

A SZÉNVEGYÜLETEK EVOLÚCIÓJA — ÚT AZ ÉLET KIALAKULÁSÁHOZ A FÖLDÖN

OPARIN A. I.

SZUTA Biokémiai Intézete, Moszkva

Napjainkban a természettudósok világszerte elismerik, hogy az élet keletkezése a Földön nem valami „szerencsés véletlen” következménye (ahogy ezt még nem is olyan régen gondolták), hanem törvényszerű folyamat, amely tudományosan tanulmányozható. A szénvegyületek evolúciója képezte ennek a folyamatnak az alapjait.

A szénvegyületek evolúciójának kiindulópontja a periódusos tábla elemeinek kialakulása volt, amely napjainkban a csillagok fejlődésével párhuzamosan megy végbe (Fower, 1964.). A további fejtegetések során fontos lesz az a tény, hogy a világűrben igen nagy mennyiségű hidrogén található. Ennek az anyagnak a mennyisége a világmindenség össz-atomjainak 93%-át teszi ki. Igen lényeges az is, hogy az élet alapját képező másik elem — a szén — szintén jóval a nehéz elemek kialakulása előtt keletkezett a csillagok állandó kisugárzása során, függetlenül a szupernovák fellobbanásaitól. Ez magyarázza, hogy a szén a felvett spektrumok tanulmányozása alapján a csillagok minden osztályában kimutatható; még a legöregebb csillagok esetében is, amelyek kora 15–20 milliárd évre tehető (Hoyle et al. 1964.).

Ha megvizsgáljuk azt a táblázatot, amely a Napban található elemeket tartalmazza (Shaply, 1958.), látható, hogy a Nap főképpen hidrogénből, szénből, héliumból, nitrogénből és oxigénből áll. A felsorolt elemekből — kivéve az inert héliumot — épül fel az élő anyag 99%-a. Galaktikánkon belül mindenütt lejátszódott és lejátszódik a kémiai evolúció, amelynek során számtalan egyszerűbb és összetettebb molekula keletkezik, változik, fejlődik, vagy éppen ellenkezőleg, szétbomlik és újra keletkezik. Erre az egész folyamatra tisztán elméleti úton is következtethetünk a kvantumelmélet alapján, mely lehetővé teszi számunkra, hogy megértsük a kémiai kötések természetét. Ez a megfontolás jól mutatja azt a különleges szerepet, amelyet a szén játszott az élettelen természet evolúciójában, s amely a Földön az élet kialakulásához vezetett. A szénvegyületek specifikus elektronszerkezetük következtében tölthették be ezt a szerepet. Ebből a szempontból semmilyen más elem nem helyettesítheti a szenet. Még a periódusos rendszerben a szénhez közel álló szilícium sem képezheti az élő anyag alapját, bár a Föld felszínén igen nagy mennyiségben

fordul elő. Mint Pullman rámutatott (Pullman, 1971.), ez az állítás elméleti úton is alátámasztható, felhasználva azokat az eredményeket, amelyek a modern kvantumkémia, közelebbről az elektron delokalizáció tanulmányozásán alapulnak, s amely csak a szénvegyületekre jellemző, ugyanakkor nem fordul elő szilíciumvegyületek esetében.

A termodinamikai adatok azt mutatják, hogy nagy hidrogénfelesleg esetén, amely jellemző a világmindenség összetételére, még nagyon különböző feltételek között is a szén feltétlenül szénhidrogént képez (részben metánt), a nitrogén ammóniát és az oxigén vizet (Miller és Urey, 1959.). A modern rádiócsillagászati megfigyelések alapján kimutatták, hogy a Galaktikában ammónia (Cheung et al., 1968.) és vízgőz (Cheung et al., 1969.; Snyder and Buhl, 1969.) fordul elő. Ezzel egyidőben kimutatták, hogy a bolygóközi térben nagy mennyiségben található formaldehid (Snyder et al., 1969.; Zuckerman et al., 1970.), szénmonoxid (Wilson, Jefferts and Penzias, 1970.), ciánhidrogén (HCN) (Snyder and Buhl, 1970.) és ciánacetilén (Turner, 1970.). Bizonyos utalások vannak arra nézve, hogy a csillagok közti térben nagy molekulásúlyú polimer szénvegyületek is találhatóak, amelyek egyes szerzők szerint porfirinek (Johnson, 1967.), mások szerint poliaromás szénhidrogének (Don, 1968. és 1971.). Lényeges információt szolgáltat a csillagok közti tér kémiai összetételét illetően az üstökösök spektroszkópiai vizsgálata. Ezek az égitestek Naprendszerünk határán keletkeznek vagy néha azon kívül a csillagok közti tér anyagából. Ezért olyan képződményeknek szokás őket tekinteni, amelyek összetételük alapján a Naprendszer anyagához hasonlóak. Az üstökösök spektrumainak tanulmányozása azt mutatja, hogy ezekben a kozmikus képződményekben különböző abiogén szerves vegyületek is előfordulnak (Swings and Haser, 1956.). Amikor az üstökös a Naphoz közeledik, a kapott spektrumban különösen élesen rajzolódik ki a cián sávja, azé az anyagé, amely nagyon fontos a szerves molekulák abiogén szintézisének.

Mindez arról győz meg bennünket, hogy a szénvegyületek és a szerves képződmények már abban a kezdeti anyagban is előfordultak, amelyből Naprendszerünk és ezen belül a Föld kialakult. Ezért az utóbbi időben igen alaposan tanulmányozták és közvetlen kémiai analízisnek vetették alá a Föld felszínére becsapódó meteoritokat. Ezek a meglehetősen különböző természetű és összetételű kozmikus képződmények mind szervetlen szenet (cohenit), mind szerves vegyületeket tartalmaznak, amelyek különösen gazdagok széntartalmú kondritokban. Bennük a szerves anyag-tartalom eléri az 5%-ot. Ezek főleg különböző szénhidrogének (néha igen bonyolultak és nagy molekulájúak), illetve ezek nitrogén és oxigén származékai (Bitz and Nagy, 1966.). Napjainkban a meteoritokban található szerves anyagokkal számos közlemény foglalkozik; ezek igen sok, de ugyanakkor ellentmondó adatot tartalmaznak (Mueller, 1967.). Ez az ellentmondás elsősorban annak tulajdonítható, hogy a meteoritok anyaga elszennyeződik mind a becsapódáskor, mind a földi

körülmények között végrehajtott analízis során, sőt a mikroorganizmusok is szennyező hatással lehetnek rájuk (Hamilton, 1965.). Ugyanakkor az összes eddig összegyűjtött anyag figyelmes tanulmányozása lehetővé teszi, hogy két következtetést vonhassunk le: először, a meteoritokban található szerves anyagok többsége magukban a meteoritokban keletkezett, vagy azokon az égitesteken, amelyekből a meteoritok létrejöttek (aszteroidok); másodsor, a szervesanyag-képződés abiogén jellegű volt, azaz semmilyen formában nem volt kapcsolatos az élettal. Az elmondottak illusztrálására két, nemrég publikált, megfigyelést lehet felhozni. Néhány évvel ezelőtt (Studier et al., 1967.) modellkísérletekben kimutatták, hogy majdnem minden vegyület, amelyet a meteoritokban azonosítottak a Fischer—Tropsch-reakció segítségével, szénmonoxidból, hidrogénből és ammóniából szintetizálható vas-nikkel vagy magnetit katalizátor jelenlétében. Nemrég (Lancet and Andres, 1970.) észrevették, hogy a Fischer—Tropsch-reakció 400 K°-on ugyanolyan szénizotóp eloszlást mutat, mint amit a meteoritokban találtak. Ebből az a következtetés vonható le, hogy a meteoritokban található szerves anyagok katalitikus reakció során szénmonoxidból és hidrogénből keletkeztek. Ezek a reakciók a napködben lévő részecskék felszínén játszódtak le.

A szerves anyagok abiogén keletkezésére nézve nagyon meggyőző bizonyítékul szolgálnak azok az analízisek, amelyeket az Ausztráliában nemrég becsapódott Murchison-meteoriton végeztek a NASA szakemberei. Már az első közleményből, amely ezzel a témával foglalkozott (Kvendvolder et al., 1970.), kitűnt, hogy a Murchison-meteorit jelentős mértékben tartalmaz olyan aminosavakat, amelyek a Föld bioszférájában a fehérjék alkotórészét képezik. Ezek a glicin, az alanin, a glutaminsav és a prolin. Ugyanakkor ezen aminosavak mennyiségi aránya különbözik a földi körülmények között keletkező aminosavak arányától. Erre utal az is, hogy az aminosavak D és L izomérjei egyenlő mennyiségben fordulnak elő a meteoritokban. Különösen érdekes az a megfigyelés, hogy a Murchison-meteoritban a felsorolt aminosavakon kívül kis mennyiségben még 12 egyéb aminosavat is találtak, amelyek nem fordulnak elő a fehérjékben, és a földi szervezetek egyáltalán nem szintetizálják azokat. Következésképpen nem tulajdoníthatók szennyezésnek vagy egyéb kísérleti hiba következményének (Kvendvolder et al., 1971.).

Laboratóriumi körülmények között sok esetben sikerült kismolekulájú gázokból abiogén úton olyan aminosavakat szintetizálni, amelyek nem képezik a fehérjék alkotórészét (Miller and Urey, 1959.; Chadh et al., 1971.; Miller, 1955.). Így nagyon valószínű, hogy olyan szerves anyagok, mint az aminosavak — melyek az élő rendszerek jellemzői — nem élőlények által, hanem tisztán abiotikus úton keletkeztek magukban a meteoritokban vagy az aszteroidokban. Az utóbbi években lehetőség nyílt arra, hogy a meteoritokon kívül a Hold felszínén található anyagot is vizsgálat tárgyává tegyünk. Mivel a Hold felszínére (ugyanúgy, mint a Földére) az évmilliárdok során folyamatosan

csapódtak be meteoritok, a holdfelszín anyagában ugyanazokat a szerves anyagokat kellene találnunk, mint a meteoritokban. Ugyanakkor a közvetlen analízisek azt mutatták, hogy a holdkőzetekből készített mintákban igen kis mennyiségű fémvegyület található; ezek elsősorban a szén szervesetlen vegyületei formájában (karbidok) fordulnak elő. Ezért a Holdon talált karbidok izotóp-összetétele igen erősen különbözik azoknak a karbidoknak az izotóp-összetételétől, amelyek a meteoritokban találhatók (Chang et al., 1971.). Apstein és Tylor (1970.) adatai alapján a holdkőzet széntartalmának izotóp-összetétele megfelel a mintavétel helyén becsapódott meteoritok széntartalmának, valamint a napszélből származó szén izotóp-összetételének. Mindez arra utal, hogy a Hold védtelen felszínére hulló meteoritokban található szénvegyületek a napszél hatására erős izotóp-frakcionálódáson mentek keresztül. Az ilyen erős hatásoknak kitett szerves anyagok azonnal elbomlottak és kismolekulájú termékek keletkeztek, amelyek a kis vonzóerő következtében nem maradtak a Hold felszínén.

Egészen más feltételek alakultak ki a Földön. A felsorolt adatok, amelyek a Földön kívüli kémiai átalakulásokkal kapcsolatosak, meggyőzően mutatják, hogy a Földre már kialakulásának pillanatában is nagymennyiségű szerves anyag jutott a napködből és a bolygóközi űrből, amelynek kémiai összetétele közel áll a meteoritok összetételéhez (Whipple, 1964.). Nagyon is közelítő számítások alapján ez a szervesanyag-mennyiség a Föld össztömegének kb. 0,01%-át tette ki. Bár jelentős mennyiségű elsődleges szerves vegyület pirolizálódott azon a hőmérsékleten, amely a litoszféra, hidroszféra és az atmoszféra kialakulása során a Földön uralkodott (Miller and Urey, 1964.), mégis jelentős mennyiségű szerves anyagnak kellett maradnia bolygónk felszínén. A pirolízis során kismolekulájú szénvegyületek keletkeztek, amelyek nem szóródtak szét a világűrben, hanem a Föld vonzóereje következtében a Föld másodlagos redukciós atmoszférájában maradtak. Napjainkban igen nagyszámú laboratóriumi modellkísérletet végeznek, melynek során olyan feltételeket hoznak létre, amik hasonlóak a még kezdeti állapotban levő élettelen Földéhez. A kísérletek meggyőzően mutatják, hogy bolygónk atmoszférájában és hidroszférájában különböző energetikai tényezők hatására (részben ultraibolyafény hatására) egyre bonyolultabb és egyre nagyobb molekulájú szerves vegyületeknek kellett keletkezniük (Kenyon, Hand, Steinman, 1969.). Ellentétben azokkal az átalakulásokkal, amik a Hold felszínén játszódtak le, a Földön a szerves vegyületek már nem voltak kitéve a napszél erős hatásának, mivel a Föld védve van ettől a saját mágneses tere által. Természetesen ma, amikor élet van a Földön, nem figyelhetjük meg közvetlen úton, a maga természetes körülményei között a szerves anyagok kémiai evolúcióját. Az élet keletkezésével és további fejlődésével éles változás ment végbe a Föld felszínén, kizárva minden lehetőségét a szerves anyagok lassú abiotikus evolúciójának. Ha napjainkban a bioszférán belül valamilyen véletlen folytán

abiogén úton is keletkeznének szerves anyagok, ezek azonnal megsemmisülnének, mivel a mikroorganizmusok, amelyek benépesítik a talajt, a levegőt és a vizeket, asszimilálják őket, ahogy erre már Darwin is utalt egyik levelében.

Vonzó feladatnak tűnik, hogy a modellkísérletek mellett a kémiai evolúció egymást követő stádiumait is megfigyeljük, továbbá tanulmányozzuk a szervezethez biológiai formájába való átalakulást. Vizsgálataink során azt az utat követjük, amivel a paleontológia az élet darwini evolúcióját tanulmányozza, azokat a mind egyszerűbb formájú szerves képződményeket vizsgáljuk, amelyek a földkéreg ősi rétegeiben megmaradtak.

A modern paleontológiai vizsgálatok során, amelyek a kambriumig nyúlnak vissza (Precambrian), olyan ősi mikroorganizmus maradványokat figyeltek meg, amelyek kora 2, sőt 3 milliárd évre tehető (Barghoorn and Scofield, 1966.; Scofield and Barghoorn, 1967.). Ezzel együtt elterjedt ezeknek az ősi szerves képződményeknek a kémiai tanulmányozása. M. Rutten kiváló kritikai áttekintést írt ezekről a vizsgálatokról, amely az Elsevier Publishing Company kiadásában jelent meg 1971-ben. Az ide vonatkozó munkák alapvető célja az, hogy feltárja a kapcsolatot a mind bonyolultabb kémiai képződmények és az élet legprimitívebb formái között. Ezen az úton haladva azonban komoly nehézségekbe ütközünk. Ezek egyfelől abban állnak, hogy minél régebbi korokba visszanyúló paleontológiai megfigyeléseket végzünk, annál egyszerűbb morfológiai felépítésű képződményeket találunk. Ugyanakkor ismeretes, hogy sok kolloidális anyag, amelynek semmi köze sincs az élethez, mesterséges és természetes körülmények között könnyen képezhet olyan struktúrát, amely külsőleg nagyon hasonlít a mikroorganizmusokra. Jó példa erre a Herrera-féle „mesterséges sejt” (Herrera, 1934., Herrera, 1942.). A szerző szulfocianát és formaldehid oldatokat kevert össze, majd az így kapott kolloid oldatot alkohollal fixálta. Az ily módon kapott üledékből mikroszkópiai preparátumokat készített, amelyeket még gyakorlott citológusok is fixált mikroorganizmusoknak véltek, amik az élőlények különböző osztályaiba sorolhatók be. Ezért az ősi struktúrájú képződmények tanulmányozása során nagyfokú óvatossággal kell eljárni annak a kérdésnek az eldöntésében, vajon a vizsgált objektum primitív szervezet maradványa-e, vagy artefaktum, amely valamilyen szerves vagy szervetlen kolloid oldatban keletkezett. Erre figyelmeztet bennünket az a szerkezeti képződményekkel kapcsolatos eset, amelynek során ilyen artefaktumokat találtak az „Orgej” (Nagy et al., 1962.) és az „Ivona” (Anders, 1963.) meteoritokban.

Másfelől az ősi földkéregben található különböző szerves anyagok tanulmányozása során soha sem állapíthatjuk meg teljes biztonsággal, hogy ezek az anyagok abiogén úton keletkeztek-e, vagy valamely ősi szervezet élettévékenységének produktumaiként alakultak ki. Néhány éve porfirineket és egyéb bonyolult szerves anyagokat találtak a kozmikus objektumokban, ami már meggyőző bizonyítékul szolgált az élet jelenlétére. Így például Urey már 1966-ban

a széntartalmú meteoritokban található szerves anyagokkal kapcsolatban a következőket írta: „Biztonsággal jelenthetjük ki, hogy ha hasonló anyagokat találnánk a Földön, senki sem kételkedne azok biológiai eredetében.” („It seems safe to say that if similar materials were found on the Earth, no one would question its biological origin.”)

Ez a helyzet azonban gyökeresen megváltozott. Az általunk ismert ősi szerves anyagok közül nem tudunk egyet sem megnevezni, melyről egyértelműen megállapíthatnánk, hogy eredetét tekintve biogén vagy abiogén képződmény-e. Konkrétan ilyen anyagok az izoprenoidok, például a prisztán vagy a fitán. M. Calvin (1969) az élet indikátorainak tekintette ezeket az anyagokat, de kiderült, hogy abiogén úton is keletkezhetnek. Ezért Calvin különböző geológiai korú mintákból nyert szénhidrogéneket tömegspektrométeres és gázkromatográfiás vizsgálatoknak vetette alá, és tisztán mennyiségi összefüggések alapján igyekezett a szénhidrogének biológiai eredetére vonatkozó kritériumokat meghatározni (Calvin, 1969).

A Földön található, ősi eredetű szerves anyagok tanulmányozásával foglalkozó átfogó geológiai mű az „Organic geochemistry” (1969). c. gyűjtemény, melyet G. Eglinton és M. Murphy szerkesztett.

Nem kétséges, hogy a kutatások a fent említett irányban mind nagyobb méreteket öltenek. Ma azonban a kutatási eredmények még nem teszik lehetővé, hogy a szerves anyagok és az azokból képződő makromolekula komplexek kémiai és biológiai evolúciójának egységes képét felvázolhassuk; azt az evolúciót, amely az élet kialakulásához vezetett a Földön.

Az élet keletkezéséről alkotott elképzeléseink az alábbi vizsgálatokon alapulnak: először is mind bonyolultabb modellreakciók végrehajtása, nemcsak egyes szerves vegyületekkel, hanem az azokból képződő makromolekula-komplexekkel is; másodsor a jelenkori legprimitívebb élőlények metabolizmusának és szerkezetének biokémiai vizsgálata.

Ne képzeljük azt, hogy a szerves vegyületek evolúciója valamilyen egységes terv alapján, szigorúan meghatározott sorrendben játszódott le a Földön. Az evolúció különböző forrásokból származó energiák hatására játszódott le, a hidroszféra különböző részeiben uralkodó különféle lokális feltételek mellett: az óceánok és tengerek felszínén, mely közvetlenül a Nap sugárzó energiájának volt kitéve, ezeknek a víztömegeknek a sötét mélyében, a parti vizeken, a folyók torkolatában, ahol nagy mennyiségű iszapszemcse lebegett a vízben, a lagunákban, édesvízi tavakban és kiszáradó pocsolyákban, az esővízben, mely különböző ásványokat mosott ki a talajból, a víz-cseppekben, amelyek az elsődleges szervesetlen talajt nedvesítették és így tovább.

Ezekben az esetekben a szerves anyagokból képződött komplexek különbözőképpen alakultak át. Egyes esetekben teljes szétbomlás játszódhatott le, de emellett feltétlenül végbe ment az anyag egyre bonyolultabb

felépülése is, melynek során egyre összetettebb vegyületek, fehérjeszerű anyagok is létre jöttek. Néhány szkeptikus szerző arra hivatkozva, hogy a termodinamikai egyensúlynak érvényesülnie kellett, azt állítja, hogy az elsődleges óceán felszíni rétegében, amely a nagy energiájú ultraibolyasugárzásnak állandóan ki volt téve, csak nagyon kis mennyiségű szerves anyag maradhatott meg (Seelen, 1965).

Ugyanakkor ezek a szerzők nem veszik figyelembe, hogy az ultraibolya fény hatásának kitett szerves anyagok nem szükségszerűen bomlanak el, mivel behatolhatnak a víz legmélyebb rétegeibe, adszorbeálódhatnak a fenéket képező szemcsékre stb. Meggyőzően mutatja ezt az a nagyszámú modell-kísérlet, melynek során a szerves anyagok szintézise, ill. azok felhalmozódása játszódik le (Miller, 1953.; Fox, 1965.; Young, 1969.) Ezeknek a kísérleteknek és megfigyeléseknek az összessége meggyőzően mutatja, hogy a földfelszín különböző lokális feltételei között az ún. „szubvitalis területeken” a bomlással egyidejűleg a szerves anyagok mind bonyolultabb szintézise, ill. azok kondenzációja és polimerizációja játszódott le. Így egymástól függetlenül keletkeztek a fehérjeszerű polipeptidek és a nagy molekulájú polinukleotidok.

Egy meghatározott földtörténeti kor folyamán bolygónk felszínének egyes részein kialakult az abiogén úton keletkezett szerves anyagok vizes oldata, vagyis az, amit a modern irodalomban „elsődleges bouillonnak” szokás nevezni. Ilyen módon játszódott le az átmenet a kémiai evolúciótól a biológiaihoz. Ennek során kezdeti rendszerek (probiotok) alakultak ki, amelyek mind újabb és újabb jeleit mutatták a szervezethez, amely kizárólag az élő világnak a sajátossága. Először is az összes élőlényre jellemző, hogy képes ellenállni az entrópia növekedésének és hogy meghatározott rendezettség jön létre a rendezetlen oldatban.

Másodszor az ún. „célszerűség” mutatkozik az élőlények szervezethez, konkrétan a szervezet minden részének felhasználása (molekulák, sejtszervecskék és szervek) az életfunkciók végrehajtásánál.

Végül és harmadszor az a sajátos és tökéletes formája az információ megőrzésének és átadásának, amely a makromolekulák belső szervezethez alapszik (nukleinsav kód).

Míg az abiogén anyagok az „elsődleges bouillon” oldatban rendszeretlenül szét vannak szórva, addig az élő anyagra az a jellemző, hogy a külső környezettől individuális rendszerrel van elhatárolva, de a külső környezettel állandó kölcsönhatásban áll és mint nyílt rendszer funkcionál. Csak az ezekben a rendszerekben uralkodó specifikus termodinamikai folyamatok — amik jellemzőek az összes élőlényre — tették lehetővé, hogy ezek a rendszerek ellenálljanak az entrópia növekedésének, ellentétben azzal, amit a szervetlen világban tapasztalhatunk.

Az élet kialakulásához először is arra volt szükség, hogy a homogén oldatban fázisviszonyok jöjjenek létre, melyek kialakulása a sokmolekulás

rendszereket mint egységet elkülönítették, és így az ellen tudott állni a környezetnek, megőrizve eközben az állandó jellegű „rendszer-közeg” kölcsönhatást.

A többfázisú rendszerek, amelyek az egynemű oldatból alakultak ki, s egy meghatározott felület révén elkülönültek attól, nagymértékben elszaporodtak a természetben és állandóan találkozhatunk velük a laboratóriumi kísérletek során. Kétségtelen, hogy ilyen típusú rendszerek óriási mennyiségben keletkeztek az élettelen föld felszínén is. A különböző „szubvitális területeken” különböző természeti feltételek mellett különböző kémiai összetételű és a legkülönbözőbb fajtájú individuális rendszerek keletkeztek, természetesen ezek nagymértékben különböztek a mai élőlényektől. Ezeket a rendszereket nemcsak elképzelhetjük, hanem a laboratóriumi kísérletek során számos ilyen elkülönült fázisrendszert állíthatunk elő [hólyagocskák (Goldacze, 1958.), „dzsovana” (Bahadur, 1966.), mikrogömböcskék (Fox, 1965.), koacervátum cseppek (Bungenberg-de-Yong, 1932). és még sok más]. Sok szerző ezekkel a modellrendszerekkel folytatott kísérleti munka során arra törekszik, hogy a sejt szerkezetéhez leginkább hasonló képződményt kapjon, bár az entrópia növekedését az a rendszer képes sikerrel leküzdeni, amelyik nyílt rendszerként áll kölcsönhatásban környezetével. A nyílt rendszerek termodinamikája igen alaposan ki van dolgozva (Rigogine, 1955.), és az elvileg különbözik a klasszikus termodinamikától; ennek az elméletnek az alapján nyílik lehetőség az entrópia növekedése leküzdésére. Ezért fontos, hogy a modellrendszerek a legegyszerűbb úton jussanak a statisztikus állapotból a stacioner, folytonos állapotba. Ilyen vonatkozásban a koacervátum cseppecskék mutatkoznak a legperspektivikusabb modelleknek. Ezek könnyen keletkeznek a kaotikus vagy monoton felépítésű polimerekből, belső struktúrájuk általában igen egyszerű, de a környezettől élesen elkülönülnek egyfelszíni réteg által. Emellett azzal a szelektív képességgel is rendelkeznek, hogy az őket körülvevő oldatból csak meghatározott anyagokat kebeleznek be (Jebrefnova, 1966).

Ha a koacervátumokba olyan anyagokat viszünk be, melyek gyorsítják a kémiai folyamatokat (katalizátorok), elemi formában modellezhetjük a bennük lejátszódó igen egyszerű metabolizmust, a környezettel folytatott anyagcserét. Meghatározott sebességű reakciók esetében a cseppecskék szemünk láttára növekszenek, térfogat és súly szerint (Oparin, 1968). Minél tökéletesebb a csepp belső szervezetsége, annál jobban alkalmazkodik a környezet feltételeihez, a cseppek gyorsabban növekednek, s egyre kisebb a valószínűsége annak, hogy szétesnek vagy megsemmisülnek, s így mint individuális képződmények funkcionálnak.

Sikerült olyan modell-kísérleteket is bemutatni, amelyek során egyazon közegben kétféle csepp növekedett. Az egyikben bonyolultabb és hatékonyabb összetételű katalizátorok voltak, mint a másokban. Ily módon közvetlenül megfigyelhettük, hogy a bonyolultabb összetételű csepp gyorsabban nőtt, míg

a kevésbé bonyolult csepp igen lassan növekedett, majd rövid idő elteltével a növekedés teljesen leállt, sőt egy fordított folyamat során a csepp szétesett (Oparin et al., 1968). Ezekkel a kísérletekkel sikerült demonstrálnunk egy új törvényszerűséget: az élettelen anyag természetes kiválasztódását, vagyis ez a folyamat már az élet előhírnökei, a „probiontok” között is lejátszódott.

Modellkísérleteink során különféle katalizátorokat, többek között enzimeket használtunk, amelyek laboratóriumi körülmények között a legkényelmesebb sebességfokozó anyagok. De a probiontok evolúciójának kezdetén a katalizátorok szerepét csak a külső környezetből származó szerves anyagok játszhatták, amelyeket később a koenzimek (vitaminok) váltottak fel; erre következtethetünk az összehasonlító biokémia eredményeiből.

A fehérje enzimek, amelyek katalitikus aktivitása azonos kapcsolatban áll a molekulán belüli szervezettséggel, elsősorban az elsődleges struktúrával, ahol az aminosav-csoportok meghatározott sorrendben helyezkednek el a polimer-láncban, csak a későbbiek során kezdtek meghatározott szerepet betölteni az evolúcióban. Ez a szervezettség a maga primitív formájában abiogén körülmények között is kialakulhatott, erről tanúskodnak Fox (1969) és egy sor más kutató (Lipmann, 1968) kísérletei.

Az enzimmolekulák jellegzetes felépítése, mely alkalmassá teszi őket funkciójuk betöltésére, az élettelen anyag természetes kiválasztódása következtében alakulhatott ki. Ennek során mindaz, ami a metabolizmus tökéletesedéséhez vezetett, megőrződött a későbbi fejlődés során is, és minden egyéb megsemmisült.

Calvin (1969) adatai alapján csak fehérjékkel is lejátszódhatott ez a jelenség (nukleinsavak távollétében), így az enzimek progresszív evolúciója kapcsolatban állhat nemcsak az egyre bonyolultabb molekulák keletkezésével, amelyekben meghatározott sorrendben helyezkednek el az aminosav-csoportok, hanem azok szintézisének ismétlődése meghatározott módon rögzítődik, a replikáció a rendszer növekvő végének kontrollja alatt áll. Ily módon tisztán elméleti úton feltételezhetjük fehérjerendszerek evolúciójának létezését. Ugyanakkor az ilyen típusú fehérje replikáció nagyon tökéletlen lenne és könnyen megváltozna a fehérje összetétel. Ezzel ellentétben a nukleinsavak nem rendelkeznek katalitikus tulajdonsággal, de viszonylag pontosan képesek replikálni.

Nagyon előnyösnek látszik ezeknek a rendszereknek az együttműködése. Mint a modellkísérletek mutatják, már abban az esetben is, ha kevert vagy monoton felépítésű polipeptidok és polinukleotidok (melyek még nem hordanak magukban semmiféle genetikai információt) oldatait összekeverjük, ezek az anyagok egy fázison belül egyesülnek. Ily módon a fehérje és nukleinsav-rendszerek kölcsönhatásba léptek egymással, és ezt követően ment végbe a nukleinsavkód evolúciója (Crick, 1960). Ugyanakkor szeretném még egyszer kihangsúlyozni, hogy ez az evolúció nem egyszerűen az oldatban

ment végbe, hanem mint a probiontok természetes kiválasztódásának az eredménye.

A fentiekből kiindulva a következő (természetesen ma még erősen hipotetikus) sémát szeretném felvázolni az élettelen természet evolúciójával kapcsolatban. Már a szénvegyületek evolúciójának kezdetén sem beszélhetünk valamely egyetlen kiindulási anyagról vagy a fejlődés általános útjáról. A szerves vegyületek keletkezése és kezdeti bonyolódása a kozmoszban és a Földön nagyon különböző feltételek mellett játszódott le, igen különböző energiaforrások hatása alatt. Ezért a séma alján nem egyetlen törzs található, hanem különböző utak egész hálózata. Az utak többsége zsákutcába vezetett — a molekulák széteséséhez és a térben való szétszóródásához (ami a Hold felszíni rétegeiben lejátszódott), vagy fordítva, nagystabilitású makromolekulák keletkeztek, melyek nem képesek további átalakulásra (ilyenek a meteoritokban található bitumenek).

A Föld felszínén uralkodó igen különböző feltételek mellett néhány kezdeti szerves anyag egyre bonyolultabbá, egyre nagyobb méretű makromolekulákká vált. Ezt a folyamatot nem tekinthetjük valamilyen szerencsés véletlennek. Természetesen ez a folyamat valamely meghatározott helyen és időben vagy végbement, vagy nem ment végbe, ugyanígy, mint ahogy egy adott helyen vagy esik az eső, vagy nem esik. A Föld egész felszínét figyelembe véve igen hosszú időtartam alatt a kezdeti szerves anyagok nem is egy alkalommal a szervezettség magas fokára kellett hogy eljussanak. Természetesen ezek a molekulák nem rendelkeztek olyan tökéletes belső szerkezettel, mint a ma létező fehérjék és nukleinsavak. Ahhoz, hogy a szerves anyagok az evolúció magasabb fokára jussanak, arra volt szükség, hogy a korábban egynemű „elsődleges bouillonban” kialakulhassanak a fázisviszonyok. Csak ezen az alapon keletkezhetek különálló sokmolekulájú rendszerek, melyek a környezetüktől egy felületi réteg által voltak elválasztva, de mint nyílt rendszerek kölcsönhatásban álltak a környezettel. Az ilyen típusú rendszerek kialakulása az őket megelőző kémiai evolúción alapszik és rajtuk alapszik a későbbi biológiai evolúció, melynek első lépése a növekvő entrópia leküzdése volt az újonnan keletkezett rendszerekben. Nagyon sokféle ilyen rendszer keletkezett a Földön, igen nagy mennyiségben, különböző összetétellel, struktúrával és intermolekuláris kötéssel. Ezeknek a rendszereknek a többsége elvben különbözött a mai élőlényektől. Így például a séma bal szélén azoknak a rendszereknek a fejlődését ábrázoltuk, melyek csak egy polimerből épülnek fel (pl. a fehérjék vagy a proteinoidek), míg a jobb oldalon a fehérjelipoid, szénhidrogén-lipoid és ehhez hasonló rendszereket tüntettünk fel. A séma közepén olyan rendszerek vannak feltüntetve, melyek fehérjékből és nukleinsavakhoz hasonló polimerekből épülnek fel, melyekben az egyes monomerek véletlenszerűen helyezkednek el. A fejlődés végső stádiumában olyan tökéletes szerkezet és metabolizmus alakul ki, mely biztosítja az élő rendszer folyamatos

önfenntartását és önreprodukciónak a létezés adott feltételei mellett. Ez az életképessége a szervezethez, vagy „célszerűsége” mind az élő rendszer egészét tekintve, mind annak egyes részeit (molekulák, szervek és szervrendszerek), áthatja az egész élő világot felülről lefelé, az élet legelemibb formájáig. De az élet csak az evolúció során kialakult új törvényszerűség — a természetes kiválasztódás alapján jöhetett létre.

A koacervátum cseppekkel végzett modellkísérletek azt mutatták, hogy az ilyen típusú individuális nyitott rendszerek (probiontok) további evolúciója, mely a külső környezettel való kölcsönhatás, a növekedés és a szaporodás fokozatos tökéletesedéséhez vezetett, gyökereiben az élettelen anyag természetes kiválasztódásához nyúlik vissza. Ennek eredményeként sok „probiont” nyomtalanul eltűnt, amely szervezethez folytán a külső környezet adott feltételei mellett létezhetett volna, de a tökéletesebb rendszerekkel nem tudott konkurálni. Így például bizonyos „probiontok” esetében (a séma közepén helyezkednek el), melyek polinukleotidokat és polipeptideket is tartalmaznak, kialakultak a kódolt összefüggések az említett anyagok között, és így az információ megőrzése és átadása tökéletesebbé vált, ami ezeknek a rendszereknek a gyorsabb fejlődését és ezzel egyidejűleg más rendszerek visszaszorítását eredményezte; ilyen rendszerek a séma bal oldalán levő, egyetlen polimer molekulából álló képződmények, vagy a nukleinsav nélküli „probiontok” a séma jobb oldalán. Ha nem léteztek volna nukleinsav-fehérje alapú „probiontok”, akkor sok egyéb, például proteinoid képződmény is fennmaradhatott volna, és tisztán kinetikai alapon jöttek volna létre a szükséges enzimek (mint ez Fox kísérleteiből kitűnik—1969). De akkor az élet a Földön egészen más jellegű lenne, mint amilyen jelenleg. Ezzel együtt az élet nem valami célirányos folyamat eredménye, amely egy előre meghatározott terv szerint játszódott le. Csak azért tekintjük az élet kialakulásának ezt a formáját kötelező jellegűnek, mivel jelenleg nem ismerünk a földi életen kívül egyéb életet. Várható, hogy a mind nagyobb mértékű kozmikus vizsgálatok által közelebb kerülünk ennek a problémának a megoldásához.