. Az elméletet Max Planck fedezte föl 1900-ban. A modern genetika Mendel cikkének de Vries,

Correns és Tschermak által való újrafelfedezésétől (1900) és de Vriesnek a mutációkról írt cikkeitől (1901–1903) számítható. A két nagy elmélet fölfedezése majdnem egyidejűleg történt, s nem csoda, hogy mindkettőnek bizonyos érettségi fokot kellett elérnie, mielőtt a kapcsolatra fény derült volna. A kvantumelméletben negyedszázadnál hosszabb ideig tartott, amíg végül 1926–1927-ben a kémiai kötés általános kvantumelméleti alapelveit W. Heitler és F. London kidolgozta. A Heitler–London-elmélet a kvantumelmélet legfrissebb eredményeinek legszövevényesebb és legbonyolultabb fogalmait alkalmazza (neve „kvantummechanika”, illetve „hullámmechanika”). Az elmélet közlése matematikai eszközök nélkül szinte lehetetlen, vagy legalábbis még egy ilyen kis kötetet megtöltene. De szerencsére most már, hogy a munkát elvégezték, és az segített gondolataink tisztázásában, közvetlenebb módon is megérthető a kapcsolat a „kvantumugrások” és a mutációk között, hogy rögtön a legfeltűnőbbet válasszuk ki. Ennek tárgyalására térünk most rá.

34. Kvantumelmélet – diszkrét állapotok – kvantumugrások

A kvantumelmélet nagy meglepetése az volt, hogy a természet könyvében olyan dolgokkal kapcsolatban, amelyek tekintetében az addigi nézetek szerint a folytonosságon kívül minden más tökéletesen lehetetlennek látszott, diszkrét vonásokat fedeztek föl.

Az első ilyen dolog az energia volt. Makroszkopikus test folytonosan változtatja energiáját. A lengésbe hozott ingát például a levegő ellenállása fokozatosan lelassítja. Elég furcsa, de fel kell tételezni, hogy az atomi méretű rendszer másként viselkedik. Olyan okok alapján, amelyekre itt nem térhetünk ki, fel kell tételeznünk, hogy a kis rendszereknek belső természetüknél fogva csak, bizonyos diszkrét mennyiségű energia lehet a birtokában, az ún. sajátenergia-szint. Az átmenet egyik állapotból a másikba meglehetősen rejtelmes esemény, amelyet általában „kvantumugrásnak” neveznek.

De egy rendszernek nem az energia az egyetlen jellemzője. Vegyük példaként ismét az ingát, de gondoljunk, olyanra, amely többféle mozgást végezhet. Ilyen a mennyezetről függő kötélre kötött súlyos golyó. Ez lenghet észak-déli, kelet-nyugati vagy bármely más irányban, kör vagy ellipszis mentén. A golyót fűjtatóval finoman fűjva, folytonosan vihető át az egyik mozgásállapotból a másikba.

Kis rendszereknél az ilyen és hasonló jellemzők – a részletekre nem térhetünk ki – nem folytonosan változnak. „Kvantáltak”, akárcsak az energia.

Ennek az az eredménye, hogy ha egy csomó atommag, elektrontestőrségével együtt, egymás közelébe kerül, s „rendszert” alkot, belső természeténél fogva nem vehet föl bármely elképzelhető mértani konfigurációt. Természetüknél fogva csak igen nagy számú, de diszkrét „állapotok” sorozata közül választhatnak.¹⁶ Ezeket általában szinteknek vagy energiaszinteknek hívjuk, mert az energia a jellemző tulajdonságok lényeges része. De legyünk tudatában annak, hogy a teljes leírás sokkal többet tartalmaz, mint pusztán az energiát. Az állapot lényegileg úgy képzelhető el, mint amely minden részecske egy meghatározott konfigurációját jelenti.

Az átmenet egyik konfigurációból a másikba a kvantumugrás. Ha a második állapot energiája nagyobb („magasabb szintű”), a rendszerrel kívülről kell közölni legalább a két energiaszint különbségével egyezte mennyiségű energiát, hogy az átmenet lehetségessé váljék. Az átmenet az alacsonyabb szintre spontán bekövetkezhet, az energiátöbblet kisugárzódik.

¹⁶ Arra az álláspontra helyezkedem, amelyet általában a népszerű tudományos könyvekben kifejtene, s amely jelen célkitűzésünk szempontjából megfelelő. De olyan rossz a lelkiismeretem, mint annak, aki egy kényelemből elkövetett hibát örökössé tesz. Az igazság sokkal bonyolultabb, amennyiben a rendszer állapotára vonatkozó esetenkénti indeterminizmust is magában foglal.

35. Molekulák

Adott atomcsoport diszkrét állapotai között nem szükségszerű, de lehetséges egy legalacsonyabb szint, amikor az atommagok egymáshoz szoros közelségben helyezkednek el. Az ilyen állapotú atomok molekulát alkotnak. A hangsúlyozandó pont itt az, hogy a molekulának szükségszerűen bizonyos stabilitása van; a konfiguráció nem változhat meg mindaddig, amíg legalábbis a következő magasabb szintre való „emeléshez” szükséges energiakülönbséget kívülről meg nem kapja. Tehát a szintkülönbség, amely pontosan definiált mennyiség, szabja meg kvantitatíve a molekula stabilitási fokát. Látható, milyen bensőséges kapcsolatban áll ez a tény a kvantumelmélet alapjaival, azaz a szintek diszkrét voltával.

Kénytelen vagyok az olvasót arra kérni, hogy vegye ezeket az elgondolásokat a kémiai tények által teljesen igazoltak; s hogy sikeresen megmagyarázták segítségükkel a kémiai vegyértéket és a molekulaszervezet számos részletét, kötési energiáikat, stabilitásukat különböző hőmérsékleteken stb. A Heitler–London-elméletről beszélek, amelyet – mint mondtam – nem tárgyalhatok itt részletesen.

36. A molekulák stabilitása függ a hőmérséklettől

Meg kell elégednünk annak a pontnak a vizsgálatával, amely biológiai kérdésünk szempontjából döntő fontosságú, azaz a molekula különböző hőmérsékleteken való stabilitásának tanulmányozásával. Tegyük fel, hogy kezdetben atomrendszerünk a legkisebb energiájú állapotban van. A fizikus azt mondaná, hogy abszolút zérus fok hőmérsékletű molekuláról van szó. A legközelebbi magasabb állapotra, illetve szintre való emeléshez meghatározott mennyiségű energia közlésére van szükség. Az energiaközlés legegyszerűbb módja a molekula „felmelegítése”. Tegyük magasabb hőmérsékletű környezetbe („meleg fürdő”), ahol más rendszerek (atomok, molekulák) ütközhetnek belé. Figyelembe véve a hőmozgás teljes rendezetlenségét, nincs éles hőmérsékleti határ, amelyen a magasabb szintre való „emelkedés” biztonsággal és azonnal bekövetkezik. Ehelyett minden (az abszolút zérustól különböző) hőmérsékleten kisebb-nagyobb valószínűséggel bekövetkezhethet az emelkedés, s a valószínűség a meleg fürdő hőmérsékletének emelkedésével természetesen nő. A valószínűség kifejezésére a legjobb mód, ha azt az átlagos időt adjuk meg, ameddig az emelkedés bekövetkezésére várnunk kell. Ez az ún. „várakozási idő”.

Polányi és Wigner¹⁷ kutatásai szerint a „várakozási idő” erősen függ két energia hányadosától. Az egyik éppen az emelkedés létrehozásához szükséges energiakülönbség (jelöljük W betűvel), a másik a hőmozgás erősségére a kérdéses hőmérsékleten jellemző energia (jelöljük az abszolút hőmérsékletet T betűvel, ekkor kT a jellemző energia)¹⁸. Magától értetődik, hogy a magasabb szintre való emelkedés valószínűsége annál kisebb, s így a várakozási idő annál hosszabb, minél nagyobb az emelkedéshez szükséges energiának az átlagos hőenergiához való aránya, azaz a $W : kT$ arány. Meglepő, hogy a várakozási idő milyen nagy mértékben függ a $W : kT$ érték viszonylag kicsiny változásától. Íme egy példa (Delbrück nyomán). Ha W harmincszor akkora, mint kT , a várakozási idő mindössze 0,1 másodperc, de 16 hónapra emelkedik, ha W kT -nek 50-szerese, s 30 000 évre, ha W kT -nek 60-szorosa!

¹⁷ *Zeitschrift für Physik, Chemie (A), Haber-Band, 439. o. 1928*

¹⁸ k ismert szám, az ún. Boltzmann-féle állandó. $\frac{3}{2} kT$ a T hőmérsékletű gázatom átlagos mozgási energiája.

37. Matematikai köztétel

Matematikai nyelvezettel is rá lehet mutatni – olyan olvasók számára, akiket ez érdekel –, hogy mi az oka a szint-, illetve hőmérsékletváltozás iránti óriási érzékenységnek, s ezzel kapcsolatban néhány fizikai megjegyzést is tehetünk. Az ok az, hogy a várakozási idő, amelyet jelöljünk t betűvel, a W/kT hányadostól exponenciális függvény szerint függ, azaz:

$$t = \tau e^{W/kT}$$

τ kicsiny, 10^{-13} illetve 10^{-14} nagyságrendű állandó. Nos, ez a speciális exponenciális függvény nem esetleges jellegű. A hő statisztikus elméletében állandóan vissza-visszatér, annak mintegy a gerincét alkotja. Azt méri, mennyire valószínűtlen, hogy W mennyiségű energia a rendszer egy adott részében felhalmozódjék, s ez a valószínűtlenség nő olyan óriási mértékben, amikor a kT „átlagos energia” komoly sokszorosára van szükség.

Valójában a $W = 30kT$ (lásd a fentebb idézett példát) összefüggés már nagyon ritkán teljesül. Hogy nem vezet igen hosszú várakozási időre (példánkban mindössze 0,1 másodperc), az persze a τ tényező kicsinségének köszönhető. E tényezőnek fizikai jelentése van. Azoknak a rezgési periódusoknak a nagyságrendjét határozza meg, amelyek a rendszerben egész idő alatt végbemennek. A tényező, rendkívül általánosan felfogva, azt jelenti, hogy a kívánt mennyiségű W energia fölhalmozódásának lehetősége, noha nagyon kicsiny, „minden egyes rezgés alkalmával”, tehát másodpercenként körülbelül 10^{13} – 10^{14} -szer megismétlődik.

38. Első helyesbítés

A molekulák stabilitási elméletének fenti módon való közlésében hallgatólagosan feltételeztük, hogy a kvantumugrás, amelyet magasabb energiaszintre való „emelkedésnek” nevezünk, ugyanazon atomoknak, ha nem is a teljes bomlására, de legalábbis lényegileg különböző konfigurációjára – izomer molekulára – vezet, mondaná a kémikus. Az izomer molekula ugyanazokból az atomokból áll, mint az eredeti, de más elrendezésben (a biológiára való alkalmazásban ugyanazon a „helyen” – *locus* – egy különböző „allérról” van szó, a kvantumugrás pedig mutációval egyértelmű).

Hogy ez az értelmezés lehetségessé váljék, két helyesbítést kell tenni eddigi mesénkben, amelyet szándékosan leegyszerűsítettem, hogy mindenki megértse. Az eddig mondottakból azt lehetne hinni, hogy atomcsoportunk csak a legkisebb energiájú állapotban alkot molekulát, s a következő magasabb szint „valami mást” képvisel. Ez nincs így. A legalacsonyabb szintet valójában egész tömeg olyan szint követi, amelyek nem vonják maguk után a konfiguráció egészének megváltozását, csupán az atomok egymáshoz viszonyított kicsiny rezgéseinek felelnek meg, amelyekről a 37. szakaszban volt szó. Ezek is „kvantáltak”, de az egyes szintek között viszonylag kicsinyek a lépcsőfokok. A „melegfürdő” részecskéinek ütközése ezért meglehetősen alacsony hőmérsékleten is megindíthatja ezeket a rezgéseket. Ha a molekula hosszúkás szerkezetű, a rezgéseket nagy frekvenciájú hanghullámoknak tekinthetjük, amelyek anélkül haladnak át a molekulán, hogy kárt tennének benne.

Az első helyesbítés tehát nem nagyon komoly: az energiaszintek „rezgéses finomszerkezetét” figyelmen kívül hagyhatjuk. A „következő magasabb szint” kifejezésen azt a következő szintet kell érteni, amely a konfiguráció lényeges változásának felel meg.

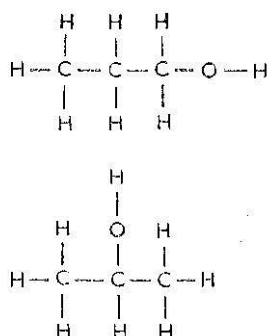
39. Második helyesbítés

A második helyesbítést sokkal nehezebb elmagyarázni, mert a lényegesen különböző szintek rendszerének bizonyos fontos, de elég bonyolult tulajdonságairól van szó. Két szint között az átmenet lehet egyéb tekintetben is akadályozott, nemcsak a szükséges energiatöbblet szempontjából; sőt még a magasabb szintről az alacsonyabb szintre való átmenet is lehet akadályozott.

Induljunk ki a tapasztalati tényekből. A kémikusok tudják, hogy ugyanaz az atomcsoport többféle módon is alkothat molekulát. Az ilyeneket izomer molekuláknak („ugyanazokból az alkatrészekből álló”; $\iota\sigma\sigma\varsigma$ = ugyanaz, $\mu\epsilon\rho\omicron\varsigma$ = rész) nevezzük. Az izomerizmus nem kivétel, hanem szabály. Minél nagyobb a molekula, annál több izomer változat lehetséges. A 11. ábra az egyik legegyszerűbb esetet, a kétféle propilalkoholt ábrázolja, amelyek mindketteje 3 szénatomot (C), 8 hidrogénatomot (H) és 1 oxigénatomot (O) tartalmaz.¹⁹ Az utóbbi bármely hidrogén- és a hozzá tartozó szénatom közé helyezhető, de csak az ábrán szemléltetett két eset szolgáltat különböző anyagokat. Valóban különbözők. Minden fizikai és kémiai állandójuk határozottan különböző. Energiák is különbözők, „különböző szinteket” képviselnek.

Érdekes dolog, hogy mindkét molekula tökéletesen stabilis, mindkettő úgy viselkedik, mintha „legalacsonyabb szint” volna. Az egyik állapotból a másikba spontán átmenet nincsen.

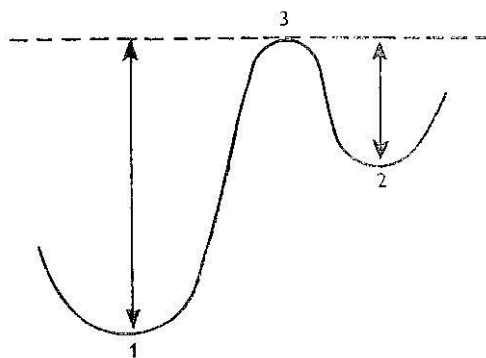
Az ok az, hogy a két konfiguráció nem szomszédos. Az átmenet egyikből a másikba csak közbenső konfigurációkon át lehetséges, amelyek energiája nagyobb, mint bármelyiküké. Durván mondva, az oxigént ki kell ragadni az egyik helyről, és be kell illeszteni a másik helyre. Ez tetemesen nagyobb energiájú konfigurációkba való átmenetek nélkül nem lehetséges. A helyzetet néha a 12. ábrával szemléltetik, ahol 1 és 2 a két izomert jelenti, 3 a „küszöb” köztük, a nyilak pedig azt az energiamennyiséget jelölik, amelyekre szükség van az 1-es állapotból a 2-esbe, illetve a 2-es állapotból az 1-esbe való átmenethez.



11. ábra. Propilalkohol két izomerje

Most már megadhatjuk „második helyesbítésünket”. Ez abban áll, hogy a biológiai alkalmazás során csak ezek az „izomer” átmenetek érdekelnek bennünket. Ezekre gondoltunk, amikor a 35–37. szakaszban elmagyaráztuk a „stabilitás” fogalmát. A „kvantumugrás”, amelyről szó volt, az átmenet az egyik viszonylag stabilis molekuláris állapotból a másikba. Az átmenethez szükséges energiatöbblet (a W -vel jelölt mennyiség) nem a valóságos szintkülönbség, hanem a kezdeti szinttől a küszöbig terjedő lépcsőfok (lásd a 12. ábra nyilait).

¹⁹ Az előadás során olyan modellt mutattam be, ahol a C-, H- és O- atomokat fekete, fehér és piros fagolyókkal jelöltem. Itt nem közlöm őket, mert a valódi molekulákhoz való hasonlóságuk nem sokkal nagyobb, mint a 11. ábráé.



12. ábra. Energiaküszöb: (3) az (1) és (2) izomerszintek között. A nyilak az átmenethez szükséges minimális energiamennyiséget jelölik

Az olyan állapotok, amelyeknél a kezdeti és végállapot között nincsen küszöb, teljesen érdektelenek, mégpedig nemcsak biológiai alkalmazásunkban. Valójában sem járulnak hozzá a molekula kémiai stabilitásához. Miért? Mert nincs tartós hatásuk, észrevétlenek maradnak. Bekövetkezésüket ugyanis szinte rögtön követi a kezdeti állapotba való visszatérés, mert ezt semmi sem akadályozza meg.

V. Fejezet

Delbrück modelljének ismertetése és vizsgálata

*Sane sicut lux seipsam et tenebras manifestat,
sic veritas norma sui et falsi est.*

Ahogy a fény nyilvánvalóvá teszi önmagát
és a sötétséget, úgy az igazság is mértéke
önmagának és a hamisnak.

SPINOZA *Ethica*. P. II. Prop. 43.

40. Az öröklődés anyagi tényezőinek általános képe

E tények alapján nagyon egyszerű választ kapunk kérdésünkre: képesek-e ezek a viszonylag kevés atomból álló struktúrák hosszú időn át ellenállni a hőmozgás zavaró hatásának, aminek az öröklődés anyaga állandóan ki van téve? Feltesszük, hogy a gének szerkezete azonos egy óriásmolekulával, amely csak nem folytonos változásokra képes, amik nem egyebek az atomok átrendeződésénél, s izomer molekulát eredményeznek.²⁰ Az átrendeződés esetleg a génnek csak egy kis részét érinti, s sokféle különböző elrendeződés lehetséges. Az energiaküszöböknek, amelyek a valóságos konfigurációt a többi lehetséges izomer konfigurációtól elválasztják, elég magasnak kell lenniük ahhoz (az atom átlagos hőenergiájához képest), hogy a változás ritka esemény legyen. Ezeket a ritka eseményeket a spontán mutációkkal azonosítjuk.

Fejezetünk további részeiben vizsgáljuk meg a gén és mutáció ezen általános képét (amely lényegében M. Delbrück német fizikustól származik), összehasonlítva részletesen a genetikai tényekkel. Mielőtt ehhez hozzákezdénénk, szeretnénk néhány megjegyzést tenni az elmélet megalapozásához és általános természetéhez.

41. A kép egyedülálló volta

Feltétlenül fontos volt-e a biológiai kép szempontjából a legmélyebb gyökerekig leásni és megkeresni a kvantummechanikai képet? Az a sejtés, hogy a gén valójában molekula, ma már – merem állítani – közhely. Kevés biológus akad, aki tagadja – akár ismeri a kvantumelméletet, akár nem. A 32. szakaszban azt a merészséget követtem el, hogy a kvantumelmélet előtti fizikus szájába adtam, mint az észlelt állandóság egyetlen ésszerű magyarázatát. Az ezt követő megfontolások az izomériára, a küszöbenergiára, a W/kT aránynak az izomer átmenetek valószínűségének meghatározásában játszott fontos szerepére vonatkozóan – mindezek tisztán empirikus, tapasztalati alapon is bevezethetők, a kvantumelmélet kifejezett igénybevétele nélkül. Miért ragaszkodtam olyan makacsul a kvantummechanikai nézőponthoz, holott nem tudtam valóban értelmesen kifejteni e könyvecskében, s ezzel esetleg sok olvasót fölöslegesen fárasztottam?

A kvantummechanika az első elmélet, amely a természetben előforduló minden atomcsoportosulásról az alapelvek segítségével ad számot. A Heitler–London-féle kötés az elmélet egyedülálló, különleges vonása, nem a vegyi kötés magyarázata céljából találták ki. Egészen magától adódik, igen érdekes és fejtörést okozó módon, egészen más megfontolások szinte ránk kényszerítik. Kiderült, hogy pontosan megfelel az észlelt kémiai tényeknek, s mint mondtam,

²⁰ A kényelem kedvéért továbbra is izomer átmenetnek nevezem, noha lehetetlen kizárni a környezettel való bármely csere lehetőségét.

egyedülálló a maga nemében, s elég jól értjük ahhoz, hogy ésszerű biztonsággal mondhassuk, „ilyen dolog nem történhet meg még egyszer” a kvantumelmélet további fejlődése folyamán.

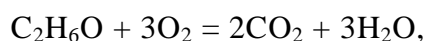
Ezért biztonsággal állíthatjuk, hogy az öröklődés anyagi hordozójára nincs más magyarázat, mint a molekuláris. Fizikai szempontból nincs más lehetőség arra, hogy számot adjunk állandóságáról. Ha a Delbrück-féle kép is csődöt mond, abba kell hagynunk a további próbálkozásokat. Ez az első megállapításom.

42. Néhány hagyományos tévképzet

De fölvethető a kérdés: az atomokból valóban nem képződhet más tartós struktúra, mint a molekulák? Vajon például az az arany pénzérme, amely kétezer évig egy sírba volt temetve, nem őrizte-e meg a rávert kép arcvonásait? Annyi biztos, hogy az érme óriási számú atomot tartalmaz, de ebben az esetben nem vagyunk hajlandók az alak pusztta megőrzését a nagy számok statisztikájának tulajdonítani. Ugyanez a megjegyzés tehető azokra a szépen fejlett kristályokra is, amelyeket kőzetbe ágyazva találnak, ahol több geológiai korszakot kellett tölteniök változás nélkül.

Így jutunk el a második ponthoz, amelyet szeretnék elmagyarázni. A molekula, a szilárd test, a kristály nem különbözik lényegében egymástól. Jelen tudásunk szerint valójában ugyanazok. Az iskolai oktatás sajnálatos módon megtart bizonyos hagyományos nézeteket, amelyek már sok éve elavultak, s megnehezítik az ügyek jelenlegi állásának megértését.

Valóban, amit az iskolában a molekulákról tanultunk, abból nem szűrtük le azt a következtetést, hogy közelebbi kapcsolatban állnak a szilárd, mint a folyékony vagy gáznemű halmazállapottal. Sőt, éppen ellenkezőleg, arra tanítottak, hogy gondosan különbséget tegyünk a fizikai változások, így az olvadás és párolgás között, amikor a molekulák változatlanok maradnak (úgyhogy például az alkohol, akár szilárd, cseppfolyós vagy légnemű halmazállapotú, mindig ugyanazokból a C_2H_6O képletű molekulákból áll), és a kémiai változások között, amilyen például az alkohol égése:



ahol az alkoholmolekula és a három oxigénmolekula átrendeződve két szén-dioxid- és három vízmolekulát alkot.

A kristályokról azt tanultuk, hogy háromszorosan periodikus rácsot alkotnak, amelynek szerkezetében az egyes molekulák néha felismerhetők, mint például az alkohol és a legtöbb szerves molekula esetében, más kristályokban viszont, például a kősókristályban (NaCl), a NaCl-molekulák nem definiálhatók egyértelműen, mert minden Na-atomot szimmetrikusan hat Cl-atom vesz körül, és fordítva, úgyhogy eléggé önkényes, hogy mely párokat tekintünk molekuláknak, amennyiben egyáltalában ragaszkodunk ehhez.

Végül azt is tanultuk, hogy a szilárd testek lehetnek kristályosak vagy nem, s az utóbbi esetben amorfoknak nevezzük őket.

43. Az anyag különböző „állapotai”

Nos, nem mennék olyan messzire, hogy mindezek az állítások és megkülönböztetések egészen tévesek. Gyakorlati szempontból néha hasznosak. De az anyag igazi szerkezete tekintetében a határokat egészen másképpen kell megvonni. Az alapvető különbség az alábbi két „egyenlet”-sor között áll fenn:

molekula — szilárd test = kristály
gáz = folyadék = amorf.

Ezeket az állításokat röviden el kell magyaráznunk. Az ún. amorf szilárd testek valójában vagy nem amorfak, vagy nem szilárdak. Az „amorf” faszénrostokban röntgensugarakkal kimutatták a grafitkristály csökevényes szerkezetét. A faszén tehát szilárd test, de egyúttal kristály is. Ahol nem találunk kristályszerkezetet, a kérdéses anyagot igen nagy „viszkozitású” (belső súrlódású) folyadéknak kell tekintenünk. Az ilyen anyagnál a pontosan definiált olvadáspont és a rejtett olvadáshő hiánya bizonyítja, hogy nincs igazi szilárd testtel dolgunk. Melegítéskor fokozatosan meglágyul és esetleg diszkontinuitás nélkül olvad meg. (Emlékszem, hogy az első világháború végén Bécsben aszfaltszerű anyagot kaptunk a kávé pótlására. Olyan kemény volt, hogy vésővel vagy baltával kellett a kis téglát darabokra hasogatni, s a hasadási felület sima, kagylószerű volt. De ha időt hagytak neki, folyadékként viselkedett, szorosan kitöltve annak az edénynek az alsó részét, amelyben oktanul két napig benne hagyták.)

A gáznemű és cseppfolyós halmazállapot folytonossága jól ismert tény. A gáz diszkontinuitás nélkül cseppfolyósítható az ún. kritikus pont „körül”. Erre azonban itt nem térünk ki.

44. A valóban fontos különbség

A fentiekben mindent indokoltunk, kivéve a legfontosabbat, azt tudniillik, hogy a molekulát szilárdtest-kristálynak óhajtjuk tekinteni.

Ennek az az oka, hogy a molekulát alkotó atomokat, legyen a számuk akár kevés, akár sok, ugyanolyan természetű erők tartják össze, mint azt a sok atomot, amelyek az igazi szilárd testeket, a kristályokat alkotják. A molekula szerkezete ugyanolyan szilárd, mint a kristályé. Emlékeztetünk arra, hogy éppen ezt a szilárdságot használtuk föl a gének állandóságának magyarázatául!

Az anyagszerkezetben az a valóban fontos különbség, hogy az atomokat a „megszilárdító” Heitler–London-féle erők tartják-e össze, vagy sem. A szilárd testekben és molekulákban ezek adják az összetartó erőt. Egyszerű atomokból álló gázokban (például higanygőzben) nincsenek ilyen erők. Molekulákból álló gázokban mindössze az egyes molekulákon belül atomok kötődnek így.

45. Az aperiodikus szilárd testek

Egyetlen kis molekula „szilárdtest-csírának” nevezhető. Kis szilárdtest-csírából kiindulva két különböző mód van, ahogyan egyre nagyobb társulások felépülhetnek. Az egyik az a viszonylag unalmas mód, hogy ugyanaz a struktúra három irányban állandóan ismétlődik. Ezt az utat követi a növekvő kristály. A periodicitás kialakulása után a felhalmozódás nagyságának nincs meghatározott korlátja. A másik mód egyre nagyobb társulás felépülése az unalmas ismétlődés nélkül. Ez az egyre bonyolultabb szerves molekulák esete, amelyekben minden atomnak, minden atomcsoportnak egyedi, a többiekével nem egyező szerepe van (nem úgy, mint a periodikus struktúrákban). Az ilyen anyagot egészen helyesen aperiodikus kristálynak vagy szilárdtestnek nevezhetjük, s hipotézisünket az alábbi módon fogalmazhatjuk meg: szerintünk a gének aperiodikus szilárd testek, sőt talán az egész kromoszómaszál²¹ is az.

²¹ A hajlékonyság nem akadály; vékony rézhuzal is hajlékony.

46. A miniatűr kódban kifejezhető tartalmak sokfélesége

Gyakran fölvetették a kérdést, hogy egy apró anyagdarabka, a megtermékenyített petesejt magja hogyan tartalmazhat olyan bonyolult kódolt szöveget, amely a szervezet egész jövőbeni fejlődését magában foglalja? Az atomok jól rendezett társulása, amely eléggé ellenálló ahhoz, hogy rendezettségét állandóan megtartsa, az egyetlen elképzelhető anyagi struktúra, amely nagyszámú lehetséges („izomer”) elrendezésre nyújt alkalmat, s elég nagy ahhoz, hogy a „determinációk” bonyolult rendszerét kis térfogatban egyesítse. Az atomok számának a struktúrában nem is kell nagyon nagyoknak lenni ahhoz, hogy szinte korlátlan számú elrendezés legyen lehetséges. Ennek érzékeltetésül gondoljunk a Morse-kódra. Két különböző jelet, a pontot és a vonást használva, négyenél nem több tagot tartalmazó rendezett csoportokban harminc a különböző lehetőségek száma. Ha a ponton és vonáson kívül egy harmadik jelet is bevezetnénk, s tíznél nem nagyobb tagszámú csoportokat használnánk, ezzel 88 572 különböző „betűt” tudnánk képezni. Öt jellel és 25 tagú csoportokkal a lehetőségek száma 372 529 029 846 191 405 volna.

Ellenvetésül föl lehetne hozni, hogy a hasonlat sántít, mert a Morse-jelek összetétele különböző (például . – – és . . –), tehát az izomériára nem jó a hasonlat. A hiányosság kiküszöbölésére tekintsük a harmadik példából csak azokat a kombinációkat, amelyek pontosan 25 jelet tartalmaznak, s mind az öt jeltípusból pontosan öt van bennük (5 pont, 5 vonás stb.). Durva közelítő számítással ezek száma 62 330 000 000 000, ahol a jobb oldali zérusok azokat a számokat pótolják, amelyeket már nem volt kedvem kiszámítani.

A jelen esetben persze az atomcsoportoknak nem „minden” elrendezése jelent egy lehetséges molekulát; sőt nincs is szó önkényesen kiválasztható kódról, mert a kódszövegnek magának kell annak az operatív tényezőnek lennie, amely létrehozza a fejlődést. Másrészt viszont a példában választott szám (25) még mindig nagyon kicsiny, s csak az egy vonalba való egyszerű elrendezéseket vettük tekintetbe. Csak azt szeretnénk szemléltetni, hogy a gének molekuláris képének birtokában többé nem elképzelhetetlen, hogy a miniatűr kód pontosan leírjon egy nagyon komplikált, megadott fejlődési tervet, s tartalmazza az annak működésbe hozásához szükséges eszközöket is.

47. Összehasonlítás a tényekkel: stabilitási fok; a mutációk diszkontinuitása

Végezetül hasonlítsuk össze az elméleti képet a biológiai tényekkel. Az első kérdés nyilvánvalóan az, vajon tényleg képes-e számot adni az észlelt nagyfokú állandóságról. Vajon a szükséges nagyságú küszöbértékek – az átlagos kT hőenergia nagy többszörösei – ésszerűek-e, a közönséges kémiában ismert értékhatárokon belül maradnak-e? Ez a kérdés triviális; táblázatok vizsgálata nélkül is igenlő válasz adható rá. Bármely anyagnak a molekulái, amelyeket a kémikus adott hőmérsékleten elkülöníteni képes, a kérdéses hőmérsékleten legalább néhány perc élettartamúak kell legyenek. (Ezt az értéket elég szerényen választottuk, az élettartam rendszerint sokkal nagyobb.) A küszöbértékek tehát, amelyeket a kémikus tapasztal, szükségszerűen éppen olyan nagyságrendűek, mint amelyekre szükség van ahhoz, hogy a gyakorlatban bármely fokú állandóságról számot tudjunk adni, amellyel a biológus találkozhat. Emlékeztetünk arra, hogy a 36. szakasz szerint körülbelül 1 : 2 arányban változó küszöbértékek elegendők ahhoz, hogy az élettartamok a másodperc törtrészétől több tízezer évig változzanak.

De említsünk meg néhány számértéket, amelyekre később majd hivatkozunk. A 36. szakaszban példaként említett W/kT arányok, azaz a

$$\frac{W}{kT} = 30, 50, 60$$

értékek az alábbi élettartamokat eredményezték: 0,1 másodperc, 16 hónap, 30 000 év,

s ezeknek szobahőmérsékleten az alábbi küszöbértékek felelőnek meg: 0,9; 1,5; 1,8 elektronvolt.

Meg kell magyaráznunk az „elektronvolt” egység jelentését, amely a fizikusok számára nagyon kényelmes, mert szemléletesen elképzelhető. Például a harmadik számérték (1,8) annyit jelent, hogy körülbelül 2 voltnyi feszültséggel felgyorsított elektron éppen annyi energiát szerez, hogy ütközéssel képes az átmenetet kiváltani. (Összehasonlításként megemlíthetjük, hogy a közönséges zseblámpa elem feszültsége 3 volt.)

Ezek a megfontolások elképzelhetővé teszik, hogy a molekulánk valamely részében végbemenő izomériás konfigurációváltás, amelyet a rezgési energia véletlen ingadozása idéz elő, eléggé ritka esemény ahhoz, hogy spontán mutációként lehessen értelmezni. Így a kvantummechanika legalapvetőbb elveivel adunk számot a mutációkkal kapcsolatos legmeglepőbb tényről, ami legelőször vontta magára de Vries figyelmét, tudniillik arról, hogy „ugrásszerű” változásról van szó, közbenső formák nincsenek.

48. A természetesen kiválasztott gének stabilitása

Miután felfedezték, hogy az ionizáló sugárzások bármely fajtája növeli a természetes mutációs rátát, arra lehetne gondolni, hogy a természetes ráta a talaj radioaktivitásának és a kozmikus sugárzásnak a következménye. De a röntgensugaras kísérletek eredményeivel való kvantitatív összehasonlítás azt mutatja, hogy a „természetes sugárzás” igen gyönge, s a természetes rátának csupán egy kis törtrészeről képes számot adni.

Ha elfogadjuk, hogy a ritkán bekövetkező természetes mutációkat a hőmozgás véletlen ingadozásainak a számlájára kell írni, úgy nem szabad nagyon csodálkoznunk azon, hogy a természetnek sikerült olyan ügyesen megválasztani a küszöbértékeket, hogy a mutációk ritkák váljanak. Az előzőekben ugyanis arra a következtetésre jutottunk, hogy a gyakori mutációk károsak az evolúcióra. Az olyan egyedeknek, amelyek mutáció következtében nem kellő stabilitású génkonfigurációra tesznek szert, nem sok esélyük van arra, hogy „ultraradikális”, gyorsan mutáló utódjaik sokáig fennmaradjanak. A faj megszabadul tőlük, s természetes kiválasztódással a stabilis géneket gyűjti össze.

49. A mutánsok néha kisebb stabilitása

De persze a szaporítási kísérletek során előforduló és az utódok tanulmányozására kiválasztott mutánsok esetében nincs ok arra a várakozásra, hogy mindegyikük nagy fokban stabilis lesz. Ezek ugyanis még nincsenek „kipróbálva” – vagy ha igen, úgy a vad szaporodásban „visszautasítást” szenvedtek, -, talán a túlságosan nagyfokú mutációs képesség miatt. Mindenesetre nem meglepő, hogy e mutánsok egyike-másika valóban sokkal inkább hajlamos a mutációra, mint a normális „vad” gének.

50. A hőmérséklet az instabilis génekre kisebb hatású, mint a stabilisakra

Ez lehetővé teszi a mutációs hajlamra vonatkozó képletünk ellenőrzését. A képlet a következő volt:

$$t = \tau e^{W/kT}$$

(Emlékeztetünk arra, hogy t olyan mutáció várakozási ideje, amelynek küszöbenergiája W .) Fölvetjük a következő kérdést: hogyan változik t a hőmérséklettel? Az előző képlet alapján jó közelítéssel meghatározható a $T+10$ hőmérséklethez és a T hőmérséklethez tartozó t értéknek a hányadosa:

$$\frac{t_{T+10}}{t_T} = e^{-10W/kT}.$$

Mínt hogy a kitevő negatív, a hányados értéke természetesen kisebb 1-nél. A várakozási idő csökken, a mutációra való hajlam nő a hőmérséklet emelkedésével. Ez ellenőrizhető, és a *Drosophila* ecetmuslicánál a rovarok által elviselt hőmérsékleti tartományban ellenőrizték is. Az eredmény első pillantásra meglepő volt. A vad gének kicsiny mutációs hajlama határozottan nőtt, de a már mutált gének egyik-másikánál előforduló nagy mutációs hajlam nem, vagy legalábbis sokkal kevésbé nőtt. Két képletünket összehasonlítva éppen ezt várhatjuk. W/kT nagy értékeinél, amelyek első képletünk szerint szükségesek, hogy t értéke nagy legyen (stabilis gén), a második képlet kicsiny hányadost eredményez, vagyis a mutációs hajlam a hőmérséklettel tetemesen nő. A hányados valóságos értéke alighanem $\frac{1}{2}$ és $\frac{1}{5}$ között van. Reciprok értéke 2,5, s a közönséges kémiaiában van't Hoff-tényezőnek nevezik.

51. Hogyan idéznek elő mutációkat a röntgensugarak

A röntgensugarakkal előidézett mutációs rátára térve a szaporítási kísérletekből már két következtetést vontunk le. Az első (a mutációs ráta és a dózis arányossága alapján) az, hogy a mutációt egyetlen esemény idézi elő; a második következtetés szerint (a kvantitatív eredmények és azon tény alapján, hogy a mutációs rátát az összionizációs sűrűség határozza meg, és független a hullámhossztól) ennek az egyetlen eseménynek ionizációnak vagy hasonló folyamatnak kell lennie, amelynek olyan kocka térfogatán belül kell végbemennie, amelynek élhosszúsága mindössze 10 atomtávolság, csak ekkor idézhet elő meghatározott mutációt. Elképzelésünk szerint a küszöb legyőzéséhez szükséges energiát nyilvánvalóan ezen robbanásszerű folyamatnak, az ionizációnak vagy gerjesztésnek kell szolgáltatnia. Azért nevezem robbanásszerűnek, mert az egy ionizáció során elfogyasztott energia (az energiát tulajdonképpen nem maga a röntgensugár, hanem a képződött szekunder elektronok szolgáltatják) jól ismeretes, s viszonylag óriási, 30 elektronvolt. Ez annak a pontnak a környékén, ahol az energia felszabadul, óriási mértékben megnöveli a hőmozgást, s onnan „hőhullám” formájában, azaz az atomok intenzív rezgése alakjában terjed tovább. Hogy a hőmozgás átlagos tíz atomtávolságnyi „hatótávolságon” belül képes szolgáltatni a szükséges 1 vagy 2 elektronvoltnyi küszöbenergiát, nem elképzelhetetlen, noha lehetséges, hogy egy elfogulatlan fizikus valamivel kisebb hatótávolságot feltételezne. A robbanás hatása sok esetben nem szabályos izomer átalakulás, hanem a kromoszóma megsérülése. A sérülés halálossá válik akkor, ha

leleményes módon végzett keresztezésekkel a pár meg nem sérült tagját (a második sorozat megfelelő kromoszómáját) eltávolítják, s olyan taggal helyettesítik, amelynek megfelelő génjéről ismeretes, hogy beteg – viszont éppen ez várható, s pontosan ezt is észlelik.

52. A röntgensugarak hatékonysága nem függ a spontán mutációképességtől

Egész sor további vonás, ha nem is jelezhető előre, de könnyen magyarázható a fenti kép alapján. Például az instabilis mutánsok röntgensugarak okozta mutációs rátája átlagosan nem sokkal nagyobb, mint a stabilisaké. Nos, 30 elektronvolt energiát szolgáltató robbanás esetén nem várható, hogy nagy különbséget jelent a szükséges küszöbenergia kisebb vagy nagyobb volta, mondjuk 1 elektronvolt és 1,3 elektronvolt mellett.

53. Reverzibilis mutációk

Az átmenetet több esetben mindkét irányban tanulmányozták, mondjuk egy bizonyos „vad” gén átalakulása egy speciális mutánssá s e mutáns[^]visszaalakulása a vad génné. Ilyen esetekben a természetes mutációs ráta a két irányban néha ugyanaz, néha nagyon különböző. Ez első pillantásra rejtélyesnek látszik, mert a legyőzendő küszöb a két esetben azonosnak tűnik. Ez persze nincs így, mert a küszöböt a kezdeti konfigurációtól kell mérni, s a vad és a mutált génre különböző lehet. (Lásd a 12. ábrát, ahol „1” a vad allélt, „2” a mutánst jelentheti, amelynek kisebb stabilitását a rövidebb nyíl jelzi.)

Egészében az a véleményem, hogy Delbrück „modellje” a vizsgálatot jól kiállja, s a továbbiakban való használata indokolt.

VI. Fejezet

Rend, rendezetlenség és entrópia

*Nec corpus mentem ad cogitandum nec mens
corpus ad motum, neque ad quietem nec ad
aliquid (si quid est) aliquid determinare potest.*

Sem a test nem determinálhatja a lelket
gondolkodásra, sem a lélek a testet mozgásra
vagy nyugalomra, sem semmi másra.

SPINOZA. *Ethica*. P. III. Prop. 2.

54. Érdekes általános következtetés a modellből

Térjünk vissza a 46. szakasz utolsó mondatára, amelyben azt magyarázgattam, „hogy a gének molekuláris képének birtokában többé nem elképzelhetetlen, hogy a miniatűr kód pontosan leírjon egy nagyon komplikált, megadott fejlődési tervet, s tartalmazza az annak működésbe hozásához szükséges eszközöket is”. Jó, jó, de hogyan teszi ezt? Az „elképzelhetőség” hogyan válik valódi megértéssé?

Delbrück molekuláris modellje a maga teljes általánosságában nem tartalmaz semmi célzást abban a tekintetben, hogyan működik az öröklődés anyagi hordozója. Nem is számolok azzal, hogy a fizika a közeljövőben részletes felvilágosításokkal tud e tekintetben szolgálni. A haladás élén jelenleg – és biztos vagyok benne, hogy a jövőben is – a biokémia jár, a fiziológia és a genetika irányításával.

Az olyan általános struktúraírásból, amilyent föntebb adtunk, a genetikai mechanizmus működéséről részletes felvilágosításokat nem kaphatunk. Ez nyilvánvaló. De furcsa módon egy általános következtetés levonható belőle, s bevallom, könyvem megírásának ez volt az egyetlen indítéka.

Delbrücknek az öröklődés anyagi hordozójára vonatkozó általános képéből következik, hogy az élő anyagra, noha nem siklik ki a máig feltárt „fizikai törvények” alól, valószínűleg eddig ismeretlen, „más fizikai törvények” érvényesek, amelyek, ha sikerül őket egyszer feltárni, éppen olyan lényeges részét alkotják majd a fizikának, mint a régebbiek.

55. A renden alapuló rend

Ez elég kényes gondolatmenet, s több szempontból félreérthető. Hátralevő oldalainkon végig ennek tisztázásával foglalkozunk. Előzetes közelítő, de nem teljesen hibás bepillantást az alábbi meggondolások alapján kaphatunk:

Az I. fejezetben elmagyaráztuk, hogy a fizikai törvények ma ismeretes alakjukban statisztikus törvények.²² Nagyrészt azzal kapcsolatos ez, hogy a dolgokban megvan a természetes tendencia a rendezetlenségbe való átmenetre.

De hogy az öröklődés anyagi hordozójának időállósága és kicsiny mérete közti ellentmondást feloldjuk, a rendezetlenségre való készséget „a molekula feltalálásával” kellett kivédenünk, mégpedig szokatlanul nagy molekulával, a differenciált rendezettség e mesterművével, amely a kvantummechanika varázspálcájának oltalma alatt áll. A „találmány” nem módosítja a véletlen

²² Talán vitatható, hogy ez „a fizika törvényeiről” általánosságban elmondható. A kérdést tovább tárgyaljuk a VII. fejezetben.

törvényeit, csupán kimenetelüket változtatja meg. A fizikusok jól ismerik azt a tényt, hogy a kvantumelmélet, főleg alacsony hőmérsékleten, módosítja a fizika törvényeit. Erre számos példa van. Az egyik különösen feltűnő példa éppen maga az élet. Az élet az, anyag rendezett és törvényszerű viselkedése, amely nem kizárólag a rendből a rendezetlenségbe való átmenet készségén, hanem részben a meglévő rend fenntartásán alapszik.

Remélem, hogy a fizikusok számára – de csak az ő számukra – világosabbá tehetem nézeteimet az alábbi fejtegetésekkel. Az élő szervezet makroszkopikus rendszer, amelynek viselkedése hasonlít ahhoz a tisztán mechanikai (a termodinamikaival ellentétben) viselkedéshez, amelyhez minden rendszer tart, ha a hőmérséklet közeledik az abszolút zérusponthoz, s a molekuláris rendezetlenség megszűnik.

A nem fizikusok nehezen hiszik el, hogy a fizika közönséges törvényei, amelyeket a sérthetetlen precizitás prototípusainak tartanak, az anyag rendezetlenségbe való átmenete készségén alapulnak. Példákat az I. fejezetben közöltem. Az ezekben rejlő általános alapelv a termodinamika híres második törvénye és ennek szintén híres statisztikai megalapozása. Az 56–60. szakaszokban megkísérlem megmagyarázni az entrópiaelv hatását élő szervezet makroszkopikus viselkedésére – egyelőre elfeledkezve mindarról, amit kromoszómákról, öröklődésről stb. tudunk.

56. Az élő anyag elkerüli az egyensúly felé való hanyatlást

Mi az élet jellemző vonása? Mikor mondjuk az anyag egy darabkájáról, hogy él? Ha „csinál valamit”, mozog, anyagcsere-kapcsolatban áll a környezetével stb., s hogy mindezt sokkal hosszabb időn át „teszi”, mint ahogyan az élettelen anyagtól hasonló körülmények között elvárnánk. Ha élettelen rendszert elszigetelünk vagy egyenletes környezetbe teszünk, rendszerint igen hamar megszűnik minden mozgás a különböző súrlódások eredményeképpen; az elektromos, illetve kémiai potenciálkülönbségek kiegyenlítődnek, a vegyületekké átalakulni képes anyagok átalakulnak, a hőmérséklet a hővezetés következtében egyenletessé válik. Ezután az egész rendszer halott és semleges anyagtömörületté válik. A fizikusok ezt az állapotot termodinamikai egyensúlynak, illetve „maximális entrópiájú” állapotnak nevezik.

Az anyag ezt az állapotot gyakorlatilag általában nagyon gyorsan éri el. Elméletileg nagyon sokszor ez még nem abszolút egyensúly, még nem igazi entrópiamaximum. De ilyenkor az egyensúlyhoz való végleges közeledés igen lassú. Eltarthat órákig, évekig, évszázadokig... íme egy példa – olyan példa, amikor a közeledés még elég gyors. Töltsünk meg egy poharat tiszta vízzel, egy másikat cukros vízzel, s tegyük a két poharat légmentesen lezárt, állandó hőmérsékletű tartályba szorosan egymás mellé. Eleinte úgy tűnik, hogy semmi sem történik, tökéletes az egyensúly. De körülbelül egy nap múlva azt észleljük, hogy a tiszta víz nagyobb gőznyomása következtében lassan elpárolog, és az oldatba lecsapódik. Az utóbbi túlcsoportul. A cukor a rendelkezésre álló cseppfolyós víz egészében csak azután oszlik el egyenletesen, miután a tiszta víz teljesen elpárolgott.

Az egyensúlyhoz való végső, lassú közeledés sohasem téveszthető össze az élettellel, s itt figyelmen kívül hagyjuk. Csupán azért említettem, hogy mentesüljek a pontatlanság vádjától.

57. Az élő anyag „negatív entrópiával” táplálkozik

Az élő szervezet azért olyan rejtélyes, mert elkerüli a semleges „egyensúlyi” állapotba való gyors hanyatlást. Ez annyira igaz, hogy az emberi gondolkodás kezdetétől fogva azt állította, hogy

különleges nem fizikai, illetve természetfölötti erő (*vis viva*, entelechia, életerő) működik a szervezetben. Egyesek még ma is kitartanak emellett.

Hogyan kerüli el az élő szervezet az egyensúlyba hanyatlást? A nyilvánvaló válasz: táplálkozással, ivással, lélegzéssel és (a növények esetében) asszimilációval. Szaknyelven anyagcseréről (metabolizmus) beszélünk. Az eredeti görög kifejezés (*μεταβάλλειν*) cserét, kicserélést jelent. Minek a cseréjét? Az eredeti elgondolás kétségtelenül anyagok cseréjét jelenti; a metabolizmus szó német megfelelője például *Stoffwechsel* (magyarul anyagcsere – *ford.*). Hogy anyagok cseréje legyen a lényeges, az abszurd dolog. Bármely nitrogén-, oxigén-, kén- stb. atom ugyanolyan jó, mint bármelyik más azonos fajtájú atom. Mire volna jó a cseréjük? A múltban azzal csillapították egy ideig a kíváncsiságunkat, hogy energiával táplálkozunk. Egyes élen járó országokban (már nem emlékszem, hogy Németországban vagy az Egyesült Államokban, esetleg mindkettőben) az éttermek étlapjain az árakon kívül az egyes ételek energiatartalmát is feltüntették. Talán mondanunk sem kell, hogy ezt betű szerint érteni szintén abszurd dolog. A felnőtt szervezet energiatartalma ugyanolyan állandó, mint az anyagtartalma. Minthogy nyilván az egyik kalória egyenértékű a másikkal, nem világos, hogy a pusztán csere mi előnnyel járhat.

Mi tehát az az értékes valami, amelyet a haláltól megóvó táplálékunk tartalmaz? Erre könnyű a válasz. Minden folyamat, esemény, történés – nevezük bárminek –, egyszóval minden, ami a természetben történik, a világ azon része entrópiájának növekedését jelenti, ahol a történés végbemegy. Az élő szervezet tehát állandóan növeli entrópiáját – azt mondhatnánk, hogy pozitív entrópiát termel s ezáltal közeledik a maximális entrópia veszélyes állapotához, azaz a halálhoz. Ettől csak úgy szabadulhat meg, vagyis maradhat életben, ha környezetétől állandóan negatív entrópiát von el – ami egyébként igen pozitív dolog, mint mindjárt látjuk majd. Az élő szervezetek valójában negatív entrópiával táplálkoznak. Vagy hogy kevésbé ellentmondásosan fejezzük ki magunkat, az anyagcserében az a lényeges, hogy a szervezet ezzel szabadul meg mindattól az entrópiától, amelyet életében kényszerűen termel.

58. Mi az entrópia ?

Mi az entrópia? Először is hangsúlyozni szeretném, hogy nem ködös fogalomról vagy elgondolásról, hanem ugyanolyan mérhető fizikai mennyiségről van szó, mint egy rúdnak a hossza, test bármely pontjának a hőmérséklete, adott kristály olvadáshője vagy bármely adott test fajhője. Az abszolút zérus fok hőmérsékleten (durván -273 C fok) minden anyag entrópiája zérus. Ha a kérdéses anyagot lassú, megfordítható kicsiny lépésekben bármely más állapotba visszük (még ha az anyag ezáltal meg is változtatja fizikai vagy kémiai állapotát, vagy különböző fizikai, illetve kémiai természetű két, esetleg több részre bomlik), az entrópia olyan mennyiséggel nő, amelynek nagysága úgy számítható ki, ha a kérdéses folyamat során a testnek szolgáltatott kis hőmennyiségeket osztjuk azzal az abszolút hőmérséklettel, amelyen a hőátadás történt, s az így kapott kis tagokat összegezzük. Példaként megemlítjük, hogy ha egy szilárd testet megolvasztunk, az entrópia az olvadáshő és az olvadáspont hányadosával nő. Ebből látható, hogy az entrópia mértékegysége a *kalória / °C* (mint ahogyan a kalória a hőmennyiség egysége, illetve a centiméter a hosszúság egysége).

59. Az entrópia statisztikai jelentése

A szakmai definíciót csupán azért említettem, hogy az entrópiáról föllebbentsem a ködös titokzatosság fátylát, amellyel gyakran övezik. Számunkra sokkal fontosabb a rend és

rendezetlenség statisztikai fogalmával való összefüggése. Ezt a kapcsolatot Boltzmann és Gibbs statisztikus-fizikai tanulmányai tárták föl. Ez az összefüggés szintén egzakt matematikai képletbe foglalható:

$$\text{entrópia} = k \cdot \log D,$$

ahol k az ún. Boltzmann-féle állandó ($= 3,2983 \cdot 10^{-24}$ kal/°C), D pedig a kérdéses test atomi rendezetlenségének kvantitatív mértéke. E D mennyiség szakkifejezések nélküli rövid magyarázása szinte a lehetetlenséggel határos. Az a rendezetlenség, amelynek a mértékét kifejezi, részben a hőmozgástól ered, részben attól, hogy a különböző fajta atomok, illetve molekulák véletlenszerűen összekeverednek, ahelyett hogy szépen elválnának egymástól, mint a fenti példában a cukor- és vízmolekulák. Boltzmann képletét ez a példa jól szemlélteti. A cukornak az összes vízben való fokozatos „szétszóródása” növeli a rendezetlenség D mértékét, s egyúttal (minthogy D logaritmus D -vel együtt nő) az entrópiát is. Az is egészen világos, hogy minden hőátadás növeli a hőmozgást, vagy is növeli D értékét, s ezzel együtt az entrópiát. Ez különösen akkor világos, ha megolvastunk egy kristályt, mert ezáltal az atomok, illetve molekulák szép és állandó rendjét tönkretesszük, s a kristályrácsból állandóan változó véletlen- szerű eloszlást hozunk létre.

Elszigetelt rendszer vagy egyenletes környezetben levő rendszer (amelyet a jelen gondolatmenet szempontjából leghelyesebb, ha a vizsgált rendszer részének tekintünk) entrópiája nő, s többé-kevésbé gyorsan közeledik a maximális entrópiájú semleges állapothoz. Most már felismerhető, hogy a fizika ezen alaptörvénye nem más, mint a dolgok természetes készsége a kaotikus állapothoz való közeledésre – ugyanilyen „törekvés” tapasztalható egy könyvtár könyveinél vagy az íróasztalon fölhalmozódó cikkeknel és kéziratoknál, hacsak mi meg nem akadályozzuk ezt, ebben az esetben azzal a tevékenységünkkel, hogy a kérdéses dolgokat időnként visszatesszük a helyükre.

60. A szervezethez fenntartása a környezetből „rend” elvonásával

Hogyan fejezhetnénk ki a statisztikus elmélet segítségével a szervezetnek azt a csodálatos képességét, amellyel késlelteti a termodinamikai egyensúly (halál) felé való haladást? Az imént ezt mondtuk: a szervezet negatív entrópiával táplálkozik, azaz negatív entrópiaáramot vonz magához, ezzel kompenzálja azt az entrópiánövekedést, amelyet élete következtében termel. Így tartja fenn saját állandó, meglehetősen alacsony entrópiaszintjét.

Ha D a rendezetlenség mértéke, úgy reciproka, $1/D$ a rendezettség mértékének tekinthető. Minthogy $1/D$ logaritmus D logaritmusának (-1) -szeresével egyenlő, a Boltzmann-egyenlet így is írható:

$$-(\text{entrópia}) = k \cdot \log (1/D).$$

Az ügyetlen „negatív entrópia” kifejezés tehát jobbal pótolható: a negatív előjellel vett entrópia a rendezettség mértéke. Az a módszer tehát, ahogyan a szervezet állandóan kellően magas rendezettségi szinten tartja magát (=kellően alacsony entrópiaszint), lényegében abból áll, hogy környezetétől állandóan rendezettséget von el. Ez a következtetés kevésbé ellentmondásos, mint első pillantásra látszik. Inkább trivialitással vádolhatnánk. Valójában a magasabb rendű állatok esetében jól ismeretes az általuk fogyasztásra kerülő rendezettség, azaz többé-kevésbé bonyolult szerves vegyületek rendkívül jól szervezett állapotú anyaga, amely táplálékul szolgál számunkra. Fölhasználás után jóval rendezetlenebb, de mégsem teljesen rendezetlen formában adják ezeket az

anyagokat vissza, mert azt a növények táplálékként még föl tudják használni. (A növények leghathatósabb „negatív entrópia”-forrása természetesen a napfény.)

Jegyzet a VI. fejezethez

A *negatív entrópiára* vonatkozó megjegyzéseket fizikus kollégáim kétkedéssel fogadták. Hadd mondjam meg először, hogy ha csak nekik írtam volna, ehelyett inkább a *szabad energiáról* beszéltem volna. A jelen összefüggésben ez az ismertebb fogalom. Ez a szigorú szakkifejezés azonban nyelvileg túl közel áll az *energiához*, úgyhogy az átlagos olvasó nehezen érti meg a két dolog közti különbséget. Valószínű, hogy a *szabad jelzőt* komolyabb jelentőség nélküli *epitheton ornamnak* (díszítő jelző – *ford.*) tekinti, holott a fogalom a valóságban eléggé bonyolult, s a Boltzmann-féle rendezetlenségi elvvel való kapcsolat kevésbé könnyen követhető nyomon, mint az entrópiánál és a „negatív előjellel vett entrópiánál”, ami egyébként nem az én felfedezésem. Pontosán arról a dologról van szó, amelyen Boltzmann eredeti okfejtése alapult.

F. Simon azonban nagyon helyesen mutatott rá arra, hogy egyszerű termodinamikai megfontolásaimmal nem lehet számot adni arról, hogy miért kell „többé-kevésbé bonyolult szerves vegyületek rendkívül jól szervezett állapotú” anyagával táplálkoznunk például faszén vagy gyémántpép helyett. De a nem szakember számára el kell magyaráznom, hogy egy darab el nem égett szén vagy gyémánt, az égéshez szükséges oxigénmennyiséggel együtt, a fizikusok szerinti értelemben szintén rendkívül jól rendezett állapotú. Erről az tanúskodik, hogy a szén égési reakciójának bekövetkezésekor nagy mennyiségű hő képződik. A hőnek a környezetbe való leadásával a rendszer megszabadul a reakció előidézte igen tetemes entrópiainövekedéstől, s olyan végállapotba kerül, amelyben entrópiája durva közelítéssel ugyanakkora, mint kezdetben.

De nem táplálkozhatunk a reakció termékével, a széndioxiddal. Így Simonnak tökéletesen igaza van, amikor hangsúlyozza, hogy valójában táplálékunk energiataralma a *lényeges*, úgyhogy csipkelődésem azokkal az étlapokkal kapcsolatosan, amelyek ezt feltüntetik, nem volt helyénvaló. Energiára van szükségünk nemcsak testi erőfeszítéseink energiájának, hanem a környezetnek állandóan leadott hőnek pótlására is. S hogy hőt adunk le, nem véletlen, hanem lényeges dolog. Éppen ezáltal szabadulunk meg attól az entrópiafölöslegtől, amelyet fizikai életfolyamataink állandóan termelnek.

Ez arra mutat, hogy a meleg vér állatok magasabb hőmérséklete azzal az előnnyel jár, hogy az entrópiától gyorsabb ütemben képesek megszabadulni, úgyhogy intenzívebb életfolyamatokra képesek. Nem tudom, mennyi az igazság ebben az érvben (amely tőlem származik, nem Simontól). Ellenérvként fölhozható, hogy másrészt viszont sok meleg vérű állatot bunda vagy toll *véd* a gyors hő veszteség ellen. Ezért a testhőmérséklet és az „életintenzitás” közti párhuzamosságot, amelyben hiszek, közvetlenebb úton kell igazolni van't Hoff törvényével, amelyet az 50. szakasz végén említettem. A magasabb hőmérséklet önmagában meggyorsítja az étellel kapcsolatos vegyi reakciókat. (Hogy ez valóban így van, azt a környezet hőmérsékletét felvevő fajoknál kísérletileg igazolták.)

VII. Fejezet

A fizika törvényein alapszik-e az élet?

Si un hombre nunca se contdice, sera porque nunca dice nada.

Ha egy ember sohasem mond ellent önmagának,
annak az az oka, hogy valójában sohasem mond semmit.

MIGUEL DE UNAMUNO (beszélgetésből idézve)

61. *A szervezetben várható új törvények*

A jelen utolsó fejezetben röviden kifejezve azt szeretném tisztázni, hogy mindannak alapján, amit az élő anyag szerkezetéről megtudtunk, arra kell számítanunk, hogy működése nem vezethető vissza a közönséges fizikai törvényekre. Mégpedig nem azért, mert tétezik valami „új erő”, amely az egyes atomok viselkedését az élő szervezeten belül irányítja, hanem azért, mert az élő test konstrukciója egészen más, mint amit fizikai laboratóriumban valaha is megvizsgáltunk. Durva hasonlattal élve, az a mérnök, aki csak a hőerőgépeket ismeri, egy elektromotor konstrukciójának meg szemlélése után el van készülve arra, hogy az olyan elvek szerint működik, amelyeket ő nem ért. A rezet, amelyet itt tekercekké formált, hosszú huzalok alakjában használnak, a kazánokból ismeri, a vasat, amely a rézhuzaltekercsek belsejét kitölti, emelőkarok, rudak és gőzhengerek alakjában látta. Arról meg van győződve, hogy ez ugyanaz a réz és ugyanaz a vas, mint amelyet ő is ismer, és ugyanazon természettörvényeknek engedelmeskedik. Ebben igaza is van. A konstrukció különbözősége mégis elég ahhoz, hogy föl legyen készülve az egészen eltérő működésmódra. Nem gyanakszik arra, hogy a villamos motorokat szellem hajtja, azért mert egy kapcsoló zárására kezdenek el forogni, kazán és gőz nélkül.

62. *A biológiai helyzet áttekintése*

A szervezetek életjelenségeinek magyarázata bámulatos szabályosságot és rendezettséget tár fel, aminek az élettelen anyagban nincsen párja. Az irányítást rendkívül jól rendezett atomcsoport végzi, amely minden sejtben az atomok összességének csupán egy kis hányadát képviseli. Sőt annak a véleménynek az alapján, amelyet a mutáció mechanizmusáról alkottunk, arra következtetünk, hogy a csírasejt „vezérlő atomcsoportján” belül mindössze néhány atomnak az eltávolítása elég ahhoz, hogy pontosan definiálható változást hozzon létre a szervezet makroszkopikus öröklődési jellemzőiben.

E tények nyilvánvalóan a legfontosabbak közé tartoznak, amelyeket a tudomány napjainkban feltárt. Hajlandók vagyunk őket nem egészen elfogadhatatlanoknak tekinteni. Az élő szervezet bámulatos adománya, hogy képes a „rendezettség áramlását” önmagára koncentrálni, s így megmenekülni az atomi káoszba való hanyatlástól – azzal, hogy a megfelelő környezetből „rendezettséget iszik” –, valószínűleg az „aperiodikus szilárd testek”, a kromoszómamolekulák jelenlétének a következménye. Ezek kétségtelenül a legmagasabb rendezettségi fokú atomtársulást jelentik, amelyet ismerünk – a rendezettség sokkal nagyobb, mint a periodikus kristályban –, mert itt minden atom és minden gyök egyedi szerepet játszik.

Röviden összefoglalva, azt tapasztaljuk, hogy a meglévő rendnek megvan az a képessége, hogy fenntartsa önmagát, s rendezett eseményeket hozzon létre. Ez elég magától értetődőnek hangzik, noha abban, hogy magától értetődőnek találjuk, kétségtelenül társadalmi szervezetekre és

ilyen szervezetek tevékenységével kapcsolatos egyéb eseményekre vonatkozó tapasztalatainkra támaszkodunk. Ez mintha a hibás körrel (*circulus vitiosus*) volna egyértelmű.

63. A fizikai helyzet összefoglalása

Akárhogy legyen is a dolog, ismételten hangsúlyozni kell, hogy a fizikusok számára a helyzet távolról sem magától értetődő, sőt rendkívül izgalmas, mert példa nélkül álló. Az általános hiedelemmel ellentétben az események szabályos lefolyása, amelyeket a fizikai törvények irányítanak, sohasem jól rendezett atomi konfiguráció következménye – hacsak a konfiguráció nem ismétlődik nagyon sokszor, mint a periodikus kristályokban vagy nagy számú azonos molekulákból álló gázban, illetve folyadékban.

Még akkor is, ha a vegyész kémcsövében nagyon bonyolult molekulával dolgozik, mindig nagy számú azonos molekulával van dolga. Ezekre érvényesek a kémia törvényei. Meg lehet például mondani, hogy egy bizonyos reakció megindulása után a molekulák fele már reakcióba lépett, újabb perc múlva háromnegyed részük. De hogy egy kiválasztott molekula, feltéve, hogy egyáltalában követni tudnánk, a reakciót szenvedettek között vagy a még érintetlenek között lesz-e, nem lehet előre megmondani. Ez tökéletesen a véletlen dolga.

Ez nem tisztán elméleti sejtés. Nem áll, hogy egyetlen kis atomcsoport, sőt egyetlen atom sem észlelhető sohasem. Esetenként igenis észlelhető. De amikor észlelhető, teljes szabálytalanságot észlelünk, az együttműködés csak átlagban idéz elő szabályosságot. Az I. fejezetben tárgyaltunk ilyen példát. Folyadékban lebegő kis részecskék Brown-féle mozgása teljesen szabálytalan. Ha azonban sok a hasonló részecskék száma, szabálytalan mozgásuk a szabályos diffúzió jelenségét idézi elő.

Egyetlen radioaktív atom bomlása már észlelhető (olyan lövedéket bocsát ki, amely fluoreszkáló ernyőn látható felvillanást vált ki). Ha azonban adva van egyetlen radioaktív atom, annak valószínű élettartama sokkal kevésbé biztos, mint egy egészséges verébé. Valóban csak ennyit mondhatunk róla: amíg csak megmarad (ez lehetett akár több ezer év is) annak a valószínűsége, hogy a következő másodpercben elbomlik, lehet a valószínűség kicsiny, akár nagy, mindig ugyanakkora. Az egyedi határozottságnak ez a nyilvánvaló hiánya mégis az ugyanazon fajtájú radioaktív atomok egzakt exponenciális csökkenési törvényére vezet.

64. A meglepő ellentét

A biológiában egészen más helyzettel állunk szemben. Mindössze egy példányban létező atomcsoport rendezett, egymással és a környezettel csodálatosan összehangolt, igen szövevényes törvények szerinti eseményeket idéz elő. Egyetlen példányt mondtam, mert lényegében a pete és az egysejtű szervezet példájáról van szó. A magasabb rendű szervezetekben a példányok száma persze no. De mekkora mértékben? A szám felnőtt emlősállatokban 10^{14} körül van. Ez semmi! Egy köbhüvelyknyi levegőben levő molekulák számának ez mindössze az egymilliomod része. Noha együttesen elég nagy a térfogatuk, eggyé olvadva mégis csupán kis folyadékcseppet alkotnának. És hogyan oszlanak el! Minden sejtbe pontosan egy jut belőlük (illetve kettő, ha emlékszünk a diploidiára). Ismerve azt a hatalmat, amelyet e kis központi hivatal az elszigetelt sejtben gyakorol, vajon nem hasonlítanak a testben szétszórta helyi kormányzati szervekhez, amelyek közös kódjuk következtében igen könnyen tudnak egymással érintkezni?

Nos, a leírás fantasztikus, talán kevésbé illik tudóshoz, mint költőhöz. De nincs szükség költői képzeletre, csupán világos és józan tudományos gondolkodásra annak a felismeréséhez, hogy itt

nyilvánvalóan olyan eseményekkel van dolgunk, amelyek szabályos és törvényszerű lefolyását egészen más „mechanizmus” kormányozza, mint a fizika „valószínűségi mechanizmusa”. Ugyanis egyszerű tapasztalati tény, hogy a vezérelvet minden sejtben egyetlen atomtársulás képviseli, amely csak egyetlen (néha két) példányban létezik; s az is tapasztalati tény, hogy olyan eseményeket idéz elő, amelyek a rendezettség eszményképei. Akár meglepőnek, akár magától értetődőnek tartjuk, hogy egy kicsiny, de jól szervezett atomcsoport képes ilyen módon hatni, a helyzet egyedülálló, az élő anyagon kívül mindenhol másutt ismeretlen. Az élettelen anyagokat vizsgáló fizikusok és kémikusok sohasem tapasztaltak olyan jelenségeket, amelyeket így kellett volna értelmezniök. Ilyen eset nem volt még, s ezért elméletünk nem érvényes rá – a mi szép statisztikus elméletünk, amelyre jogosan annyira büszkék voltunk, mert lehetővé tette számunkra, hogy bepillantunk a függöny mögé, észrevegyük az atomi és molekuláris rendezetlenségből adódó egzakt fizikai törvények pompás rendjét; mert kiderült, hogy a legfontosabb, a legáltalánosabb, mindent magában foglaló entrópiánövekedési törvény külön, *ad hoc* feltételezés nélkül megérthető, hiszen nem egyéb, mint a molekuláris rendezetlenség kifejezője.

65. Két mód rendezettség előállítására

Az élet kibontakozásában tapasztalt rendezettség más forrásból ered. Úgy tűnik, hogy két különböző „mechanizmus” létezik, amelyek segítségével rendezett események idézhetők elő: a „statisztikus mechanizmus”, amely a „rendezetlenségből állít elő rendet”, és az új mechanizmus, amely „rendből állít elő rendet”. Az elfogulatlan értelem számára a második elv sokkal egyszerűbbnek, sokkal magától értetődőbbnek látszik. Kétségtelenül az is. Ez az oka, amiért a fizikusok olyan büszkék voltak, hogy rábukkantak a másik, a „rendezetlenségből rendet” alapelve, amelyet a természet valóban követ, s egyedül képes megmagyarázni a természeti események fő vonalait, elsősorban irreverzibilitásukat (meg nem fordíthatóság – *ford.*). De nem várhatjuk, hogy az ebből levezetett „fizikai törvények” elegendőek ahhoz, hogy közvetlenül megmagyarázzák az élő anyag viselkedését, amelynek leginkább feltűnő vonásai a „rend a rendből” elven alapulnak. Nem várható, hogy két egészen különböző mechanizmus ugyanarra a törvénytípusra vezessen – mint ahogy nem várható, hogy lakáskulcsunk a szomszéd zárját is nyissa.

Nem szabad tehát, hogy elbátortalanítson bennünket az életnek a közönséges fizikai törvényekkel való megmagyarázhatatlansága. Az élő anyag szerkezetéről szerzett tudásunk alapján ugyanis éppen ez várható. Számolnunk kell azzal, hogy újfajta fizikai törvények uralkodnak benne. Vagy talán nemfizikai, fizika fölötti törvényeknek kellene hívunk őket?

66. Az új elv nem idegen a fizika számára

Nem. Ezt nem hiszem. Az új elv ugyanis valóságos fizikai elv: véleményem szerint nem más, mint ismét a kvantumelmélet elve. Ennek a magyarázatában kénytelen leszek hosszadalmas lenni, beleértve az előbbiekben tett feltételezés egy finomítását, hogy ne mondjam módosítását, tudniillik, hogy minden fizikai törvény a statisztikán alapszik.

Ez a többször lerögzített feltételezés kényszerűen ellentmondásra vezet. Vannak ugyanis jelenségek, amelyek szem betűnő sajátságai nyilvánvalóan a „rend a rendből” elven alapulnak, s semmi közük sincsen a statisztikához, illetve a molekuláris rendezetlenséghez.

A Naprendszer és a bolygók mozgásának a rendje szinte beláthatatlan ideig fennmarad. A jelen pillanatbeli konstelláció közvetlenül összefügg a piramisok korának tetszés szerinti pillapatabeli konstellációjával; az egyikből következtetni lehet a másikra. A történeti időkben

végbement fogvatkozások időpontját kiszámították, s azok egyeztek a történeti feljegyzésekkel, illetve egyes esetekben éppen a számítások alapján helyesbítették az addig elfogadott időrendet. Ezekben a számításokban semmi szerepe sincsen a statisztikának, egyes-egyedül Newton természetes tömegvonzási törvényén alapulnak.

Egy jó óra vagy bármely más szerkezet szabályos mozgásának sincs semmi köze a statisztikához. Röviden, minden tisztán mechanikai esemény látszólag a „rend a rendből” elvet követi. A „mechanikai” kifejezést itt tág értelemben kell vennünk. Ismeretes, hogy villamos erőművekből eredő impulzusok szabályos átvitelével igen jó órák tarthatók üzemben.

Emlékszem Max Plancknak egy érdekes kis cikkére „A törvény dinamikus és statisztikus típusa” („Dynamische und Statistische Gesetzmässigkeiten”). Ez a megkülönböztetés pontosan ugyanazt jelenti, amit mi a „rend a rendből” és a „rend a rendezetlenségből” szavakkal fejeztünk ki. A cikk tárgya az volt, hogy a makroszkopikus eseményeket irányító statisztikus törvény hogyan alkotható meg a mikroszkopikus eseményeket, az egyes atomokat és molekulák közti kölcsönhatásokat kormányzó, feltételezett „dinamikus” törvényekből. Az utóbbi típusra példák a makroszkopikus mechanikai jelenségek, így a bolygó vagy az óra mozgása stb.

Úgy tűnik tehát, hogy az „új elv”, a rend a rendből elv, amelyre nagy ünnepélyességgel mint az élet megértésének valódi kulcsára hivatkoztam, egyáltalában nem új a fizikában. Sőt Planck állásfoglalása következtében övé az elsőbbség. Arra a nevetségesnek ható következtetésre jutottunk, hogy az élet megértésének a kulcsa az, hogy tiszta mechanizmuson, a Planck-féle értelemben vett „óraművön” alapszik. A következtetés nem nevetséges, s véleményem szerint nem is teljesen hibát; de „alaposan megsózva” kell fogyasztani.

67. Az óra mozgása

Elemezzük pontosan az igazi óra mozgását. Szó sincs tisztán mechanikai jelenségről. Tisztán mechanikai órához nem volna szükség sem rugóra, sem felhúzásra. Mozgásba hozva örökké járna. A rugó nélküli óra az inga néhány lengése után megáll, mechanikai energiája hővé válik. Rendkívül bonyolult atomi folyamatról van szó. Az az általános kép, amelyet a fizikus alkot róla magának, arra készíti, hogy a fordított folyamat lehetőségét ne zárja ki teljesen: a rugó nélküli óra saját fogaskerekei és a környezet hőenergiájának rovására hirtelen mozgásba jöhet. A fizikusnak erre ezt kellene mondania : az óra kivételesen erős Brown-féle mozgást végez. Az I. fejezetben (9. szakasz) láttuk, hogy nagyon érzékeny torziós mérlegnél (elektrométer vagy galvanométer) ez állandóan megtörténik. Az óra esetében ez persze rendkívül valószínűtlen.

Hogy az óra mozgását a törvényszerűség szerint lefolyó események dinamikus vagy statisztikus típusához soroljuk-e (Planck kifejezéseit használva), állásfoglalásunktól függ. Ha dinamikus jelenségnek nevezzük, akkor figyelmünket a szabályos járásra fordítjuk, amely viszonylag gyenge, a hőmozgás kicsiny zavarait legyőző rugóval biztosítható, úgyhogy e zavarok figyelmen kívül hagyhatók. Ha azonban emlékezünk arra, hogy rugó nélkül az óra súrlódás következtében fokozatosan lassuló járású, akkor rájövünk, hogy a folyamat csak statisztikus jelenségként érthető meg.

Bármilyen jelentéktelenek gyakorlati szempontból az órában a súrlódási és hőhatások, nem lehet kétség afelől, hogy a második állásfoglalás, amely nem hanyagolja el ezeket, az alapvetőbb még akkor is, ha rugóval meghajtott óra szabályos járásáról van szó. Nem szabad ugyanis azt hinnünk, hogy a meghajtó mechanizmus valóban kiküszöböli a folyamat statisztikus jellegét. A valódi fizikai kép tartalmazza azt a lehetőséget is, hogy még a szabályosan járó óra mozgása is egyszerűen csak megfordulhat, s felhúzza a saját rugóját – a környezet hőjének rovására. Ez az esemény

mindössze „egy kissé kevésbé valószínű”, mint egy meghajtó szerkezet nélküli óra „Brown-mozgásáé”.

68. Az óraszerkezet mégis statisztikus viselkedésű

Tekintsük át újból a helyzetet. Az „egyszerű” eset, amelyet vizsgáltunk, sok mást is képvisel – tulajdonképpen mindazokat, amelyek látszólag kisiklanak a molekuláris statisztika mindent magában foglaló elve alól. A valódi fizikai anyagból készült (vagyis nem elképzelt) óraművek nem igazi „óraművek”. A véletlen elem szerepe csökkenthető, annak a valószínűsége, hogy az óra hirtelen rosszul járjon, szinte elenyésző lehet, de a háttérben állandóan fennmarad. Az irreverzibilis súrlódási és hőhatások még az égitestek mozgásából sem hiányoznak. A Föld forgását például az árapálysúrlódás lassítja, s ennek megfelelően a Hold fokozatosan távolodik a Földtől, ami nem következne be, ha a Föld teljesen merev, forgó gömb volna.

Ennek ellenére fennáll az a tény, hogy a „fizikai óraszerkezetek” igen feltűnő „rend a rendből” vonásokat mutatnak – olyanfajta tulajdonságokat, amelyek izgalomba hozták a fizikusokat, amikor az élő szervezetben találkoztak velük. Valószínű, hogy a két esetben vannak közös vonások. Még tisztázásra vár, hogy ezek mik, s hogy mi az a meglepő különbség, ami az élő szervezet esetét mégis újjá és előzmények nélkülivé teszi.

69. Nernst tétele

Fizikai rendszer – bármely atomtársulás – mikor viselkedik „dinamikus törvényszerűségeket” szerint (plancki értelemben), azaz „óraműként”? A kvantumelmélet igen röviden válaszol erre a kérdésre: az abszolút zérus hőmérsékleten. A zérus hőmérséklethez való közeledéskor a molekuláris rendezetlenségnek a fizikai eseményekkel való minden kapcsolata megszűnik. Ezt a tényt egyébként nem elméletileg fedezték föl, hanem a kémiai reakciókat széles hőmérsékleti sávban megvizsgálták, s az eredményeket zérus hőmérsékletre – amely valójában nem érhető el – extrapolálták. Ez Walter Nernst híres „hőtétele”, amelyet gyakran, nem is indokolatlanul, „a termodinamika harmadik főtétele” büszke elnevezéssel emlegetnek (az első az energiatétel, a második az entrópiatétel).

A kvantumelmélet ésszerű alapot ad Nernst empirikus törvényének, s lehetővé teszi annak megbecsülését, milyen szorosan kell megközelítenie a rendszernek az abszolút zéruspontot ahhoz, hogy közel „dinamikus” módon viselkedjék. Adott esetben mekkora hőmérséklet tekinthető az abszolút zérusai ponttal egyenértékűnek?

Nem szabad azt hinnünk, hogy ez mindig nagyon alacsony hőmérséklet kell hogy legyen. Nernst felfedezését éppen az a tény idézte elő, hogy az entrópia már szobahőmérsékleten is meglepően jelentéktelen szerepet játszik számos kémiai reakcióban. (Emlékeztetek arra, hogy az entrópia, illetve logaritmusai a molekuláris rendezetlenség közvetlen mértéke.)

70. Az ingaóra virtuálisan zérus hőmérsékletű

Mi a helyzet az ingaórával? Ingaóra esetében a szobahőmérséklet gyakorlatilag egyenértékű a zérus abszolút hőmérséklettel. Ez az oka, hogy „dinamikus” működik. Ha lehűtjük, változatlanul működik tovább (feltéve, hogy minden olajnyomot eltávolítottunk belőle!). Ha azonban szobahőmérséklet fölé hevítjük, nem működik változatlanul tovább, mert esetleg megolvad.

71. Összefüggés az óraszerkezet és az élő szervezet között

Ez nagyon magától értetődőnek látszik, de azt hiszem, a döntő pontról van szó. Az óraszerkezetek azért képesek „dinamikusan” működni, mert olyan szilárd testekből állnak, amelyek alakját a London–Heitler-féle erők szabják meg, s ezek elég erősek ahhoz, hogy a hőmozgás rendezetlenségére irányuló tevékenységét szobahőmérsékleten megakadályozzák.

Ezután szerintem már csak kevés szóra van szükség az óraszerkezetek és az élő szervezetek közti hasonlóság kifejtésére. Egyszerűen csupán arról van szó, hogy az utóbbi is olyan szilárd testen alapszik – az öröklődés anyagát hordozó aperiodikus kristályon –, amelynek rendezetlen hőmozgása eresen akadályozott. De kérem, ne vádoljanak engem azzal, hogy a kromoszómákat „a szerves gép fogaskerekeinek” neveztem – legalábbis anélkül, hogy megemlítenék azokat a mély fizikai elméleteket, amelyeken a hasonlat alapszik.

Ugyanis még kevesebb szónoklatra van szükség ahhoz, hogy emlékeztessünk a kettő közti alapvető különbségre, s indokoljuk a biológiai esetben alkalmazott új és előzmények nélküli jelzőket.

A legszembeütőbb különbségek: először a fogaskerekek furcsa eloszlása a több sejtű szervezetekben, amelyre vonatkozóan a 64. szakasz kissé költői leírására hivatkozom; másodsor, a fogaskerekek nem durva emberi készítmények, hanem a legfinomabb mesterművek, amelyek valaha az Úr kvantummechanikája szerint készültek.

Utószó

A determinizmusról és a szabad akaratról

Jutalmul a fáradságért, amellyel igyekeztem a dolgok tisztán i adományos oldalát *sine ira et studio* (elfogultság nélkül – *ford.*) kifejtteni, azt kérem, hogy a filozófiai következményekkel kapcsolatos, szükségszerűen szubjektív véleményemet elmondhassam.

A könyvemben felhozott bizonyítékok szerint az élőlények testében az értelmi tevékenységnek, a tudatnak és egyéb tevékenységnek megfelelő térbeli és időbeli események (figyelembe véve összetett szerkezetüket és az általánosságban elfogadott fizikai-kémiai statisztikai magyarázatot), ha nem is szigorúan determinisztikusak, de legalábbis statisztikus-determinisztikusak. A fizikusok számára azt szeretném hangsúlyozni, hogy ellentétben másokkal, az én véleményem szerint a *kvantumelméleti határozatlanság* nem játszik bennük fontos szerepet, kivéve talán azt, hogy hangsúlyozottabbá teszi tisztán véletlenszerű jellegüket az olyan eseményekben, mint a számcsökkentő osztódás, a természetes és röntgensugarakkal kiváltott mutációk stb. – ez pedig minden esetben nyilvánvaló és ismeretes.

A vitaindítás kedvéért hadd tekintsem ezt ténynek, mint ahogy hitem szerint minden elfogulatlan biológus is annak tekintené, ha nem lenne az a jól ismert, kellemetlen érzés, hogy „tisztá gépezetnek nyilvánítjuk saját magunkat”. Azt hiszik ugyanis, hogy ellentétben áll a közvetlen önmegfigyelés által igazolt szabad akarat.

De a közvetlen tapasztalatok önmagukban, bármilyen sokfélék és eltérők legyenek is, logikailag nem mondhatnak ellent egymásnak. Lássuk tehát, nem lehet-e helyes, ellentmondásmentes következtetést levonni az alábbi két premisszából:

(I) Testem a természettörvényeknek megfelelően tiszta mechanizmusként működik.

(II) De megcáfolhatatlan közvetlen tapasztalat, hogy mozgását, amelynek hatásait előre látom, s ezek lehetnek végzetesek és rendkívül fontosak, amely esetben érzem és vállalom értük a teljes felelősséget, én magam irányítom.

E két tényből szerintem az az egyetlen lehetséges következtetés, hogy én – a szó legtágabb értelmében véve, azaz minden tudatos értelem, amely valaha kimondotta vagy érezte az „én”-t – magam szabályozom az „atomok mozgását” a természet törvényei szerint.

Olyan kultúrákban (*Kulturkreis*), amelyekben bizonyos fogalmak (amelyeknek régebben vagy ma is más népeknél tágabb jelentésük van) jelentése beszűkült vagy speciálissá vált, merész dolog volna ezt a következtetést azokba az egyszerű szavakba önteni, amelyet megkíván. Keresztény terminológiában kifejezve: „Tehát én vagyok a mindenható isten”, ez istenkáromlásnak, s egyúttal örültségnek is hangzik. De tekintsünk el pillanatnyilag az ilyen mellékértelmektől, s gondoljuk meg jól, vajon a fenti következtetés nem a legközelebbi-e, amelyet a biológus kaphat, hogy vele istent és a halhatatlanságot egy csapással bizonyítsa.

Önmagában véve ez a megérzés nem új. Legrégebbi feljegyzései tudomásom szerint 2500 évnél is idősebbek. A hindu gondolkodásban a korai nagy védák idejétől kezdve az ATHMAN = BRAHMAN (a személyes én egyenlő a mindenütt jelenlevő, mindent magában foglaló örök énnel) felismerést távolról sem tekintették istenkáromlásnak, hanem ez jelentette a világ történéseibe való legmélyebb bepillantás lényegét. A védák minden tudásának az volt a törekvése, hogy miután megtanulta ajkaival kiejteni, értelmével valóban fel is fogja a gondolatok e legnagyobbikát.

Sok évszázad vallásai, egymástól függetlenül ugyan, de tökéletes összhangban (mint az ideális gáz részecskéi), az emberi élet egyedülálló tapasztalatát ebbe a mondatba tömöríthetően írták le: DEUS FACTUS SUM (istenné lettem).

A nyugati ideológia számára a gondolat idegen maradt, Schopenhauer és mások igyekezete ellenére, akik kiálltak mellette, s azoknak az igazi szerelmeseknek ellenére, akik, amikor egymás szemébe néznek, látják, hogy gondolataik és örömeik *szám szerint* egyek – nem csupán hasonlóak vagy azonosak; de ők rendszerint érzelmileg túlságosan elfoglaltak ahhoz, hogy tiszta gondolkodásba merüljenek, amely szempontból nagyon hasonlítanak a valláshoz.

Hadd tegyek még néhány megjegyzést. A tudatot senki sem tapasztalja többes számban, csupán egyes számban. Még a tudathasadás vagy kettős személyiség patológiai eseteiben is a két személyiség váltakozik, egyszerre sohasem nyilvánul meg. Álmunkban több jellemet valósítunk meg, de nem megkülönböztetés nélkül: egyikük *mi* vagyunk; benne közvetlenül cselekszünk és beszélünk, s gyakran türelmetlenül várjuk a másik személy válaszát, nem véve észre azt a ténytet, hogy mozdulatait mi irányítjuk, s beszéde olyan, mintha mi beszélénk.

Hogyan keletkezik egyáltalában a többszörösség fogalma (amellyel a védák írói oly nyomatékosan szembeszállnak)? A tudatosság bensőséges kapcsolatban és összefüggésben áll az anyag egy korlátozott tartományának, a testnek fizikai állapotával. (Gondoljunk értelmünk változására a test fejlődése, így a serdülőkor, öregedés, vénülés közben stb., illetve a láz, mérgezés, érzéstelenítés, agysérülés stb. hatására.) A hasonló testek száma igen nagy. Ezért a tudatok, illetve értelmek többszörözése nagyon vonzó feltevésnek tűnhet. Valószínűleg minden egyszerű, naiv ember, továbbá a nyugati filozófusok nagy többsége, elfogadja.

Ez majdnem rögtön arra a felfedezésre vezet, hogy ugyanannyi lélek van, mint ahány test, s felvetődik az a kérdés is, hogy a lélek is halandó-e, mint a test, vagy létezhet-e önmagában is. Az első változat ellenszenves, az utóbbinál pedig egyszerűen elfelejtik, figyelmen kívül hagyják vagy tagadják azokat a tényeket, amelyekben a többszörösségi feltevés alapszik. Még ostobább kérdéseket is föltek: van-e az állatoknak lelkük? Még az a kérdés is felvetődött, hogy a nőknek is van-e lelkük, vagy csupán a férfiaknak?

Az ilyen következtetések, még ha csak kísérletező jellegűek is, gyanússá teszik a többszörösségi feltevést, amely minden hivatalos nyugati vallásfelekezethez közös tulajdonsága. Vajon nem követünk-e el még nagyobb ostobaságot, ha durva babonákat elvetve megtartjuk a több lélek létezésének naiv elgondolását, de azzal „orvosoljuk”, hogy a lelket is halandónak, a hozzá tartozó testtel együtt megsemmisülőnek jelentjük ki?

Az egyetlen lehetséges alternatíva egyszerűen az, hogy ragaszkodunk ahhoz a közvetlen tapasztalathoz, hogy a tudat egyes számú, többes száma ismeretlen; csupán egyetlen dolog *létezik*, s amit többszörösségnek látunk, csupán ugyanazon dolog különböző aspektusainak csalódás okozta sorozata (a hindu MAJA); hasonló illúziót kelt egy tükörgaléria, s így derült ki az is, hogy a Gaurizankár és a Mount Everest ugyanaz a csúcs, de különböző völgyekből nézve.

Persze elménkben sok olyan bonyolult kísértetstória rögződött, amely megakadályozza ezen egyszerű felismerés elfogadását. Azt mondják például, hogy az ablakom előtt van ugyan egy fa, de valójában nem azt látom. Valamilyen ravasz szerkezet segítségével, amelynek eddig még csak a kezdeti, viszonylag egyszerű fokozatai vannak kikutatva, a valódi fáról kép vetítődik a tudatomba, s tulajdonképpen ezt veszem észre. Ha valaki mellettem áll, s ugyanazt a fát nézi, a fáról annak a tudatába is vetítődik kép. Mindketten a magunk fáját látjuk (hasonlóak egymáshoz), de hogy a fa valójában milyen, nem tudjuk. Ezért a hóbortosságért Kant felelős. Az olyan elgondolás rendjében, amely a tudatot *singulare tantum*nak (csak egyes szám – *ford.*) tekinti, egyszerűen azzal az állítással helyettesíthető, hogy nyilvánvalóan csak *egyetlen* fa van, s az egész a képekkel nem egyéb kísértetstóriánál.

De mindegyikünknek az a vitathatatlan érzése, hogy saját tapasztalatunk és emlékeink összessége egységet alkot, amely bármely más személyétől különbözik. Ezt *úgy* nevezzük, hogy „Én”. De mi az az „Én”?

Ha alaposabban elemezzük, gondolom, azt vesszük észre, hogy valamivel több, mint egyes adatok gyűjteménye (tapasztalatok és emlékek), tudniillik azzal az alappal egyezik, amelyre ezek össze vannak gyűjtve. Alapos belső vizsgálattal rájöhettünk, hogy az, amit valójában „Én”-nek tartunk, az az alapanyag, amelyre az adatokat összegyűjtöttük. Ha távoli országba kerülünk, elvesztjük szem elől minden barátunkat el is felejthetjük őket; új barátokat szerzünk, s azokkal éppen olyan intenzíven osztjuk meg életünket, mint a régiékké tettük. Egyre kevésbé fontos az a tény, hogy mialatt éljük új életünket, még emlékszünk a régre. Néha harmadik személyben beszélünk a múltunkról: „Az ifjú, aki voltam” s sokszor talán közelebb áll a szívünkhöz, de bizonyára előbb és jobban ismert előttünk annak a könyvnek a főhőse amelyet olvasunk éppen. Pedig nem volt közbenső megszakítás, halál. S ha egy ügyes hipnotizálónak sikerülne kiirtani minden régebbi emlékünket, nem éreznénk, hogy megöl minket. A személyi létezésben veszteség egyik esetben sem következik be.

Nem is lesz soha.