

EGY ÚJ TERMÉSZETKÉPRŐL

Debreceni Egyetem, 2008/2009. tanév I. félév, leadta és lejegyezte Végh László

2008. december 14.

Tudnivalók a vizsgázásról. Vizsgázni a karácsony és újév közötti időszakot kivéve előreláthatólag bármelyik munkanapon lehet. Aki a Neptun rendszeren megadható időszak előtt vizsgázna, az időpontot személyesen, vagy az 11359-es egyetemi hívószámon, (városból 509259) egyeztetheti vagy ír a vl@atomki.hu címre.

Helyszín: Atomki, VIII. épület, ez egy háromemeletes betonépítmény, bejárat a Poroszlai úti portán, azután jobbra kell térni. A második emeleten, a tanteremben van a vizsga, a lépcső oda visz. Ha a tanterem foglalt, akkor balra térve a 210-es szobát keressék. Szóbeli a vizsga, írásban készülhetnek fel. Tollat hozzanak. Jegyzet a teremben csak zárt táskában tartható.

Tartalomjegyzék

1. Világképünk jellege és fejlődése	1
1.1. Vallásosság és világszemlélet	2
1.2. Természettudományos módszer	4
2. Tér és idő	7
2.1. Speciális relativitáselmélet	9
2.2. Általános relativitáselmélet	12
2.2.1. Tér-idő görbület	13
3. Törvények és szimmetriák	16
3.1. Szimmetriasértések	18
4. Kisvilág	19
4.1. Hullámtermészet - részecskék 'fényképezése'	19
4.2. Határozatlansági összefüggés	22
4.3. Elemi részecskék	25
5. Alapvető kölcsönhatások	27
5.1. Nagy egyesített elméletek	32
5.2. Kölcsönhatások mértani eredetéről	33
6. Rend és szabadság a világban	34

7. Összetett rendszerek	38
7.1. Entrópia	38
7.2. Önhasnolóság, fraktálok	39
7.3. Hálózatok	40
7.4. Önszerveződés	44
8. Táguló világegyetem	46
8.1. Világegyetem fejlődése a csillagrendszerekig	49
8.2. Kaotikus felfúvódás	54
8.3. Tömegvonzás és a csillagok	54
9. Naprendszer és a Föld	58
10. Élet és örökítőfonata	61
10.1. Genetikai kód	61
10.2. "Hulladék" örökítőfonat	63
10.3. Az élet keletkezéséről	64
11. Ökorendszerek	72
11.1. A Gaia modell	74
12. Az emberről	75
12.1. Agyfejlődés	75
12.2. Emberarcú világegyetem	80

1. Világképünk jellege és fejlődése

Öntudat kialakulása és világszemlélet. A világról, természetről való alapérzésünk, hogy szép rendezett egésznek avagy összevisszaságnak látjuk-e, már öntudatra ébredésünk során rögzül bennünk és ilyen marad életünk egésze során. Tudatosságunk élettani alapja agyunk működéséhez kötődik. Az agysejtek a magzati lét nyolcadik hetétől a tizenharmadik hétig alakulnak ki, ezalatt percenként kétszáz ezer új neuron keletkezik. Hálózatba rendeződésük azonnal megindul, huzalozódásukat alapvetően külső ingerek, magzatkorban főleg az anyával való kapcsolatok határozzák meg. Még az állat is érzékeli a szeretet áradását. Nem csodálkozhatunk azon, hogy a magzat és a csecsemő számára ez annyira szükséges. A magzatkor és a csecsemőkori első fele az öntudat kialakulásának - az én és a világ létrejövélére való ráébredésnek -, kulcsfontosságú szakasza. Ha ekkor a magzat és a csecsemő azt érzi, hogy szeretik, örvendezve várják és jövője nagyon sokat jelent a környezete számára, akkor egyúttal az emberkében az is tudatosul, hogy ez a világ az ő világa, ebben otthon érezheti magát. Mélyen meggyökerezik az így létrejövő bizalom és biztonságérzés az emberben. Ez határozza meg egész életét, viszonyát az emberekhez, a természethez és a világhoz. Szép, rendezett egységes egésznek érzi a világot. Ennek a zsigeri érzésnek eredetével nincs az egyén tisztában, hiszen az igen korai időszakból - ez a bensőnek nevezhető biztonságérzet kb. hathónapos korig alakul ki -, később már nincsenek emlékei. Ha valaki a természetben elsősorban a zűrzavaros, veszélyes elemekre figyel fel, mint a 'nagy sötét rengeteg erdő', vagy amikor a tó 'fenyegető nagy víz', akkor az illető nem a saját személyes tapasztalatai miatt fél és szorong, hanem belső bizonytalanságait vetíti ki a természetre.

Világrend és varázslás. Régen úgy vélte a világ rendjét érző, észlelő ember, hogy a világ egyetlen hatalmas összefüggő egészet alkot, minden mindennel össze van kapcsolva. Hogy a dolgok miként kötődnek egymáshoz, ember fel nem foghatja, mert az egész annyira összetett. Viszont hittek abban, hogy a világ összefonódottsága lehetőséget ad az embernek a jövő alakítására. Beavatott személyek, mint a varázsló, a bűbájos, a boszorkány varázslással befolyásolták a világot. Megfelelő cselekedetek sorát végezve törekedtek arra, hogy a világ bizonyos erői engedelmessé legyenek nekik, mint essen-e avagy elálljon az eső, betegségbe essen avagy meggyógyuljon az állat, szerelem ébredjen valakiben. Babonaként ma is él a varázserőbe vetett hit. Ez sugallja azt is, hogy ne lépünk rá a küszöbre vagy ne menjünk át a boltív alatt.

1.1. Vallásosság és világszemlélet

Vallásos érzelem. Idővel a varázslással befolyásolhatónak gondolt világ képét a rendezettebb körülmények között élők vallásos szemlélete szorította háttérbe. A vallásosság alapeleme a természetfölötti felismerése. Ha a benső biztonságérzettel bíró emberek világról alkotott képét nézzük, - ezek alkotják a nagy többséget - számukra zsigeri érzés, hogy a világot rendezett egész. Másik fontos emberi tapasztalat, hogy a minket óvó és megtartó rend valamint annak fennmaradása folyamatosan végzett értelmes munka eredménye. Ez a két fontos tapasztalat ott fészkel szinte mindannyiunk tudata mélyén. Ott előbb-utóbb összetalálkoznak, mivel van közös elemük, a rend. Rend van a világban, a rendhez és fenntartásához pedig értelmes rendező kell, ezt adja a két gondolat összekapcsolása. Ha a természethez közel éltünk gyermekként, megtapasztalva annak hatalmasságát és összhangját, akkor tudatalattink a feldolgozás után ezt akként foglalja össze, hogy világunk egészének összehangolt rendje, és ennek fennmaradása a természet felett álló értelem műve. Ugyanis az anyagi világ egyedüli értelmes lényé az ember, mi pedig jól tudjuk magunkról, hogy a természet rendjét nem mi hoztuk létre, ennek a rendnek csak termékei vagyunk. Mindez az emberből azután úgy bukik ki, hogy nem lehet az, hogy a világ csak úgy magától létezzon, lennie kell mögötte valaminek. Ebben a gondolatban a bennünk természetes módon kifejlődött vallásos érzelem nyilvánul meg. Valamennyi természethez közel élő ember, akiben megvan az ősbizalom, vallásos érzelmű, a tudatalattijában ott lakozik a természetfeletti fogalma. Erre épít azután a vallásos nevelés. Ha viszont gyermekkorunk helyszíne alapvetően épített környezet, beleértve a betonrengeteg kevés szabad helyére ültetett fát és nem volt módunk rácsodálkozni a természet egészére, akkor a világ egészének rendjét tudatalattink emberi tevékenységnek tulajdonítja és a vallásos érzelem nem alakul ki.

Világrend jellege. Összefüggő egészet alkot a világ. De hogy milyen az összefüggések jellege, nem egyszerű megérteni. A régi nagy műveltségek természetképét az élő természet rendszereinek, mint a hangyabolyoknak és más társulásoknak alapos megfigyelése formálhatta. Csodálatraméltóan összehangolt rendszert alkot a hangyaboly egésze. Úgy tevékenykednek, nyüzsögnek az egyes hangyák, hogy a boly összefüggő, önfenntartó egészet képezzen. Még akkor is, ha kisebb-nagyobb zavarok mutatkoznak. A természet rendszereinek és a természet egészének ezt a jellegzetességet emeli ki a kínai és más keleti műveltségek valamint Arisztotelész természetképe is. Úgy működik a természet, hogy egyensúlyban lévő egészet alkotson. Részai oly módon kapcsolódnak, úgy hatnak kölcsön, hogy az egyensúly kisebb-nagyobb megrázkódások esetén is fennmarad. Nem a külső hatások, hanem az egész rendje szabja meg a részek működését. Jóval több tehát az egész, mint részeinek egyszerű összege. Ezért részletekre figyelni, azokat boncolgatni hiábavalóság, mert az egész, a lényeg megértésében mit sem segíthet.

Józan volt ezért a törekvés, hogy a világot valamilyen mindent átfogó rendező elvet feltárva lehet megérteni. Ősidők óta felismerték, hogy a földi természet és az égbolt rendje között kapcsolat van. Világminőségünk rendezettségének és összhangjának legszembeötlőbb jelei éppen az égbolton figyelhetők meg, mivel a csillagok és bolygók mozgása egyszerű szabályszerűségeket követ. Már az ősi korok embere is észlelte ezeket és az első műveltségek naptárai is a szabályszerűen ismétlődő égi jelenségeken alapultak. Miközben a földi történéseket - nem alap nélkül - kiismerhetetlennek tartották, látták, hogy a földön tapasztalt szabályosságok, mint az évszakok váltakozása is, égi jelenségekhez kötődnek. Ennélfogva a régi korok

embere a világ egésze rendjének alapjait az egek rendjében látta.

Sokistenhit. A sokistenhívő vallások felfogása szerint a történeket istenek, felsőbbrendű lények irányítják. Egy ilyen, szellemi lények döntései által vezérelt világ ember számára nem fogható fel, mert ember felsőbbrendű lény gondolkodását, szándékait nem ismerheti ki. Világunkban szent és ezért sérthetetlen dolgok is vannak. Mivel nem bolygathatók, még a lehetősége is ki van annak zárva, hogy az ember kísérletezhessen velük.

Akkor boldogulhat a megismerhetetlen világban élő ember, ha alkalmazkodik az istenek kívánalmaihoz. Nem saját kárán kell mindent megtanulnia, hanem átveheti az ősök tapasztalatait. Körkörös az időszemlélet, ennek alapja a napszakok, holdhónapok, évszakok, évek ismétlődése. Azaz minden csak ismétlődés, ezért nincs szó eredetről, beteljesülésről, csupán a körforgás egyes szakaszairól. Ilyen szemléletű társadalmakat, például az régi Kínát, a hagyományok tisztelete, az ősök megbecsülése és az újtól való, sokszor rettegésig fokozódó tartózkodás jellemzi. Ugyanis ami most újnak látszik, azzal már találkozniuk kellett a régieknek is. Nyilván azért nem szerepel az ismereteink között, mert a régiek úgy ítélték meg, hogy értelmetlen.

Sokistenhit gyengülése és a világkép átalakulása. A természettudományos gondolkodás megjelenését a korábbi istenkép fokozatos átalakulása tette lehetővé. Nagy, sokezer éven át virágzó birodalmak földrajzilag védettebb, nehezen megközelíthető területeken alakulhatnak ki. Ezek vallásos szemlélete nem változott komolyabban. Behatóbb szemléleti változás olyan térségekben történhetett, ahol a történelem forgandósága magával vonta az istenképek jelentős változását is. Ilyen övezet Mezopotámia és a Földközi-tenger medencéje. Történetüket az állandóan beáramló népek vándorlása és letelepedése, az ezzel járó örökös háborúk tették mozgalmassá. Errefelé a sokistenhit súlyos válságba került, mert a helyi istenek vesztek tekintélyükből, mivel nem tudtak megfelelő védelmet és biztonságot nyújtani. Egyre kevésbé tartottak tőlük az emberek isteneiktől és azon kezdtek el gondolkodni, melyek azok az erők, amik ténylegesen kormányozzák a világot. Két területen, Görögországban és a zsidó nép földjén különösen szembetűnően jelentkezett a sokistenhit gyengülése.

Kr. e. 600 körül egyes kisázsiai görög bölcselek felvetették, hogy a természeti jelenségek isteni közreműködés nélkül is leírhatók. Nem akarták kizárni isteneiket a világból. Ehelyett személyes indokból hozott szabad döntésekre képtelenné és a világot vezérlő törvények jelképeivé tették isteneiket. Egyrészt a görög bölcsélet és tudományosság összegezte a korábbi korok eredményeit, másrészt máig érvényes felismerésekkel gazdagította az emberi gondolkodást. Platón szerint a megfigyelhető, az érzékeink által megragadott anyagi világ nem az igazi valóság. Anyagi világunk változó jelenségei mögött örök és változatlan minták és eszmék, az ideák rejlenek. Ezek az elvont fogalmak, mint a számok, mértani idomok, jóság, szeretet és hasonlóak ragadhatják meg a világ valóságát. Ám elvont fogalmakat csak az értelem ragadhat meg. Ezért érzékeinkkel a világnak csupán az árnyékát, tökéletlen utánzatát fogjuk fel. Platón szerint az anyagi világ istene az értelem nélküli anyagot az ideák mintája szerint gyúrja. Igyekszik az anyagot minél tökéletesebbé alakítani. Azonban az örökösén változó anyag kitör ezekből a rendszerezett állapotokból, alakzatokból, állandóan bomlik, szóródik szerteszét. Azaz az anyag tökéletlen, rosszra hajlamos, afelé tart. Az eszme és anyag szétválasztása az ókori gondolkodás számára alapelemévé vált. Mivel ez a földi valóság lebecsülését vonja maga után, a megvetett anyagi világ nem kaphatott kellő figyelmet.

Egyistenhit és a természettudomány születése. Az egyistenhívő vallások szerint Isten a világot az általa adott törvényekkel kormányozza. Törvényt csak az adhat, aki teremtett. Ha a teremtés nyersanyaga kívülről származna, akkor az Isten hatalma nem lehetne teljes, alkalmazkodnia kellene az előzményekhez. Ezért az egyistenhit alapvető jellemzője a semmiből való teremtés. Isten az embert saját képmására teremtette. Ez nem kinézetre való hasonlóságot jelent, hanem részben azt, hogy észjárásunk hasonlít Isten gondolkodásmódjára. Azaz az ember képes lehet arra, hogy felfogja Isten teremtett világának törvényeit. Ez felbátorít a törvények keresésére. Mivel a természetben minden csak teremtmény, sérthetetlen szentségek hiányában vizsgálódást gátló tényezők sincsenek. Egyirányú az egyistenhit időszemlélete, az idő a teremtéstől az

utolsó ítéletig tart. Közben természetes módon változik a világ. Ezért itt hiányzik a körkörös időszemléletű társadalmak újtól való merev idegenkedése.

A mai természettudomány a keresztyén világszemlélet és a görög gondolkodás kölcsönhatása révén született meg. Itt a keresztyén Európában a megfelelő szellemi és társadalmi háttérnek köszönhetően lassan megnyílhatott az út a természet törvényeinek felismeréséhez, rendszeres vizsgálatához, azaz a tudományok fejlődéséhez. Ez a fejlődés a latin kereszténység uralta területeken gyorsult fel, ahol a 12. századtól kezdve az akkor alapított egyetemeken, ahol a különböző irányzatok követői szabadon vitatkozhattak Isten és a világ, Isten és az ember viszonyáról és más kérdésekről. Annak köszönhető a szabad légkör, hogy a Szentírás kijelentéseit az egyház nem csak betű szerint értelmezte, hanem egyéb magyarázatokat is elfogadhatónak tartott. Eszerint az Isten által sugalmazott Biblia az emberi tudás kimeríthetetlen kincsestára. A szó szerinti üzenet mögé még felmérhetetlenül sok tudás, ismeret van beépítve. Ezeknek feltárása örök emberi feladat. Tévedhet az ember, ezért a Szentírás értelmezése állandó szabad eszmecsere tárgya. A közös nyelv, a latin általános használata, a különböző irányzatok képviselői közötti viták, nézetek szabad ütköztetése és az egyetemeken tanulók valamint tanárok tanulmányútjai évszázadokon át megfelelő háttérrel szolgáltak új gondolatok, eszmék születéséhez és terjesztéséhez. Ez a sok évszázadon át tartó folyamat vezetett el oda, hogy a 17. században Európában megszületett a természettudomány.

Az újkori, 16-17. századi tudományos forradalom az égitestek mozgásának tanulmányozásához kötődött. Mind pontosabbak lettek az adatok. Ezeket a korábbi, másfél évezreden át használt, Ptolemaiosz nevéhez fűződő földközéppontú leírás csak egyre bonyolultabban tudta értelmezni. Kopernikusz napközéppontú leírása szakított a ptolemaioszi felfogással. Később Kepler törvényei a Nap körül keringő bolygók mozgásának egyszerű, ám igen pontos leírását nyújtották. Newton a tömegvonzási erő bevezetésével és a mozgástörvények megfogalmazásával levezette Kepler három törvényét. Newton törvényei az égi és a földi jelenségek leírására egyaránt alkalmasak. Így derült ki, hogy a világ valóban egységes egészet alkot.

1.2. Természettudományos módszer

Jól mutatja a természet megismerésének története, hogy a világ egészét egyszerre, egyetlen elv segítségével megragadni akaró törekvések nem vezettek eredményre. Nem lehet a világ rendjét 'mindent vagy semmit' alapon megérteni. Bár a világ dolgait számtalan kapcsolat fűzi egybe, mégis előfordul, hogy egyes jelenségek a többitől elkülöníthetők és úgy vizsgálhatók. Azaz lehetséges, hogy valamit úgy tanulmányozhassunk, hogy az összes többitől mit sem tudunk. Mindez megdöbbentően érdekes. Einstein ezt úgy fejezte ki, hogy a világnak az a legérthetlenebb tulajdonsága, hogy felfogható, megérthető.

Éppen az jellemzi a tudományos módszert, hogy a tudomány nem törekszik rögtön az egész teljes megértésére, nem akarja egy lépésben megragadni a világ egészét. Sőt a világ valamilyen kisebb részét sem akarja tökéletesen, a maga egyediségében leírni. Például a Holdat vizsgálva, nem akarja megérteni a Holdat teljes egészében, annak a világra, emberiségre gyakorolt hatását. Nem törekszik úgymond a "holdság" lényegének megragadására. Megelégszik azzal, hogy le tudja írni a Hold Föld körüli keringését, a Hold tengelye körüli forgását, a holdközveteket, stb. Így a tudomány megkeresi, melyek azok a tulajdonságok, amelyek a világ egyes tárgyait jellemezhetik és csak ezekkel a tulajdonságokkal foglalkozik.

Megfigyelés, kísérlet, ábrázolás. Megfigyelés, kísérletezés, mérés a tudományos módszer alapja. Egyrészt meg tudjuk figyelni a természet jelenségeit, leírhatjuk azokat. Ilyen, csak a megfigyelésre támaszkodó tudomány a csillagászat. Égi jelenségekkel mást nem tehetünk, mint hogy megfigyeljük őket és a mérési eredményeket értelmezzük.

Elemezve a megfigyelés eredményeit, meg akarjuk érteni, mi miért történik. Ehhez fel kell ismerni a vizsgált rendszert jellemző tulajdonságokat és fel kell tárunk a köztük lévő kapcsolatokat. Ez általában nem egyszerű, mert nem könnyű megtalálni, mik egy jelenség lényegesebb tulajdonságai, mi az, ami egy

rendszer igazából jellemez, milyen ábrázolást használva írhatjuk le, érthetjük meg a rendszert. Ki kell találni, rá kell jönni arra, a jelenség megértéséhez mi az, ami igazán fontos, és mi az, aminek a jelenlététől, hatásától el lehet tekinteni. Ha sikerül jó ábrázolást (modellt) készíteni, akkor, bár sokmindent elhanyagoltunk, számos dologtól eltekintettünk, mégis elég nagy biztonsággal és pontossággal megmagyarázhatjuk, mi, hogyan történik.

Ha nem égi, hanem földi jelenségeket tanulmányozunk, és meg akarjuk ragadni egy adott jelenség lényegét, a környezet bonyolultsága zavaró tényező lehet. Ezért, annak jobb megértéséhez, mi hogyan történik, kísérleteznünk kell. Ekkor a jelenség tanulmányozásához mesterségesen olyan környezetet teremtünk, melyben kevesebb a zavaró tényező, azaz más dolgok hatásai nem fedhetik el a tanulmányozott jelenséget. Nem más a kísérletezés, mint mesterséges környezetben végzett megfigyelés. Megtervezése, véghezvitele néha igen komoly feladatot jelent és a kísérleti berendezés sokszor egészen más jellegű rendszert alkot, mint a természetben találhatóak.

Kísérletezésnél alapvető szempont, hogy a megfigyelő léte, a megfigyelés ténye ne befolyásolja a kísérlet kimenetelét. Ez, ha az élettelen természetet vizsgáljuk, vagy alacsonyabb rendű élőekkel kísérletezünk, nem okoz gondot. Magától értetődően nem zavarja a Hold viselkedését, ha figyelik a csillagászok. Kémcsőben zajló folyamatok sem függenek a megfigyelőtől és az alacsonyabbrendű élőket sem befolyásolja a megfigyelés ténye. De az ember viselkedése erősen függhet attól, hogy kísérleteznek-e vele. Így a gyógyszer hatásának ellenőrzésekor nemhogy a betegek, hanem még a kezelést végző helyi orvos sem tudhatja, melyik beteg kapott valódi hatóanyagot tartalmazó gyógyszeradagot és melyik ahhoz külsődlegesen teljesen hasonló, ugyanolyan ízű, ám hatóanyag nélküli szert, idegen eredetű szóval placebót. Csak más, távoli helyen lévő személy ismerheti, mely sorszámú üvegek tartalmaztak hatóanyagot. Nem lehet hagyományos módon kísérletezni a természet élő rendszereivel sem. Még súlyosabbak a nehézségek lélektani kísérleteknél. Ha a kísérletben résztvevők rájönnek, miben vesznek részt, értékelhetetlenné válik az eredmény. Ez a lélektani kísérleteket, azoknak előkészítését és értelmezését kifejezetten nehézé teszi.

Előzetes elképzelésünk, ábrázolásunk határozza meg, hogyan tervezzük a kísérletet, mire figyeljünk jobban, minek a kizárásáról, vagy legalább is zavaró hatásának a csökkentéséről kell gondoskodnunk. A kísérletezés és az ábrázolás kidolgozása, finomítása egymást kölcsönösen serkentő, tökéletesítő folyamat. Ha sikeres az ábrázolás, megtaláltuk, milyen törvényszerűségek állhatnak egy-egy jelenség, jelenségek csoportja mögött. A törvények megfogalmazásában a matematika meghatározó szerepet játszik és a természettudomány ragaszkodik ahhoz, hogy a törvényeket lehetőleg matematikai alakban fogalmazzuk meg.

Igen hatékonyak bizonyult a tudomány és a tudományos módszer. Tudjuk, mennyire sikeresek. Egy vonásukra külön is fel kell hívni a figyelmet. Ez a tudomány tisztessége, becsületessége. Mindent, amit elfogad, csak komoly elemzés után teszi. Vannak csaló tudósok, olyanok is, akik saját elképzeléseiket délibábként hajszolva csak annak igazolására összpontosítanak, miközben másra alig figyelnek. Ám nagyon erős a tudományos közvélemény ellenőrző szerepe, ezt is kibírja. Nincs tekintély, arra hivatkozni, hogy egy nagy ember valaha ezt mondta, nem számít perdöntő érvnek. Minél újabb dolgot sikerül felfedezni, korábban minél szilárdabbnak hitt ismeretet sikerül megkérdőjelezni, a tudós annál sikeresebb. Ezért az élenjáró kutató nem vádolható az új iránti érzéktelenséggel, vaskalapossággal. Aki tudós, annak nem szégyen tudományos elképzeléseinek állandó felülvizsgálata, hanem egyenesen létszükséglet.

Matematika és természettudomány. A természettudomány, a fizika nyelve a matematika. Úgy határozható meg a matematika, mint valamennyi lehetséges mintázat és a mintázatok között létező kapcsolatok összessége. Mintázaton véges számú adattal leírható dolgot értünk. Mintázatok például síkbeli, térbeli alakzatok, a közöttük lévő kapcsolatokat a síkmértan vagy a térmértan tételei fogalmazzák meg. Mintázatok a számok, kapcsolataikat a számelmélet tételei adják meg. Mintázatok egy halmaz elemei is, itt a kapcsolatokat a halmazelemeken végezhető műveletek szabják meg. Matematika helyett használhatnánk a mintatan elnevezést is, ez képszerűvé teszi, mivel foglalkozik.

Sokkal többet tartalmaz a matematika, mint amennyit belőle a természettudós, közgazdász vagy más alkalmazó felhasznál. Mindig is inkább a tudomány kedvéért művelte a matematikus, nem pedig azért,

hogy közvetlen gyakorlati haszon származzék felismeréseiből. Az egyes eredmények hasznosítása sokszor évtizedekkel követte a matematikus felfedezését. Jó példa erre Bolyai János mértani felfedezése. Bolyai mint katonatiszt szolgált és szabad idejében dolgozta ki a róla is elnevezett mértant. Az izgatta, lehetséges-e olyan mértan, amely nem tartalmazza az euklidészi mértan párhuzamossági alaptételét. Sikerült ilyen alkotnia. Munkája után sok évtized telt el, míg kiderült, hogy az általa kidolgozott mértan mennyire jelentős. Az Einstein által felfedezett általános relativitáselmélet leírásának eszköze, a világmindenség egy lehetséges mértana.

Érdekes, miközben a természet a mintatan nyelvét beszéli, a matematika egyúttal az emberi elme alkotása. Ezen, mint fentebb tárgyaltuk, nem csodálkozhatunk. Alapvető emberi képességünk a világ összefüggéseit, rendjét feltárni képes gondolkodás. Nem csoda, hogy az összefüggéseket következetesen tárgyaló mintatani gondolkodásra is képesek vagyunk. Mivel az ember több lépésre előre tud gondolkodni, és nem vagyunk egyformák, egyes emberek képesek arra, hogy összetettebb és elvontabb mintatani tételeket mondjanak ki és bizonyítsanak be.

Mindezeket tudva sem lehet egyszerűen azt mondani, hogy az ember mintákat tanulmányozó képessége pusztán törzsfajlódási kényszer lehetne. Sokkal egyszerűbb gondolkodás is elég volna a túléléshez. Egyedül a ragadozókkal, mostoha természeti körülményekkel folytatott harc nem teszi szükségessé az elvont gondolkodás ilyen fokú mélységét. Ugyan az embercsoportok közötti küzdelem már igényelné a magasabb szintű gondolkodást, de az idő rövideje miatt ez mint a törzsfajlódásra ható tényező még nem fejthette ki hatását. Az a tény, hogy az ember gondolkodása annyira összetett összefüggéseket is képes átlátni, mint amilyenek a világegyetem kialakulását, fejlődését jellemzik, igencsak figyelemreméltó.

Deizmus. A newtoni természettan hatalmas eredményein felbuzdulva néhány hittudós arra gondolt, hogy Isten létét, a hit mélyebb megalapozása céljából, úgymond matematikai pontosságú bizonyítékokkal kellene alátámasztani. Ez a tudományos jellegű érvelés nem várt és nem kívánt eredményekre vezetett, amelyek azután súlyosan rombolták az egyházi gondolkodás tekintélyét. Mérlegelve a tudományos eredményeket, a világ egészét óraműhöz hasonlóan működő gépezetnek vették és Istent eme gépezet alkotóját gondolták el. Tekintve a matematikai megközelítés sikerét, a számítások pontosságát, megbízhatóságát, nem lehet csodálkozni azon, hogy a világegyetemet óraműhöz hasonlították. Bolygók, csillagok valóban lenyűgöző pontossággal követték a kiszámított pályákat, és a newtoni természettan törvényei megdöbbenően jól írták le az egyes természeti jelenségeket.

Amikor viszont a hittudósok és bölcselek elgondolkodtak azon, hogy a gépezetként működő világ mit jelenthet a hittudományi értelmezés számára, meglehetősen visszas eredményekre jutottak. Gépezet a világ és annak alkotója Isten, ám minél jobban van megszerkesztve egy gépezet, annál ritkábban szorul tervezője, építője segítségére. Annál tökéletesebb egy óra, mennél ritkábban kell felhúzni, minél ügyesebb az órásmester. Ha Isten alkotta a világot, annak tökéletesnek kell lennie, merthogy az Alkotó hibátlan és tévedhetetlen. Mivel a világ egésze Isten alkotása, és Isten tökéletes, ebből következik, hogy Istennek nem kell jelen lennie a világban. Megy a gépezet magától is, akár évmilliókon át. Beavatkozás nélkül. Gondoljunk Madách Imre művének, az Ember tragédiájának kezdősoraira. Ez a gondolatmenet a felvilágosodás korában vált uralkodóvá. Nézetrendszerét, miszerint Isten teremtette a világot, de nincs benne jelen, deizmusnak nevezik. Isten ebben a világban csak nyugalmazott mérnök. Vagy ahogy egy másik kép mutatja, csupán lapozgatja a világ történetének előre megírt forгатókönyvét. Mint Voltaire is, a deizmus képviselői szükségtelen, felesleges intézményeknek tekintették és hevesen támadták az egyházat.

Amikor a vegytanban felfedezték az anyagmegmaradás törvényét, az anyagelvű (materialista) bölcselet érthető módon általánosította ezt a világmindenség egészére. Kimondták, hogy az anyag nem vész el, csak átalakul. Newton tömegvonzási elméletét a világ egészére alkalmazva arra az eredményre jutott, hogy a világ végtelen, csillagokkal egyenletesen kitöltött tér (lásd később). Emiatt a világot térben és időben végtelennek fogadták el. Ez ellentmondott a bibliai leírásnak, miszerint a világot az Isten a semmiből teremtette. Ezzel a bölcselek a természettudományra hivatkozva tagadták Isten létezését, váltak istentagadóvá. Majd az istentagadás további erősödését vonta maga után Darwin elméletének korabeli értelmezése

is. Eszerint az ember nem a teremtés koronája, hanem csak a legértelmesebb állat.

Világgepezet. Az anyagelvűség, a világ gépként való szemlélete 19. század végére uralkodóvá vált és még ma is meghatározó tényező. Eszerint a tér és az idő mindenektől független létező és az anyag részecskékből áll. Legegyszerűbbek részecskék az anyag elemi építőkövei. Ezek tömeggel rendelkező, szerkezet nélküli, pontszerűnek tekinthető, változatlan, változtathatatlan, örökké létezők. Nyugalomban vannak, vagy mozognak, képesek egymással kölcsönhatni. Világunk folyamataiért az állandónak tekintett részecskék egymással való kölcsönhatása felelős. Eszerint a természetben minden hatás úgy terjed, hogy az anyagi részecskék vonzzák vagy taszítják egymást. Világos kapcsolat van az ok és az okozat között, az anyag szigorúan meghatározott matematikai törvények szerint változik, viselkedik. Ez a felfogás talán legszebb sikereit a gázok viselkedésének leírásával aratta.

Az anyagelvűség és világegyetemet gépezetként kezelő szemlélet igen sikeres volt. Nagyon hasznos keretet nyújtott tudományágak fejlődéséhez. Ezért érthető, hogy annyira ragaszkodtak hozzá, és sok tudományág esetén ma is meghatározó módon használják. Ott is, ahol nem igazán alkalmazható.

Kiderült a 20. században, hogy a világ a fenti egyszerű módon nem értelmezhető. Tér és az idő nem tekinthető minden mástól független létezőknek. Nem örökéletűek a részecskék sem. Világegyetemünk sem tekinthető állandónak, hanem egyre összetettebb rendszerek fejlődnek benne. Meglehet, hogy az élet sőt az értelem megjelenése sem egyszerű véletlen, hanem mély kapcsolatban áll a természettan alaptörvényeivel. Mindezekkel a következő részekben foglalkozunk.

2. Tér és idő

A tér és idő természettani fogalmai a 20. század elején még egyszerűbbek voltak és nagyjából megfeleltek a köznapi elképzeléseknek. Mivel annyira alapvető, a legtöbbször a teret adottnak veszi, amin nincs rajta különösebb töprengésváltozó. Csak akkor ütődünk meg egy kissé, ha szembekerülünk a kérdésekkel, végtelen-e a tér, vagy véges, létezett-e mindig.

A térről alkotott, a józan észnek megfelelő elképzelésünk az általános iskolában tanult euklidészi mértanon alapul. Mindenki el tudja képzelni, hogy párhuzamos vonalak a végtelenben sem találkoznak. Ez a mértani tér természetes módon azonosítható a valódi térrel, amelyben élünk. Történelmileg ez az azonosítás hosszabb folyamat eredménye. Világegyetemünket a görögök az égbolt megfigyelése alapján véges gömbnek képzelték el. Földünk a gömb középpontjában van. Gömbfelületek sokaságával írták le az égbolt szerkezetét és az egyes gömbfelületek különböző fajta égitestek, Nap, a Hold, bolygók és csillagok tartózkodási helyei. Megválaszolatlan maradt, mi van a legkülső gömbhéjon kívül? Később a kialakuló természettan elvetette a véges és gömbszerű világ eszméjét, helyébe a végtelen tér fogalma került. Kopernikusz óta tudhatjuk, hogy a Föld nem tekinthető a Mindenség középpontjának. Sokkal jobban leírhatjuk és megérthetjük a bolygók mozgását, ha feltételezzük, hogy azokat a Nap vonzereje tartja maga körül pályájukon. Newton felismerte, hogy az égitestek mozgását a tömegvonzás vezérli.

Newton végtelen világegyeteme. Valamennyi tömeg között fellép a tömegvonzási erő, minden egyes tömeg vonz minden más tömeget. Ez így igaz a Földön a lehulló almára, a Föld körül keringő Holdra és a Nap körül keringő bolygókra is. Igaz kell legyen csillagokra is. Ebből kiindulva a csillagos égre igen súlyos következtetéseket kell levonnunk. Egymáshoz képest mozdulatlanak látszanak az égbolt csillagai, legalább is Newton koráig, sőt még a 18. századig is annak látták őket. Azaz a Mindenség állandó állapotúnak fogták fel. Mivel a tömegvonzás valamennyi csillag között hat, az égbolton álló csillagok mozdulatlansága érthetetlen. Ha most állnának is, akkor a kölcsönös vonzás hatására meg kell kezdeniük az egymás felé való mozgást. Idővel egyre közelebb kerülnek egymáshoz, végül pedig egymásba, a csillagok összessége által alkotott rendszer tömegközéppontjába kell zuhanniuk. Ám az ókori csillagászok is ugyanilyenek látták az eget.

Newton a következőképpen magyarázta a Mindenség állandóságát. Azért nem mozognak egymás felé a csillagok, mert valamennyi csillagra minden egyes irányból azonos nagyságú tömegvonzási erő hat. Egyetlen csillag sem mozdulhat el, mert mindenfelé vannak szomszédai és ezek ugyanakkora erővel húzzák valamennyi irányba. Ezért az egyes csillagokra ható összerő nulla. Következésképpen minden egyes csillag mozdulatlan. Ez viszont csak akkor lehetséges, ha az eget mindenhol, minden irányban egyenletesen töltik ki a csillagok. Azaz a csillagokkal egyenletesen kitöltött égboltnak térben végtelennek kell lennie. Ha a csillagokkal kitöltött térrész véges lenne, akkor a peremen lévő csillagok befelé gyorsulva mozognának. Hasonló mozgást végeznének a belső tartományok csillagai is. Így végül az összes csillag a közös tömegközéppontba zuhanna. Newton magyarázata, a végtelen és mindenhol ugyanolyan világmindenség feltételezése a csillagászati tudás alapjává vált. Érthető, a bölcselek sem tiltakoztak különösen a térben végtelen, időben öröktől fogva létező, állandó világegyetem feltételezése ellen. Kényelmes volt ez a kép számukra, segítségével megszabadulhattak a kezdetekre és a világ keletkezésére vonatkozó nehéz kérdésektől.

Tehetetlenségi rendszer. Jelenségek térben és időben való leírásához vonatkoztatási rendszer szükséges. Különböző vonatkoztatási rendszerekben a természettan törvényeinek alakja általában más és más. Ha a körhintán ülők mozgását a talajról szemlélem, akkor körmozgást végeznek. Ha viszont a vonatkoztatási rendszer a körhinta egy széke, innen, ebben a rendszerben a körhintán ülőket mozdulatlanak látom. Olyat érdemes a számtalan sok lehetséges vonatkoztatási rendszer közül választani, melyben a mozgástörvények a lehető legegyszerűbb alakban írhatók fel. Érthető, ilyen rendszerben a legkönnyebb a mozgás leírása.

Tehetetlenségi rendszerben, vagy idegen eredetű szóval inerciarendszerben a mozgás tárgyalása valóban nagyon könnyű. Vegyünk egy magára hagyott testet, azaz egy olyat, amelyre semmilyen más test nem hat. Tehetetlenségi rendszerben ez a szabad, azaz magára hagyott test vagy nyugszik, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Ha tehetetlenségi rendszerben egy test nem ilyen mozgást végez, akkor valamelyik más test biztosan hatással van rá. Különböző tehetetlenségi rendszerek egyenesvonalú egyenletes mozgással mozoghatnak egymáshoz képest.

Galilei-féle relativitási elv. Ha valamely tehetetlenségi rendszerben egy test szabad testként viselkedik, akkor valamennyi más tehetetlenségi rendszerből is szabadnak látjuk. Azt tapasztaljuk, hogy a tehetetlenségi rendszerek nemcsak a szabad, hanem bármilyen más mozgást végző test leírása számára is egyenértékűek. Például ha zárt helyiségben a fonálinga lengését vizsgálom, az inga mozgástörvénye ugyanaz lesz, függetlenül attól, hogy a helyiség ház szobája, sima vízű taven egyenletesen sikló hajó vagy egyenletesen mozgó vonat fülkéje. Zárt vasúti fülkében, ha a vonat nem gyorsul, nem végezhető olyan kísérlet, amellyel eldönthetnénk, mozog-e a vonat. A tehetetlenségi rendszerek egyenértékűségét a Galilei-féle relativitási elv mondja ki, mely szerint valamennyi természettani törvény az összes tehetetlenségi rendszerben ugyanolyan alakú. Itt a relativitás szó arra utal, hogy miközben a tehetetlenségi rendszerek a leírás szempontjából egyenértékűek, a sebesség viszonylagos fogalom. Ugyanis egy adott mozgást egymáshoz képest mozgó tehetetlenségi rendszerekből leírva, a mozgás sebessége a különböző rendszerekben más és más. Például a mozgó vonatból tekintve a vonat egy kocsijában ülő nyugalomban van, míg ugyanez az utas az állomásról nézve mozog.

Tehetetlenség. Míg egyenesvonalú egyenletes mozgás sebessége a Galilei-féle relativitási elv szerint viszonylagos, a sebesség irány és nagyság szerinti változása, a gyorsulás már nem az. Ha gyorsulunk, mondjuk körhintában, hullámvasúton vagy hirtelen fékező járművön ülve, világosan érezzük. Nem kell látnunk, mihez képest gyorsulunk. Mekkora a testek 'ellenállása' a mozgásukat változtató hatással szemben? Ezt a tömeg, ami a test tehetetlenségének mértéke adja meg. Miközben az egyenesvonalú egyenletes mozgást mindig valamihez képest viszonyítjuk, Newton arra a következtetésre jutott, hogy a gyorsuló mozgás a térhez képest gyorsuló. Ezt a teret nevezte Newton abszolút térnek. Semmitől sem függő térnek nevezhetnénk.

Abszolút tér és idő. Nem idegen tőlünk a semmitől sem függő tér fogalma, mivel hétköznapi gondolkodásunkban a tér éppen ilyen. Háromféle kiterjedése van, hosszúság, szélesség és magasság. Valaminek semmitől sem függő volta azt jelenti, hogy semmi sem gyakorolhat rá befolyást, jellemzőit, tulajdonságait nem változtathatja meg. Például egy tárgy szélességének, hosszának, magasságának mérése, ha a mérések eléggé pontosak, mindig, mindentől függetlenül ugyanakkora értékeket kell hogy adjon. Nem függhetnek a hosszak attól, honnan, milyen körülmények között, melyik módszerrel mérjük meg ezeket. Nem függhet tárgyak mérete attól sem, vannak-e a térben más tárgyak, nagyobb tömegek és hogy mik ezek, miből vannak, mozgunk-e a megfigyelt térrészhez képest vagy sem.

Hasonlóan, abszolút, azaz a semmitől sem függő idő feltételezése azt jelenti, hogy az idő is mindentől független létező. Mindentől függetlenül, mindenhol azonosan telik. Adott időtartam nem függhet attól, ki, milyen körülmények között, hogyan méri azt meg.

Mach-elv. Newton szerint a semmitől sem függő tér gyorsuláskor visszahat a testre. Így a test tehetetlensége, a forgáskor fellépő kiröpítő erő léte a semmitől sem függő térnek a testre gyakorolt hatásával magyarázható. Newton feltételezte, hogy a semmitől sem függő tér az állócsillagokhoz rögzített térnek feleltethető meg. Sokan vitatták a semmitől sem függő tér létét. Mach is elvetette ezt a szerinte megfigyelhetetlen fogalmat. A Mach-elv szerint a test tehetetlen tömege a Mindenség összes tömegének egymással való kölcsönhatásából ered. Azaz az állócsillagokhoz rögzített rendszerben mért gyorsulás az állócsillagok és más tömegek által gyakorolt erők eredménye. Miként kellene ezt pontosan érteni, Mach sem tudta szabatosabban kifejteni. A Mach-elv Einsteinre is nagy hatást gyakorolt és befolyásolta az általános relativitáselmélet megszületését.

Sebességösszeadás. A Galilei-féle relativitási elv és a newtoni mechanika az abszolút tér és idő fogalmaira épülnek. Eszerint az idő minden egyes tehetetlenségi rendszerben ugyanúgy telik. Mivel az idő és a tér abszolút, a sebességek egyszerű módon összeadhatók és kivonhatók. Tehetlenségi rendszerekben a sebességek a sebességösszeadás szabályával számíthatók át. Ezt alkalmazva, ha V sebességgel közeledik egy gépkocsi és abból a mozgás irányába v' sebességgel kidobnak egy dobozt, akkor a doboz az úthoz képest $v = V + v'$ sebességgel mozog. Ha ellentétes irányba dobják ki a dobozt, annak úthoz viszonyított sebessége $v = V - v'$. Számszerű példával, ha valaki a vonatban 4 km/óra sebességgel megy menetirányba és a vonat 60 km/óra sebességgel közeledik az állomáshoz, akkor az állomás épületéhez képest a vonaton gyalogló ember 64 km/óra sebességgel mozog.

2.1. Speciális relativitáselmélet

Éter. Ha Newton nem is tudott módszert adni az abszolút tér kimutatására, feltételezték, van olyan eljárás, amellyel az abszolút tér kiválasztható. Úgy látszott a 19. század második felében, erre az elektromágneses hullámok vizsgálata ad majd lehetőséget. Természetesnek tartották, például a vízhullámra vagy a hanghullámra gondolva, hogy a hullámok terjedéséhez kell valamilyen hordozó közeg. Feltételezték, van olyan közeg is, amelyben az elektromágneses hullámok, így a fény is terjed. Ezt éternek nevezték el. Azonosítva az abszolút teret az éterrel, az éterben való mozgás egyben az abszolút térhez viszonyított mozgás is.

Feltételezték, ha valaki fénysebességet mér, függni fog az eredmény attól, miként mozog a megfigyelő az abszolút térhez képest. Ha áll benne, akkor ugyanazt az értéket méri, mindegy milyen irányba mozog a fény. Ha viszont mondjuk észak felé mozog az abszolút térben, akkor az északnak tartó fényt lassabbnak, a délnek tartót gyorsabbnak méri. Éppen úgy, mint ahogyan az észak felé repülő madarat lassabbnak és a délnek repülő madarat gyorsabbnak látná.

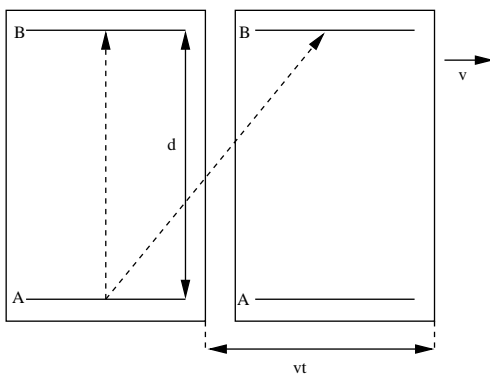
Ha a Föld abszolút térben való mozgását vizsgáljuk és csak a Nap körüli keringését tekintjük, akkor a Föld júniusban és decemberben pont ellentétes irányban mozog. Ez azt jelenti, hogy a júniusban és decemberben mért fénysebességeknek különbözőeknek kell lenniük. Nem nagy a várható különbség, csak tízez-

red résznyi, mivel a Föld mozgási sebessége a fénysebességhez képest nagyon kicsiny. Nagy megdöbbenést váltott ki, hogy a fény üres térben mérhető sebességét, bármilyen irányban, bármelyik évszakban mérték is meg, mindig, nagy pontossággal ugyanakkorának találták. Azaz fényre a sebességösszeadási szabály nem teljesül. Eleinte kételkedtek a fenti mérések hitelességében. Később megkísérelték a fény sebességének állandóságát a newtoni természettan keretén belül valahogyan értelmezni, de ez nem járt sikerrel.

Lorentz-transzformáció. Nemcsak mérések utaltak a fénysebességnek állandóságára. Az elektrodinamika alapegyenleteinek, a Maxwell-egyenleteknek alakja tartalmazza a fénysebességet. Ha igaz a relativitási elv, akkor a Maxwell-egyenletek alakja valamennyi tehetetlenségi rendszerben azonos. De ekkor a fénysebességnek is azonosnak kell lennie valamennyi tehetetlenségi rendszerben. Ha egyik tehetetlenségi rendszerről másik, ahhoz képest v sebességgel mozgó rendszerre térünk át, akkor lesz azonos a Maxwell-egyenletek alakja mind a két tehetetlenségi rendszerben, ha a két tehetetlenségi rendszer tér- és idő koordinátái közötti kapcsolatot a Lorentz-transzformáció adja meg. Ha a v sebesség a fénysebességnél sokkal kisebb, akkor a Lorentz-transzformáció és a sebességösszeadási szabálynak megfelelő átalakítás jó közelítéssel azonos kapcsolatot ír le. De ha a v sebesség a fénysebességgel összemérhetővé válik, a Lorentz-transzformáció és a sebességösszeadási szabálynak megfelelő átalakítás eltérő eredményeket ad.

A fénysebesség megfigyelt állandóságát végül a speciális relativitáselmélet magyarázta meg, ezt Einstein 1905-ben fogalmazta meg. Eszerint a természettörvények valamennyi tehetetlenségi rendszerben azonos alakúak. Véges a kölcsönhatások terjedési sebessége és ez a sebesség éppen a fénysebesség, amelynek értéke egyetemes természeti állandó, nem függhet vonatkoztatási rendszertől. Semmi sem mozoghat a fény terjedési sebességénél gyorsabban. Bár a tömeggel rendelkező test sebessége ugyan tetszés szerint közelíthet a fénysebességhez, de azt sohasem értheti el.

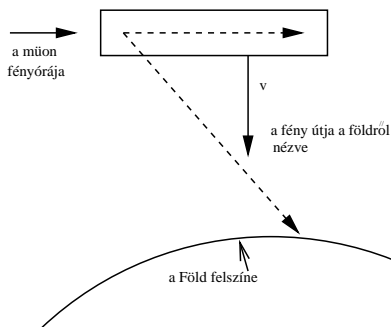
Einstein speciális relativitáselméletében a fénysebesség állandósága a Lorentz-transzformáció érvényességével függ össze. Ha a Lorentz-transzformáció képleteit tanulmányozzuk, kiderül, nincs abszolút tér és abszolút idő. Mozgó rendszerben lassabban telik az idő és rövidebbek a rúdak. Ezzel térbeli távolság és időtartam, tér és idő viszonylagos fogalmakká váltak. Helyettük a fénysebesség abszolút, azaz mindentől független. Tér és idő viszonylagosságának kimondásával Einstein szilárdnak hitt dolgokat rendített meg, de nem csak rombolt. Olyan alapot vetett meg a fénysebesség állandóságának kimondásával, melyre azóta is lehet építeni. Eszerint bármilyen is legyen a tér és az idő szerkezete, a fénysebesség mért értéke mindenkor, mindenhol és minden irányban ugyanakkora és teljesen független a fényforrás és a fénysebesség mérését végző személy mozgásától.



1. ábra. Ha a fényóra nyugalomban van, a fény az A és B lemez között haladva d utat fut be. Ekkor a mért idő $t_0 = d/c$. Ha a fényóra v sebességgel mozog, akkor a fény az A és B között átló mentén mozog és a Pithagorasz-tétel alkalmazásával számolva $s = \sqrt{d^2 + v^2 t^2}$ utat tesz meg. Mivel a fénysebesség állandó, a derékszögű háromszög átlójának befutásához szükséges $t = s/c$ idő hosszabb lesz, mint a nyugvó rendszerben mérhető $t_0 = d/c$ idő. Könnyen kiszámítható, hogy $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ lesz, ami egyébként a Lorentz-transzformáció adta összefüggéssel egyezik meg.

Miként vonja magával a fénysebesség állandósága az esemény időtartamának viszonylagosságát, azt az 1. ábrán látható, fényórának nevezett berendezés szemlélteti. Úgy kapjuk meg a fényóra által mért időt, hogy a fény által befutott utat osztjuk a minden körülmények között ugyanakkora fénysebességgel. Ha a fényóra mozog, akkor a megfigyelő számára a fény hosszabb utat fut be. Emiatt a megfigyelő órája többet mutat. Ez azt jelenti, hogy mozgó rendszerekben lassabban telik az idő.

A müonok életideje és az általuk befutott út. Nézzünk példaként a fényóra által szemléltetett viselkedésre a magasban keletkezett müonok élettartamát. Átlag 20 kilométer magasságban találunk el egy atommagot a világűr távoli tartományaiból érkező sugárzás nagyon nagy energiájú protonjai és ilyen ütközésekben fénysebességhez közeli sebességgel mozgó müonok is képződnek. Mi a Föld felszínén észleljük őket. Bomlékony részecskék, átlagosan $2,2 \cdot 10^{-6}$, azaz 2,2 milliomod másodpercig létezhetnek. Ha a 20 kilométeres utat a talaj szintjéig csaknem fénysebességhez közeli sebességgel teszik is meg (sebességük a fénysebességet nem érheti el), akkor a fenti élettartam alatt legfeljebb 660 métert repülhetnének. Ennek ellenére, befutva a 20 km körüli távolságot, lejutnak hozzánk. Ez az eredmény nem függ attól, hogy ezt az utat függőlegesen teszik meg. Ha hasonló sebességű müont itt gyorsítóban állítanánk elő, ugyanilyen eredményt kapnánk. Itt talajszinten is be tudja futni a 20 kilométeres távolságot. Ha a müon lassú, élettartamára a fent megadott $2,2 \cdot 10^{-6}$ másodperces értéket mérjük.



2. ábra. Ha a v sebességgel lefelé mozgó müon az időt fényórával méri, látszik, hogy a saját rendszerében, - neki az időt a vele együtt mozgó fényóra méri - a fény sokkal rövidebb utat fut be (vízszintes szaggatott vonal), mint a Föld felszínéről nézve (ferde szaggatott vonal). Ezért a földi megfigyelő ugyanannak az eseménynek az időtartamát jóval hosszabbnak méri. Ez is mutatja, hogy a mozgó rendszerben az események lejátszásához több idő szükséges, azaz mozgó rendszerben az idő lassabban telik.

Azért észleljük a világútból érkező sugárzás által keltett müonokat, mert mialatt a mi óránkon kb. 60 milliomod másodperc telt el, a $v = 0.999c$ sebességgel mozgó müon "saját" óráján (ez vele együtt mozog, tehát amely hozzá képest mozdulatlan) eltelt idő ennek csupán 1/30-ad része, 2 milliomod másodperc, lásd a 2. ábrát. Ez annak a megnyilvánulása, hogy egy esemény időtartama viszonylagos. Attól függ, mekkora sebességgel mozgó rendszerből méri.

Négykiterjedésű (négydimenziós) tér. A relativitáselmélet matematikai leírása a három térbeli kiterjedéshez igen hasonló módon kezeli az időt. Ezért érdemes bevezetni az ún. négykiterjedésű (négydimenziós) téridő fogalmát. Ezt Minkowski tér néven is emlegetik. Háromkiterjedésű (háromdimenziós) tér egy pontja három koordinátával, az x, y, z értékeivel jellemezhető. Négy értéket kell ismernünk a téridő egy pontjának megadásához, az x, y, z koordináta mellett szükség van a t idő ismeretére is. A négykiterjedésű téridő koordinátái: x, y, z, ct (c a fénysebesség). Ebben a térben a négy koordináta egyenrangú. Ne értsük félre, ct nem a tér negyedik dimenziója, hanem a téridő egyik kiterjedése. Tér és idő számunkra nyilvánvalóan különböző fogalmak, csak a természettani leírás fonja őket össze. Azért érdemes négykiterjedésű térben dolgoznunk, mert az itteni mértani mennyiségek, négykiterjedésű vektorok, azoknak hosszai, jól használhatóak a természettani leíráshoz.

Négykiterjedésű téridőben a fénysebesség állandóságának követelménye könnyen tárgyalható. Nem csupán az a négykiterjedésű tárgyalás haszna, hogy könnyű benne megfogalmazni a fénysebesség állandóságát. Valamennyi természetani mennyiséget négykiterjedésű vektor összetevőjeként kezel. Megmutatható, hogy a lendület vektor 3 dimenziója mellé rendelhető negyedik kiterjedés az energia. Ebből a kapcsolatból következik a tömeg és az energia egyenértékűségét kifejező összefüggés, az $E = mc^2$ képlet is. Míg korábban az energia és a tömeg megmaradása egymástól függetlenül, külön-külön érvényes törvényszerűségek voltak, a négykiterjedésű tárgyalás megmutatta, hogy csak egyetlen megmaradási törvényről lehet szó. Mivel az energia alapvetőbb mennyiségnek tartható, csak az energia megmaradásának törvényéről beszélünk. De az energiák számbavételénél figyelembe kell venni a tömegeknek megfelelő $E = mc^2$ energiákat is.

2.2. Általános relativitáselmélet

Arra utal a speciális jelző a speciális relativitás elmélete kifejezésben, hogy ez az elmélet csak akkor alkalmazható, ha a tömegvonzási hatások elhanyagolhatóak. Bevéve a tárgyalásba a tömegvonzást is, Einstein 1916-ban tette közzé általános relativitáselméletét. Ez a leírás térről, időről alkotott fogalmainkat ha lehet, még erőteljesebb módon változtatta meg. Egyben a tömegvonzás általános elmélete is az általános relativitáselmélet, a négykiterjedésű téridő és a tömegek kapcsolatát tárgyalja. Kiindulópontja az ekvivalencia elv.

Ekvivalencia elv. Most is vonatkoztatási rendszerek egyenértékűségét taglaljuk. Kétféle vonatkoztatási rendszert vetünk össze. Egyik egy tehetetlenségi rendszer. A másik egy nagy tömeg felé szabadon eső rendszer, mondjuk egy zuhanó felvonó. Szabadeséssel zuhanó felvonóban a tárgy súlytalanná válik, mivel nem hat rá erő. Tárgyaltuk, a tehetetlenségi rendszerben mint viselkedik a magára hagyott test. Mind a tehetetlenségi, mind szabadon eső rendszerben a magára hagyott test vagy áll, vagy egyenesvonalú, egyenletes mozgást végez. Feltehetően az azonos viselkedés a kétféle rendszerben nemcsak a magára hagyott test esetére igaz. Einstein éppen ezt mondta ki:

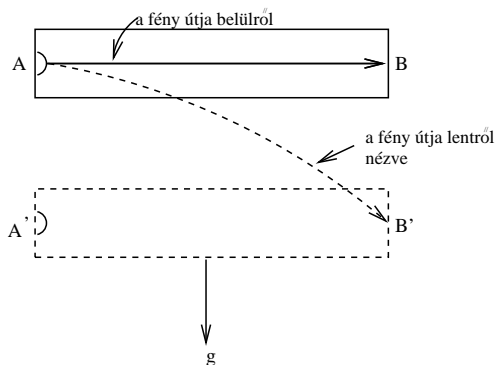
- Kisméretű, szabadon eső rendszerben a természetan törvényei ugyanazok lesznek, mint a tehetetlenségi rendszerben. Lehet a szabadon eső rendszer valahol a Földön, akár a Tejútrendszer középpontjában, vagy egy fekete lyuk közelében, bárhol a Világmindenségben.

Ha a tehetetlenségi és a szabadon eső rendszer egyenértékű, a rendszeren belüli megfigyelő megfigyeléseket, kísérleteket végezve nem tudja eldönteni, hogy tehetetlenségi avagy zuhanó rendszer belsejében van-e. Mindenféle jelenség mindkét rendszeren belül ugyanúgy zajlik. Nemcsak a testek mozgásai, hanem a fényjelenségek és minden más is ugyanolyan.

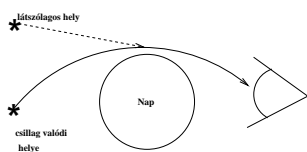
Fény gravitációs térben. Rögtön következik az ekvivalencia elvből az általános relativitáselmélet egyik legfontosabb eredménye, miszerint a fény a gravitációs térben elhajlik. Képzeljünk el egy szabadon eső kamrát, melyben valaki a kamra falánál felvillant egy zseblámpát, lásd a 3. ábrát.

Mivel az ekvivalencia elv szerint a zuhanó kamrában minden úgy zajlik, mint egy tehetetlenségi rendszerben, a fény a kamrabeli megfigyelő számára egyenes vonal mentén terjed. De a földi megfigyelő ezt úgy látja, hogy a fény a kamrával együtt esik. Mintha a fénynek is lenne tömege. Természetesen nem azért látjuk görbülni a fénysugarat, mert ott a kamra. Elgörbül a fény a nagy tömeg mellett haladva, nemcsak az ekvivalencia elv jósolja ezt, hanem elvégzett mérések is igazolják az előrejelzést. Teljes napfogyatkozáskor ellenőrizhető, hogy a Nap mellett elhaladó fénysugár elhajlik, mert az akkor a Nap mögött lévő csillagot máshol látjuk, mint ahol az éjszakai égbolton található, lásd a 4. ábrát.

Ahogy az általános relativitáselmélet kifejti, nem azért esik felénk a fény, mert tömege lenne. Egy fénysugár a legrövidebb idő alatt befutható út mentén halad. Ha elgörbülni látjuk, ott a tér mértana más, mint a megszokott euklidészi mértan. Ilyen másféle mértan az ún. gömbi mértan, például a gömb felületére rajzolt háromszög szögeinek összege nagyobb, mint 180 fok.



3. ábra. Elhajlik a fény a gravitációs térben. Szabadon eső kamrában az A pontban felvillan egy zseblámpa. Mivel az ekvivalencia elv szerint a zuhanó kamrában minden úgy zajlik, mint egy tehetetlenségi rendszerben, a fény az A és B pontok között egyenes vonal mentén terjed. Ezt a földi megfigyelő viszont úgy észleli, hogy a fény az A és B' pontok között haladva a kamrával együtt szabadon esik.



4. ábra. Fényelgömbülés a Nap körül. Ilyen elgömbült fénysugarat a Földön akkor láthatunk, ha napfogyatkozáskor egy, a Nap által csaknem vagy teljesen elfedett csillag helyzetét határozzuk meg.

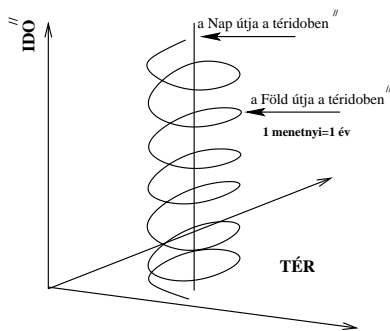
2.2.1. Tér-időgörbület

Einstein általános relativitáselmélete szerint a fény azért hajlik el a nagy tömeg körül, mert a tömegek elgömbítik a négykiterjedésű téridőt. Azaz a térben lévő tömeg határozza meg a téridő milyenségét, hogy a tér miként gömbüljön, milyen legyen a mértana. Görbültté teszi a tér mértanát a Nap tömege is, ezért látjuk elhajlottnak a fénysugár útját. Miközben az anyag mondja meg a téridőnek, miként gömbüljön, a téridőgörbület, amely a gravitációnak is a forrása, mondja meg az anyagnak és a fénynek, miként mozogjon. Nagyság és irány szerint is változik a tömegek által létrehozott téridőgörbület, a tömegtől távolabb a téridőgörbület kisebb.

Hogy milyen az adott anyageloszlásnak megfelelő téridő, az Einstein-egyenletek segítségével számítható ki. Ezek az egyenletek nagyon bonyolultak, nehéz velük bánni. Bizonyos egyszerűbb anyageloszlásra könnyebben megoldhatók és jó közelítő eljárásokat használhatunk. Két esetet tárgyalunk, először a gömb alakú tömeg által görbített téridőt, majd az egyenletes anyageloszlás térídejét.

Gömb alakú tömeg téridőt görbítő hatásai - tömegvonzás. Nemcsak a fény, hanem a tömegek mozgását is a téridő görbülete szabja meg. Fény és tömegek a görbült téridő 'egyenesei' mentén mozognak, ezeket geodetikus vonaloknak nevezik. Azaz a tömegvonzás is a téridő görbületével függ össze. Hangsúlyozni kell, a tömegek a téridő szerkezetét befolyásolják. Tévedés azt gondolni, hogy a tömeg csak teret görbít. Nem azért mozog a Föld Nap körüli ellipszis pályán, mert a Nap tömege így görbítette maga körül a teret mivel a Nap tömege a téridőt görbíti. Nézzve a teret, a Nap a térbeli koordinátarendszer kezdőpontjában marad ugyan, de az időben a ct tengely mentén mozog, méghozzá egy év alatt fényévnnyi. Ezalatt a Föld a térben egy kb. 150 millió kilométer, azaz 8,5 fényperc sugarú pályán kering, miközben a ct tengely mentén szintén fényévnnyi utat tesz meg, lásd a 5. ábrát.

Könnyen elképzelhető, a Föld csavarmenethez hasonló pályán mozog a téridőben. Ez a Nap által elgömbített téridő geodetikus vonala. Látható, a Nap által létrehozott téridőgörbület, mely mentén a Föld mozog, igen kicsiny, 8,5 fénypercnyi görbület fényévnnyi távolságon. Kicsiny téridőgörbületek számításakor az általános relativitáselmélet nagyon jól közelíthető azzal, hogy elhagyjuk a négykiterjedésű téridőt,



5. ábra. Földünk a téridőben a Nap tömege által meghatározott téridő görbület mentén, geodetikus vonal mentén mozog. Maga a Nap a térbeli koordináta rendszer kezdőpontjában ugyan nyugszik, de a téridő negyedik tengelye, a ct tengely mentén fénysebességgel mozog, egy év alatt fényévnnyit tesz meg. Ezalatt a Föld a térben a kb. 8,5 fényperc sugarú körpályán is mozog - ekkora a Nap-Föld távolság -, miközben a ct tengely mentén szintén fényévnnyit tesz meg.

csak a szokásos háromkiterjedésű térben és az időben számolunk valamint bevezetjük a térben lévő tömegek között a newtoni tömegvonzási erőt. Innen látható, hogy a tömegvonzási erő a téridő tömegektől való függésének közelítő leírásából ered. Ezzel a tömegvonzást mint mértanhoz köthető hatást értelmezzük.

Naprendszerünk bolygóinak pályáit a newtoni tömegvonzással való közelítés nagyon jól leírja, kivéve a Merkúr mozgását. Annál nagyobb a Nap által létrehozott térgörbület, minél közelebb vagyunk a Naphoz. Annyira közel van a Merkúr a Naphoz, hogy az ottani téridőgörbület már nem mondható elég kicsinynek. Emiatt a Merkúr pályamozgását a newtoni tömegvonzási erő már nem adja vissza pontosan. Amint a Merkúr napközbe kerül, mintha egy újabb, az előzőtől különböző ellipszis pályára térne át. Nagyjából úgy néz ki a Merkúr pályamozgása, mintha virág szirmai mentén haladna és a virág középponti térségéhez érve - napközben - egyik szirmról a másikra csúszna át. Ilyen pályának számításához már szükség van az általános relativitáselmélet pontosabb közelítéseire is. Ez volt az általános relativitás elméletének első megfigyelhető bizonyítéka. Einstein egyenletei pontosan le tudták írni a Merkúr különös pályáját.

Gömb alakú tömeg téridőt görbítő hatásai - idő lassulása. Ha a gravitációs tér nagyobb, az általános relativitáselmélet szerint lelassulnak a rezgések. Minél közelebb kerülünk egy tömeghez, annál jobban lelassulnak a mozgások, rezgések, azaz lassabban telik az idő. Emiatt az óra a Föld felszínén lassabban jár, mint a világűrben. Ez nem függ az óra fajtájától, nemcsak az órák tulajdonsága, nem ezek szerkezetének, működési elvének következménye. Egyszerűen az idő telik máshogyan.

Jól egyeznek a tapasztalattal az általános relativitáselmélet eredményei, előrejelzéseit a mérések eredményei kielégítő módon igazolják. Például sikerült kimutatni, hogy itt a Földön felfelé menve az órák gyorsabban járnak. Egy igen érzékeny magfizikai jelenséget, a Mössbauer effektust kihasználva megmérték, hogy egy 10 méterrel magasabban lévő helyen az általános relativitáselmélet által megjósolt módon telik gyorsabban az idő. Megjegyezzük, bár az idő nagyobb magasságokban gyorsabban telik, ez a különbség az ember, mint élőlény számára elhanyagolhatóan kicsiny. Azt sem mondhatjuk, ha nagyobb magasságokba emelkedünk, már észrevehetőbb lesz az idők telése közötti különbség. Csillagoktól, nagy tömegektől távol az idő milyenségét a világegyetemben nagyjából egyenletesen eloszló csillagok, csillagrendszerek tömegeloszlása határozza meg. Ezt az időt nevezhetjük "világidőnek". Tömegekhez közelebb ehhez képest lassabban fog telni az idő. Ennek fontos gyakorlati következményei is vannak. Ha a világűrben működő műholdak jeleit vizsgáljuk, azokat értékeljük, figyelembe kell venni, hogy itt és fenn az órák máshogy járnak. Ha erről megfeledkeznénk, komoly hibákat követnénk el a műholdas azonosítások pontosságát, a földi tárgyak, például az ellopott járművek helyzetének meghatározását illetően.

Az M tömegű gömb által meghatározott téridő fontos jellemzője az $r_c = 2GM/c^2$ Schwarzschild sugár, ahol G a gravitációs állandó. Ha az M tömegű test a hozzá tartozó Schwarzschild sugár belsejében tömörödik össze, akkor körülötte a téridő annyira meggörbül, hogy a test láthatatlanná válik, mert még a

fénysugár sem hagyhatja el. Ekkor beszélünk fekete lyukról. Fekete lyukakkal a csillagfejlődés tárgyalásakor foglalkozunk majd.

Téridő egyenletes anyagsűrűség esetén. Einstein általános relativitáselméletének alapegyenletei alkalmasak arra, hogy a világegyetem egészének viselkedését is leírják. Mivel a világegyetemet a csillagok, így az anyag nagyjából egyenletesen töltik ki, a világegyetem jó közelítésben durván egy végtelen, anyaggal egyenletesen kitöltött tér. Erre az esetre az Einstein-egyenletek megoldása azt mutatja, hogy állandó állapotú világegyetem nem létezhet. Vagy tágul, vagy összefelé húzódik a világegyetem, köztes, állandó állapot nem lehetséges.

Einsteint mélyen megdöbbenette, hogy elmélete nem adja vissza a newtoni állandó világegyetemet. Akárcsak mindenki más, Einstein is nagyon hitt a mindenség állandóságában. Einstein elrontva egyenleteinek szépségét, bevezette az ún. kozmológiai állandót, amely tömegek közötti taszítást ír le. De hamarosan kiderült, hogy a kozmológiai állandóval kibővített általános relativitáselmélet sem képes igazából állandó állapotú világegyetem leírására. Még a legkisebb ingadozás is képes a finoman kiegyensúlyozott világegyetem állandóságát megszüntetni és a világegyetem elkezd tágulni, vagy összefelé húzódni.

Gravitációs hullám. Mivel a téridő görbületét a térben lévő tömegek eloszlása határozza meg, a tömegeloszlás módosulása a legtöbb esetben a téridőgörbület változásával jár együtt. Ez a változás hullámszerűen, mint gravitációs hullám, fénysebességgel terjed. Gravitációs sugárzasként, a gravitációs hullámok energiaként észlelhető, hasonló az elektromágneses sugárzáshoz. Ha a Nap ebben a pillanatban eltűnne, annak a hatását, a Föld szabaddá válását 500 másodperc múlva észlelnénk, ennyi idő alatt ér a napfény hozzánk. Gravitációs hullámforrás a bolygók mozgása miatt a Naprendszer is, ám ezek a hullámok nagyon gyengék a kettőscsillag által kibocsátott sugárzáshoz képest, ahol két csillag kering egymás körül. További fontosabb gravitációs hullámforrás a szupernovarobbanás. Előfordulhat, bár nagyon ritkán, hogy két ütköző csillag egymásba olvad, ezek esetén lehet a keletkezett gravitációs hullám a legerősebb.

Eddig csak közvetve sikerült tudomást szerezni a gravitációs hullámok létéről. Sok éven át figyelve egy kettőscsillag viselkedését, sikerült megmérni, hogy közben gravitációs sugárzásban vesztett energia miatt miként változott meg keringésük ideje. A megmért és a kiszámolt energiavesztés pontosan megegyezik és a felfedezőket 1993-ban Nobel-díjat kaptak. Reménykedhetünk, hogy a most készülő, majdan a világűrbe telepített lézerefényes mérőberendezéssel sikerül a gravitációs hullámokat közvetlenül is kimutatni.

A relativitáselmélet fogadtatása. Nem lehet mindent gépiesnek gondolni, nem gépezet a világ, ez a speciális relativitáselmélet egyik fontos eredménye. Ha minden gépezet, akkor valamennyi hatás kapcsolódások, rezgések által terjed. De nincs éter, a tér, amiben a fény terjed, az üres tér, nem pedig az éter. Bár a fény hullámként terjed, mégsem kell hozzá hullámot hordozó közeg, amelynek 'fodrozódásaként' terjedne. Mivel a fény terjedéséhez nincs szükség ilyen rezgést továbbadó közegre, a mindent gépies működésként értelmező szemlélet tarthatatlanná vált.

Másfajta hatása is van a relativitás elvének és a nagyközönség gondolkodását ez határozta meg. Akik értik az elméletet tudták és tudják, Einstein valójában azt fogalmazta meg, hogy létezik mindenféle vonatkoztatási rendszertől független, alapvető igazság. Ez elméletében a fénysebesség állandósága. Igaz, ezzel együtt abba is bele kellett törődni, hogy a idő és tér fogalma viszonylagos. De a kívülállók nem értették meg, mit jelent a relativitás szó Einstein elméleteiben és lassan mindennek értékét viszonylagosként fogták fel. Minden relatív, semmiben sem lehetünk biztosak, mindenben kételkedni kell, ez a felfogás egyébként is kezdett általánossá válni és a relativitáselmélet csak erősítette ezt a nézetet.

Relativitáselmélet és newtoni fizika. Ha a speciális relativitáselmélet egyenleteit megvizsgáljuk, látható, hogy csak akkor adnak a newtoni törvények adta leírástól eltérő eredményeket, ha a vizsgált jelenséget jellemző sebességek elég nagyok. De ha a jellemző sebességek a fénysebességhez képest elhanyagolhatóan ki-

csik, akkor a speciális relativitáselmélet és a newtoni törvények egyező eredményre vezetnek. A természeti jelenségek nagy többségének és a mindennapi életre jellemző jelenségeknek leírására ezért változatlanul nyugodtan használhatjuk a newtoni törvényeket.

Hasonlóan, ha a tömegek nem túl nagyok, az általános relativitáselmélet által leírt téridőgörbítő hatások a tömegvonzási erő segítségével nagyon jól közelíthetőek. Csak a világmindenség egészének és bizonyos égitesteknek leírásakor és néhány nagyon finom, de adott esetben fontos földi jelenség esetén válik szükségessé az általános relativitáselmélet egyenleteinek tényleges alkalmazása.

3. Törvények és szimmetriák

A jelenség leírása és a törvény. Ha a világ valamennyi dolga, történése be lenne írva egy nagy könyvbe, vagy CD lemezre lenne felvíve, akkor igazából nem volna szükségünk a természet törvényeinek ismeretére. Bármilyen érdekelne bennünket, ki tudnánk keresni, meg tudnánk nézni, mi hogyan történik. Ez igazából csak elvileg volna így, hiszen a felmérhetetlenül sok ismeret olyan óriási adathalmazt tenne ki, amelyet nagyon nehezen tudnánk kezelni. Például a Hold pályájának a részletes leírása is könyveket tölthetne meg. Azért is szükséges tehát ismerni a természet törvényeit, mert az adathalmaz túl nagy lenne. Nézve a newtoni mozgástant, elég, ha a Hold helyzetét és sebességét csak egy adott pillanatban ismerjük. Ebből kiindulva a Hold pályája bármely jövőbeni vagy múltbeli időpontra meghatározható. Ezért a jelenség leírását megadó adathalmaz felesleges, ha ismerjük a megfelelő törvényt, amelynek segítségével bármit ki tudunk számítani, ami szükséges.

Sokszor viszont nem ismerjük a törvényeket. Ezért hasznosak az olyan elvek, amelyeknek segítségével csökkenthetjük az adathalmaz méretét. Ilyen elvek a szimmetriaelvek. Szimmetrián azt értjük, amit a mindennapi életben is. Arcunk szimmetrikus mert az arcélünket jobbról vagy balról nézve ugyanaz látható. Egy kocka már magasabb rendű szimmetriát mutat, mert az átlók és a lapok középpontja felől nézve is ugyanazt láthatjuk. Legerősebb ilyen jellegű szimmetria a gömbbé. Bármely, a középpontján átmenő tengely irányából nézzük a gömböt, ugyanazt észleljük. Ha egy tökéletes kristályt belülről szemlélünk, akkor ugyanolyannak látjuk, ha egy adott helyről nézzük, vagy ha onnan megfelelő irányba bizonyos lépésekben elmozdulunk. Látható, a szimmetriák csökkentik a jelenség jellemzéséhez szükséges adatok számát.

Törvények, szimmetriák és egyszerűség. Kiterjesztették a szimmetria fogalmát a fenti egyszerű mértani értelmezésen túlra is. Egyenlet szimmetriájáról akkor beszélünk, ha bizonyos matematikai átalakítás elvégzése után az egyenletek alakja változatlan marad. Például az $y = x^2$ egyenlet alakja ugyanaz marad az $x \rightarrow -x$, tükrözésnek nevezett átalakítás után. Szakkifejezést használva az egyenlet invariáns a tükrözéssel szemben. Egy invariancia megszorítást jelent az egyenlet alakjára. Például a tükrözéssel szembeni invariancia az $y = x^2 + x$ egyenletre nem igaz, mivel ez a tükrözés után az $y = x^2 - x$ egyenletbe megy át. Minél több átalakítással szemben invariáns az egyenlet, alakja annál inkább rögzített.

Segít a szimmetriák felismerése törvények alakjának meghatározásában is. Egy szimmetria a törvényt megadó egyenlet alakjára jelent megszorításokat. Léte az egyenletet áttekinthetőbbé, szabályosabb alakúvá, mondhatni szebbé teszi. Miközben a törvények alakját keressük, a szépség, a szimmetriák léte egyfajta útmutatás, ami megkönnyíti a feltevések közötti választásokat, ami akár még a kísérleti ellenőrzés előtt elveti az esélytelenebb modelleket. Egy elméleti fizikus sokkal inkább hajlamos elfogadni egy új modellt, ha az szép és egyszerű, még akkor is, ha a kísérleti megerősítés várat magára vagy egyelőre nem lehetséges. Ezért kívánatos, hogy az elmélet minél szebb, szimmetrikusabb legyen. Ne legyen benne homályos eredetű tényező, amelyet azért kell odavenni, mert a kísérleti eredmények értelmezése megkövetelik jelenlétét. Egy elmélet lehetőleg első elvekből induljon ki és ne szükség alapján toldozzuk-foldozzuk.

Maxwell, Faraday méréseit és az elektromágneses jelenségekről ismert más méréseket összegezve írta fel az elektrodinamika alapegyenleteit. Úgy találta, hogy a négy egyenletből álló egyenletrendszer szép szimmetrikus lenne, de ehhez az egyik egyenletből hiányzik egy tag. Maxwell feltételezte, hogy ennek

a tagnak ott kell lennie. Ezt belevéve közölte egyenletrendszerét, amely ezzel már szép szimmetrikus lett. Maxwell előrejelzését komolyan vették és keresni kezdték a felírt tagnak megfelelő jelenséget. Így fedezték fel az elektromágneses hullámokat, igazolva, hogy a Maxwell által feltételezett tag valóban létezik. Nem csoda, hogy ezek után az egyenletek szépsége komoly értékévé vált.

Másik fontos szempont a törvények megfogalmazásában az egyszerűség. Ha arról van szó, hogy ugyanazt két különböző módon is meg lehet magyarázni, gondolkodás nélkül azt a leírást fogadják el a fizikusok, amelyik egyszerűbb, kevesebb feltevést tartalmaz. Bonyolultabb leírásokat eleve elvetnek. Csak akkor fanyalodnak rájuk, ha az egyszerűbb valamilyen új ismeret értelmezésére alkalmatlannak bizonyul. Ezt az eljárást, vagyis a bonyolultabb eleve elvetését a középkori angol filozófus után Occam-elv vagy Occam borotva néven emlegeti a szakirodalom. Arra utal a borotva, hogy minden fölösleges szószálat el kell távolítani.

Fizikai alapegyenlet alakja és a szimmetriák. Ha egy fizikai egyenlet érzéketlen egy átalakítással szemben, azt jelenti, hogy az egyenlet alakja az átalakítás után ugyanaz marad mint volt azelőtt. Ezért átalakítás előtt és után ugyanazokat a jelenségeket írja le. Egy fizikai alapegyenlet alakjára vonatkozólag a térbeli és időbeli szimmetriákkal szembeni érzéketlenség megkövetelése komoly megszorítást jelent. Gondoljunk például, változhat-e a leírt jelenség attól, hol játszódik le. Ha nem, akkor a térben való eltolhatóság érvényes szimmetria. Ilyenkor a fizikai egyenlet változatlan kel, hogy maradjon, ha arrébb toljuk a vonatkoztatási rendszer kezdőpontját. Ez a követelmény rögzíti azt, hogy a részecskék helyzetét megadó irányszakaszok (vektorok) milyen alakban, függvénykapcsolatban fordulhatnak elő az egyenletben.

Egyszerűbb tér- és időbeli szimmetriákon kívül más szimmetriákat is elvárhatunk, például megkövetelhetjük még a relativitáselméletnek megfelelő viselkedést is. Ez utóbbi azt vonja magával, hogy az előforduló tér és idő változók a négykiterjedésű tér változóinak megfelelő módon forduljanak elő. Ha a fenti szimmetriákkal szembeni érzéketlenségen kívül még azt is kikötjük, hogy az egyenletek emellett a lehető legegyszerűbbek legyenek, máris megkapjuk a szabad részecskék mozgását leíró newtonii és kisvilágtani mozgásegyenleteket! Köztük a kvantummechanika egyik alapegyenletét, a Dirac egyenletet is. Azaz olyan sok megszorítást adtunk, hogy azok már megadták a természettani alapegyenletek alakját.

Léteznek a mértani szimmetriákon kívül még elvontabb szimmetriák is, valamennyi lehetséges, az egyenlet alakját változatlanul hagyó átalakítás ilyen szimmetriának felel meg. Közülük csak a mértani műveletekhez kötődőknek van szemléletes jelentésük, de néhány más, elvont szimmetria is fontos a természetben, ezeket belső szimmetriáknak nevezik.

Szimmetriák és megmaradó mennyiségek. Alapvetően fontos természettani törvények az energia, lendület, perdület, elektromos töltés és még más kevésbé ismert mennyiségek megmaradását megfogalmazó törvények. Kiderült, hogy szimmetriák és megmaradó mennyiségek között nagyon mély kapcsolat létezik. Ha a térben nincs kitüntetett pont, azaz a tér pontjai egyenértékűek, a vonatkoztatási rendszer kezdőpontjának eltolása nem befolyásolhatja a természet törvényeinek alakját. Megmutatható, hogy a lendület megmaradása a térben való eltolhatóság következménye. Ha nincs kitüntetett időpillanat, akkor egy jelenség leírása nem függhet az időszámítás kezdőpillanatának megválasztásától. Mikortól kezdjük mérni az időt, a jelenséget leíró egyenlet ezzel szemben invariáns. Kiderült, az energiamegmaradás tétele az időbeni eltolhatósággal szembeni invarianciával függ össze. Ha nincs a térben kitüntetett irány, akkor a jelenség leírása, a természettörvények alakja nem függhet attól, hogy a térben elforgatást végzünk, azaz más irányba mutatnak a koordináta-rendszer tengelyei. Ebből a megkapjuk a perdület megmaradásának tételét.

Szimmetriák fontossága. Nagy hatást gyakorolt a tudósok gondolkodására a szimmetriák és megmaradási tételek kapcsolatának felismerése. Valójában nem erőkkkel, részecskékkel, hanem szimmetriákkal takarékoskodik a természet. Úgy tűnik, az igazán alapvető tudás szimmetriákhoz köthető. Ez az eredetileg

Platón által megfogalmazott gondolat a mai részecskefizika egy talán meghökkentő, de gondolkodásunkat meghatározó eredménye. Természetesen felmerülhet a kérdés, ha a mélyenfekvő szimmetriák ennyire egyszerűek és tökéletesek, honnan a világ sokszínűsége, változatossága. Ezt részben a szimmetriákat sérülésének módjával magyarázhatjuk.

3.1. Szimmetriasértések

Magától sérülő (spontán) szimmetriasértés. A magától sérülő szimmetria felismerése a mai fizika kiemelkedő fegyverténye. Ez az egyszerű jelenség a fizika számos területén vezetett új felfedezésekre. A megsérülő szimmetria mértani eredetű vagy belső szimmetria egyaránt lehet.

Matematikailag fogalmazva meg a magától sérülést, azt mondjuk, hogy a jelenséget leíró egyenlet ugyan szimmetrikus, de az általa leírt folyamat már nem mutatja ezt a szimmetriát. Ilyen esetekben több megoldása is van az egyenletnek, azaz különféle folyamatokat, eseteket írhat le. Külön-külön egyetlen megoldás sem mutatja az eredeti szimmetriát, csak valamennyi megoldás együttese. Ez nem azt jelenti, hogy a természetben minden lehetséges megoldás megmutatkozhatna, általában csak egyetlen megoldásnak megfelelő jelenséget tanulmányozhatunk. Arra utal a magától sérülő szimmetria kifejezés, hogy az egyenlet szimmetriáját semmi sem sérti meg, a szimmetria sérülése csak úgy magától a megoldásokban jelentkezik. Lássunk erre néhány példát.

Gondoljunk el egy vacsorát, ahol a társaság kerekasztal körül foglal helyet és azt teljesen körbeülik. Mindenki előtt van teríték és a terítés rendje szerint a terítékek között ott a pohár. Mivel kerekasztal körül ülnek, kezdetben a jobb és bal irány egyenértékű, mivel mindenki számára egyaránt lehetséges jobbra vagy balra nyúlni a pohárért. Ha azonban valaki már választott, a szimmetria megsérül, mivel ezután mindenki már csak egy felől, mondjuk jobbról veheti el a poharat. Nyilvánvaló, a kezdeti szimmetriának meg kell sérülnie, valamelyik, vagy a jobb, vagy bal irányt ki kell választani.

Másik egyszerű példának vegyünk egy függőleges helyzetű, tökéletesen egyenletes szerkezetű acélszálat. Hasson rá felülről lefelé irányuló nyomóerő. Hengerszimmetrikus a rúd függőleges tengelye körül a rendszer. Ha a nyomóerő fokozódik, egy idő után a szál elgörbül, valamire kitér. Hogy merre, véletlen. Elveszett a hengerszimmetria, a sérülés itt is csak úgy magától jelentkezett.

Nemcsak az acélpálca görbülésében és más egyszerű jelenségekben sikerült szimmetria magától való sérülését észlelni. Szerephez jut a magától sérülő szimmetria az alapvető kölcsönhatások alakjának meghatározásában is.

Rejtett szimmetria. Szimmetriák sérülésével kapcsolatos másik fontos jelenség a rejtett szimmetriák fellépte. Rejtett szimmetria léte utalhat az, ha valahol sok, egymással rokon részecskével, dologgal találkozunk. Amik ugyan megkülönböztethetőek, de mégis nagyon hasonlítanak egymáshoz. Annyira, hogy akár egyetlenegy dolog különféle változatainak is tekinthetjük őket.

Erre a szimmetriára tárgyalt példáink belső szimmetriákra vonatkoznak. Ilyet példa a férfi és nő közötti különbségtétel. Igaz rájuk az 'emberi' szimmetria, mert mindkettő ember, a felcserélésük nem változtatja meg emberi mivoltukat. Hasonló módon gondolhatunk a proton és neutron közötti eltérésre is. E két részecske nagyon hasonló egymáshoz, tömegük csaknem megegyezik, csupán elektromos töltésükben különböznek. Magfolyamatokban neutron és proton, töltésüktől eltekintve, azonos módon viselkednek, a töltés is általában csak címkeként szolgál, nem tényleges különbség jelölője. Ezért a fizikusok a protont és a neutront csupán mint egyetlen, nukleonnak nevezett részecske kétféle változataként kezelik.

Kiderült, ha nem is annyira nagy a hasonlóság, de van még hat másik részecske, amik a protonhoz és neutronhoz valamint egymáshoz hasonló módon viselkednek. Ezeket a részecskéket a világűrből érkező igen nagy energiájú sugárzások kelthetik. Az ún. kozmikus záporokban lehet őket megfigyelni és nagyenergiájú gyorsítóknál is elő lehet állítani őket. Nemcsak ezt a nukleonnal rokon hat darab, hanem még

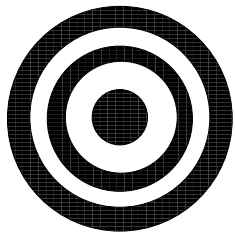
nagyon sok másféle részecskét is előállítottak és tanulmányoztak nagyenergiájú gyorsítóknak. Ezeket a rejtett szimmetriák segítségével rokonították, csoportokba rendezték. Sőt, a rendszerezés segítségével újabb részecskék létezését is meg tudták jósolni. Leghíresebb ilyen eset az volt, amikor 9 rokon részecskét már felfedeztek és látszott, ha a rendszerezés helyes, léteznie kell egy tizediknek is. Előre pontosan meg tudták mondani, melyek lesznek a keresett tizedik részecske tulajdonságai. Kutatták ezt részecskét és meg is találták. Éppen olyan, mint ahogy az előrejelzés megadta.

4. Kisvilág

Newton törvényei az érzékelhető világ leírását adják. Nagyon jól alkalmazhatóak, ha a tárgyak sebessége jóval kisebb, mint a fénysebesség, vagy ha a tömegek nem túl nagyok, vagy ha a méretek nem túl kicsik. Ha a sebességek a fénysebességgel összemérhetőek, akkor a négykiterjedésű téridővel dolgozó speciális relativitáselméleti leírással kell dolgoznunk. Ha a tömegek túl nagyok, figyelembe kell venni a tömegek téridőt görbítő hatását. Ezekkel a relativitáselméletek ismertetésekor foglalkoztunk. Newton törvényei akkor is érvényüket veszítik, ha a méretek eléggé kicsik. Egyszerűen azért, mert a világ kicsiben nem olyan, mint nagyban. Emiatt a kisvilág (mikrovilág) viselkedését másféle törvények szabályozzák, például nem beszélhetünk pálya mentén mozgó részecskéről. A kisvilág törvényeit a kisvilágtan (kvantummechanika) fogalmazza meg, ennek néhány jellegzetességét ismertetjük.

4.1. Hullámtermészet - részecskék 'fényképezése'

Nézzük, miként határozhatjuk meg, mekkora és hogyan néz ki egy nagyon kicsiny részecske. Méreteket, alakot a részecske fényképezésével vizsgálhatunk. Egy tárgyról akkor tudunk éles képet készíteni, ha a megvilágításhoz használt fény hullámhossza jóval kisebb mint a tárgy jellemző mérete. Minél kisebb a megvilágító fény hullámhossza, annál pontosabb, részletesebb képet kapunk a tárgyról. Ha a fény hullámhossza körülbelül akkora, vagy nagyobb, mint a vizsgált tárgy mérete, akkor is kapunk valamilyen képet, lásd a 6. ábrát. Ez az úgynevezett elhajlási (diffrakciós) kép alkalmas arra, ha a részleteket nem is, de legalább a tárgy méreteit, alakját meg tudjuk határozni.



6. ábra. Fényelhajlás. Ha egy lyuk mérete összemérhető a megvilágító fény hullámhosszának méretével, akkor a lyuk képe az ernyőn nem csak a korong, hanem ekörül még egy gyűrűs szerkezet is megjelenik. Ha a hullámhosszat csökkentjük, akkor a gyűrűs szerkezet először sűrűsödik, majd egy idő után elenyészik, marad csak a korong, azaz megkapjuk a lyuk pontos képét.

Nem csupán fényt, hanem tömeggel rendelkező részecskéket is használhatunk kisvilági tárgyak, mint molekulák, atomok, atommagok 'fényképezéséhez'. Ugyanis a kvantummechanika szerint részecskék is rendelkeznek hullámtulajdonságokkal. Egy m tömegű részecske hullámhossza, az ún. deBroglie hullámhossz

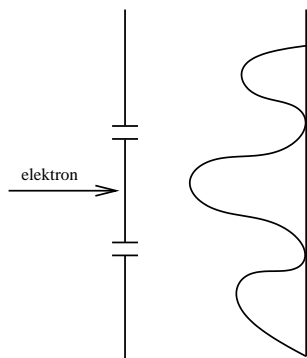
$$\lambda = h/mv \quad (4.1)$$

ahol h a kvantummechanika alapvető állandója, a Planck-állandó és v a részecske sebessége. A bombázó részecske hullámtulajdonsága a következőben is megnyilvánul. Nagyszámú részecskével bombázva a bombázott tárgy mögötti ernyőn a becsapódó részecskék sokasága ábrát rajzol ki. Ez az ábra ugyanolyan

elhajlási képet jelenít meg, mint amelyet az adott tárgyra eső, a bombázó részecske λ hullámhosszával azonos hullámhosszú fényvel kaphatnánk. Nagyobb tömegű részecskék hullámhossza, ahogyan a 4.1. képlet mutatja, kisebb, ezért minél nagyobb tömegű valami, a hullámtulajdonságai annál kevésbé jelentkeznek. Hullámszerű viselkedést csak a legkisebb tömegű részecskéktől, például elektronoktól várhatunk.

Parányi, atommagot és annál kisebb méreteket lefényképezni képes fény előállítására nagyon kis hullámhosszú, azaz nagyon nagy energiájú elektromágneses sugárzás létrehozását igényelné, ami igen nehéz feladat. Ennél könnyebb a megfelelően nagyon kis hullámhosszú, így nagy sebességű, azaz nagy energiájú részecskék előállítására. Elektronok hullámtulajdonságát felhasználó fényképező berendezés az elektronmikroszkóp is, amely felgyorsított elektronokat használva készít felvételeket. Nagysebességű részecskenyalábokat gyorsítóknak hoznak létre. Egyre nagyobb energiájú gyorsítókkal egyre kisebb hullámhosszú részecskéket kaphatunk, így a vizsgálandó dolgokról egyre jobb felbontású felvételeket tudunk készíteni. Ha egy részecskét pontszerűnek tekintünk, azt jelenti, hogy a világ legnagyobb energiájú gyorsítójának nyalábját használva sem látszik a mérete, azaz kisebb, mint amekkorát a gyorsítóval még észlelni lehet, 'meg lehet látni'.

Interferencia - kétréses kísérlet. Elektron vagy más részecske hullámszerű viselkedését nemcsak az akadályon való elhajlás jelensége mutatja, hanem interferenciára való képességük is. Képzeljünk el, elektronnyalábot lövünk lemezre, melyen két vékony párhuzamos kis rés található. Tegyük a lemez mögé egy filmet, melyen a becsapódó elektron foltot hagy. Ha egy idő után megnézzük, milyen kép keletkezett a filmen az elektronnyalábbal való bombázás után, a következőt látjuk.



7. ábra. Kétréses interferencia. Kétlyukú lemezen elektronok haladnak át. Ugyanolyan eloszlási képet hoznak létre a lemez mögötti filmen a becsapódó elektronok, mint amelyet a kétlyukú lemezen átjutó azonos hullámhosszú fény hozott volna létre.

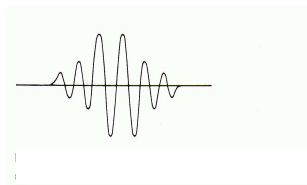
A két résen átjutó elektronnyaláb a lapon pontosan olyan képet rajzol ki, mintha egy fényforrással világítottuk volna meg a két rést tartalmazó lemezt. Akár az áthaladó fény, az elektronnyaláb is interferenciaképet hoz létre, lásd a 7. ábrát. Most az elektronok tényleg hullámként viselkednek, a lapon megjelenő kép a két résen áthaladó hullám interferenciájaként jelenik meg, akár csak a fénysugárral végzett kísérlet esetén. Ez alátámasztja deBroglie elképzelését, miszerint részecske is viselkedhet hullámként. Ha fényérzékeny lap helyett elektronokat számláló apróbb csövek sokaságát helyezünk oda érzékelőként, akkor is ugyanezt az eloszlási képet kapjuk, csak a feketedések helyett a becsapódások sűrűsödései rajzolják ki a hullámszerű viselkedést mutató interferenciaképet.

Tegyük fel, gyengítjük az elektronnyalábot. Ugyanannyi elektront lövünk rá a két rést tartalmazó lemezre, de mivel az elektronnyalábban másodpercenként kevesebb elektron repül, hosszabb ideig tart a kísérlet. Ám a lemez mögötti elektroneloszlás képe ezzel nem változik meg. Akkor is ugyanaz marad az interferenciakép, ha annyira lecsökkentjük az elektronnyaláb erősségét, hogy egyszerre csak egy elektron haladhat át a lemez résein keresztül. Tehát a megfigyelt jelenség csak azzal magyarázható, hogy az elektron úgy kerül a lemez mögé, mintha hullámként jutna át a két résen. Ez felfoghatatlan, mivel az elektron pontszerű, ezért vagy az egyik, vagy a másik résen kell átmennie. Ha viszont bármilyen módon meghatározható, melyik résen ment át az elektron, a lemez mögött észlelt kép más lesz. Ekkor olyan eredményt

kapunk, mintha az elektron részecskeként, golyóként ment volna át. Most a lemez mögötti eloszlás nem mutatja a hullámokat jellemző interferenciaképet, a két résen átjövő golyók eloszlásainak egyszerű összege lesz.

Tankönyvekben eddig erre az a magyarázat szerepelt, hogyha meghatározzuk, melyik résen halad át az elektron, feltétlen befolyásoljuk az elektron viselkedését, mert a mérés közben valamennyi lendületet adunk neki. Az interferenciakép eltűnését a mérés okozta zavarnak tulajdonították. Ez a magyarázat hamis. Egy nemrég végzett mérésben olyan finom módszert alkalmaztak a résen áthaladó elektronok áthaladási helyének meghatározására, hogy az áthaladó elektronok lendületét alig befolyásolták. Most is eltűnt az interferenciakép, de nem azért, mert nagy volt a közölt lendület, hanem egyedül csak azért, mert meghatározták, hol mentek át az egyes elektronok.

Hullámcsomag, fény részecsketermészete. Ha hullámként viselkedik valami, kérdés lehet, milyenek a hullámvonulat méretei. Arra utal a hullámcsomag kifejezésben a "csomag", hogy a méretek végesek.



8. ábra. Hullámcsomag. Véges méretű hullámvonulat különböző rezgésszámú hullámok megfelelő módon való összekeveréséből alakul ki.

Hullámok összegzésének matematikai tulajdonságait vizsgálva a következő derül ki. Adott rezgésszámú hullám végtelen kiterjedésű, azaz a térben mindenütt jelen van, úgy, mint a szinuszhullám. Lehetséges viszont véges méretű hullámvonulatot is előállítani, ha különböző rezgésszámú hullámokat megfelelő módon keverünk, lásd a 8. ábrát. Ekkor a hullámok, egy adott térrészen kívül mindenütt másutt kioltják egymást. Minél jobban kiszélesedik a keveréshez használt rezgésszámok sávja, annál kisebb méretű lehet a hullámcsomag. Fordítva, minél határozottabb rezgésszámú a hullámvonulat, hullámcsomagja annál kiterjedtebb.

Egy gerjesztett atom által kisugárzott fény véges hosszúságú hullámvonulat. Ez a fotonnak nevezett fényadag a térben fénysebességgel mozgó hullámcsomaggént terjed. Emiatt a kisugárzott fény rezgésszáma nem pontosan meghatározott értékű, hanem sávva szélesedett. Ha a gerjesztett atom életideje t , ami közelítőleg a kisugárzási időtartamnak felel meg, akkor a foton mérete, a hullámcsomag hozzávetőleges hossza ct . Ha az atomi átmenet élettartama 10 nanoszekundum, a kisugárzott foton hullámcsomagja kb. három méter hosszú. t ideig tartó kisugárzás esetén megmutatható, a kisugárzott fény f rezgésszámának bizonytalansága $\delta f = 1/t$. Az f rezgésszám bizonytalansága egyúttal megadja azt is, mekkora a foton $p = hf/c$ lendületének a bizonytalansága, ahol h a Planck-állandó. Ha a hullámcsomag ct hosszát és lendületének $\delta p = h\delta f/c$ bizonytalanságát összeszorozzuk, eredményként épp a Planck-állandót kapjuk.

Láthatjuk, mit jelenthet a fény részecsketermészete. Tűzből, izzóból, a Napból és máshonnan érkező fény mind atomok által kibocsátott fotonokból áll, amelyek energiával, lendülettel, perdülettel rendelkező hullámcsomagok. Ha beleütköznek valamibe, akkor energiát, lendületet, perdületet hordozó részecskéhez hasonlóan hatnak kölcsön.

Egy részecske térbeli viselkedését hullámtermészetének megfelelően, akárcsak a fény esetén a fotonokat, hullámcsomaggal írjuk le. Szabad elektron térbeli terjedését a 8. ábrán látható hullámcsomag mozgásával jellemezhetjük. Atomba kötött elektron térbeli viselkedését az atom térfogatán belül kialakuló, állóhullámhoz hasonló alakú 'csomag' jellemzi.

4.2. Határozatlansági összefüggés

A kvantummechanikai leírás fontos jellemzője a határozatlansági összefüggések léte. Amit fent a hullámcsoport hosszára és rezgésszámának bizonytalanságára levezettünk, a fotonra felírt határozatlansági összefüggésnek felel meg. Mivel a részecskéknél is van hullámtermészete, határozatlansági összefüggések rájuk is érvényesek. Például az atomban lévő elektronnak nincs egyszerre pontosan helye és lendülete, ezért nem lehet az elektronnak az atomban pályája sem. Helyét ugyan tetszőleges pontossággal megismerhetjük, de akkor nem tudhatjuk, mekkora az elektron lendülete. Hasonlóan, lendületét ugyan tetszőleges pontossággal megismerhetjük, de akkor nem tudhatjuk, hol van az elektron. Ha egyszerre határozzuk meg a helyet és a lendületet, akkor a két mennyiség pontatlanságának szorzata meg kell hogy haladja a h Planck-állandó nagyságát.

Nem csak a helyre és a lendületre, hanem más fizikai mennyiségek párojaira is léteznek határozatlansági összefüggések. Későbbiekre tekintettel a legfontosabb a folyamat időtartamára és energiabizonytalanságára vonatkozó határozatlansági összefüggés. Fotonra a fenti összefüggéseket felhasználva megmutatható, hogy a foton kibocsátási idejének és a foton energiabizonytalanságának a szorzata éppen a h Planck-állandó. Hasonlóan kapható, hogy bármely folyamat élettartamának és energiabizonytalanságának a szorzata nem lehet kisebb, mint a h Planck-állandó.

Van-nincs (virtuális) részecskék. Az állapot energiabizonytalanságára és élettartamára vonatkozó kapcsolat képtelen jelenségeket is megenged. Eszerint még az energiamegmaradás is megsérülhet, igaz, csak nagyon kis időre. Minél nagyobb mértékű a sérülés, annál rövidebb ideig tart.

Egészen megdöbbentő az, hogy az energiamegmaradás sérülése úgy is megtörténhet, hogy a teljesen üresnek vélt térből részecskék bukkannak elő. Ez egyrészt azzal sérti az energiamegmaradás tételét, hogy a részecskéknél tömege is lehet, és az $E = mc^2$ összefüggés értelmében az energiatétel legalább ekkora mértékben sérül. Továbbá a kipattanó részecskének lehet még mozgási energiája is, amely tovább növeli az energiamegmaradási tétel sérülését. Minél nagyobb a kipattanó részecske tömege, a fenti határozatlansági összefüggés értelmében annál rövidebb ideig létezhet.

Ezeket a térből csak úgy kipattanó részecskéket van-nincs részecskéknél nevezhetjük. Létük közvetlen méréssel nem mutatható ki, de a megengedett igen rövid időn belül tényleg léteznek, hatásuk észlelhető. Van-nincs részecskék mindenütt, mindenhol állandóan keletkeznek és aztán eltűnnek. Létezésük, állandó keletkezésük és eltűnésük miatt az üres teret, a vákuumot nem tekinthetjük többé igazán üres térnek.

Schrödinger egyenlet. A kvantummechanika alapegyenlete a Schrödinger egyenlet. Ez a rendszer hullámszerű viselkedését jellemző függvény, a rendszer hullámfüggvényének időbeli fejlődését szabja meg. Például a hidrogénatomban lévő elektront az elektron hullámfüggvényének segítségével írjuk le. Egy hullámfüggvény komplex értékű függvény, a komplex szó itt a matematikában értelmezett komplex számra utal. A hullámfüggvény a rendszer állapotának jellemzője, segítségével a rendszer tulajdonságai közül mindent ki tudunk számolni, amit csak lehetséges. Maga a hullámfüggvény viszont nem feleltethető meg fizikai mennyiségnek, nem köthető közvetlenül mérhető adatokhoz. Mérhető mennyiségek, mint az energia, impulzus, lendület, hely, stb. egyszerű számértékek. Nem meglepő, hogy a rendszer állapotát leíró komplex értékű függvény egésze nem feleltethető meg egyszerű módon néhány számértéknek. Ha a komplex függvény által megadott kisvilágbeli rendszer tulajdonságait mérjük, akkor csak ritkán kapunk meghatározott értékeket.

Ha adott fizikai mennyiség értékére vagyunk kíváncsiak, a hullámfüggvény csak azt határozza meg, hogy mik lesznek a lehetséges értékei, és melyik értékre milyen valószínűséggel számíthatunk. Egy méréskor az adott fizikai mennyiségre a lehetségesek közül akármelyiket megkaphatjuk. Nem tudhatjuk előre, mikor éppen melyiket, ez igazi véletlen. Csak az egyes értékek mérésének valószínűségét határozza meg a hullámfüggvény. Például a hullámfüggvény a részecske pontos helyét nem tudja megadni, de a részecske

egy adott pontban való tartózkodásának valószínűsége a komplex értékű hullámfüggvény adott helyen felvett értékének négyzetével arányos.

Ha egy molekula vagy atom állapotáról az adott pillanatban mindent tudok, amit tudhatok, akkor sem tudom megmondani, pontosan milyen mennyiségek jellemzik majd a következő pillanatban. Ha a molekula például gerjesztett állapotban van, nem tudom bizonytalansággal megmondani, mikor fog elbomlani, melyik állapotba kerül majd a bomlás után. A Schrödinger egyenletből csak a gerjesztett állapot élettartamát vagy az ennek megfelelő, a határozatlansági összefüggés által megszabott energiabizonytalanságát számolhatjuk ki. Továbbá a megoldásként kapott hullámfüggvényből az is megtudható, hogy a bomlás után melyik állapotba mekkora valószínűséggel kerül a molekula.

Csak akkor használható a Schrödinger-egyenlet a kisvilág jelenségeinek leírására, ha a részecskék sebessége viszonylag kicsi. Ha a sebességek összemérhetők a fénysebességgel, akkor az ilyen relativisztikus tárgyaláshoz a négykiterjedésű téridőben megfogalmazott hullámegyenleteket kell használnunk. Az elektrorra felírt relativisztikus hullámegyenlet a Dirac-egyenlet.

Atomszerkezet. Az atom szerkezetét a kvantummechanika segítségével lehet értelmezni. Most csak a hidrogénatom szerkezetével foglalkozunk egy keveset, tekintettel arra, hogy a középiskola utolsó osztályában nagyon sokan nem jutottak el eddig az anyagrészig.

Egy hidrogénatom a közepén lévő hidrogén atommagból, ami épp a proton, és a körülötte lévő elektronból áll. Nem mondhatjuk azt, hogy az elektron kering a proton körül, mert mint tárgyaltuk, nem beszélhetünk arról, hogy az elektronnak egyszerre meghatározott helye és lendülete van. Keringési pálya leírásához pedig az adott pillanatban való helyzet és sebesség ismeretére lenne szükség.

Csak bizonyos meghatározott energiájú állapotokban lehet a hidrogénatom elektronja. Atommagot ölelő állóhullámhoz hasonlít az állapotokat leíró hullámfüggvény. Minél erősebben kötött az elektron, a hullámfüggvénye annál közelebb van az atommaghoz. Legalacsonyabb energiájú, azaz a legjobban kötött állapot a hidrogénatom alapállapota. Alapállapotban lévő elektron fotont elnyelve magasabb energiájú, ún. gerjesztett állapotba kerülhet. Gerjesztett állapotú hidrogénatom legerjesztődhet. Ekkor fotont bocsát ki. A foton energiája a gerjesztett állapot és az alapállapot energiája közötti különbséggel egyenlő.

Alagúthatás - áthaladás falon. Képzeljük el a következő esetet. Egy tűzhányó csúcsán, a bemélyedésben van egy golyó. Mivel magasan van, nagy a helyzeti energiája. Ha valahogyan kijuthatna a bemélyedésből, a hegy lábáig gurulva nagy sebességre gyorsulhatna fel. De a newtoni törvények szerint a golyó a bemélyedésből magától semmiképpen sem juthat ki. Viszont a kisvilágban van esély a részecske kiszabadulására.

Vizsgáljuk meg a radioaktív α -bomlás esetét. Ekkor az atommag egy α -részecskét kibocsátva alakul másik atommaggá. Nem más az α -részecske, mint a hélium atommag, két proton és két neutron alkotja. Bomlásra képes atommagban az α -részecske helyzete a bomlás előtt a bemélyedésben lévő golyó állapothoz hasonló. Ha az α -részecske az atommag belsejéből a perem felé tart, taszító erő űzi vissza az atommag belsejébe. Csak akkor hagyhatja el az α -részecske az atommagot, ha átjut ezen a gáton.

Az α -bomlást az α -részecske hullámtermészete teszi lehetővé. Ha az α -részecske csak egy golyó lenne, akkor belülről a falig jutva onnan lepattanna és ide-oda pattogva bezárva maradna. De az α -részecskének van hullámtermészete is. Egy hullám, felülethez érve, nemcsak visszaverődhet, hanem be is hatolhat a közegbe. Így viselkedik a fény is. Egy része visszaverődik a felületről, kisebb része viszont behatol a felület anyagába. Ha ez a közeg vékony, a fény egy része át is hatolhat rajta. Vékony tükrön átjutó fényhullámhoz hasonlóan, az α -részecske is áthatolhat a gáton. Mintha alagútat találna. Minél magasabb, szélesebb ez a gát, a bomlás valószínűsége annál kisebb. 4,51 milliárd év az ^{238}U atommagjának bomlásának felezési ideje. Átlagosan ennyi időbe kerül, míg egy α -részecskének sikerül átjutni a gát falán.

Mérés - a Schrödinger macskája paradoxon. Ahogy tárgyaltuk, a Schrödinger egyenlet a hullámfüggvény időbeli változását írja le. Ennek segítségével az α -bomlás folyamatának leírása a következő. Mivel az α -részecske csak ott lehet, ahol a hullámfüggvénye értéke nem nulla, eleinte a hullámfüggvény csak az atommag belsejében különböző nullától. Ahogy telik az idő, a hullámfüggvény kezd 'belefűrödni' az atommag felületi rétegeibe. Lassacskán egyre nagyobb hányada 'lóg ki' az atommagból. Matematikai alakját tekintve a hullámfüggvény az atommagba zárt állóhullámból és a távozó α -részecskét leíró hullámcsomag összegéből áll. Ahogy telik az idő, az atommagba zárt rész hányada csökken és ezzel együtt a távozó hullámcsomag részaránya egyre nő. Ez mutatja, idővel egyre nagyobb annak a valószínűsége, hogy az α -részecske átjutott a gát alatt. De a hullámfüggvény nem mondhatja meg, pont mikor történik a bomlás.

Einsteint ez a leírás kifejezetten zavarta. Azt állította, a kvantummechanikai leírás nem teljes, mert nem tudja megmondani, ténylegesen mikor bomlik el az atommag, azaz mikor repül ki az α -részecske. Ha az α -részecske egyszer átjutott a gát alatt, akkor az őt leíró hullámcsomag nagy sebességgel elhagyja a mag környezetét. De a hullámfüggvényes jellemzés szerint - mivel a bomlás pontos ideje nincs eleve rögzítve - az α -részecske egyszerre lehet 'bent és kint', azaz a kvantummechanikai állapot a 'bent és kint' egyszerre létezése, összefonódása. Csak a tényleges megfigyelés, mérés derítheti ki, kint van-e már az α -részecske, vagy a bomlás még nem történt meg.

Schrödinger, akit a hullámfüggvény fenti értelmezése szintén zavart, végsőkéig élezte a kérdést. Felismerve, hogy az α -részecske kijutása a magból akár emberléptékű világunkat is befolyásolhatja, a következő gondolat kísérletet fogalmazta meg. Legyen a kvantummechanikai rendszer külvilágtól elzárt dobozba rakva. Legyenek a dobozban az α -bomló atommag, azt körülvevő, α -részecskét észlelni képes számlálócsövek, kalapács, üvegsényi mérgezőgáz és egy macska. Amint elbomlik az atommag, a kirepülő α -részecske megszólaltatja az útjába eső számlálót. Annak jelére a kalapács az üvegsére zuhan, széttöri azt és a kiáramló mérgezőgáz elpusztítja a macskát. Legyen az α -bomlás bomlás felezési ideje egy óra. Tétélezzük fel, ennyi idő után nyithatjuk ki rendszert, nézhetjük meg, megtörtént-e a bomlás.

Mit mond az egészről a hullámfüggvény? Amíg meg nem néztük a macskát, a leírás szerint össze van fonódva az élő és elpusztult macska állapota. Élve és halva egyszerre létezik. Csak akkor mutatkozhat meg a valóság, ha ténylegesen megnézzük, él-e még a macska. Ekkor nyilván csak az egyik lehetőség észlelhető. Amíg viszont meg nem nézzük, nem végzünk mérést, addig az 'összefonódottság' létezik, számtalan más kísérlet, persze nem a macskával, mind ezt igazolta, igazolja. Ez az értelmezés képtelenség, macskalét nem lehet élő és elpusztult macska összefonódása. Hol sántít a gondolatmenet, mai napig nem világos.

Nemlokalitás - az Einstein-Rosen-Podolsky paradoxon. Einstein talán leghíresebb gondolat kísérlete a kvantummechanika tökéletlenségének bizonyítására a határozatlansági összefüggések képtelen voltát igyekezett beláttatni. Egy részecskének nem lehet egyszerre pontosan meghatározott helye és lendülete. Részecske helyét vagy lendületét nem csak úgy mérhetjük meg, hogy magának a részecskének mérjük a helyét és a lendületét. Gondoljunk el, két részecske együtt, nyugalomban van. Belső kölcsönhatás eredményeként szétrepülnek. Kezdetben az összes lendület nulla és a tömegközéppont is nyugszik. A lendületre és a tömegközéppontra vonatkozó megmaradási tételek a kvantummechanikában is érvényesek. Ha mérjük az egyik kirepülő részecske lendületét, akkor a lendületmegmaradási tétel értelmében megkapjuk a másik részecske lendületét is. Ha mérjük az egyik kirepülő részecske helyzetét, meghatározhatjuk ebből a másik részecske helyzetét is.

Einstein, Rosen és Podolsky a következő gondolat kísérletet írták le. Végezzünk mérést egymástól függetlenül mind a két részecskén. Akkor, amikor már jó nagy távolságra repültek el egymástól. Ekkor már semmiféle kölcsönhatás nem lehet közöttük. Egyiknek mérjük meg nagy pontossággal a lendületét. Másiknak ugyanakkor nagy pontossággal a helyzetét. Ezt a lehetőséget a kvantummechanika megengedi. Ezt a két egyidejű mérést kiértékelve pontosan meg tudjuk határozni mindkét részecske pontos helyét és pontos lendületét. Ami viszont a kvantummechanika szerint lehetetlen. Ez képtelenség, ami arra utal, hogy a kvantummechanika tökéletlen. Ha mégis a kvantummechanika bizonyul igaznak, akkor az azt jelenti, hogy a két részecske között létezik valamiféle helyhez nem kötött távolbhatás, bármilyen távolságot átfogó végtelen

gyorsan megjelenő kapcsolat, ún. nemlokális hatás. Ezt viszont tiltja a relativitáselmélet, mert kölcsönhatás legfeljebb véges sebességgel, a fénysebességgel terjedhet, lásd a 2.1. részben.

Akkoriban, a harmincas években még nem tudták a megfelelő méréseket elvégezni. Később, hasonló jellegű, fotonokkal végzett kísérletekre Bell írt fel összefüggéseket. Ha a Bell-egyenlőtlenségek teljesülnek, Einsteinnek van igaza, ha nem teljesülnek, akkor a kvantummechanika ad helyes leírást. Az azóta végzett kísérletek mind a kvantummechanikát igazolják. Ez azt jelenti, kvantummechanikai összefonódások nemcsak atomi méretekben, hanem nagy, akár méteres távolságokon is érvényesülhetnek. Ha két részecske valamikor egymástól kisvilági távolságra volt, hiába távolodtak el egymástól, az összefonódottság megmarad. A távolbahatás szerint így ha valami változik, akkor ez a változás azonnal, időtlenül, másutt is, akár kilométeres távolságokban is megnyilvánul. A manapság kifejlesztett kvantum kriptográfiai, magyarul titkosítási módszerek ezen az elven alapulnak.

Elvileg a teljes megfigyelhető világegyetem oszthatatlan rendszert képez, mert valaha az egész együtt egy kisvilágbeli, kvantummechanikai rendszert alkotott, ezzel később foglalkozni fogunk. Ténylegesen mit jelenthet ez a korai összefonódottság, erről nem sokat tudunk. Egyelőre csak kísérletek vannak arra, milyen módon lehetne ezt a jelenséget gyakorlati célokra is felhasználni. Továbbá fontos kérdés, van-e a távolbahatásnak kimutatható jele a világegyetemre vagy annak egyes részeire.

4.3. Elemi részecskék

Sok-sok egymástól különböző tárgy népesíti be a természetet. De ez a sokféleség megmagyarázható néhány alapvető részecske különböző módokon való összekapcsolódásával. Kulcskérdés, miket is tarthatunk elemi részeknek. Elemi részen a tovább már nem osztható részecskéket értjük. Nincs belső szerkezetük, bármilyen, eddig elvégzett kísérletben pontszerűen viselkednek. Bár az elemi részeket kiterjedés nélkülinek tekintjük, mégis lehet saját perdületük, amit spinnek neveznek.

Általánosan, ez nem csak elemi részekre vonatkozik, egy részecske spinje a kvantummechanika szabályai szerint a megfelelő egységben csak feles vagy egész értékű lehet. Feles spinű részecskék neve fermion, egész spinűek neve bozon. Fermion az elektron is. Egy adott pályán egyszerre csak egy elektron lehet. Ez a Pauli elv, amely a fermionokra általánosan is igaz. Egy adott kvantummechanikai állapotban egyszerre csak egy fermion lehet. Vannak olyan részecskék, amelyek spinje egész értékű, ezeket bozonoknak nevezzük. Bozonokra nem igaz a Pauli-elv, egy adott állapotban egyszerre akárhány is lehet közülük.

Elemi részecskék osztályozása. Az atom egyik alkotórésze, az elektron elemi részecskének tekinthető, szerkezet nélküli, pontszerű. Atommagokat más atommagokkal bombázva felfedezték, hogy az atommag pozitív töltésű protonokból és a körülbelül ugyanolyan tömegű, elektromosan semleges neutronokból áll. De a protonokról és neutronokról kiderült, nem tekinthetők elemi részecskének. Kísérleti eredmények elemzéséből az adódott, hogy véges térbeli kiterjedéssel rendelkeznek és más olyan tulajdonságaik is vannak, amik összetettségre, szerkezetre utalnak. Belsejüket, akárcsak az atom szerkezetét, ütköztetésekkel sikerült feltárni. Amikor nagyon nagy energiájú, azaz nagyon kis hullámhosszú elektronokkal 'fényképezték' a protont és a neutronot, lásd a 4.1. szakaszt, az elektronok elhajlási képe megmutatta, hogy pontszerűnek vehető, elektromosan töltött részecskékből állnak. Ezeket kvarkoknak nevezzük, a proton és neutron egyaránt három darab kvarkból áll. Tört töltésűek a kvarkok, az u kvark töltése a proton töltésének $2/3$ része, a d kvark töltése $-1/3$ proton töltés. A proton két u és egy d , a neutron két d és egy u kvarkból áll. Szabadon kvarkok nem fordulhatnak elő. Ezt a tapasztalati tényt a kvarkok egymás közötti kölcsönhatását vizsgálva lehet megérteni.

Elfogadottá vált a hetvenes évekre, hogy csak kétféle, az anyag építőkövének vehető elemi részecske létezik, lepton és kvark. A leptonok közé az elektron mellett még a neutrínó tartozik, de vannak nehezebb leptonok is. A neutrínót az atommag β bomlásában fedezték fel. β bomláskor az atommag töltése eggyel változik, miközben a tömegszám változatlan marad. Ennek során az atommag egy protonja neutronná, vagy

egy neutronja protonná alakul át. Ilyen folyamatokban neutrínó is keletkezik, ez töltés nélküli, nagyon jó közelítéssel fénysebességgel mozgó részecske. Nagyon kicsiny tömegű, ennek nagysága az elektron tömegének alig milliomod része lehet. Igen nehéz észrevenni, mert az anyaggal csak nagyon ritkán hat kölcsön. Egy köbcentiméterben minden pillanatban többszáz neutrínó van jelen, de túlnyomó többségük észrevétlenül megy át az anyagon.

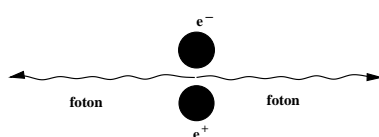
A világegyetem anyagának túlnyomó része elektronból, az ún. elektron-neutrínókból, u és d kvarkokból, illetve a belőlük felépülő protonok és neutronok alkotta atommagokból áll. Ez a négy elemi részecske egy részecskecsaládhoz sorolható és ehhez hasonló két további részecskecsalád is létezik, lásd a 1. táblázatot. Hogy miért nem csak egy, hanem három ilyen család létezik, nem ismert. A második családhoz a teljesen elektronszerűen viselkedő, de annál több mint kétszázszor nehezebb és bomlékony müon, a müon-neutrínó, c kvark és s kvark tartoznak. A harmadik család tagjai az elektronhoz és müonhoz hasonló de azoknál jóval nehezebb és bomlékony tauon, a tau-neutrínó valamint a t és b kvarkok.

elektron	-1	u	$2/3$
elektron-neutrínó	0	d	$-1/3$
müon	-1	c	$2/3$
müon-neutrínó	0	s	$-1/3$
tauon	-1	t	$2/3$
tau-neutrínó	0	b	$-1/3$

1. táblázat. Anyagi építőköveknek tekinthető elemi részek táblázata. Első oszlopban a leptonok, harmadik oszlopban a kvarkok találhatóak. Második és negyedik oszlopban a részecskék elektromos töltését találjuk. Ennek a felosztásnak megfelelően három részecskecsaládról beszélünk. A müon és a tauon bomlékonyak és hasonlóképpen bomlékony valamennyi olyan részecske is, melynek összetevő kvarkjai között van olyan, amelyik a második vagy harmadik részecskecsaládhoz tartozik.

Elemi rész a kvarkokon és leptonokon kívül még a foton és néhány, hozzá hasonló, ám tömeggel is rendelkező részecske. Ezek bozonok, spinjük egységnyi és a kölcsönhatások létesítésében játszanak alapvető szerepet. A foton, ahogyan tárgyaltuk, az elektromágneses sugárzás adagja és az elektromágneses erőter közvetítője, ez utóbbit lásd később. Vannak még más eleminek tartott részecskék is, az ún. skalár részecskék, ezek bozonok, a spinjük nulla. Ilyen részecskéket még nem figyeltek meg, de feltételezik, létezniük kell. Jelentőségükkel később foglalkozunk.

Ellenrészecskék. Ellenrészecskék (antirészecskék) létezését a kvantummechanika relativisztikus hullámegyenletei jósolták meg. Például az elektronra felírt Dirac-egyenlet egyben leír egy, az elektronnal egyébként teljesen azonos tulajdonságú, ám vele ellentétes töltésű részecskét is. Legtöbb részecskének van ellenrészecskéje, csak a töltésnélküliek között lehetnek olyanok, amelyeknek nincs ellenrészecskéje. Az ellenrészecske tömege a megfelelő részecske tömegével egyezik meg. Más tulajdonságai is ugyanolyanok, mint a részecskének, csak éppen az elektromos töltése, és más hasonló jellemzője is ellentétes előjelű. Elektron ellenrészecskéje a pozitron, kvark ellenrészecskéje az ellenkvark, protoné az ellenproton, neutroné az ellenneutron. Bár neutron és ellenneutron elektromos töltése egyaránt nulla, mégis különböznek, mert egy neutron kvarkokból, egy ellenneutron ellenkvarkokból áll.



9. ábra. Ha e^- elektron és e^+ pozitron találkozik, mindketten megsemmisülnek. Energiájukat két ellentétes irányba repülő, egyenlő energiájú foton viszi el.

Részecske és ellenrészecskéje ha egymással találkoznak, megsemmisülnek. Sugárzásként távozik a tömegüknek megfelelő energia. Például ha elektron és pozitron összetalálkoznak, mindketten eltűnnek és a tömegüknek megfelelő energiát két akkor keletkező foton viszi magával, lásd a 9. ábrát.

Mivel részecskék és ellenrészecskék egymással találkozva megsemmisülhetnek, az anyag nem elpusztíthatatlan. Továbbá nem lehet anyagmegmaradásról sem beszélni, hiszen például az elektron és pozitron megsemmisülésekor tömegek vesznek el. Csak az energia marad meg. Energiamérleget készítve viszont figyelembe kell venni az $E = mc^2$ összefüggésnek megfelelő energiákat is, lásd a 2.1. rész végét.

Van-nincs részecske-ellenrészecske párok. Töltött részecske, például van-nincs elektron önmagában nem keletkezhethet. Ekkor ugyanis megsérülne a töltésmegmaradás törvénye, mely semmilyen körülmények között, rövid időre sem sérülhet meg. De ellenrészecskéjével párban bármilyen van-nincs részecske kipattanhat a térből. Az energia- és lendületmegmaradás tételén kívül más tétel ekkor nem sérül meg. Például a van-nincs elektron-pozitron, proton-ellenproton, stb. párok ezért mindig, mindenütt létezhetnek és befolyásolják az egyébként üresnek tekinthető tér tulajdonságait.

Barionok és mezonok. Mint már említettük, kvarkok szabadon nem fordulhatnak elő, csak részecskék belsejében. Erre két lehetőségük van. Egyrészt hármassával bezárva, protonok, neutronok és más, hozzájuk hasonló, náluk nehezebb részecskék, barionok alkotórészeiként. Másik lehetőség a két összetevőből, kvarkból és ellenkvarkból álló mezon. A protonnál nehezebb barionok és a mezonok bomlékonyak. Csak nagy energiájú ütközésekben keletkezhetnek és keletkezés után gyorsan elbomlanak. Maga a neutron is bomlékony, átlagos élettideje kb. 15 perc. Amint a müon és tauon is, mezonok valamint protonnál és neutronnál nehezebb barionok is csak a világűrben érkező nagyenergiájú sugárzásban vagy nagyon nagy energiájú gyorsítóknál keletkezhetnek.

5. Alapvető kölcsönhatások

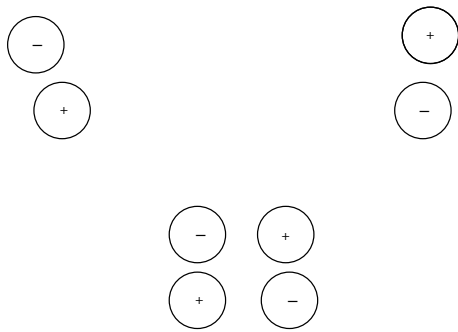
Csak kölcsönhatásaik ismeretében tárgyalhatjuk az elemi részek tulajdonságait. Gondolnánk, hogy a természetben előforduló bonyolult, sokszínű folyamatok igencsak kifinomult kölcsönhatási módokról árulkodnak. De a világ jelenségeinek elképesztő gazdagsága mögött csupán néhány, valóban alapvetőnek tekinthető erő működése áll.

Eddigi ismereteink szerint négy alapvető kölcsönhatás létezik: gravitációs, elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatás. Legismertebb az első, a tömegvonzási erő. Ami az elektromágneses kölcsönhatást illeti, legismertebb megnyilvánulásai a két töltött test között fellépő Coulomb vonzás vagy taszítás valamint a mágnesesség. Mind a gravitációs, mind az elektromágneses erők nagyobb hatótávolságú. Ez a tömegvonzás esetén nyilvánvaló, mivel ez a vilámindenséget uraló kölcsönhatás.

Azonos a tömegvonzási és Coulomb erőnek a kölcsönható részecskék távolságától való függése, az r távolsággal az $1/r^2$ törvény szerint csökkenő. Ám ha összehasonlítjuk két proton között fellépő Coulomb és tömegvonzási erők nagyságát, azt kapjuk, hogy a Coulomb erő 37 nagyságrenddel erősebb. De a természetben az anyagok általában villamosan semlegesek, mert azonos mennyiségű pozitív és negatív töltést tartalmaznak. Mivel az atommagok pozitív és az elektronok negatív töltése leárnyékolja egymást, a Coulomb erő be van zárva az atomok és molekulák belsejébe. Ezért nagyobb távolságokon csak a tömegvonzás játszik szerepet.

Csak atommag illetve annál kisebb méretű rendszerek viselkedését vezérli a gyenge és az erős kölcsönhatás. Igazából az erős kölcsönhatás a kvarkok között ható erőnek felel meg. A protonok és neutronok között ható magerők is az erős kölcsönhatás megnyilvánulásai, ezek az erők tartják össze az atommagot. Nagyon kicsiny az atommagban uralkodó erők hatótávolsága, nem haladja meg az atommag sugarát. Szintén az atommagban zajló folyamatok utalnak a gyenge kölcsönhatás működésére. Ez a nagyon rövid hatótávolságú erő felelős az atommag β bomlási folyamataiért.

Van der Waals erők. Valamennyi köznapi életben észlelt kölcsönhatás az alapvetőnek vett tömegvonzási és Coulomb kölcsönhatásra vezethető vissza. Utóbbira példa a semleges atomok és molekulák közötti fellépő Van de Waals erő. Nézzük két egymástól távolabb eső semleges atom, mondjuk hidrogénatom viselkedését. Mivel a proton és elektron össztöltése nulla, a két hidrogénatom között ható erők nagyobb távolságokon elhanyagolhatóak, mert a taszítások és vonzások leárnyékolják egymást. Ha a két atom egymás közelében van, az egyik atom elektronja már érezhetően más távolságra kerülhet a másik atom protonjától, mint annak protonjától, lásd a 10. ábrát. Ha egymáshoz elég közel kerülnek, minthogy a két atom alkotórészei kölcsönösen érzékelik a másik szerkezetét, egy gyenge, vonzó erő lép fel, ami a két atomot molekulává forrasztja össze.



10. ábra. Van der Waals erő. Ha két semleges atom egymás közelében van, akkor az atomokon belül lévő elektronok és atommagok sűrűségeloszlása már nem árnyékolja le tökéletesen egymást. Ezért két semleges atom között gyenge, rövidhatótávú vonzó erő lép fel.

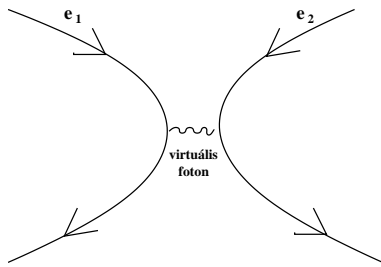
Ilyen, úgynevezett Van der Waals erők játszanak szerepet az atomi és molekuláris kötések, kölcsönhatások alakításában. Rövid hatótávú, vonzó erők, amelyeket az eredeti Coulomb kölcsönhatásokból származtathatunk le. Ilyen, másodlagosnak nevezhető, származtatott erőket más alapvető erőből is származtathatunk.

Erők eredete és belső szimmetriák. Nagyon sok belső szimmetriája lehet egy egyenletnek. Ám a természet alapegyenleteinek csak néhány belső szimmetriája lényeges és egyelőre még nem világos, miért éppen ezek a fontosak. Vegyük példának a szabad elektronok viselkedését leíró Dirac egyenletet. Követeljük meg, hogy a Dirac-egyenlet alakja maradjon változatlan, ugyanaz, ha a benne szereplő hullámfüggvényen egy bizonyos belső szimmetriának megfelelő átalakítást végzünk. Kiderül, ez az csak akkor lehetséges, ha léteznek olyan terek, melyeknek viselkedését pontosan a Maxwell egyenletek írják le. Maga a teljes elektrodinamika, a Coulomb kölcsönhatás alakja is azzal kapcsolatos, hogy a Dirac-egyenlet alakja változatlan marad, ha egy bizonyos átalakítást végzünk rajta.

Érezhetjük, a szimmetriák léte mennyire hatékony módszert ad a kezünkbe, mikre tehet képessé bennünket. Szimmetriaelvekre vezethetjük vissza a gyenge és erős kölcsönhatásokat és az ún. a nagy egyesített elmélet megfogalmazását is. Hangsúlyozni kell, nem tudjuk, miért pont ezek a belső szimmetriák a fontosak. Nem a legegyszerűbbek, vannak hozzájuk hasonló szimmetriák bőséggel, melyek közömbösek a természet leírása szempontjából. Továbbá meg kell mondani azt is, a szimmetriák, bár rögzítik az egyenletek, erőtvények alakját, nem mondanak semmit arról, miért éppen akkorák az elemi részek tömegei, kölcsönhatások erősségei, mint amilyenek. Távol vagyunk attól, hogy tökéletes, befejezett, végső elméletről beszéljünk.

Kvantumtérelméletek. Erők, erőterek segítségével írjuk le a kölcsönhatásokat, legalább is az érzékelhető méretekben. Például az elektromosan töltött részecskék közötti erőket elektromos erőterrel írjuk le. Hasonlóképpen beszélhetünk mágneses, gravitációs erőter létezéséről. De ha a kölcsönható részecskék csak nagyon rövid ideig lehetnek egymás közvetlen közelében, azaz nagyon gyorsan mozognak egymáshoz

képest, akkor az erőtérről való leírás nem kielégítő. Ekkor a kölcsönhatási folyamatokat csak a kvantumtérelmélet tudja pontosan tárgyalni.



11. ábra. Két nagyon gyors elektron, jelölésük e_1 és e_2 , közvetítő részecske, egyetlen van-nincs (virtuális) foton segítségével kerül kölcsönhatásba egymással. Azaz az energiát és lendületet egy van-nincs foton viszi át az egyik elektrontól a másikhoz.

Ha két részecske, mondjuk két elektron rugalmasan ütközik, mindkét elektronnak megváltozik a sebessége. Ezt a kvantumtérelmélet úgy írja le, hogy a két elektron közvetítő részecske segítségével kerül kölcsönhatásba egymással, lásd a 11. ábrát. Az egyik elektron energiát ad át a közvetítő részecskének és ez az energiát a másik elektronnak továbbítja. Ha a két elektron mozgása egymáshoz képest nagyon gyors, akkor elég, ha csak egyetlen közvetítő részecske cseréjét vesszük tekintetbe. Ha a mozgás lassabb, számításba kell vennünk a két közvetítő részecskés folyamatokat is. Még lassabb ütközéseknél még több közvetítő részecske létét kell figyelembe venni. Az ilyen számításokat az elektromágneses tér kvantumtérelmélete, a kvantumelektrodinamika tárgyalja.

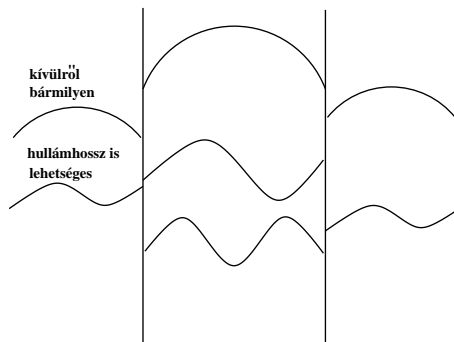
Ha az ütközés nem túl gyors, akkor a kvantumtérelméleti leírás jól közelíthető úgy, hogy a közvetítő részecskés leírás helyett az erőter fogalmát használjuk. Ezzel a kvantumtérelméletet a hagyományos fizikából jól ismert erőter leírás váltja fel. Erőtérről, az atommag és az elektronok között ható Coulomb erővel tárgyalhatjuk az atomok viselkedését is mert a kvantumelektrodinamikai hatások csak nagyon kis járulékot adnak a hidrogénatom energiaszintjeihez. Figyelembevéve a kvantumelektrodinamikai járulékokat, a számolt energiaszintek tíz értékes jegyig egyeznek a kísérleti értékekkel. Ez az egyezés az elméleti fizika egyik csúcsteljesítménye.

Természetüket tekintve a kölcsönhatást közvetítő részecskék van-nincs részecskék. Róluk az állapot élettartamának és energiabizonytalanságának kapcsolatát tárgyaló határozatlansági összefüggést ismertetve már volt szó, lásd a 4.2. szakaszt. Két elektron között a kölcsönhatást van-nincs fotonok közvetítik, lásd a 11. ábrát. Az általunk jól ismert foton, amit fény formájában látunk, valódi részecske, valódi foton. Van-nincs részecske, így van-nincs foton megjelenése az energia és lendület megmaradási tételek megsértésével jár együtt. Amint a van-nincs részecske elnyelődik, a megmaradási tételek sérülése megszűnik.

Bizonyos megmaradási tételek korlátozott időtartamon belüli sérülését a kvantummechanika már említett határozatlansági összefüggése, a folyamat időtartama és energiabizonytalansága közötti kapcsolat szabályozza, lásd a 4.2. szakaszban. Minél nagyobb a keletkezett van-nincs részecske energiája, annál rövidebb kell hogy legyen az élettartama. Ennélfogva minél kisebb a van-nincs részecske tömege, annál nagyobb lehet az általa közvetített erő hatótávja. Ugyanis a nagy tömegű van-nincs részecske felbukkanásához a tömeg megjelenése miatt eleve nagyobb energia kell, emiatt az ilyen van-nincs részecske csak rövidebb ideig létezhet. Ezalatt a kisebb időtartam alatt rövidebb utat futhatnak be, ezért az általuk közvetített erő is rövidebb hatótávú. Ha a közvetítő részecske tömege nulla, akkor az fénysebességgel kell mozogjon és az erő végtelen hatótávú lesz.

Casimir-hatás. Meggyőzően bizonyítja a van-nincs fotonok létezését a Casimir-hatás. Képzeljünk el két párhuzamos fémlamezt. Ismert az elektromosságban, csak olyan elektromágneses tér létezhet két fémlamez között, amely a lemezeken eltűnik. Ezért a lemezek között nem lehet a hullámoknak akármilyen a hullámhossza, csak olyan megengedett, ahol a lemezek a hullámok amplitúdója nullának adódik. Ezért a

legnagyobb előforduló hullámhossz a lemezek közötti távolság kétszerese, ekkor éppen egy félhullámhossz van a lemezek között. Ennek a fele, harmada, negyede, stb. lesz, a többi megengedett hullámhossz lásd a 12. ábrát.



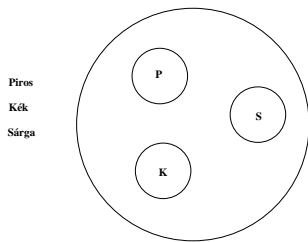
12. ábra. Casimir-hatás. Ismert az elektromosságban, hogy két fémlemez között csak olyan elektromágneses tér létezhet, mely eltűnik a lemezekben. Ezért a legnagyobb előforduló hullámhossz a lemezek közötti távolság kétszerese, a többi megengedett hullámhossz ennek a fele, harmada, negyede, stb. Mivel a kívül keletkező van-nincs fotonok hullámhosszaira nincs korlátozás, kintről több hullám ütközik a lemezeknek és ezért a lemezeket ezek nyomóereje összefelé nyomja.

Egy lemezre eső foton, ha a lemeztől visszaverődik, a lendület megmaradásának értelmében lendületet adnak át a lemeznek, azaz erőt gyakorol rá. Ez a jelenség jól ismert, egy szabadon lebegő tükör az általa visszavert fény hatására elmozdul.

Egy van-nincs fotonok mint hullám úgy viselkedik, akár egy valódi foton. Ha a teljesen üres térbe két párhuzamos lemezt rakunk, ez megváltoztatja a térben kipattanó és eltűnő van-nincs fotonok viselkedését, ugyanis a két lemez között csak a fent megadott hullámhosszú fotonok szerepelhetnek. Mivel a lemezek kívül lévő térben a van-nincs fotonok hullámhosszára nincs hasonló kikötés, ezért a lemezekbe kívülről több van-nincs foton ütközik, mint belülről. Ez a lemezeket összefelé nyomó erő felléptéhez vezet. Kísérletileg is kimutatták ezt az erőt és nagysága éppen akkora, amekkorát Casimir, a jelenség felismerőjének kvantumelektrodinamikai számolása előrejelzett.

Erős kölcsönhatás. Az erős kölcsönhatás kvantumtérelméletének kidolgozásához a kvantumelektrodinamikában használt módszer szolgált útmutatóul. Az alapvető erős erők a kvarkok között hatnak, ezek nagysága a kvarkok 'erős' töltésével arányos. Azaz a kvarkoknak nemcsak elektromos töltése, hanem erős töltése is van. Utóbbit színtöltésnek szokás nevezni. A kvarkok erős kölcsönhatásait leíró kvantumtérelmélet a kvantumszíndinamika. Itt a szín kifejezés természetesen nem az igazi színekre vonatkozik, ennek a jelzőnek a használata csak jelképes.

Hasonlóan a Coulomb erőhöz, két színtöltés között ható erő a színtöltések szorzatával arányos. Nincs a leptonoknak színtöltésük, erős erők köztük nem hatnak. Sokkal erősebbek a kvarkok közötti színes erő, mint az ugyanazon kvarkok között fellépő, elektromos töltésüknek megfelelő Coulomb erő. Szemben az egyfajta elektromos töltéssel, amin a pozitív töltést és ellentétét, a negatív töltést értjük, háromféle színesnek nevezett töltés létezik. Eredetileg ezt azért tételezték fel, mert olyan barionokat fedeztek fel, amelyek három azonos kvarkból állnak és mindhárom kvark azonos állapotú. Mivel a kvarkok fermionok, ez tiltott. Ezért feltételezték, hogy a kvarkoknak lennie kell valamilyen addig még ismeretlen tulajdonságának is, amelyben aztán különbözhetnek. Ez a tulajdonság a szín, ezeknek a háromféle értékét önkényesen pirosnak (P), sárgának (S) és zöldnek (Z) nevezték el. Onnan ered az elnevezés, hogy a barionokban, így protonban illetve neutronban három, egymástól különböző színtöltésű kvark fordul elő, úgy, hogy a barion ill. a proton és a neutron egészének színes töltése nulla, lásd a 13. ábrát. Ahogyan a fényben is a három alapszín adja ki a színtelen fényt, ennek megfelelően nevezték el a színes töltéseket a fentiek szerint.

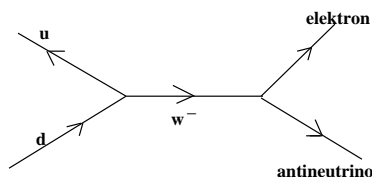


13. ábra. Protonban illetve neutronban három, egymástól különböző színtöltésű kvark fordul elő, úgy, hogy a proton és a neutron színes töltése nulla.

A kvarkok közötti kölcsönhatás eredete a tömeg nélküli gluonok cseréjével értelmezhető. Színesek lehetnek a gluonok maguk is, azaz kölcsönhatás közben megváltozhat a kvarkok színe is. Két színes kvark között a vonzóerő távolságuk növekedésével növekszik. Durván úgy írható le a kvarkok közötti erő távolságfüggése, mintha rugók tartanák őket össze. Mennél jobban feszítjük a rugót, annál erősebb a visszahúzó erő. Így kvark nem szakadhat ki a protonból vagy neutronból, ezért nem láthatjuk szabadon.

A nukleonok, azaz a protonok és neutronok között fellépő magerők, nem tekinthetők alapvető erőknek. Viselkedésükben a semleges atomok között ható Van der Waals erőkhöz hasonlítanak. Csak akkor lépnek működésbe, ha két proton, proton és neutron vagy két neutron annyira közel kerül egymáshoz, hogy összetevő kvarkjaik komolyabban érezhetik a másik nukleon kvarkjainak térbeli eloszlását. Ezért a magerők csak származtatott erők, az erős kölcsönhatásból, a kvarkok között ható, gluonok közvetítette erőkből származtathatók le.

Gyenge és elektroyenge kölcsönhatás. A legismertebb gyenge kölcsönhatás által vezérelt folyamat az atommagok béta bomlása. Ennek során az atommag egy neutronja protonná bomlik, miközben egy elektron és ellenneutrino keletkezik, lásd a 14. ábrát.



14. ábra. Neutron protonná való bomlásakor a neutron belsejében egy d kvark u kvarkká alakul. Eközben egy van-nincs W^- bozon keletkezik, ami elektronná és ellenneutrinnóvá (antineutrinnóvá) bomlik el.

Hasonlóképpen, az atommag belsejében a proton neutronná alakulhat át, miközben pozitron és neutrino keletkezik. Béta bomlás során a proton vagy neutron egy kvarkja másik kvarkká alakul át, hiszen a proton és a neutron csak egyetlen kvarkban különböznek. A gyenge kölcsönhatást közvetítő részecskék a W^+ , W^- és Z^0 részecskék. Ezek tömegei igen nagyok, csaknem százszorosa a proton tömegének. Ezért a gyenge kölcsönhatás hatótávja igen kicsi.

Alaposabb tanulmányozás után kiderült, hogy elektromágneses és gyenge folyamatok igencsak hasonlóak. Ugyan az erőhatást közvetítő részecskék tömege között nagyon nagy a különbség, de ha a két kölcsönható részecske elég közel kerül egymáshoz, a kölcsönhatási folyamatot a közvetítő részecske tömegének nagysága nem befolyásolja lényegesen. Ha a két kölcsönható részecske kb. 10^{-16} centiméternél kisebb távolságra van egymástól, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatási folyamatok ugyanúgy módon viselkednek. Fotonok valamint a gyenge kölcsönhatást közvetítő nagy tömegű Z^0 részecskék egyforma könnyedséggel keletkeznek és cserélődnek. Ekkor az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás helyett elég egyetlen, az ún. elektroyenge kölcsönhatást tárgyalni. Ez volt akkor a helyzet, amikor a Mindenség mérete még nem haladta meg a fent említett igen kicsiny, 10^{-16} centiméteres skálát.

Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítéséhez az elméleti fizikusok a 4.3. szakaszban már említett skalár részecskéket használnak fel. A skalár részecskéknek, mint ahogy a fotonoknak az elektromágneses tér, terek feleltethetők meg. Ezekhez a terekhez hasonló a mindennapi életben is létezik. Nézzük az elektrosztatikus tereket, a terek potenciálját. Elektromos tér potenciálkülönbségekből adódik. Ha az egész világegyetem 220 voltos potenciálon lenne, senki sem venné észre létezését. Ez a potenciál egyszerűen az üres teret, a vákuumot jellemezné. Hasonló módon nem vesszük észre a skalár tereket sem.

Betöltik a Mindenséget a skalár terek, mindenhol jelen vannak és befolyásolják az elemi részek tulajdonságait. Az elektroyenge kölcsönhatás elméletének skalár részecskéit Higgs-részecskének nevezik. Háromféle is kell hogy legyen belőlük, pozitív, negatív és semleges elektromos töltésű változatai vannak. Felfedezésük a CERN most az ősszel üzembe helyezett LHC (Large Hadron Collider) gyorsítónál várható, ez a világ legnagyobb gyorsítója. Már bizonyos, hogy a Higgs részecske tömege a W és Z részecskék tömegénél is nagyobb. Éppen azért nagy a W és a Z részecskék tömege, mert kölcsönhatnak a Higgs-részecskéknek megfelelő terekkel. Azért nincs a fotonnak tömege, mert nincs ilyen kölcsönhatása. Felteszik, hogy a világegyetem fejlődésének legelején valamennyi részecske tömeg nélküli volt. Tömeggel rendelkező részecskék, mint az elektron is, a világegyetem tágulásának egy igen kezdeti szakaszában, a skalár terekkel kölcsönhatva nyertek tömeget.

5.1. Nagy egyesített elméletek

Az a nagy egyesített elméletek kiindulópontja, hogy az elektroyenge valamint a kvantumszindinamikai elméletek szerkezete nagyon hasonló. Lehetséges olyan modellt készíteni, amelyben az elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatási folyamatok egyetlen alapvető kölcsönhatásként tárgyalható. Ez a leírás kvarkat és leptont egyetlen részecske két különböző változataként fogja fel és új jelenséget, a kvark-lepton átmenetek létezését is megjósolja. Két kvark kölcsönhatásának eredményeképpen egy lepton és egy ellenkvark is keletkezhet belőlük. A kölcsönhatás közvetítője az ún. X -részecske, amelynek tömege a proton tömegének kb. 10^{16} -szorosa. A keletkezett ellenkvark a megmaradt kvarkkal mezonná egyesül, így a folyamat eredményeképpen a proton egy leptonra és egy mezonra bomlik. Ha ez a fajta kölcsönhatás létezik, akkor a proton sem örök, elbomolhat. Az egyesített elmélet az elektroyenge egyesítéshez szükséges skalár tér mellett feltételezi két újabb skalár tér létezését is.

A nagy egyesített elmélet a rendkívül kicsiny, körülbelül 10^{-29} centiméteres méreteken belül írja le a jelenségeket. Azaz akkor válik lényegessé, ha a kölcsönható részecskék ilyen vagy ennél kisebb távolságra kerülnek egymáshoz. Akkor bomolhat el a proton, ha a protonon belül két kvark ennyire megközelíti egymást. Ennek a valószínűsége rendkívül kicsiny, úgyhogy a proton elbomlásának lehetősége csaknem kizárható. Ilyen eseményt eddig nem sikerült megfigyelni, habár hatalmas kísérleti berendezéseket építettek és működtettek a proton bomlásának kimutatására.

Mindeddig ugyan nem sikerült megfigyelni proton bomlását, de ez még nem bizonyítja, hogy a nagy egyesített elmélet alapfeltevése hibás lenne. Lehetséges, hogy a proton ugyan elbomolhat, de annyira kicsiny a bomlás valószínűsége, hogy jelenlegi mérőberendezések alkalmatlanok kimutatására. A proton bomlásán kívül más, az egyesített elmélet által jósolt eredmény a jelen körülmények között nem ellenőrizhető. Ilyen vizsgálatokhoz a korai, az ősrobbanást követő $10^{-40} - 10^{-35}$ másodpercben létező, $10^{-30} - 10^{-25}$ cm átmérőjű világegyetem az egyetlen alkalmas hely. Ezért az egyesített elméletek igazi ellenőrzése a világegyetem kezdeti fejlődését leíró modellekből kapott eredmények és a világegyetem megfigyelhető jellemzőinek összevetésével végezhető csak el.

A nagy egyesített elméletek a négy kölcsönhatás közül háromnak, az elektromágneses, erős és gyenge kölcsönhatások egyesített leírását adják meg. Kívülmarad a kereten a negyedik, a gravitációs kölcsönhatás.

Kvantumgravitáció. Amint a 4.3. szakaszban tárgyaltuk, a térből nagyon kis időtartamra részecske-ellenrészecske párok pattanhatnak ki, amelyek nagyon gyorsan el is nyelődnek. Ezeknek a van-nincs ré-

szecskeparóknak keletkezését a kvantummechanika törvényei szabályozzák. Rögzített téridőben van megfogalmazva a kvantummechanika. Ha a kipattanó részecskék létezésének időtartama nagyon kicsiny, a kipattanó részecskék tömege igen nagy lehet. Viszont a kipattanó nagyon nagy tömeg megváltoztatja maga körül a téridő szerkezetét, ezzel megváltozik a téridő görbülete, azaz érvénytelenné válik a rögzített téridőben megfogalmazott kvantummechanika. Egyúttal a nagy tömeg kipattanásakor alkalmazhatatlanná válik az általános relativitáselmélet is, amely feltételezi, hogy a térgörbületet meghatározó tömegek nagysága nagyon kicsiny időszakokon belül nem változik túl gyorsan. Ennélfogva nagyon kicsiny időtartamokon és távolságokon belül a kvantummechanika és általános relativitáselmélet feltevései kölcsönösen kizárják egymást. Így ott mindkét elméleti leírás, alapfogalmaival, a térrel és idővel együtt alkalmazhatatlanokká válnak.

Olyan kicsiny időtartam és távolság, melyeknél kisebb már nem értelmezhető, a következőképpen határozható meg. Egy M tömegű test kvantumos természetét, a 4.1. képlet szerint a $\lambda = h/Mv$ deBroglie hullámhosszal jellemezhetjük, v -re felső határt a c fénysebesség ad, ezért λ lehetséges legkisebb értéke az M tömegre $\lambda_{kv} = h/Mc$. Ahogyan a 2.2.1. szakaszban megadtuk, az M tömegű test Schwarzschild sugara $r_c = 2GM/c^2$, ez a tömeg térre gyakorolt hatásának mértékét jellemzi. Az az M_p tömeg, melynek kvantumos és gravitációs tulajdonságai egyaránt fontosak, a kvantummechanikai hullámhossz és a Schwarzschild sugár egyenlőségéből számítható ki: $h/M_p c = 2GM_p/c^2$. M_p tömeg az ún. Planck tömeg, ebből $r_p = h/M_p c$ szerint adódik az $r_p = 1.62 * 10^{-33} \text{ cm}$ Planck hossz, amiből $t_p = r_p/c$ szerint a Planck idő, melynek értéke $t_p = 5.31 * 10^{-44}$ másodperc.

A Planck idő és hossz tartományában új fogalmak, törvényszerűségek alkotására van szükség, melyekkel egyesíteni lehet a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet nyújtotta leírásokat. Az ilyen egyesített elméletet kvantumgravitációnak nevezik. Eddig még nem dolgoztak ki megbízhatóan ellenőrizhető kvantumgravitációs elméletet. Ennek hiányában csak a másodperc egy igen kicsiny töredékétől kezdve, a Planck idő eltelte után van szilárdabb alapokon nyugvó leírásunk arról, mi történhetett kezdetben.

5.2. Kölcsönhatások mértani eredetéről

Az általános relativitás elmélete szerint a gravitáció onnan ered, hogy a tömeg görbíti a téridőt. Amikor a tömegvonzást mint a téridő görbületének megnyilvánulását tárgyaljuk, a téridő mértanának viselkedésére vezethetjük vissza és úgy is fogalmazhatunk, hogy a tömegvonzási erő mértani eredetű. Felmerül a kérdés, mi az eredete a másik három, az elektromágneses, erős és gyenge kölcsönhatásnak.

Rejtőző kiterjedések, Kaluza-Klein modell. Nem új a gondolat, hogy a térnek háromnál több kiterjedése létezhet. Amikor az általános relativitáselmélet megszületett, még csak két kölcsönhatást, a tömegvonzást és elektromágnesest kölcsönhatást ismertek. Nemsokkal Einstein elméletének ismertté válása után Kaluza megmutatta, hogy elektromágnesesség is leírható mértan segítségével, nevezetesen az ötkiterjedésű téridő görbülete segítségével alapozható meg. Ha Einstein általános relativitáselméletét a 3 tér és 1 idődimenzió helyett 4 tér és 1 idődimenzióban fogalmazzuk meg, megkapjuk a tömegvonzás és a Maxwell-egyenletek által leírt elektromágnesesség egységes elméletét.

Kaluza elméletével az a baj, hogy a térnek csak három kiterjedése van, negyedik nincs. Vagy van, de nem érzékeljük. Klein úgy módosította Kaluza feltevését, hogy a tér negyedik kiterjedése ugyan létezik, de nem vesszük észre, mert 'fel van csavarodva'. Azaz a negyedik kiterjedésben csak nagyon kis távolságok mérhetők. Ahogyan egy drót messziről vonalnak hat, de közelről észrevesszük a vastagságát, a tér negyedik kiterjedését Klein úgy szemlélteti, hogy ami távolról nézve a vonal egy A pontja, közelről egy kör kerülete, amely a nagyon vékony csövet kerüli meg. Vagy ami a háromkiterjedésű térben pont, közelről, a negyedik kiterjedésben apró kör. Annyira kicsiny a kör kerülete, hogy nem csodálkozhatunk az észrevehetetlenségén.

Kaluza és Klein elmélete évtizedekig csak mint érdekesség létezett. Az erős és gyenge kölcsönhatás felfedezése után nem volt különösebben érdekes, hogy a két régen ismert kölcsönhatás mértani eredetű lehet.

De a nyolcvanas években felmerült az ötlet, hogy mind a négy kölcsönhatás mértani eredetű. Kaluza módszerét követve a négy alapvető kölcsönhatás mértani eredetének levezetéséhez az 1 időkitérjedés mellé még egy legalább 10 kiterjedésű tér szükséges. Ez a legegyszerűbb, leginkább szimmetrikus megfogalmazás. Itt is rögtön felmerül a kérdés, hová lett, hogyan csavarodott fel hét nem mutatkozó térkiterjedés.

A fenti tizenegy dimenziós modell egyik nehézsége az, hogy a részecske spinjét nem kezeli megfelelően. Nyilván egy egységes elméletben a spinek megfelelő tárgyalására is szükség van, valamilyen alapvető szimmetria még szükséges, amely a spinek leírását megfelelő keretbe foglalja. Ezt a szimmetriát a szuperhúr elméletek megalkotói fedezték fel.

Húrok, szuperhúrok. Zavaró, hogy a kvantumelektrodinamika és más kvantumtérelméletek matematikai megfogalmazása matematikailag bizonytalan elemeket is tartalmaz. Végtelenül nagy kifejezések jelennek meg a képletekben, melyek kételyt ébresztenek a leírás tökéletességét illetően. Igaz, hogy a renormálásnak nevezett eljárás segítségével a végtelen kifejezések leválaszthatók a többiektől és a kvantumelektrodinamika és más elméletek nagyon pontos, kísérletekkel jól egyező eredményeket adnak. De a végtelen kifejezések kérdése mégis arra utal, hogy a leírások valamilyen alapvetőt tökéletlenül kezelnek.

Végősoron a bizonytalanságok az elemi részecskék pontszerűségének feltételezésére vezethetők vissza. Sikerült kimutatni a hetvenes években, ha a részecskék nem pontok, hanem végtelenül vékony szálacskák, húrok, a kvantumtérelméletek fenti matematikai nehézségei eltűnnek. Ezek a húrok Planck-hossznyi méretűek. Különböző elemi részeket, kvarkokat, leptonokat és másokat, mint húrok rezgéseit és egyéb mozgásait értelmezhetjük. Továbbá az elektromágneses, a gyenge és erős kölcsönhatási folyamatok egyaránt jól leírhatók mint húrok között fellépő kapcsolatok. Lehetőséget ad a húrelmélet arra is, hogy kvantumgravitációs elméletet készíthessünk. Ugyanakkor a húrok többféle bonyolultabb mozgást is végezhetnek és ezek tárgyalása újabb nehézségekre vezetett.

Kiderült azonban, ha az húrelmélet a részecskék spinjét szimmetrikusan kezeli, úgy, hogy a fermion és bozon állapotok szimmetrikusan jelennek meg benne, ez az ún. szuperszimmetria, akkor a húrok leírása már nem jár semmiféle nehézséggel, a húrok 'rosszul viselkedő mozgásai' kezelhetőekké válnak. A szuperszimmetrikus húrelméletet szuperhúrelméletnek nevezik, ezek természetes módon magukba foglalják a gravitáció létezését is.

Akár a Kaluza-Klein elmélet, a szuperhúr elméletek megfogalmazása is tartalmaz nem észlelhető térkiterjedéseket is. Tízkitérjedésű téridőt feltételező szuperhúrelmélet mellett van 26 kiterjedésű változat is. Számos olyan jóslatot tartalmaznak a szuperhúrelméletek, amelyek egyelőre nem ellenőrizhetők. Éppen ezért, akármennyire szép a megfogalmazásuk, egyelőre nem fogadhatók el kvantumgravitációs modellként, kölcsönhatásokat egyesítő végső elméletként.

6. Rend és szabadság a világban

Láthattuk az előzőekből, a világ néhány eleminek tekinthető részecskéből épül fel és a részecskék között fellépő kölcsönhatások is nagyon egyszerűek. Ennyire egyszerű építőkövekből és kölcsönhatásokból hogyan jöhetett létre az a kifinomult rend és összetettség, amely a világunkat jellemzi? Honnan ered a szervezettség, miért éppen ilyen rend alakult ki, amelyet láthatunk? Volt-e ebben a világnak szabadsága?

Tudomány azért lehetséges, mert a természet rendezett egészet alkot és megfogalmazhatók a természet jelenségeit leíró törvények. Törvények írják le a bolygók mozgását, a Föld forgását, évszakok és napszakok változását. Ezekben a törvények pontosságát, szigorát, kérlelhetetlenségét tapasztalhatjuk. Ugyanakkor észleljük azt is, mintha sok jelenségre nem vonatkozna törvényes szabályozottság. Időjárásai szeszélyek, földrengések kirobbanásai véletlenek megnyilvánulásaira utalnak. Hogyan fér meg egymás mellett szükségszerűség és véletlen? Ennek tisztázásához meg kell vizsgálnunk, vajon mindenre vonatkoznak-e a szigorú törvények vagy vannak-e a természetnek olyan területei is, ahol a törvények szabta ok-okozati lánc nem teljesen kötött. Először az érzékelhető világot leíró törvényekkel foglalkozunk.

Érzékelhető világ meghatározottsága. Az érzékelhető világ (idegen eredetű szóval makrovilág) az érzékszerveinkkel észlelhető világunkat foglalja magába. Ebbe beleértjük az érzékszerveink kiterjesztésül szolgáló egyes műszerekkel, mint a fénymikroszkóppal és a távcsövekkel tanulmányozható világot is. Méreteket tekintve felülről nincs korlát, az alsó határa a századmikron lehet. Ezt a tartományt a hagyományos természettan írja le, melynek alapja Newton három törvénye. A századmikronnál kisebb méretű világ, a kisvilág dolgainak, molekuláknak és nála kisebb rendszereknek leírása már a kisvilágtan (kvantummechanika) tárgya. Mint az előző fejezetben tárgyaltuk, a kisvilág vizsgálatokor a hagyományos fogalmaink jó része használhatatlanná válik, és szemléletes képek alkalmazása alig segít jelenségei, rendszerei megértésében.

A hagyományos természettani feladat megoldásának első állomása a rendszer időfejlődését megadó egyenlet felírása. Ez Newton II. törvényének a rendszerre való alkalmazását jelenti. Ehhez ismernünk kell a rendszert alkotó részecskék számát, tömegeit és a részecskék között ható erőket. Például a Naprendszer bolygóinak Nap körüli keringésének leírásához ismernünk kell a Nap és a bolygók tömegét és a tömegvonzási erőt. Továbbá meg kell oldanunk a felírt mozgásegyenletet is.

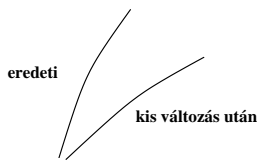
Változást ír le a mozgásegyenlet változást, megadja, hogy az idő telésével mint változik a rendszer. Ha tudni akarom, hogy egy adott időpontban ténylegesen milyen állapotban van, ehhez egy kezdeti időpillanatban ismernem kell a rendszer állapotát. Megadva ezt a kezdőállapotot, az egyenletet megoldva kiszámítjuk a változás mértékét, így meg tudjuk mondani, milyen állapotban lesz a rendszer a következő időpillanatban. Ezt tudva kiszámoljuk, milyen lesz a rendszer állapota a rákövetkező időpillanatban, és így tovább. Így másodpercnyi pontossággal ki tudjuk számolni, mikor lesz Magyarországon legközelebb teljes napfogyatkozás, mely vonal mentén lesz majd leghosszabb a teljes fedés, hol, mettől meddig fog majd tartani. Mivel a newtoni mozgásegyenletek megoldása egyértelmű, a jelen állapotból kifejlődő jövő csak egyféle lehet. Ahogyan jelen határoz meg jövőt, úgy a múlt sem enged másféle jelent, mint ami van. Rögzített a rendszer időbeli viselkedése. Teljes a meghatározottság, a kötöttséget semmi sem oldhatja. Nem beszélhetünk semmiféle szabadságról, meg van 'írva' a rendszer sorsa. Egy rögzítetten viselkedő rendszert viselkedése idegen eredetű szóval determinálnak, magát a rendszert determinisztikusnak nevezzük.

Óriási hatást gyakorolt a felvilágosodás korának gondolkodására a megszabottság felismerése. Laplace az egyes rendszerek rögzített viselkedéséből a teljes világmindenség meghatározott voltára következtetett. Szerinte a világ sorsa rögzített. Annyira, hogy a jövőjét akár ki is lehetne számolni. Laplace feltételezte, egy képzeletbeli lény - ezt Laplace-féle démonnak is nevezik, és csak abban áll az ember felett, hogy amit az ember tud, azt ő sokkal gyorsabban, teljesebben tudja -, előre, teljes pontossággal ki tudná számolni a világ sorsát. Ugyanis ha ismeri a világ valamennyi részecskéjét valamint a közöttük ható erőket, akkor fel tudja írni a világ fejlődését megadó egyenletrendszerét. Ha még ismeri a világ állapotát egy adott pillanatban, - ez valamennyi részecske helyének és sebességének ismeretét jelenti -, ebből a kezdeti állapotból kiindulva, egymást követő pillanatokon át 'lépegetve' ki tudja számolni a világ jövőjét. Ez azt mutatja, hogy a világ jövője előre le van rögzítve. Meghatározó jelentőségű fejleménye a 19. század természettanának az elektrodinamika megszületése. Alaptörvényei, a Maxwell egyenletek szintén időben pontosan meghatározott jelenségeket írnak le. Felismerésük tovább erősítette a világot megszabottnak felfogó szemléletet.

Káosz, determinisztikus káosz, kiszámíthatatlanság. Meghatározott világban nincs véletlen. De mindennapjainkban mégis nagyon sok mindent véletlennek tartunk. Véletlenek a kockadobás eredményei, ezek a valószínűségszámítás szigorú matematikai törvényeinek alappéldái. Mivel a kockavetés az érzékelhető világ folyamata, meghatározott. Hogyan fér itt össze szükségszerűség és véletlen?

Igen, a kockavetés megszabott folyamat. Ha teljes pontossággal ismernénk az eldobás körülményeit, milyen sebességgel, merre, mekkora perdületet adva dobtuk el, milyen a légellenállás, a padló állapota ahová a kocka zuhan, akkor elvileg pontosan kiszámító lenne hányast dobunk. Látszólagos véletlenszerűségének okai a következők. Egyrészt a kockavetés kimenetelét nagyon sok tényező befolyásolja. Még ez önmagában nem lenne gond. Ha sima lenne az egyes tényezőktől való függés, nem látszana véletlennek a végeredmény. De a folyamat kimenetele nagyon erősen függ az egyes tényezőktől. Kezdeti feltételek igen apró változása

már érzékelhetően más végeredményre vezet. Nagyon kis változásokat már nem tudunk beállítani, hétköznapi eszközeinkkel ellenőrizni. Emiatt a kockadobás hat kimenetele egyenlő valószínűségű.



15. ábra. Kaotikusan viselkedő rendszer erősen függhet a kezdeti feltételektől. Annyira, hogy a kezdeti értékek pontosabb megadásával sem érhetjük el azt, hogy a rendszer későbbi viselkedését kellő pontossággal ismerhessük, mivel a megoldások eltérése az idővel exponenciálisan nő.

Ha a rendszer viselkedése nagyon érzékeny lehet a kezdeti feltételekre, akkor a rendszer viselkedése kaotikus, lásd a 15. ábrát. Ahogy telik az idő, az eltérés exponenciális függvény szerint nő. Ez a kifejezés, kaotikus, fedi a szó hétköznapi értelmezést, ilyen rendszer ugyanis nem tartható kézben, nem számítható ki. Követhetetlen módon viselkedik. Egy kockavetés, amellet, hogy meghatározott, egyúttal kaotikus folyamat is. Determinisztikus káosznak nevezzük az ilyen viselkedést. Érzékelhető világunk véletlennek látszó folyamatai a determinisztikus káosz jelentkezései. Ha csak az érzékszerveinkkel felfogható világ törvényeit tekintenénk, nem beszélhetnénk valódi véletlenről, minden eleve meghatározott lenne.

Kaotikus viselkedésre szokszor idézett példa a pillangó hatás. Mint ismeretes, az északi féltekén az uralkodó szél nyugatról kelet felé fúj. Emiatt egy Peking felett repkedő pillangó szárnycsapásainak hatása annyira felerősödhet, hogy két-három hét múlva az USA nyugati partjain forgószél söpör végig. Nyilván nem a pillangó, hanem a légkörben felhalmozódott energia felelős a forgószélért. De az, hogy éppen milyen utat követ a forgószél, már nagyon kis dolgoktól is függhet.

Kaotikus viselkedést mutató tartományokban a rendszer jövőjének kiszámítása nagyon nehéz, mivel bizonyos kezdőértékeknél a jövő már teljesen véletlenszerű. Még ha a fent említett kényes értékeket ki is hagyjuk, az azokat övező kezdőérték tartományban teljes pontossággal ismernünk kell a kezdőértéket. Mert ha nem, a kezdeti pontatlanság egy idő eltelte után számítási hibát okoz. Ezért bármilyen kis kerekítés megfelelően sok idő eltelte után pontatlanná teszi a jövő ismeretét, mivel a kezdeti bizonytalanság hatása exponenciális függvényt követve nő. Emiatt a világ jövője kiszámíthatatlan. Laplace démona, ha mint egy számítógép, véges pontossággal számolna, már a newtoni mozgástan által leírt világ jövőjét sem számíthatná ki.

Követve a newtoni fizika szemléletét, bár a jövő megismerhetetlen, kiszámíthatatlan, és a lejátszására sincs megfelelő módszer, attól még egyértelműen létezik, a jelen magában hordozza. Még mindig meghatározott a világ. Ezt, a meghatározott jövő létezését a kisvilág viselkedése kérdőjelezi meg.

Kvantummechanikai határozatlanságok és a jövő nyitottsága. Jóval gazdagabb jelenségkört írnak le a kisvilág törvényei, mint az érzékelhető világot kormányzó törvények. Számos olyan jelenség, mint például az alagúthatás is megengedett, melyeknek az érzékelhető világban nincs megfelelőjük. A kisvilágtan törvényei még az óriásmolekulákra, így a DNS-re is érvényesek. Szigorú ok-okozati kapcsolat csak a hullámfüggvényre létezik, a mérhető mennyiségekre csak korlátozottan. Sok esetben csak valószínűségeket számíthatunk. Hogy a molekulával végül is miért pontosan az történik, ami, igazi véletlen, nem vezethető vissza valamilyen előzményre. Például a bomló atommagról csak azt tudjuk, mekkora a felezési idő, de azt, hogy egy adott radioaktív atommag pontosan mikor bomlik el, nem rögzített. Nem léteznek ún. rejtett paraméterek, amiket még nem ismerünk, s amelyek meghatároznák a ténylegesen történteket. Azaz a kisvilágot jellemző megfigyelhető mennyiségek értékei nem rögzíthetők le előre. Ha a kisvilág véletlen ingadozásai befolyásolhatják az érzékelhető világot, akkor ennek is van valamennyi szabadsága, azaz vannak előre nem rögzíthető megnyilvánulásai. Ez valamennyire oldhatja az érzékelhető világ meghatározottságát.

Ha egyszerre nagyon sok atomot, molekulát tekintek, viselkedésük statisztikusan már determinisztikus, azaz ok-okozati kapcsolattal értelmezhető. Úgy viselkedik a rendszer, mintha newtoni törvények által

leírható lenne, de az elemek nagyon nagy száma miatt csak statisztikus módszerek lennének alkalmazhatók. Eltűnnek, kiátlagolódnak az egyedi esetekre vonatkozó bizonytalanságok. Így nagyszámú radioaktív atommagra vagy elektronra a kvantummechanikai viselkedés statisztikusan meghatározottá válik. Ha egy-milliárd radioaktív atommagunk van, azt ugyan nem mondhatjuk meg, egyes atommagok éppen mikor bomlanak el, de abban biztosak lehetünk, hogy a felezési időt elérve kb. félmilliárd atommag már elbomlott. Ezért működik például megbízhatóan a CD, mert az egyes elektronok mozgása ugyan nem jósolható meg, de nagyon sok elektron együttese már meghatározottan viselkedik.

Hagyományos módon leírható rendszer a tranzisztor is, mert elég nagyméretű és a folyamatokban nagyon sok elektron vesz részt. Ennélfogva a kisvilágii hatások kiátlagolódnak. De a tranzisztor mérete nem csökkenthető a végtelenségig. Ezért a mikroelektronika ma még szédületes ütemű fejlődése rövidesen kifulladás, mert elérjük a tíz nanométer jellemezte elvi korlátot, ahol a kvantumos hatások már nem átlagolódnak ki. Még gyorsabb működést lehetővé tevő nanoelektronika eszközök már közvetlenül a kvantummechanika által szabályzott új működési elvekre épülhetnek majd. Hogy pont miképpen, egyelőre nem világos.

Egyes rendszerek szabadságáról . Nem feltétlen adott valamennyi rendszerre a nagy számú részecskére való kiátlagolódás. Kaotikusan viselkedő rendszerekben előfordulhat, hogy atomi, molekuláris méretekben véletlen jelenségek érzékelhető méretű változásokká nagyíthatódnak. Ezen kierősödések lehetősége nem zárható ki. Gondoljunk az úgynevezett 'egy hajszálon múltott az egész' jellegű történésekre. Kérdés az, hogy a természet rendszereit vizsgálva mely rendszerekben mutatkozhat meg igazi, kisvilágból feljövő véletlen hatása. Egy kisvilági bizonytalanságoknak kitett rendszer nem tekinthető teljesen kötöttnek, jövője nem meghatározott. Véletlen elem megjelenése a rendszer szabadságának lehetőségét hordozza.

Ha nagyon sok részecskéből, molekulából épül fel és a viselkedését vezérlő elemek durva felépítésűek, a rendszer meghatározott. Newtoni törvények írják le, vezérlő elemeik durvasága, érzéketlensége kizárja, hogy a kisvilág véletlenjei érdemben befolyásolhassák. Szikla, időjárási jelenségek, porszem sodródása, víz áramlása, bolygók keringése nagyon jó közelítésben meghatározott jelenségek. Ha véletlen mutatkozik mozgásukban, ez csak a determinisztikus káosz mutatkozása.

De ha a rendszer eléggé kifinomult szerkezetű, és az élők ilyenek, akkor sorsa nem teljesen kötött. Valamennyi élő genetikai állományának kialakulásakor megjelenik a kisvilágra jellemző valódi véletlen elem. Nézzük az ivarsejtek génállományának kialakulását. Két DNS-lánc található valamennyi sejtünk magjában, az egyik apai ivarsejtből, a másik az anyai petesejtből származik. Nézve az apától kapott DNS-láncot, ez az apa két DNS-láncából, hasonlóan az anyától kapott DNS-lánc az anya két DNS-láncából lett összevagosva. Hogy kitől éppen mi öröklődött át DNS-láncainkba, véletlen. De olyan véletlen, amelyek mögött igazi, azaz molekuláris szintű, kvantummechanikai véletlenek állnak. Most kezdték el az összevagosási folyamatért felelős egyik enzim szerkezetét tanulmányozni, hogy megérthessük, miként vágja el az enzim a DNS-szálat. Egyelőre csak a legegyszerűbb előkben tanulmányozzák ezt, de idővel összetettebb szervezetek és az ember DNS-állományának kialakulásának vizsgálatát is tervezik.

Mivel a magzat jövőbeni életében a DNS-állományának kialakulásakor történtek meghatározó fontosságúak, a kezdeti véletlen folyamatok eredménye érzékelhető méretűvé erősödik fel. Ezzel az élővilágban benne van a szabadság lehetősége. Most ugyan tél van, de már eldöntött, jövőre milyen levelek nőnek majd a fán. Ez már benne van a rügyekben. De hogy pont milyenek lesznek a levelek a rákövetkező tavaszokon, az még nincs meg. Nem szükségszerűen lett minden olyan, amilyenné alakult.

Állati viselkedésben az idegrendszeri szabályozottság miatt nagyobb a szabadság, mint a növényekben. Az idegrendszer, agy működéséből sem lehet eleve kizárni kisvilágbeli bizonytalanságok befolyása alatt álló elemeket. Minél összetettebb, érzékenyebb az állat idegrendszere, annál nagyobb esély lehet arra, hogy idegsejtek működését meghatározó molekuláris véletlenek szerephez juthassanak. Minél kifinomultabb az agyműködés, annál kevésbé kötött az állat viselkedése, annál nagyobb az állat szabadsága. Legnagyobb szabadsággal ezért az ember rendelkezik. Az ember a földi természet legszabadabb lény. Nyilván ez az egészséges emberre vonatkozik, akinek viselkedése nehezen jósolható meg. Idős ember élete, ha agyának

képességei lecsökkentek, egyre inkább meghatározott. Környezete nagyon sokszor jól ismeri, mire mit fog az öreg mondani, mikor mit fog csinálni.

Ezért állíthatjuk, a világ nem szükségképpen vált olyanná, amilyenek ismerjük. Sorsa másként is alakulhatott volna. Ugyanúgy, jövője sem lehet előre meghatározott. Nemhogy megismerhetetlen, ráadásul határozatlan is a jövő. Jelen nem rögzíthet jövőt. A kisvilágból felnagyuló, érzékelhető méretű való bizonytalanságok minden pillanatban magukban hordozzák különböző jövőbeni forgatókönyvek megvalósulásának lehetőségét.

7. Összetett rendszerek

Összetevőkre visszavezető gondolkodás. Hallatlanul érdekes kérdés, hogy mennyire meghatározott a világ egésze, ám erre igen nehéz válaszolni. Egyszerűbb kisebb rendszereket vizsgálni. Most azt elemezzük, miként érthető meg egy rendszer viselkedése, hogyan írhatjuk le keletkezését, működését. Egészen mostanáig az összetevőkre visszavezető, idegen eredetű szóval redukcionista módszer szolgált alapvető eljárásként. Ennek lényegét az alábbiak szerint foglalhatjuk össze. Egy adott rendszer az összetevő elemibb részek és az azok között ható, végsősoron az alapvető erőkből leszármaztatható kölcsönhatások segítségével írható le. Így a proton és neutron tulajdonságait az őket alkotó kvarkok és a kvarkok közötti erős kölcsönhatás határozzák meg. Mivel az atommagot protonok és neutronok építik fel, tulajdonságai a protonok és neutronok, valamint a közöttük ható magerők segítségével értelmezhetők. A magerő a kvarkok között ható, alapvető erőnek tekintett erős kölcsönhatás segítségével származtatható, az atomok tulajdonságait pedig az atommag és az elektronok kölcsönhatásai szabják meg. Itt a kölcsönhatás a Coulomb erő. Az alkotó atomtörzsekre és a kötésben résztvevő elektronokra vezethetjük vissza a molekulák tulajdonságait, az összetartó erők a Coulomb kölcsönhatásból származtathatók.

Az egyszerűbb alakzatok leírására igen jól bevált, összetevőkre visszavezető eljárást azután összetettebb rendszerekre is érvényesnek tételezik fel. Ennek alapján az élőlény leírható az őt felépítő molekulák és kölcsönhatásaik segítségével. Azaz az élet a szerves vegytanon alapul, az embert pedig mint állatot érthetjük meg, minthogy a lélektan végsősoron az állati viselkedéstanon alapul. Végül a társadalomtudományok a lélektanra alapozhatók. Hamarosan visszatérünk arra, mikkel foglalkozva és mennyire sikeres a természet jelenségeinek fenti magyarázati módszere.

Most az összetett rendszerek leírásának alkalmazott módszereivel foglalkozunk. Nagyon sok részecskéből álló rendszerek jellemzésének alapvető fogalma a rendszer rendezetlenségét megadó entrópia.

7.1. Entrópia

Alapvető tapasztalatunk, hogy a rend létrehozásához és fenntartásához munka szükséges. Ha például a házat elhagyják, az hamarosan tönkremegy. A világnak ezt a jól ismert sajátosságát a fizika a hőtan második főtételeivel írja le. Eszerint a folyamatok úgy zajlanak, hogy az energia, hacsak ebben valami nem gátolja meg, igyekszik minél jobban szétszórni, szétszóródni. Így a magára hagyott rendszer munkavégzésre alkalmas energiája egyre csökken, azaz energiája annyira szétarabolódik vagy úgy szétszóródik, hogy nem lesz képes az anyag rendezettebb alakra hozására vagy abban tartására. Az entrópia azt méri, mekkora a munkavégzésre alkalmatlan energia aránya. Egy magára hagyott rendszer entrópiája egyre nő, egészen a rendszer teljes lebomlásáig, szétszóródásáig.

Akkor maradhat alacsony a rendszer entrópiája, azaz akkor zajlhatnak benne munkavégző, rendező folyamatok, ha a rendszer nyitott, azaz kölcsönhat környezetével. Ekkor a kölcsönhatás során zajló energia- és anyagsere tartja fenn a rendszert. Alacsony entrópiájú energiát és anyagot vesz fel és elhasznált, nagy-entrópiájú energiát és anyagot bocsát ki, így maradhat szervezett, működőképes. Hogy lehet-e a sokelemű rendszer szervezettebb állapotokban, az a rendszer energiájától és a rendszer elemei közötti kapcsolatoktól függ.

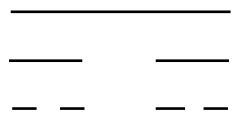
7.2. Önhasonlóság, fraktálok

Van úgy, hogy a bonyolultnak látszó rendszerek viselkedése is leírható egyszerű módszerekkel. Valóban, sokszor ami bonyolultnak tűnik, nem is annyira az. Erre példának vizsgáljuk meg a partvonalak hosszúságának a kérdését. Minél finomabb léptékű térképet készítünk, a partvonal annál hosszabbnak adódik. Ami messziről nézve egyenes, közlről már nem az. Mindenféle kiszögelések, bemélyedések jellemzik. Hamar rájöhetünk arra, hogy a partvonal hossza nehezen meghatározható fogalom. Ez a hossz bizonyos értelemben végtelenségnek tekinthető. Jól megvilágítja a partvonalak hosszúságának kérdését az alábbi, pontosan meghatározható alakzat területének számítása. Ezt a Koch által felfedezett mértani alakzatot, amit akár hópehelyhez is hasonlíthatunk, a következő módon állíthatjuk elő. Induljunk ki egy egyenlő oldalú háromszögből. Következő lépésben mindhárom oldal középső harmadára ültessünk újabb egyenlő oldalú háromszöget, melynek alapját hagyjuk el. Így a második lépésben egy Dávid csillagot kapunk, a harmadik lépés után már kezd rajzolódni a hópehely, lásd a 16. ábrát.



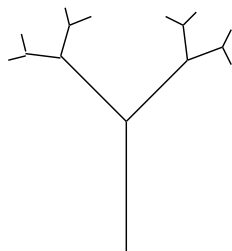
16. ábra. Koch vagy hópehely fraktál előállítás. Egyenlőoldalú háromszögből indulunk ki. Következő lépésként mindhárom oldal középső harmadára ültessünk újabb egyenlő oldalú háromszöget, melynek alapját hagyjuk el. Utána valamennyi oldal középső harmadára ültessünk újabb egyenlő oldalú háromszöget, és így tovább.

Végtelenségig folytatjuk az eljárást. Egy olyan idomot kapunk, amelynek végtelenül sok kiszögelése van. Mivel a terület lépésként $4/3$ -szorosára nő, végtelen sok lépés után végtelenné válik. Közben az idom területe véges. Ilyen idom a közönséges mértanban nincs. Fraktált készítettünk, a fraktálok mértánának is megvannak a maga tételei. Másik egyszerű példa a fraktálokra a Cantor-fraktál. Úgy állítjuk elő, hogy egy egyenes szakaszt három egyenlő részre osztunk és elhagyjuk a középső szakaszt. Ezt ismétljük a két megmaradt szakaszra, és így tovább a végtelenségig, lásd a 17. ábrát.



17. ábra. Cantor-fraktált úgy készítünk, hogy egy egyenes szakaszt három egyenlő részre osztunk és elhagyjuk a középső szakaszt. Ezt ismétljük a két megmaradt szakaszra, és így tovább a végtelenségig.

Fa fraktált úgy kezdünk készíteni, hogy a szakasz hosszának egy adott hányadát képezzük és a függőlegesre állított szakasz végére két ilyen, adott szöget bezáró szakaszt mérünk fel úgy, hogy egymás tükrözöttjei legyenek. A felmért szakaszok végpontjaira ugyanígy felmérjük az adott hányadaikat és az eljárást a végtelenségig folytatjuk, lásd a 18. ábrán.



18. ábra. Fa fraktált úgy kezdünk készíteni, hogy a szakasz hosszának egy adott hányadát a függőlegesre állított szakasz végére kétszer, adott szögben úgy mérjük fel, hogy egymás tükrözöttjei legyenek. A felmért szakaszok végpontjaira ugyanígy felmérjük az adott hányadaikat és az eljárást a végtelenségig folytatjuk.

A fraktálok alapvető jellemzője, hogy kisebb részeit kinagyítva azok az egészhez hasonlóak. Más kifejezést használva a fraktálok önhasonló alakzatok. Végtelen a Koch-féle görbe kerülete, bár a terület, amelyet bezár, véges. Hasonlítva a szokásos sima görbékhez, sokkal több pontból áll, mint azok. Felületszerű annyiban, hogy egy felületnek több pontja van, mint egy vonalnak. Nem felület a Koch-görbe, de leírható úgy, mint az egykiterjedésű vonal és a kétkiterjedésű felület közé besorolható alakzat. Emiatt a fraktáloknak kiterjedést adhatunk, ám ezek a kiterjedések nem egész számok, mint a vonal egy, sík két, térfogat három kiterjedése.

Csupán matematikai különlegességnek számítottak eleinte az önhasonló alakzatok, a fraktálok, de mára tudomány szinte valamennyi területén megjelentek. Ez nem azt jelenti, hogy például a partvonal tökéletes fraktál, akárcsak a Koch görbe. Inkább azt lehet mondani, hogy a fraktál bonyolult rendszerek modellje. Manapság már ezekben mérhető a természetben felismert, fraktál módjára viselkedő, ekként modellezhető rendszerek száma. Olyan egymástól annyira távoleső jelenségek, mint a csillagrendszerek térbeli eloszlása, a Szaturnusz gyűrűi, a földrengések, a villám cikcakkjai, a hópehely, a tőzsde mutatójának menete, a folyók folyása fraktálokkal jellemezhetőek. Azaz természeti és más jelenségek hirtelen változásainak, töréseinek, elágazásainak közös tulajdonságait tárgyalhatjuk a fraktálok mértánával. Ez arra utal, hogy az önhasonlóság világunk fontos eleme. Nem meglepő, hogy a fraktálszerű képeket szebbnek találjuk.

A fraktálok mondhatni saját jogon léteznek. Nem lehet őket sima görbékre visszavezetni, nem csupán valamilyen simaság bonyolultabb változatai. Attól sem függenek a természeti jelenségeket leíró fraktálok kiterjedései, milyenek az elemi részek fizikájának törvényei. Ezért a hagyományos tudományos felfogáshoz szorosan kötődő, mindent a részekre visszavezető eljárás megvalósíthatatlannak tűnik.

7.3. Hálózatok

Fontos jellemző a rendszer elemei közötti kapcsolatok száma. A nagyvállalat, a társadalom, egy kábítószerkereskedő társaság, a világháló, egy sejt, az agykéreg jellemzésére a rendszer elemei közti kapcsolatokat hálózatok felrajzolásával szemléltethetjük. Úgy ábrázoljuk, hogy a rendszer elemeit pontként jelöljük és a kapcsolatban álló elemek esetén a pontokat éllel kötjük össze. Ránézve a hálózatra láthatjuk, mennyire sok összekötés van az elemek között, valamint miféle szabályszerűség szerint kapcsolódnak az elemek egymáshoz. Különböző rendszereket ábrázoló hálózatok ugyan eltérő szabályok szerint épülhetnek ki, de néha az esetleg egészen más jellegű rendszert leíró hálózatok hasonlíthatnak egymáshoz.

Egy hálózat összefüggőségét az jellemzi, hány pontot érintve lehet eljutni egyik pontjából a másikba. Megnézték, hogy az emberiségből két tetszőleges embert kiválasztva átlagosan hány személyes ismerős közvetítésével juthatnak el egymáshoz. Ez a szám a felmérések szerint 6, azaz 6 ember ismeretségi körének közvetítésével bárkihez eljuthatunk.

Véletlen hálózatban az elemek véletlenszerűen kapcsolódnak össze. Ilyet például úgy készíthetünk, hogy két pontot kiválasztva kockát vetünk és ha hatos a dobás, akkor összekötjük a két pontot. Más dobás esetén nincs összekötés, hanem két pontot újra kiválasztva folytatjuk az eljárást. Egy idő után az összekötések kisebb csoportok kialakulásához vezetnek. Ha a pontok és az összekötések száma már nagyjából megegyezik, akkor a hálózat összefüggővé kezd válni. Haladva a vonalak mentén a rendszerben nagyjából mindenhová eljuthatunk. Még pár évvel ezelőtt is véletlen hálózatoknak tekintették a természetben és társadalomban kialakult hálózatokat. Mára kiderült, ez nem így van. Véletlen hálózatú emberiségre a hatlépéses szabály nem igaz. Egy embert nagyjából kétszáz másik ember ismer közelebből, de vannak olyanok is, akik hatalmas ismeretségi körrel rendelkeznek. Ők központoknak tekinthetők. Ha véletlenszerűen alakulnának ki ismeretségek, akkor a központoknak megfelelő igen nagy ismeretségi szám nem fordulhatna elő. Olyanként hatna, mintha az átlag 170 cm magas emberek között nagyon ritkán, de megjelenének az utcán 20, 200 sőt elvétve 2000 méter magas emberek is.

A társadalomban és a természetben fejlődő hálózatokban, így az a világháló esetén is, a központok képződése általános jelenség. Ha egy növekvő hálózatban az új pontok a már sok kapcsolatú pontokhoz

nagyobb valószínűséggel kötődnek, központok alakulnak ki. Igen nagy a központokkal rendelkező hálózatok hibátűrése. Ha meghibásodnak és kiesnek elemek, ez általában nem rendíti meg a rendszert. Működik tovább. Pontok felét, háromnegyed vagy nagyobb részét, csaknem az összeset eltávolíthatják, akkor is fennmarad a rendszer. De ez nem jelenti, hogy a rendszer sebezhetetlen. Ha a szándékolt támadások éppen a nagy központokat rombolják és azok közül elég sokat megsemmisítenek, akkor a rendszer valóban összeomlik.

Matematikailag az egyes pontok kapcsolatainak számát hatványfüggvényes eloszlással ábrázolhatjuk és a hálózat szerveződése ezzel a hatványkitevővel jellemezhető. Ha a fraktálokra tekintünk, lásd az előző részt, az egy hatványfüggvényes szerveződés alapján épült, térben megjelenő rendszernek tekinthető. Időben is megjelenhet hatványfüggvényes eloszlás. Nem egyenletesen szitálva hullik le az éves csapadék, van felhőszakadás és hosszabb szárazság is. Hatványfüggvényes eloszlást követnek a nyeresi esélyek is.

Az is segíthet a rendszerek megértésében, ha a hálózata kisebb hálózatokat, alacsonyabb szinteket tartalmaz. Egy szint működését megérthetjük, ha alacsonyabb szintre megyünk, de működésének értelmét magasabb szinten találhatjuk meg. Egymásbaágyazott rendszerekből áll a világ, egyik alaptulajdonsága ez. Éppen ennek köszönhetően érthetjük meg. Még azt is figyelembe kell vennünk, hogy nem egyenlően erősek a hálózat egyes pontjai között a kapcsolat. Nemcsak a kapcsolatok száma (központok léte), a térbeli eloszlási kép (fraktálok), szerveződés (egymásbaágyazódás) mutat fokozatokat, hatványszerű eloszlást, hanem a kapcsolódás erőssége is. A gyenge kapcsolatok a hálózatok általános és szükséges elemei, ezek adják a kapcsolatok döntő többségét.

Hálózat alkalmazkodása - önszervező kritikusság. Hálózatok változhatnak. Vannak rendszerek, amelyek a külső hatásra egyetlen eseménnyel válaszolnak. Mint a kréta, ami törik. Lehetséges külső hatásra kisebb, egyszerű események sorával válaszolni, amint kukoricaszemek pattognak ki melegítéskor. Van a törés és pattogás között más lehetőség is, a recsegés. Hatványszerű viselkedést a változásokhoz igazodás foka is mutathat. Nézzük az alábbi folyamatot.

Felülről tölcserből egyenletesen csorog homok az asztalra. Eleinte a dombocska egyre meredekebb lesz, de bizonyos magasság elérte után a domb meredeksége állandó marad, értékét egy határszög adja meg. Bár a homokdomb mérete növekszik, közben az állapota bizonyos értelemben egyensúlyinak tekinthető, mert a görgetegek a meredekséget állandó értéken tartják. A homokdomb viselkedését az önszervező kritikusság kifejezéssel jellemzik. Ebben az állapotban a rendszer nagyon érzékenyen válaszol a környezet hatására, jelen esetben a homok csorgására, kisebb, vagy akár nagyon nagy, az egész domboldalt érintő görgetegek indulhatnak meg rajta. Kisebb görgetegek gyakrabban, nagyobbak ritkábban fordulnak elő. Egyszerű hatványfüggvényes kapcsolat áll fenn a görgetegek nagysága és gyakorisága és ez a kapcsolat független a domb nagyságától.

Ha beáll az önszervező kritikus állapot, a hálózat kapcsolatrendszere átalakul. Ha a görgeteg lezúdul, először a gyenge kapcsolatok szakadnak fel. Majd újraképződnek a gyenge kapcsolatok és a rendszer újra egyensúlyhoz közeli állapotba kerül. Egy önszervező kritikus állapotot a káosz és a rend összhangja jellemmez. Bár a káosz miatt megjósolhatatlan, egyes pillantokban pontosan mi fog történni, az egész rendszer viselkedése mégis áttekinthető, kiszámítható.

Számos más, egészen különböző rendszer is leírható az önszervező kritikusság segítségével. Ilyen a vízesés, ahol a lezúduló sugarak viselkedése egyenként kaotikus, ám a zuhatag egésze kiszámítható módon juttatja le a mélybe víztömeget. Ilyenféle rendet mutatnak a zsúfolt országúton kialakuló közlekedés is. Különböző hosszúságú forgalmi dugók képződnek és ezeknek köszönhető, hogy az országút áteresztőképessége a lehető legnagyobb. Ha a forgalom áramlásában kevesebb torlódás van, akkor vagy nagyon kevés kocsis van az úton, vagy az egész egyetlen hatalmas dugó, ahol a zsúfoltság mindenkit azonos sebességre kényszerít.

Arányos (lineáris) rendszerek. Akkor arányos egy rendszer, ha a feltételek kisebb változása a feltételek változásával arányosan változtatja meg a rendszert. Kétszer akkora változtatás kétszeres hatást, fele akkora változtatás fele akkora hatást kelt. Ilyen rendszereket lineáris egyenletek, egyenletrendszerek írják le, amelyek csak elsőfokú tagokat tartalmaznak. Ezek matematikailag könnyen kezelhetők, így a rendszer jövője könnyen kiszámítható. Az egyenes arányosságok miatt arányos rendszerekben kaotikus viselkedés nem fordul elő. Arányosan viselkedik a rugó és más egyszerűbb rendszer, de lineárisan közelítésben írhatók le egyes összetettebb rendszerek is.

Még a következő tulajdonságuk teszi különösen egyszerűvé az arányos rendszerek vizsgálatát. Változtatva valamit, megjelenik ennek hatása. Másfajta változtatást végzünk, annak is megvan a megfelelő hatása. Ha a két változtatást egyszerre végezzük el, annak eredménye a két külön kapott hatás egyszerű összege lesz. Ezért lineáris rendszerekre a rendszer egészének vizsgálatát a rendszer elemeinek egyenkénti vizsgálatára vezethetjük vissza. Arányos rendszer egésze ezért nem más, mint részeinek egyszerű összege. Szabadon szétszedhetjük, összerakhatjuk, semmi sem változik.

Pár éve, mióta már többet tudunk a hálózatokról, láthatjuk az arányos közelítés helyét. Arányos rendszer hálózatának képe a következő. Központja valamennyi ponttal össze van kötve és a központ és pont közötti kapcsolat valamennyi pontra ugyanaz. Nincs a többi pont között összeköttetés, ezek egymást két lépésben, a középponton keresztül érhetik el. Abban is egyszerű az arányos közelítésnek megfelelő hálózat, hogy nincs benne tagoltság. Sokszor nagyobb hálózat alrendszereként találkozhatunk arányos rendszerrel.

Arányos rendszerekre nagyon jó példák a kis amplitudójú hullámjelenségek. Lineárisak az elektromágneses hullámokat leíró Maxwell egyenletek is. Szétszedhetjük, összerakhatjuk a rádióhullámokat. Adáskor az anyagot vivőhullámra ültetik, vételkor a vivőhullámra vitt anyagot arról leválasztják.

Alapállapotban, amikor a sok részecskéből álló rendszer energiája a lehető legkisebb, az alkotó részecskékre ható erők arányosak lesznek a részecske egyensúlyi helyzetétől való elmozdulásának nagyságával. Emiatt az alapállapotú rendszerek lineáris rendszerként közelíthetők. Ugyanaz az átlagos erő hat az egyes részecskékre és ez nem függ a részecskék egymáshoz képesti helyzetétől. Emiatt a rendszert alkotó részecskék egymástól függetlenül mozognak. Alapállapotú atommag, atom, molekula, kristályrács tulajdonságai mind nagyon jól értelmezhetők a lineáris közelítéssel. Tényleg úgy kezelhetjük, foghatjuk fel az ilyen rendszereket, mint részeik összegét. Vizsgálatukhoz tehát valóban az a legjobb módszer, ha alkotórészeikre bontjuk őket, azok mozgását vizsgáljuk. Majd a rendszer egészének állapotát alkotórészei állapotainak összegeként kapjuk meg.

Nagyon sikeres a lineáris közelítés, hosszú ideig szinte kizárólag csak ezt alkalmazták. Nem csoda, ha mindeddig a tudományos kutatás fő célja arányos rendszerek vizsgálatára összpontosult. Az alkotórészekre való visszavezetés, a redukcionizmus, hogy az egész nem más, mint a részek egyszerű összege, a tudományos módszer rangjára emelkedett. Aki mással próbálkozott, számíthatott társai elnéző mosolyára. Ennélfogva a módszer olyan területekre is áttért, ahol a lineáris közelítés nem alkalmazható.

Nemlineáris rendszerek. Arányos viselkedést csak kevés rendszer mutat. Mindennapjaink rendszereinek nagy többsége az alapállapotnál magasabb energiájú, nemegyensúlyi rendszer. Míg az alapállapotú rendszerekben a rendszer elemeinek egymással való kölcsönhatásától eltekinthetünk, a magasabb energiájú rendszer elemeinek egymással való kölcsönhatása fontossá válik. Nézve a magasabb energiájú rendszer hálózatát, abban hurkokat találunk. Azaz egy pontból elindulva, a pontokat összekötő élek mentén visszajuthatunk a ponthoz. Hurkok megjelenése a rendszerben visszacsatolási jelenségekre utal. Ekkor egy elem nem egyszerűen csak hat a többire, hanem ennek a hatásnak az eredménye visszahat magára az elemre is.

Egyrészt a kölcsönhatások nemarányosak voltak, másrészt a visszacsatolások, a hálózati hurkok megjelenése miatt a rendszer már nem viselkedik arányosan. A rendszert leíró egyenletek sem az egyszerűbb lineáris egyenletek. Nem csupán első hatványon szereplő tagokat tartalmaz, lehetnek benne például négyzetes, köbös, négyzetgyökös stb. kifejezések is. Az ilyen egyenleteket idegen eredetű szóval nemlineáris egyenleteknek nevezik. Körülményes a nemlineáris egyenletek megoldása. Amíg nagyobb teljesítményű

számítógépek nem voltak, az arány nélküli rendszerek tanulmányozása szinte lehetetlen volt. Csak az utóbbi évtizedekben, a számítások gépesítésének köszönhetően indult el a terület alaposabb kutatása.

Lineáris közelítést nemlineáris rendszerre használva is kaphatunk eredményeket, de azok korlátozott érvényűek. Ahogyan a kört is csak nagyon kis szakaszán közelíthetjük jól egyenessel. Ha a rendszer elemei között a kölcsönhatások nem túl erősek, akkor rövid távra az arányos viselkedés jó közelítést adhat. Hosszabb idő elteltével az eredmények már megbízhatatlanná válnak.

Arány nélküli rendszerekre nem érvényes az arányos rendszereket jellemző szétszedhetőség és összerakhatóság elve. Ha két különböző ok együttes hatását vizsgáljuk, szembeszökően új viselkedési módokat tapasztalhatunk, amelyek semmiképpen nem vezethetők vissza arra, hogyan viselkedik a rendszer egyik vagy másik esetben. Arány nélküli rendszerek esetén a kétszeres hatás vezethet feleakkora vagy akár tízszer akkora változáshoz is.

Káosz arány nélküli rendszerek viselkedésében jelenik meg, erre példa a 6. részben tárgyalt pillangó hatás. Káosz akkor lép fel, ha a rendszer egy eleme elég sok más elemmel kölcsönhathat, ekkor ugyanis kis változások is befolyásolhatják a teljes rendszer viselkedését. Valamennyi kaotikus rendszer arány nélküli, de a fordított állítás nem igaz, arány nélküli rendszerek is lehetnek egyensúlyihoz közeli állapotban és alig mutatnak kaotikus viselkedést. Erre példa a szoliton hullám kialakulása.

Szolitonok. Még a 19. század első felében a következő nagyon érdekes hullámjelenséget figyelték meg. Hirtelen megállt egy hajó a csatornán és ekkor előtte egy egyetlen taréjból álló hullám képződött. Ez kilométereken át haladt anélkül, hogy akár alakja vagy sebessége változott volna. Lóháton követte a megfigyelő aki a furcsa képződményt a csatorna egy kanyarulatánál vesztette szem elől.

A meghökkentő jelenséget értelmező egyenletet a 19. század végén írták fel. Közönséges víz hullám esetén, például amikor követ dobunk a vízbe, a keletkezett hullámfodrozódás gyorsan eltűnik. Itt a létrejött hullám vonulat különböző hullámhosszú és magasságú hullámokból tevődik össze. Csak a hullámhosszaktól függ az összetevő hullámok sebessége, magasságuktól nem. Nagyobb hullámhosszú hullámok nagyobb sebességűek. Ilyen hullámok egyszerűen összeadhatók, így lineárisan viselkednek. Amikor a hullámozás keletkezik, a kő csobbanásakor, a különböző hullámhosszú összetevők még együtt vannak. Erősítik egymást. Egy idő múlva viszont a különböző terjedési sebességek miatt a különböző hullámhosszú összetevők elcsúsznak egymáshoz képest. Hullámvölgyek hullámheggyekkel találkoznak és a hullámozás elenyészik. Ilyen közönségesen viselkedő lineáris hullámok mélyebb víz felszínén keletkeznek.

Bizonyos feltételek mellett fellép egy másik jelenség, amely a fenti széteséssel szembeni hatást fejt ki. Ha a víz sekély, akkor a hullám sebessége nem csak a hullámhosszától, hanem a hullám magasságától is függ. Ilyen hullámok összeadódása nemlineáris folyamat. Más lesz a keletkezett hullám terjedési sebessége, mint amilyen az összetevő hullámok sebességei voltak. Ha különböző magasságú és hullámhosszú összetevő hullámok megfelelő módon adódnak össze, akkor a keletkezett hullám akár együtt is maradhat. Ez nem különleges eset. Azok az összetevők, amelyek ezt a feltételt nem teljesítik, egyszerűen kiszóródnak az eredő hullámból. Így képződik a csatornában megfigyelt hullám is.

Az erre a feladatra felírható nemlineáris egyenlet, mint a nemlineáris egyenletek általában, nehezen megoldható. Csak a számítógépek megjelenése után, kb. negyven évvel ezelőtt kezdhettek el a megoldásaival komolyan foglalkozni. Megvizsgálták azt is, mi történik, ha két ilyen magányos hullám találkozik. Ilyenkor az ütközés, összekeveredés és szétesés után a két hullám megőrzi alakját és sebességét, úgy folytatja a terjedését. Azaz megőrzi azonosságukat. Szolitonnak nevezik az ilyen hullámot, a szoliton magányost jelent. Szolitonok bármely közegben fellépnek, ahol nemlineáris viselkedés mutatkozik, függetlenül attól, hogy mi a közeg. Létrejöhetnek folyadékban, szilárd közegben, gázban, elektromos áramban, elektromágneses térben. Szolitonokat olyan egész különböző területeken is tanulmányozhatunk, mint a légkör, kristályok, plazmák, optikai szálak, idegszálak, villamos berendezések. Szoliton hullám keletkezése vezet a szökőár kialakulásához is.

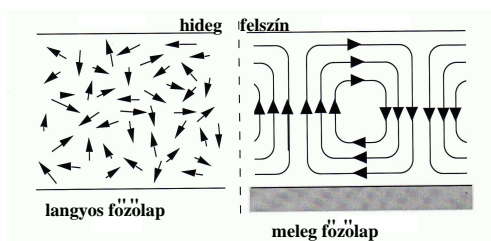
7.4. Önszerveződés

Akkor léphet fel önszerveződés, ha a rendszer hálózati képében hurkok jelennek meg, ami visszacsatolási hatások felléptét jelzi. Összegződhetnek a visszacsatolások és a rendszerben körfolyamatok alakulhatnak ki, amelyek akár egymásba is kapcsolódhatnak. Közel állandósuló mintázatok jelennek meg. Ezzel az egyébként nagyenergiájú rendszer egyensúlyihoz közeli állapotba kerül, kaotikus viselkedése gyengül. Egy önszerveződő rendszer a káosz peremén, a káosz és rend határán létezik, de nem a káosz, hanem inkább egyensúly, rendszerezettség jellemzi. Bizonyos esetekben magasan szervezett mintázatokat, mozgásokat mutat.

Az önszerveződő rendszer nagyon szoros kapcsolatban áll környezetével, attól elválaszthatatlan. Nem gépezet vagy merev szerkezet, inkább folyamat. Képes alkalmazkodni környezeté változásaihoz, akár azon az áron is, hogy átalakul. Igyekszik magát fenntartani, és ha arra kényszerül, képes komolyabb változásra is. Bár működését igen sokféle folyamat és változásra való képesség jellemzi, az önszerveződő rendszer bizonyos mennyiségek értékeit igyekszik állandónak vagy közel állandónak tartani. Hálózati képét a hurkokon kívül a 7.3. részben leírt nagyobb központok jellemzik. Ennek köszönhető az önszerveződő rendszerek hibatűrése, körülményekhez való alkalmazkodási képessége.

Sokat idézett példa az önszervezésre a lézer. Ha forró gáz vagy szilárd anyag viszonylag kevés energiát kap, közönséges fényforrásként világít. Ilyenkor egyes atomok egymástól függetlenül, véletlenszerűen viselkednek, körülbelül annyi atom sugároz, ahány éppen felgerjesztődik. Ekkor a rendszer hőmérsékleti egyensúly környékén van. Ha a rendszert olyan módon töltjük fel energiával, hogy messze eltávolodik ettől az egyensúlyi állapottól, egy határpontot átlépve a rendszer lézer üzemmódba kerül. Atomok százmilliárdjai egymással összhangban, egyszerre, egy ütemben, egy irányba sugároznak.

Önszerveződő rendszert alkot az áramló víz is, ha az áramlás sebessége egy bizonyos határt átlép. Alacsony sebességeknél a víz simán, egyenletesen folyik. Egy határsebesség után a folyadék mozgását örvények keletkezésének és elmúlásának végtelen sora jellemzi. Örvények elsősorban akadályok környékén, például hídlábnál keletkeznek. Képződésükhöz az energia a gyorsan áramló víz mozgási energiájából származik. Mindenki ismeri az örvények szabályos, jellegzetes mintázatait.



19. ábra. Amíg az edény feneké és a folyadék felszíne között kicsi a hőmérsékletkülönbség, addig a folyadék molekulák véletlen ütközései továbbítják felfelé a hőenergiát, lásd balra. Nagyobb hőmérsékletkülönbség esetén a vízmolekulák Bénard alakzatokba szerveződnek, lásd jobbra.

Talán az egyik leggyakrabban felhozott példa önszerveződésre a Bénard féle instabilitás. Ez a jelenség akkor lép fel, ha tűzhelyen edényben vizet melegítünk. Az a vízréteg, amely a tűzhely lapja felett van, melegebb vizet tartalmaz, mint a felette lévő rétegek. Mivel a melegebb víz sűrűsége kisebb, mint a felette lévő hidegebb vízrétegek hőmérséklete, ezért felfelé törekszik. Amíg az edényben lévő vízben a fenék és a felszín közötti hőmérséklet különbsége kicsiny, a melegebb vízréteg felszínre törését a víz belső súrlódása megakadályozza. Ebben az állapotban a folyadék egyenletes képet mutat. Lassan vezetik felfelé a víz molekulái a hőt a folyadékon át és a rendszer közel hőmérsékleti egyensúlyban van. Ha viszont a rendszert erősebben melegítjük, a rendszer eltávolodik az egyensúlyi állapottól és látványos változás történik. Ha a víz alsó és felső rétegei közötti hőmérséklet egy kritikus értéket átlép, a folyadék bizonytalan állapotúvá válik és elkezd áramlani. Megfelelő feltételek mellett az áramló víz csak úgy magától magasan szervezett formákba, hengerekbe vagy hatszögletes sejtekbe rendezi magát, lásd a 19. ábrát. Kezdeti egyöntetűségét

egy csapásra nagyobb távolságra kiterjedő, szerveződő rendezettség veszi át. A szervezett alakzatok térbeli mérete sokszorosa a vízmolekulák között fellépő erők hatótávolságainak. Bár egyes vízmolekulákat közvetlen szomszédai vakul taszítják vagy vonzzák ide vagy oda, a milliárdszor milliárd vízmolekula egymással összhangban, együttesen mozog.

Önszerveződésre valamennyi tudományterület szolgáltat példákat. Egyensúlyi állapottól távoli vegyi folyamatok ütemesen megjelenő mintázatokat jeleníthetnek meg. Ezek az egyenletes eloszlású folyadékból maguktól bukkanak elő. Az önszerveződés leginkább szembetűnő példáit az élővilág szolgáltatja, itt annak meghatározója a DNS-szalban rögzült adathalmaz. Önszerveződő rendszerként foghatók fel az élő szervezetek, életközösségek és az élővilág egésze is. Nézzük a sáskajárást. Olyan csoportos jelenségekre, együttműködési módokra vezethető vissza, amelyek semmiképp sem érthetők meg sáskánként. Ha az egyedsűrűség egy bizonyos érték alatt van, akkor a mezőn legelésző sáskák valóban az ott lévők egyszerű összegének tekinthetők. Ha viszont a sáskák területegységre vett száma bizonyos értéket átlép, beindulhat a sáskajárás. Egy nagyobb területről a rovarok egyszerre emelkednek levegőbe és hosszabb távolságot együtt repülve szállnak le ismét. Egyszerű szabályok állhatnak a sáskák, hangyák és más rovarok tömeges mozgásának szerveződése mögött. Feltételezhető, hogy mindegyik rovar csak a közvetlen szomszédjának a mozgásához igazodik.

Két általános feltétele van az önszerveződő rendszerek kialakulásának és fennmaradásának. Egyik az, hogy létezzen a rendszer elemei között kölcsönhatás. Elég lehet az is, ha az elemek csak saját közvetlen szomszédaiakkal hatnak kölcsön. Akár a rovarok, csak a közvetlen szomszédaiakkal hathatnak kölcsön a vízmolekulák, a hatóerők sugara kb. 10^{-8} cm , míg a létrejött szerveződés, az örvény mérete ennek durván a milliárdszorosa. Másik általános feltétel a rendszer nyitottsága, azaz álljon kölcsönhatásban a környezetével, mert a rendszer entrópiája csak így maradhat alacsony. Rendezettségét megőrző önszerveződő rendszer a kölcsönhatás során a környezetét teszi rendezetlenebbé, ezzel az önszerveződő rendszerből és a környezetéből álló nagyobb rendszerre már teljesülni fog az entrópia növekedésének törvénye, lásd a 7.1. szakasz végén.

Egy önszerveződő rendszerek igen érzékeny válaszokat adhat a környezet változásaira és annyira rá van utalva a környezettel való állandó kölcsönhatásra, hogy igazából nem is választható el attól. Nemcsak alkalmazkodnak környezetükhöz, miközben emésztik azt, hanem máshogyan is befolyásolják. Mennél összetettebb az önszerveződő rendszer, annál erősebben tudja alakítani környezetét, azért, hogy a maga számára kedvezőbb feltételeket teremtsen, környezete forrásait minél jobban hasznosítani tudja. Mint az élővilág, amely maga is önszerveződő rendszer, úgy alakította a Föld felszíni viszonyait, hogy az az élet számára minél kedvezőbb legyen. Vagy gondoljunk a közlekedésre, vasút vagy gépkocsi elterjedésére. Úgy alakították át az őket hordozó társadalmi környezetet, hogy az minél jobban rá legyen utalva a vasútra vagy a gépkocsikra. Mivel az önszerveződő rendszerek a káosz peremén vannak, néha igen érzékeny válaszokat adhatnak a környezet változásaira. Ezért jövőjük megjósolhatatlan. Ugyanakkor, külső behatásokra való esetleges rendkívüli érzékenyséjük azt is lehetővé teszi, hogy bizonyos igen kicsiny külső hatásokkal ellenőrzés alatt lehet tartani viselkedésüket.

Kérdés, hogyan fogalmazhatók meg az önszerveződés törvényei. Mindeddig nem született meg az összetett rendszerek általános elmélete. A vizsgált esetekben felismerhetők közös sajátosságok, de még nem sikerült az önszerveződést mutató jelenségeket néhány egyszerű törvény működésére visszavezetni. Remélhető, hogy ezeket a jelenségeket legalább bizonyos osztályokba sorolhatjuk. Erre a hálózatok elméletének igen gyors fejlődése adhat esélyeket.

Hálózatok, önszerveződés és gondolkodásmód. Hajlamosak vagyunk gépiesen, tisztán az ok-okozati láncot követve gondolkodni. Mindez bizonyos területeken nagyon hatékony és eredményes, sokszor viszont nem. Vizsgálva a természetet, vannak egyszerű rendszerek, amelyek valóban áttekinthetően működnek, akár a gép. Gondoljunk a Naprendszer bolygóinak mozgására, nem véletlen, hogy ezt vizsgálva az óraműként viselkedő világegyetem képe jelent meg az emberi gondolkodásban, lásd a 1.2. szakasz végén.

Mostanában kezd fejlődni a hálózatok természettudományos elmélete, ennek jellegzetességeit a 7.3. szakaszban ismertettük. Maga a gép is ábrázolható hálózatként, elemei erősen, sorosan csatoltak. A hálózat fogalma jóval általánosabb, mint a gép fogalma. Láttuk, a hálózat általában nem gépezet, ha egy gépezetből valami elromlik, valamit eltávolítunk, valószínű az egész működésképtelenné válik. Egy hálózatból akár az elemek nagyrészét is eltávolíthatjuk, mégis működőképes maradhat. Máshogyan működik mint a gép, nem követ merev szabályokat. Egy hálózat betagolódott alrendszerei működhetnek gépiesen, gépiesebben, de a hálózat egésze az önszerveződés elveit követve, magát átszervezve a környezet változásaihoz is képes igazodni.

Önmagát szervezni, változtatni képes rendszereket nem lehet egyszerű módon megismerni és megítélni. Hiába ismerem jól a hálózat egyszerűen, gépiesen, lineárisan működő alrendszereit, ezekből a hálózat egészének nemlineáris volta miatt nem értem meg, hogyan állt össze az egész és végeredményben mi tartja össze a hálózatot. Mivel a természet jelenségeinek csak kis hányada viselkedik lineárisan, a többi összetettebb hálózatokat alkotva létezik, a hálózatok és az önszerveződő rendszerek tanulmányozása és megértése igen sok feladatot tartogat a 21. század természettudományának.

8. Táguló világegyetem

Végtelen világegyetem és Olbers paradoxona. Newton után, egészen a 20. század közepéig, a térben és időben végtelen világmindenség eszméje általánosan elfogadott volt. De léteztek arra utaló jelek, hogy az állandó állapotú, örök és végtelen világegyetem képzete ellentmondásokra vezet. Olbers paradoxona arra vonatkozik, hogy az égbolt éjszaka nem lehetne sötét. Ha ugyanis a világegyetem térben és időben végtelen, és a világmindenségben a csillagok eloszlása egyenletes, a végtelen sok csillag miatt nem lehetne az égen fekete folt. Bármilyen irányba néznénk is, mindenfelé volnának csillagok. Így az égbolt minden egyes pontja éjjel is világítana. Emiatt éjjel is nappali fény árasztana el minket.

Olbers paradoxona úgy oldható fel, ha feltételezzük, hogy a belátható világegyetem térben véges, azaz létezik a világegyetem látóhatára, ezért az égboltot csak részben "fedhetik" le csillagok. Továbbá a világegyetem sem állandó állapotú mert a csillagok sem élnek örökké, keletkeznek és elmúlnak. Csak azokat látjuk, melyek éppen olyan életszakaszban vannak, hogy fényük eljuthat hozzánk. Ma már tudjuk, hogy ez a két indok, a világegyetem látóhatárának léte és a csillagok véges élettartama egyaránt helytálló. Továbbá az örök világegyetem és a benne folyamatosan létező, megfordíthatatlan természeti folyamat nem fér össze. Egy örök világegyetemben a csillagok már végtelen idővel ezelőtt kialakultak és kiegészítettek volna. Világegyetemünk viszont bővelkedik a csillagfejlődéshez hasonló megfordíthatatlan folyamatokban. Ezzel inkább egy egyszer felhúzott, lassan lejáró órára hasonlít. Ez határozottan arra utal, hogy volt kezdet.

Rohamosan fejlődő megfigyelési módszereinknek köszönhetően ma már nagyon sokat tudunk a világegyetemről. Száz éve még csak a látható fény tartományában vizsgálhatták a világmindenséget, tudtak lemezzre felvételt készíteni. Ma nagy távcsövekkel a látható fény tartományában négy nagyságrenddel pontosabb megfigyeléseket végezhetünk. Mivel a Föld légköre a világűrrel érkező sugárzások túlnyomórészét elnyeli, esély sem volt ezek észlelésére. Manapság a mérési eljárások rohamos fejlődése és a műholdakra telepített mérőberendezések segítségével nagyon sok mindent meg tudunk mérni. Igen pontosan meghatározható irányokból tudunk például ultrabolya, Röntgen vagy infravörös sugárzási színeképeket észlelni. Szinte a teljes elektromágneses színeképben, a méteres rádióhullámoktól a billió elektronvolt energiájú gamma sugarak tartományáig gyűjthetünk adatokat. Jelenleg a mérések pontossága 10% körül mozog, de hamarosan elérhetik a százalékos pontosságot is. Eljutottunk oda, hogy a különböző jellegű mérésekből kiértékelhető ismeretek nagyon jól kiegészítik egymást. Következőkben áttekintjük, miként alakult ki világegyetemről való mai tudásunk.

Távolodó csillagrendszerek. Még a 20. század elején úgy tudták, hogy a Tejútrendszer a világmindenség egészét magában foglalja és a Nap a Tejútrendszer középpontjában van. Csak 1918-ban mutatták ki,

hogy a Nap nem a Tejútrendszer központja és 1924-ben, Edwin Hubble megfigyelései alapján ismerték fel, hogy a Tejútrendszeren kívül vannak más csillagrendszerek is. 1929-ben Hubble azt is felfedezte, hogy a csillagrendszerek távolodnak tőlünk. Távolodási sebességük a csillagrendszerek fényének vöröseltolódásával mérhető. Minél gyorsabban távolodik a csillagrendszer, annál vörösebbnek látszik a fénye. Azt is észrevette Hubble, hogy minél távolabb van egy csillagrendszer, annál nagyobb sebességgel távolodik tőlünk. Hubble felfedezése azt jelenti, hogy a világegyetem tágul.

A csillagrendszerek viselkedésének és tágulásnak kapcsolatát a következő képpel tehetjük szemléletessé. Képzeljük magunkat egy felfúvódó léggömb felszínére. Észleljük, minden ami a gömb felszínén van, távolodik tőlünk. Annál nagyobb egy pont távolodásának sebessége, minél messzebb van. Bár a szomszédságunkban lévő pontok is egyre messzebb kerülnek, de legnagyobb sebességgel a léggömb legmesszebb lévő, átellenes pontja távolodik. Ahogyan a léggömb felszínén sem tarthatja senki magáról, hogy ő van középen, az sem mondható, hogy vannak olyan csillagrendszerek, melyek a táguló világegyetem közepén, más csillagrendszerekről, hogy a világegyetem peremén helyezkednek el. Világegyetemünk természetesen nem olyan, mint a háromkiterjedésű térben lévő gömb kétkiterjedésű felszíne. Úgy kellene elgondolnunk, mint négykiterjedésű térben lévő gömb háromkiterjedésű felszínét. Ilyet szemléletünk korlátai miatt nem képzelhetünk el.

Nem arról van szó, hogy kezdetben robbanás történt, és emiatt távolodnak a csillagrendszerek egymástól. Maga a tér az, ami tágul, a csillagrendszereket a táguló tér sodorja magával. Hasonlítható világegyetemünk a kelésben lévő tésztához is, amibe mazsolát szórtak. Ahogy a tészta dagad, a mazsolaszemek is távolodnak egymástól és annál nagyobb távolodásuk sebessége, minél messzebb vannak.

Ha a világegyetem tágul, akkor a csillagrendszerek régebben nyilván közelebb voltak egymáshoz. Még régebben még közelebb. Megmérve a tágulás mértékét, jelenleg a világtér egymillió fényéves szakaszára kb. 10 kilométer/másodperc sebességű tágulást kapunk. Kiindulva az általános relativitás elméletéből megmutatták, hogy táguló világegyetemhez szükségszerűen egy rendkívül kicsiny, csaknem pontszerűnek vehető kezdeti állapot tartozik. Ennyiből alakulhatott ki világunk. Ez a kép a nagy ősrobbanás modelljének alapja. Amikor világegyetemünk megszületett, valamennyi pontjának a közvetlen közelében voltunk, és közülük egyik sem vehető a világegyetem középpontjának. Már csak azért sem, mert ahogy később tárgyaljuk, a kezdeti állapot sem tekinthető teljesen pontszerűnek.

Látható, a világegyetem tágulása összhangban van Einstein általános relativitáselméletének jóslatával, miszerint a világegyetem csak kétféle módon létezhet, vagy tágul, vagy összefelé húzódik. Világegyetemünk tágul. Einstein ezek után élete legnagyobb tévedésének nevezte, hogy egyenleteinek szimmetriáit elrontva bevezette az állandó állapotú megoldást adó kozmológiai állandót, lásd a 2.2.1. szakaszban.

De a tér tágulását hatása sem a Földön, sem a Naprendszeren, sem a Tejútrendszeren belül nem észlelhető. Sőt még a szomszédos csillagrendszerek vonzása is erősebb hatást jelent, ezért a szomszédos csillagrendszerekről érkező fény a közeledést jelző kék felé való eltolódást mutatja. Csak a távolabbi csillagrendszerekre nyilvánul meg a tér tágulásának hatása, azokra érvényes a Hubble törvény. Ezt az általános relativitás elméletének segítségével a következőképpen érthetjük meg. Einstein egyenletei akkor adják a táguló világegyetem megoldást, hogy a világegyetemre egyenletes sűrűségeloszlást tételezünk fel. De a világegyetem nem egészen ilyen. Ha olyan nagyméretű kockákra osztanánk fel, amelyekben átlagosan nagyszámú csillagrendszer van, akkor ilyen léptékben a világegyetem valóban egyenletes, ám az ilyen kockák éle százmillió fényévnyi. Kisebb léptékben viszont csomók vannak. Csomókon belül még kisebb csomók, mint a csillagrendszerek csoportjai, a csillagrendszerek, a csillagok, a naprendszerek, a bolygók találhatóak. De mint tárgyaltuk, a csomósodott anyag környezetében a téridő görbületét a tömegvonzás segítségével írhatjuk le, lásd a 2.2.1. szakaszban. Ennélfogva az Einstein-egyenlet megoldása nagyléptékben a világegyetem tágulása, a csomós tartományokon belül viszont a helyi téridőgörbületnek megfelelő tömegvonzás hatása meghatározó. Azaz a világegyetem téridőgörbülete nagy méreteken tágulásként, kisebb méreteken tömegvonzásként nyilvánul meg.

Ősrobbanás hagyatéka. Nem csupán a csillagrendszerek mérhető távolodásán alapul az ősrobbanás elmélete. Más bizonyítékok is vannak. A csillagok és a csillagközi anyag fő alkotóelemei hidrogén és hélium. Tömegarányuk 3:1, azaz a világegyetem 3/4 része hidrogén, 1/4 része hélium. Más, nehezebb atomok elvétve vannak csak jelen, ilyenek csak a csillagok belsejében alakulhatnak ki. Bármerre nézünk is a világmindenségben, a tömegarány a fenti 3:1. Héliumot és más nehezebb atommagot termelő magfolyamatok csak nagyon magas hőmérsékleten indulhatnak be. Ez a hőmérséklet annyira magas, hogy hélium ma csak a csillagok belsejében termelődhet. Ez a mindenfelé azonosnak mérhető hidrogén-hélium tömegarány legegyszerűbben a következő módon magyarázható. Valaha a teljes világegyetem a maga egészében igen magas hőmérsékletű volt és ez a forró világegyetem annyira kis térfogaton belül helyezkedett el, hogy a gázok szabadon keveredhettek egymással. Ez a nagyon magas hőmérséklet csak rövid ideig állhatott fenn, különben a hidrogén és hélium mind nehezebb elemekké alakultak volna.

Penzias és Wilson 1964-ben felfedezte, hogy Földünkre a világűrből centiméteres, milliméteres hullámhosszakon sugárzás érkezik. Ezt kozmikus háttérsugárzásnak is nevezik, mivel a sugárzás minden irányból ugyanakkora erősséggel jön. Éppen olyan a mért sugárzás hullámhosszainak eloszlása, mint amelyet adott hőmérsékletű test bocsát ki. A világűrből érkező háttérsugárzásnak $2,725 \pm 0,001$ Kelvin hőmérsékletű test a forrása. Maga a teljes világegyetem az, ami $2,725$ Kelvinen sugároz. Következik a fizika alapvető törvényeiből, hogy a táguló világegyetem hőmérséklete folyamatosan csökken. Ezért régebben a világegyetemben melegebb volt. Visszafelé menve az időben visszajutunk oda, amikor a világegyetem még egészen forró. Ekkor keletkezett a világegyetemben lévő nagymennyiségű hélium. Azóta világegyetemünk olyan, mint egy hűlő kályha.

Meghatározható a csillag életkora, ha ismerjük a bennük előforduló radioaktív bomlási családok elemeinek összetételét. Így a legöregebb csillagok életkora 11-12 milliárd esztendőnek adódott. Világegyetemünk legalább ennyi idős. Az adódik a tágulás mértékéből, hogy a világegyetem életkora $13,73$ milliárd év. Az ősrobbanás elmélete a mai asztrofizika, csillagászat alapmodellje. Ebben teszi fel kérdéseit a kutatók túlnyomó többsége, ezen belül értelmezi a kísérletek eredményeit. Egyre jobban megerősítik az ősrobbanás elméletének hitelét a pontosabb adatok, a folyamatosan érkező eredmények. Szülehetnek majd teljesebb leírásaink, de az ősrobbanás elmélete a maga területét akkor is sikerrel értelmezheti.

"Semmiből" kipattanó világmindenségről. Az eredet, nevezetesen hogy a világmindenség miért, és pontosan hogyan jött létre, a tudomány számára talán a legnagyobb kihívást jelentheti. Ha a miértre talán soha nem is kaphatunk választ, a hogyanról, a folyamat leírásáról egyre pontosabb képet alkothatunk. Az icipici térfogatban keletkezett világegyetem nem az üres térben, valamikor pattant ki. Világegyetemünk születése előtt nem lehet távolságokról és időtartamokról sem beszélni mert amikor a világegyetem még nem létezett, tér és idő sem volt.

Valamennyi megmaradási tétel, beleértve az energiamegmaradás, az elektromos és más töltések megmaradásainak törvénye is nullára teljesül. Nulla a világegyetem össztöltése, mert a világmindenségben lévő protonok, a pozitív elektromos töltés hordozóinak száma pontosan megegyezik a negatív töltést hordozó elektronok számával. Nulla a világegyetem összenergiája is, mert a mérlegben szereplő + és - előjelű mennyiségek kiegyenlítik egymást. Tudjuk, a relativitáselmélet kidolgozása óta nincs külön tömeg és energiamegmaradási törvény. Viszont az energiamegmaradási törvény felírásakor be kell számítani a tömegeknek megfelelő $E = mc^2$ energiát is. Ha az energiámérleget nézzük, megmutatható, hogy világegyetemünk pozitív előjelű energiái, mint a mozgási energiák és mások valamint a tömegeknek megfelelő $E = mc^2$ energiák összege éppen kiegyenlíti a negatív, elsősorban gravitációs energiákat.

Világegyetemünk kezdőállapotának a tér, az idő és az anyag nélküli, nulla energiájú állapotot tekintjük. Ezt a természeti semmi állapotának nevezhetjük. Ezt pontosan leírni, meghatározni egyelőre nem tudjuk. Világegyetem fejlődését a tér és idő tulajdonságait a benne lévő tömegekkel magyarázó általános relativitáselmélet tárgyalja. Ennek az elméletnek is van korlátja, lásd a 5.1. szakaszt. Ezek a megszorítások, amelyek éppen a nagyon kis tér és időtartamok világára vonatkoznak, nem engedik, hogy az elméletet a kezdetek legkorábbi szakaszára is alkalmazhassuk.

Táguló világegyetem jövőjéről. Felmerül a kérdés, meddig folytatódik a tágulás. A szétrepülő csillagrendszerek között fellépő tömegvonzás fékezi a tágulást, csökkenti annak sebességét. De az újabb adatok szerint, a várakozással ellentétben, a világegyetem tágulásának üteme gyorsuló.

Mivel a világegyetem anyagi összetevői egymást vonzva mind lassítják a tágulás sebességét, gyorsulva tágulást az Einstein egyenletek csak a kozmológiai állandó nemnulla, nevezetesen pozitív értékével írhatnak le. Kérdés, milyen jelenség szolgáltathat gyorsuló tágulást. Ilyenek lehetnek a Casimir effektushoz hasonló kvantumtérelméleti hatások. Ezek azonban óriási nagy járulékokat adnak a kozmológiai állandóhoz. Mérvadó elméletek szerint - ilyenek az említett szuperhúr elméletek -, a hatalmas nagy járulékok ellentétes előjelűek, kiejtik egymást és végeredményben a kozmológiai állandóhoz nem adnak járulékot. Vannak olyan feltevések, hogy létezhet olyan skalár tér, amelynek részecskéi a tömegvonzás helyett taszító hatást fejtenek ki és ezek felelősek a kozmológiai állandó pozitív értékéért.

Végsősoron a világegyetem szerkezeteit, jövőjét a kozmológiai állandón kívül az határozza meg, mekkora a világegyetem össztömege. Ha ez a tömeg nem elég nagy, akkor a világegyetem az örökké tágulással szétszóródik, ez a nyílt világegyetem. Ha a tömeg annyira nagy, hogy a tágulás egyszer leáll, akkor ezt követően megindul az összehúzódás, ami a teljes összeroppanáshoz vezet. Ez a zárt világegyetem. Azt a tömeget nevezik a világegyetem kritikus tömegének, - a kozmológiai állandó nulla értéke mellett -, mely össztömegnél a világegyetem sem összeroppanni, sem szétszóródni nem tud, mert a világegyetem tágulási sebessége fokozatosan lassulva a nulla értékhez tartana. Ez a sík világegyetem.

Világegyetemünk mértánát a világegyetem össztömege és a kozmológiai állandó együttesen határozzák meg. Nyílt világegyetem esetén a tér mértánát az ún. Bolyai-Lobacevszkij féle mértan írja le. Ilyen térben a háromszögek szögeinek összege kisebb, mint 180 fok. Zárt világegyetem mértana az ún. gömbi mértan. Ekkor a háromszög szögeinek összege nagyobb, mint 180 fok. Sík világegyetem mértana a mindenki által ismert euklidészi mértan, amelyben a háromszög szögeinek összege 180 fok. Világegyetemünk mértana az adatok szerint egyértelműen az euklidészi mértan.

Sötét anyag. Mérések szerint a világegyetem össztömege a kritikus tömeg 26 százaléka. Látható, műszereinkkel kimutatható tömeg a kritikus tömeg alig 0,5%-a. Láthatatlan, atommagként létező tömege a kritikus tömegnek legfeljebb 4%-a. Világegyetemünk tömegének nagyobb része valamilyen más, általunk még nem ismert alakban létezik. A Tejútrendszer és a csillagrendszerek viselkedésének vizsgálatából az adódik, hogy mozgásukat, forgásukat ismeretlen állapotú anyagtömegek befolyásolják. Például az a pálya, amely mentén a Naprendszer kering a Tejútrendszer középpontja körül, csak akkor írható le, ha feltesszük, hogy a Tejútrendszer belsejében jóval több anyag van, mint amennyit látunk. Hasonlóképpen a csillagrendszerek alakja is csak valamiféle láthatatlan anyagfelhők feltételezésével magyarázható. Ugyanis csak a látható csillagok tömegvonzása nem tudná összetartani a csillagrendszereket.

Mivel az fényt nem bocsát ki, az ismeretlen állapotú anyagot sötét anyagnak nevezik. Ez a kritikus tömegnek közel 22%-át teszi ki, tehát sokszorosa, kb. öt-hatszorosa az ismert állapotú anyagnak. Mi a sötét anyag, napjaink kozmológiájának talán ez a legizgalmasabb kérdése. Mibenlétéről, hatásáról szinte havonta jelennek meg elképzelések, újabb mérési adatok. Röntgensugaras mérésekben észleltek egy csillagrendszert, melyet forró, röntgensugárzást kibocsátó gáz vesz körül. Ennek a forró gázfelhőnek az alakja eltér a attól az alaktól, amilyennek a csillagrendszert látjuk, azaz ahogy a csillagrendszer csillagai eloszlanak. Csak azzal magyarázható a forró gázfelhő alakja, hogy azt a csillagrendszer csillagainak eloszlástól eltérő sűrűségeloszlású sötét anyag alkotja.

8.1. Világegyetem fejlődése a csillagrendszerekig

Világegyetemünk tágul és hűl, kétszer akkora világegyetem felényi hőmérsékletű. Ma mérhető tágulásából és 2,725 Kelvinnyi hőmérsékletéből pontosan ki tudjuk számolni, mikor milyen nagy volt egy korábbi időpontban a világegyetem és mekkora volt a hőmérséklete. Ha ismerjük a hőmérsékletet, megadható

a közeg részecskéinek átlagos mozgási energiája. Minél magasabb a hőmérséklet, annál gyorsabbak a részecskék. Az, hogy mennyire gyorsak a részecskék, meghatározza, milyen rendszerek jöhetnek létre és maradhatnak fenn. Most a világmindenség történetének főbb állomásait ismertetjük, egészen az atomok megjelenéséig. Legkezdetben, a Planck-idő tájt, a világmindenség mérete Planck-hossznyi, azaz 10^{-33} centiméternyi.

Első másodperc. Körülbelül 10^{-43} másodperc, a Planck idő eltelte után már létezik tér és idő, fogalmaink egyértelműek és az általános relativitáselmélet egyenletei alkalmazhatóak. Elválik a gravitációs erő a természet egyéb erőitől, a 5.1. szakaszban említett kvantumgravitációs jelenségek most már elhanyagolhatóak. Elképzelhetetlenül magas, $\sim 10^{32}$ Kelvin a világegyetem hőmérséklete. Annyira hatalmas a tömegvonzás, hogy energiájának rovására a maguktól keletkező részecske-ellenrészecske párok valóságossá válnak. Így a világ kezdetben azonos tömegű anyagból és ellenanyagból állt. A világegyetem összenergiája így is változatlanul nulla marad, mert a kétszer annyi új részecske keletkezéséhez szükséges energiát az új részecskék megjelenésének következtében fellépő negatív gravitációs energiák ellentételezik.

Arról, hogy mi történt a 10^{-43} - 10^{-35} másodperc közötti korai időszakban, többféle modell létezik. A nagy egyesített elmélet szerint a korszakot meghatározó részecske az X részecske, ez az és az ellenrészecskéje a kvarkokat leptonokba és viszont alakító kölcsönhatás közvetítői. Ekkor még, lásd a 5.1. szakaszban, az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások ugyanolyan erősséggel, gyakorisággal zajlottak, egymástól nem különböztek. Mondhatjuk, csak egyféle kölcsönhatás működött. Mivel a kvarkok leptonokba és viszont is alakulhattak, gyakorlatilag csak egyetlen részecske létezett. Ez az egyszerű állapot, egyetlen fajta részecske, egyetlen kölcsönhatás, nagyon más, mint mai nagyon sok különbséggel jellemzett világunk, melyre X részecske már nem gyakorol befolyást.

A korszak végén az X részecskék és ellenrészecskéik kvarkokra, leptonokra, ellenkvarkokra és ellenleptonokra bomlottak el. Azonban az anyagra és ellenanyagra való bomlásuk aránya nem teljesen azonos. Egy szimmetria nagyon apró, ám következményeiben igen fontos sérülése az oka ennek. Végeredményben tízmilliárdnyi keletkezett kvarkra csak tízmilliárd ellenkvark jutott. Ezzel a világegyetem anyag-ellenanyag egyenlősége megbomlott.

10^{-35} másodperc eltelte után az erős és elektrogyenge kölcsönhatás már megkülönböztethetővé vált. Még elég magas a táguló és hűlő világegyetem hőmérséklete ahhoz, hogy kvarkok, ellenkvarkok valamint az erős kölcsönhatást közvetítő gluonok plazma állapotban lehessenek jelen.

Elérve a 10^{-9} másodperces kort, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás megkülönböztethetővé vált. Valamennyi ellenrészecske, belőlük az X részecskék 10^{-35} másodpercben bekövetkező bomlásainak következtében picivel kevesebb van, a részecskéjével ütközve szétsugárzódik. Mint ahogy az elektron-positron megsemmisülésekben, itt is fotonok keletkeznek, lásd a 9. ábrán. Ez magyarázza, hogy a világegyetemben egy protonra sokmilliárdnyi foton jut. Nem sokkal ezután, 10^{-6} másodperc tájt a táguló világegyetem hőmérséklete annyira lecsökkent, hogy a kvarkok protonokká és neutronokká álltak össze.

Azután, egészen az első másodperc végéig a meghatározó esemény a protonok és neutronok egymásba alakulása. Ezt a folyamatot a gyenge kölcsönhatás vezérli, elektronok, pozitronok, neutrínók és ellenneutrínók keletkeznek. Amint letelik az első másodperc, az átalakulási folyamatok megszűnnek, ettől fogva a neutrínók és ellenneutrínók nem, vagy alig hatnak kölcsön más részecskékkel.

Végeredményben a születés első másodpercében már kialakult a világegyetem teljes anyagkészlete, a mindenség ekkor protonokból, neutronokból, elektronokból, neutrínókból és ellenneutrínókból állt. Már ez időn belül is megfigyelhetjük az egyre összetettebb rendszerek kialakulását. Míg a legkezdetben különbözőség nem létezett, az első másodperc végére, a világegyetem tágulásának és hűlésének eredményeképpen a négy alapvető kölcsönhatás már elkülönült egymástól és megjelentek az olyan összetett részecskék, mint a proton és a neutron.

Első három perc - a hélium keletkezése. Miután eltelt az első másodperc, onnantól kezdve az első három perc végéig alakultak ki a legkönnyebb elemek atommagjai. Már csak néhány milliárd fok a hőmérséklet. Ez az állapot igencsak kedvez a bonyolultabb atommagok képződésének. Ezt folyamatot az igen erős, vonzó magerők szabályozza. Igen rövid hatósugarúak a magerők, csak akkor hatnak, ha a protonok és neutronok egymás közvetlen közelében tartózkodnak. Annyira, hogy szinte érintkeznek egymással, lásd a 5. fejezetben. Még akkortájt az ütköző atommagok elég gyorsan mozognak ahhoz, hogy a pozitív töltésű atommagok közötti tasztító Coulomb erőt legyőzzék. Ez a tasztítás lelassítja, le is állíthatja majd visszafordíthatja a másik töltött atommaggal ütközni készülő töltött részecskét. Ha a sebesség, azaz a hőmérséklet nem elég nagy, a két atommag nem juthat egymás közvetlen közelébe, ahol már a vonzó magerők hatása is érződik.

Magasabb hőmérsékleten ugyan végbemehetnek magfolyamatok, de akkor a keletkezett atommagok gyakran és hevesen ütköznek más atommagokkal és ezért könnyen szét is eshetnek. Éppen az első másodperctől a harmadik perc végéig voltak a feltételek olyanok, hogy összetettebb atommagok képződhettek. Legfontosabb magfolyamatok a következők voltak. Először neutronok protonokkal való ütközésében deuteronok keletkeznek. Majd deuteronok egymással vagy protonokkal ütközve végül is a két protont és két neutront tartalmazó hélium atommagokká alakulnak. Ezen az úton a világegyetem neutronjainak túlnyomó része hélium atommagok alkotórészévé vált. A világegyetem anyagának nagyobb része protonokként, azaz hidrogén atommagként maradt vissza. Amit az ősrobbanás modellje ad, a 25%-os hélium arány jól egyezik a héliumnak a világegyetemben mért gyakoriságával. Egyéb, kevésbé gyakori könnyebb atommag kozmikus előfordulási valószínűsége is jól megfelel az ősrobbanás elméletével számoltnak. Arra három perc alatt nem volt idő, hogy a hélium atommagok összeolvadásaiból számottevő mennyiségű magasabb rendszámú atommag is keletkezessen.

Három perc elmúltával a világegyetem hőmérséklete annyira lecsökken, hogy az új atommagok képződése valószínűtlenné válik. Megszűnik az erős magkölsönhatás korszakos szerepe. A táguló és hűlő világegyetem további fejlődését az elektromágneses kölcsönhatások határozzák meg.

380000 év. Három perc múltával körülbelül 380000 évig a fotonok által alkotott sugárzási tér és az anyag kölcsönhatása volt a meghatározó. Most a világegyetem csupasz atommagok, protonok és a hélium atomok magjaiból és elektronokból álló plazma. Neutrínók és ellenneutrínók is vannak jelen, de kölcsönhatásaik elhanyagolhatóak.

Fő folyamat a töltött részecskék ütközése, elektron, proton és hélium atommagok szóródhatnak egymáson. Közben lassulva vagy gyorsulva energiát cserélnek és fotonokat sugározhatnak ki, illetve nyelhetnek el. Lehetséges azonban az a folyamat is, amikor a protonnal ütköző elektron befogódik a proton vagy a hélium atommag köré. Ezzel atom képződik, ami általában gerjesztett, magasabb energiájú állapotban van. Ugyanis nem feltétlen a legalsó pályára fogódik be az elektron. Egy gerjesztett atomi állapot foton leadásával bomolhat alapállapotba, azaz az ütközési folyamatokat általában fény kibocsátása kíséri.

Még ekkor túl magas a hőmérséklet ahhoz, hogy a protonból és elektronból álló hidrogén vagy a hélium atommagból és két elektronból összetevődő hélium atom meg is maradhasson. Ezek létrejöhetnek, de magas hőmérsékleten a részecskék még nagyon sebesen mozognak. Annyira, hogy ütközéseikben a keletkezett atomok gyorsan szét is eshetnek. Nagy energiájú fotonokkal való ütközések is gerjeszthetik és rombolhatják a keletkezett atomokat.

Elég erős ahhoz az elektromágneses kölcsönhatás, hogy meg tudja akadályozni bármilyen képződmény kialakulását. Plazmában a tömegvonzás sem alakíthat ki csillagokhoz vagy csillagrendszerekhez hasonló rendszereket. A plazmában uralkodó nagy nyomás, a töltött részecskék közötti, Coulomb erők vezérelte ütközések hamar szétzilálják az ilyen alakzatokat. 380000 év után csökken le annyira a hőmérséklet, hogy az ütközések már nem veszélyeztetik tovább a kialakuló atomok létét. A keletkezett hidrogén atomok jó része hidrogén molekulákká állt össze, a nemesgáz hélium atomos állapotban található. Így a világegyetem anyaga elektromosan semlegesé vált. Ütközések során nem képződnek és nyelődnek el újabb fotonok.

Ezzel az elektromágneses kölcsönhatás uralta sugárzásos korszak 380000 év elmúltával lezárult. Ezután már jelentéktelen a sugárzás és anyag kölcsönhatása.

380000 év elmúltával a világegyetem hőmérséklete közel 3000 Kelvin. Azóta is egyre hűlt, az akkori 3000 Kelvin durván ezredrészére, 2,725 Kelvinre süllyedt. A kozmikus háttérsugárzás ma mérhető apróbb egyenetlenségei a 380000 év környékén mutatkozó egyenetlenségekre utalnak.

Csillagrendszerek. Világegyetemünket 380000 év után a tömegvonzás alakítja. Amint láttuk, a gyenge, erős és elektromágneses kölcsönhatások jellemezte korszakoknak vége. Ez a három erő már nem kezdeményez jelentősebb változásokat. Hatásaik csak kisebb távolságokon érvényesülnek. Egyetemes a tömegvonzási erő. Valamennyi tömeggel rendelkező test között fellép és hatása nagyobb távolságokra sem elhanyagolható. Minden tömeg vonz minden tömeget. Ez a mindenhol ható erő alakította ki a mindenség rendszereit. Ez a világegyetem mai arculatának fő szervezője, rendjének forrása.

Következésképpen szervezi a tömegvonzás az anyagot. Ha az ősi gáztömegben valahol kisebb egyenetlenség van jelen, mondjuk kicsit sűrűbb a gáz, ez a sűrűbb tartomány tömegvonzási központtá válik. Környezetéből kezdi magához vonzani az anyagot. A korábban csaknem jelentéktelen különbségek az önmagát erősítő folyamat eredményeképpen egyre kifejezettebbekké válnak. A tömegvonzás szervező erejének hatására az eredetileg csaknem egyenletesen eloszló anyag csomókba tömörült. Ezekben a csomósodási folyamatban keletkeztek a csillagrendszerek, ennek során jöttek létre a csillagok is. Kb. 200 millió év eltelte után alakultak ki a legősibb csillagrendszerek és csillagok. Ma a világmindenségben lévő csillagrendszerek száma körülbelül százmilliárd. Egyes csillagrendszerekben körülbelül százmilliárd csillag található. Napunk csak egyike a Tejútrendszer sokmilliárd csillagának és a Tejútrendszer is csak egyike a mindenség százmilliárd csillagrendszerének.

Egy csillagrendszer kiterjedése százezer fényévnyi. Tejútrendszerünk átlagos vagy kicsit nagyobb csillagrendszernek mondható. A csillagrendszerek átlagos távolsága néhány millió fényév. Maguk a csillagrendszerek is vonzzák egymást, csoportokba tömörülnek. Kisebb csoportok még nagyobb csoportokat alkotnak.

Világegyetem látóhatára. Jól ismerjük az égbolttal kapcsolatban a látóhatár (horizont) kifejezést. Addig láthatunk, ami azon túl van, láthatatlan számunkra. A táguló világegyetemnek is van látóhatára, azon túl nem láthatunk semmit. Hubble törvényét értelmezve oda jutottunk, hogy a világmindenség tere tágul. Minél messzebbre nézünk, a vizsgált térrész annál gyorsabban távolodik tőlünk. Elég távoli részek távolodási sebessége már csaknem fénysebességnyi, még nagyobb távolságokban a távolodás sebessége meghaladja a fény sebességét. Fénysebességnél gyorsabban semmilyen tárgy, sugárzás sem mozoghat. De a relativitáselmélet azt nem tiltja, hogy a térnek az elég távoli tartományai ne távolodhassanak fénysebességnél nagyobb sebességgel. Azaz a tér tágulása miatt fellépő sebességek akár mekkorák lehetnek. Mi csak odáig láthatunk, ahonnan a fény még elérhet bennünket. Világegyetemünk látóhatárát az a távolság adja meg, amely éppen fénysebességgel távolodik tőlünk. A vöröseltolódás miatt a távolodó fényforrás fényének rezgésszáma a távolodás sebességével egyre csökken és a látóhatárról érkező fény a vöröseltolódás miatt már nulla rezgésszámú, így nem észlelhető. A látóhatáron túli csillagrendszerek, ha vannak ilyenek, tőlünk fénysebességnél gyorsabban távolodnak.

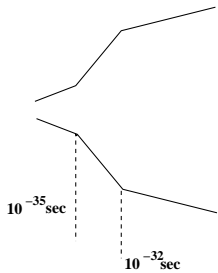
Behatárolja a látóhatár létezése, mit tudhatunk világegyetemünkről. Mérésekkel csak látóhatáron belüli, az ún. megfigyelhető világegyetemet tanulmányozhatjuk, ezekkel eleve nem tudhatunk meg semmit a látóhatáron túli részokról. Csak közvetett úton szerezhethetünk róluk ismereteket.

Ha a világegyetem történetét az ősrobbanás fenti hagyományos modellje szerint értelmezzük, súlyos nehézségekkel kerülünk szembe. Egyik legnagyobb nehézség a kozmikus háttérsugárzás csaknem teljes egyenletes volta. Ez arról a korszakról ad látóképet, amikor a világegyetem hűlésével megszűnt a plazmaállapot és kialakultak a hidrogén molekulák és a hélium atomok. Ez, mint tárgyaltuk, nagyjából az ősrobbanást követő 380000 év tájt történt. Ekkor szakadt el egymástól anyag és sugárzási tér és a kozmikus

háttérsugárzás fotonjai, amelyek mostanra értek ide hozzánk, erről az állapotról tudósítanak. Mivel a sugárzás minden irányból csaknem teljesen egyenletes, azt jelenti, hogy a megfigyelhető világegyetem egészének anyaga még plazmaállapotban kölcsönhatott egymással.

Annyira gyorsan tágul a világegyetem, hogy a háttérsugárzás egyenletességét nem lehet a szokásos, kiegyenlítődést beállító folyamatokkal megmagyarázni. Nézzük az égbolt két ellentétes irányából érkező háttérsugárzást. Amikor az ősrobbanás után 380000 évvel forrásaik kibocsátották, ezek a források egymástól 90-szer akkora távolságra voltak, mint az akkori látóhatár. Ekkora távolságban lévő anyagfelhők sohasem lehettek oksági kapcsolatban egymással. Mégis olyan állapotban voltak, mintha valamikor egymással egyensúlyra vezető kölcsönhatásban álltak volna.

Felfúvódó világegyetem. Csak egy korábban történt hatalmas felfúvódás magyarázhatja meg a háttérsugárzás megfigyelt egyenletességét. Azért történhetett felfúvódás, mert bizonyos fajta elemi részek, a már korábban említett skalár tereknek megfelelő részecskék között a gravitáció taszító. Ha a skalár terek energiája a világegyetem energiájának nagyobb részét teszik ki, akkor az ilyen összetételű világegyetem tágulása nem lassuló, hanem gyorsuló lesz. Amíg a skalár terek részecskéi az ismert közönséges anyag elemi részeivé el nem bomlottak, addig a világegyetem rohamos mértékben tágult. Ezek a skalár terek a nagy egyesített elméletek szerint az X-részecskék bomlásakor, 10^{-35} másodperccel az ősrobbanás után váltak a világegyetem fő alkotórészeivé és körülbelül 10^{-32} másodperccel az ősrobbanás után bomlottak el közönséges anyaggá. Amíg a világegyetem fő alkotórészei voltak, taszító hatások eredményeképpen a világegyetem fergeteges ütemben tágult, lásd a 20. ábrát. Mérete minden $2 \cdot 10^{-35}$ másodpercen belül megkétszereződött. Adott időszakban a világegyetem térfogata a 10^{80} -szorosára, sugara kb. 10^{-26} centiméterről kb. 10 centiméterre nőtt.



20. ábra. A felfúvódó világegyetem modellje szerint a $10^{-35} - 10^{-32}$ másodperc közötti időszakban a gravitáció taszító volt és emiatt a világegyetem gyorsulva tágult, $2 \cdot 10^{-35}$ másodpercenként a kétszeresére duzzadt.

Ez a hatalmas méretű felfúvódás meg tudja magyarázni, miért ennyire egyenletes a világegyetem. Eszerint a megfigyelhető világegyetem egésze egy annyira kis tartományból fejlődött ki, amelyik az ősrobbanás hagyományos modellje által adott tartománynál sokkal kisebb. Ebben a jóval kisebb tartományban a viszonyok kiegyenlítettek, a benne lévő anyag egyensúlyi állapotban van. Vagyis a kozmikus háttérsugárzás forrásai még a felfúvódó szakasz előtt érintkeztek szorosan egymással.

Nem teljesen egyenletes a háttérsugárzás. Ezt a COBE műhold 1992-es méréseiből tudjuk. Ennek oka az, hogy a 380000 év tájt a világegyetemben sűrűség-ingadozások mutatkoztak. Egyébként ezek a sűrűség-ingadozások felelősek a csillagrendszerekből, csillagrendszerhalmazokból stb. álló világegyetem nagyléptékű szerkezetéért. A kozmikus háttérsugárzás apró egyenetlenségeit kimutató COBE műhold adatai összhangban vannak a felfúvódó világegyetem modellje által jósolt ingadozások mértékével. De a COBE értékei nem elég pontosak. Az újabb mérések alátámasztották a COBE által mért értékeket. Azonban a felfúvódó világegyetem modelljének jóslatait még további pontosabb megfigyelésekkel kell igazolni. Két új műholdtól várunk jóval részletesebb, finomabb felbontású méréseket. A már felbocsájtott WMAP műhold eddigi adatai már eddig is jelentősen szűkítették az elfogadható modellek számát. Néhány éven belül már az adatok mérsékelt finomodása is megtizedeli a ma még elfogadható modelleket. Valószínű az évtized végéig

kiderülhet, hogy elfogadható-e a felfúvódó világegyetem modellje, vagy inkább más kvantumkozmológiai modellek felé kell fordulnunk.

A felfúvódó világegyetem modellje és más kvantumkozmológiai modellek az ősrobbanás után 10^{-32} másodperccel az ősrobbanás hagyományos modelljébe mennek át.

Kvantumkozmológia. Világegyetemünk történetének legelső szakaszával, amikor még elképzelhetetlenül kisméretű volt, a kvantumkozmológiai modellek foglalkoznak. Ezek a korai világegyetem egészét egyetlen kvantummechanikai hullámfüggvénnyel jellemzik és a világegyetem fejlődését a hullámfüggvény időbeni változásaival írják le. Világegyetemünk hullámfüggvénye a Wheeler-DeWitt egyenlet megoldásaként kapható meg. Ez az egyenlet a Schrödinger egyenlet kozmológiai megfelelője. Mivel a gravitáció kvantumelmélete, a kvantumgravitáció még nem létezik és a kvantummechanika korábban már tárgyalt értelmezési paradoxonai, mint a Schrödinger macskája paradoxon sem megoldott, a kvantumkozmológia hatalmas nehézségekkel küzd. Mindenesetre a Wheeler-DeWitt egyenletnek már számos megoldását tanulmányozták. Maga a felfúvódó világegyetem is egy lehetséges kvantumkozmológiai megoldás.

Van másik, jól megalapozott kvantumkozmológiai megoldás is. Ezek szerint 10^{-35} másodperc körül történő részecske átalakulások felelősek azokért a kezdeti egyenetlenségekért, melyek meghatározzák a világegyetem nagyléptékű szerkezetét. Ezeknek az egyenetlenségeknek a szerkezete egészen más, mint amiket a felfúvódó világegyetem 10^{-32} másodperc körüli kvantummechanikai ingadozásai jósolnak. A COBE műhold adatai még nem tudtak a két modell jóslatai között különbséget tenni. Ezért a WMAP és a Planck Surveyor mérőberendezéseit arra a célra tervezték, hogy megtudjuk, melyik modell az igazi.

8.2. Kaotikus felfúvódás

Ha a felfúvódó világegyetem modellje igaznak bizonyul, akkor a világegyetemről alkotott képünk jelentősen módosul. Ebben az esetben tudomásul kell vennünk, hogy a világegyetem jóval több, mint az észlelhető világegyetemünk. Ugyanakkor azt is el kell majd fogadnunk, hogy a világegyetem többi részéről nem szerezhetünk közvetlen módon ismereteket, semmi érdemit nem tudhatunk róla és korlátaink vannak arra nézve is, mit tudhatunk meg az észlelhető, megfigyelhető világegyetemről.

Ha volt felfúvódás, akkor a kvantumkozmológiai alapozású, felfúvódást leíró modellek szerint előfordulhat, hogy a felfúvódás az ősrobbanás után 10^{-35} másodperccel csak a világegyetem egy kisebb térrészére terjedt ki. Még az is lehetséges, hogy különböző térrészek különböző mértékben fúvódnak fel. Ha ez igaz, akkor a világegyetem különböző mértékben felfújt buborékokból áll. Megfigyelhető világegyetemünk is egy ilyen buborékban van. Bár a különböző buborékokban a legalapvetőbb mozgásegyenletek és a négy alapvető kölcsönhatás alakja ugyan azonos, de a fizikai állandók különbözőek lehetnek. Azaz egymástól különböző törvények kormányozta világegyetemek léteznek egymás mellett. Nem lehetnek oksági kapcsolatokban egymással, mert különböző téridő rendszerekbe ágyazódnak be.

Meg lehet mutatni, ha létezik felfúvódás, akkor a már felfúvódott részben újabb tartományok fúvódhatnak fel. Azaz újabb és újabb 'ősrobbanások' indulhatnak be, és ez a folyamat a végtelenségig folytatódhat. Hol, milyen térségekből indulhat be újabb felfúvódás, véletlennek tekinthető. Innen ered a kaotikus felfúvódás elnevezés. Minden lehetséges világegyetem megvalósulhat, a kedvezőbb világegyetemek tökéletesebbnek nevezhető alakokban újjászülhetnek magukat. Néhány éven belül sokat többet fogunk tudni a kaotikus felfúvódás modelljének elfogadhatóságáról.

8.3. Tömegvonzás és a csillagok

Bár a négyféle kölcsönhatás közül a tömegvonzás a leggyengébb, mégis a tömegvonzás fejtheti ki a legfeltűnőbb hatásokat. Mint tárgyaltuk, a gyenge és az erős magerők hatása az atommagra korlátozódik. A tömegvonzásnál sok nagyságrendben nagyobb Coulomb erők vonzó és taszító egyaránt lehetnek, de a

pozitív és negatív töltések leárnyékolják egymás hatását és ezért hatásuk nagyobb távolságokban nem észlelhető. Hosszú hatótávú a tömegvonzási erő, valamennyi tömeg vonzza az összes többi tömeget, ezért a tömegvonzás mértéke korlátlanul nőhet.

Tömegvonzás és méretek. Ha egy tárgyat nézünk, a felületén lévő testre ható tömegvonzási erő nem csak attól függ, mekkora a tárgy tömege, hanem attól is, mekkora a tömegvonzást gyakorló tárgy mérete. Például ha a Föld anyaga feleekkora sugarú gömbbe lenne tömörülve, akkor felszínén a tömegvonzási erő négyszer akkora lenne, mint most. Ennek oka az, hogy a tömegvonzási erő a távolság négyzetével fordítottan arányos. Ha ugyanahhoz a tömeghez feleakkora távolságra kerülök, négyszerakkora erő hat rám. Ha az égítést felületén tartózkodok, minél kisebb az ugyanolyan tömegű égítést sugara, annál nagyobb sebességre kell ahhoz gyorsulni, hogy az égítéstől el lehessen szakadni. Szökési sebességnek nevezik a végleges elszakadáshoz szükséges sebességet. Negyedakkora sugarú, ám ugyanolyan tömegű égítést esetén a szökési sebesség kétszeres.

Ha egy égítést annyira összeroppan, hogy a szökési sebesség eléri a fény sebességét, nevezetes mérethez jutottunk. Ez a tömeghez tartozó méret éppen a Schwarzschild-sugár, lásd a 2.2. szakaszban. Ha a tömeg a saját Schwarzschild-sugarán belül kerül, akkor már a fénysugár sem hagyhatja el, tehát láthatatlanná válik. Földünk Schwarzschild-sugara csupán néhány centiméternyi.

Kérdés az, mint alakítja a tömegvonzás a tárgyakat, mennyire roppanhat össze egy égítést, bezuhanhat-e egy csillag a saját Schwarzschild-sugarán belülré. Először a nagyobb tárgyak alakjával foglalkozunk.

Tömegvonzás és alak. Egymással gravitációs kölcsönhatásban álló tömegek gömb alakba igyekeznek tömörülni, mert energetikailag ez a legkedvezőbb. Ezért az égítetek csaknem gömb alakúak, gömbtől való eltérésük a égítetek forgásával értelmezhető. Annál könnyebben felveszi az égítést a gömb alakot, minél könnyebben el tudnak mozdulni alkotó közegének részecskéi.

Ha egy test tökéletesen szilárd lenne, részecskéi egyáltalán nem tudnának elmozdulni. Tökéletesen szilárd anyag nincsen. Például az üveg túlhűtött folyadéknak tekinthető, melynek részecskéi igyekeznek a lehető legmegfelelőbb alakot felvenni. Igaz ehhez nagyon sok időre van szükség. Van bizonyos fokú folyékonyága a kőzetek anyagának is, a földkéreg alakváltozásai ennek tulajdoníthatók. Ezért az égítetek, ha elég nagyok, hosszabb idő után gömbalakot vesznek fel. Ezt megfigyelések igazolják, néhány száz kilométeres méret felett a kisbolygók egyre inkább gömb alakúak.

Össze tud-e roppantani egy testet a tömegvonzás, végsősoron a test szilárdságától és tömegétől függ. Földünk anyaga elég szilárd és tömege elég kicsiny ahhoz, hogy a tömegvonzás ne roppanthassa össze. Ha az égítést gáz halmazállapotú, akkor a gáz belső nyomása állhat ellen a tömegvonzás összehúzó hatásának. A tömegvonzás összehúzó hatása a gázfelhő tömegétől és sűrűségétől függ. Ha a gázfelhő elég nagy tömegű és az adódó anyageloszlási egyenetlenség miatt megkezdte az összehúzódást, a tömegétől függ, mi lesz a sorsa.

Csillagok, szupernova, neutroncsillag. Önmagát erősíti a gravitációs összehúzódás. Erre nagyon jó példa a csillagok kialakulása. Fejlődésének kezdeti szakaszában a csillag egy gravitációsan összehúzódó gáztömeg. Amint a gázfelhő zsugorodik és közben minél közelebb kerülnek egymáshoz a gáz atomjai és molekulái, annál nagyobb erővel vonzzák egymást, de akkor ettől még jobban sűrűsödik a felhő és így tovább. A sötétén kavargó, összefelé tömörülő gáz hőmérséklete az összehúzódás folyamán emelkedik. Egy adott helyen a gáz hőmérséklete annál magasabb, minél nagyobb ott a gáz sűrűsége. Legbelül a legmagasabb, mert ott legnagyobb a sűrűség. Ahogyan a hőmérséklet emelkedik, a gáz atomjai és molekulái egyre hevesebben ütköznek egymással és a jelenlévő fotonok is egyre nagyobb energiájúak. Egy idő után, bizonyos hőmérsékletet elérve beindul az atomok és molekulák szerkezetének felbomlása.

A szétvert atomok ütközései közben keletkező fény valamint a szétrepülő elektronok és atommagok által kifejlesztett nyomás nem tudja megakadályozni a gravitációs összehúzódást. Ha a gázfelhő tömege eléri a Nap

tömegének kb. 8%-át, az összehúzódás egészen addig folytatódik, amíg a hőmérséklet emelkedése során a protonok annyira fel nem gyorsulnak, hogy beindulhatnak a magfolyamatok. Ezekben energia szabadul fel. A reakciókban keletkező, szétrepülő részecskék nagy sebességgel repülnek kifelé. Ezek nyomása megállítja a tömegvonzás okozta összehúzódást. Hosszabb időtartamra egyensúlyi állapotba kerül a csillag. Mindaddig ebben az állapotban marad, amíg a belsejében lévő hidrogén héliummá el nem ég. Ahogyan fogy a csillag belsejében a hidrogén a csillagbelső tovább zsugorodik és emiatt hőmérséklete egyre nő. Ennek következtében egyre nagyobb lesz az a belső térfogat, ahol atommagfolyamatok zajlhatnak. Azaz a hidrogén fogyásával a csillag egyre több energia termelődik. Emiatt a csillag egyre fényesebben ragyog és nagysága is nő. Végül vörös óriássá alakul.

Attól függ a csillag sorsa, mekkora a tömege. Napunk vörös óriássá alakulva összes hidrogénjét héliummá égeti el, illetve a vörös óriásból könnyen elszökik a hidrogén, hatalmas felhők robbannak le róla. Amint elfogyott és elszökött a hidrogén, megszűnik a csillag energiatermelése és így a tömegvonzás összehúzza a héliumból álló forró felhőt. Fehér törpe keletkezik. Ez egy kb. földnyi méretű fehéren izzó csillag, mely összesajtolódott atomokból áll. Mivel újra összesűrűsödik a csillag, jóval nagyobb sűrűségekre, mint milyen a Nap belsejében található, az egyre magasabb hőmérsékleteken újabb magösszeolvadási folyamatok indulnak be. Ezek során héliumból először szén atommag majd más magasabb rendszámú elem atommagjai képződnek. Eközben energia szabadul fel és a fehér törpe addig nem zsugorodik tovább, amíg a belső nyomás ellensúlyozni tudja a tömegvonzás összeroppantó hatását.

Napunk végül héliumból, szénből és oxigénből álló fehér törpévé alakul. Vannak nagyobb tömegű, magnéziumot, szilíciumot és más nehezebb elemet tartalmazó fehér törpék. Ha le is áll a csillag energiatermelése, a fehér törpe esetén a tömegvonzás nem elég erős ahhoz, hogy az atomokat összeroppantsa, mert a kvantummechanika törvényei egy bizonyos határig meg tudják ezt akadályozni. Ugyanis az összeroppantó és így egyre kisebbé váló csillagban egyre kevesebb az elektronok rendelkezésére álló állapot és a Pauli elv alapján egy pályán csak egy elektron lehet. Emiatt az elektronok nem húzódnak tetszés szerinti térfogatba össze. Mivel a kis térrészbe beszorított elektron sebessége a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés alapján megnő, a beszorított, így nagy sebességű elektromok nyomása meg tudja akadályozni a csillag további összeroppantását. Egy fehér törpe lehűlve fekete törpévé alakul.

Ha a fehér törpe tömege nagyobb, mint a Nap tömegének 1,4-szerese, akkor a fehér törpe állapot csak átmeneti. Tömegvonzása annyira erős lesz, hogy a kvantummechanikai hatások sem tudják megakadályozni a csillag összeomlását. Akkor gyorsul fel az ilyen csillag összeroppantása, ha a belsejében már nincs energiatermelő atommagfolyamat. Ilyenek a vas keletkezéséig játszódhatnak le. Vasnál nagyobb rendszámú atommagok képződéséhez már energia szükséges. Ha a csillag magja már vassá alakult, többé már semmi sem állhat ellen a tömegvonzás nyomásának. Egy ilyen fehér törpe annál gyorsabban összeroppant, minél nagyobb a csillag tömege.

Naptömeg 1,4-szeresénél nagyobb tömegű csillag összeomlása egyúttal robbanáshoz is vezet. Miközben a csillag anyaga összeroppant, hatalmas mennyiségű energia szabadul fel. Ezek az energifaló magfolyamatok felhasználhatják és így vasnál nehezebb elemek is képződhetnek. Ekkor alakulnak ki a periódusos rendszer vasnál nehezebb elemei. Az energia az összeomló csillag belsejéből főleg neutrínók energiájaként juthat ki a felszínre, mivel a neutrínók csak igen gyengén hat kölcsön az anyaggal. Összeomlaskor a kifelé tartó sok-sok neutrínó a befelé zuhanó nagysűrűségű anyagra kifelé irányuló nyomást gyakorol. Ennek eredményeképpen az összeroppantó csillag külső rétegei leválnak és szétrepülnek. Ez a folyamat a szupernovarobbanás.

Egy szupernova fénye a robbanás környéki pár napban olyan hatalmas, hogy akár a szupernovát tartalmazó csillagrendszer ragyogását is elnyomhatja. Egy átlagos csillagrendszerben évszázadonként 2-3 szupernovarobbanás történik. Amióta felfedezték a távcsöveket, a Tejútrendszerben közeli szupernovarobbanás nem történt. Viszont 1987-ben Tejútrendszerünk egyik kisebb kísérő csillagrendszerében, a Nagy Magellán-felhőben volt szupernovarobbanás. Ezt részletesen megfigyelhettük. Ez igazolta, hogy a szupernovákról alkotott modelljeink alapvetően helyesek.

A felrobbant szupernova megmaradt belső tartománya az összeroppantás során egyre jobban sűrűsödik.

Olyan nagy lesz a belső hőmérséklet, hogy az atomok elektronjai befogódnak az atommagokba és az atommagok protonjai neutronná alakulnak. Atommag sűrűségűre roppantja össze a hatalmas nyomás a már csak neutronokból álló csillagot. Így az egész csillag egyetlen hatalmas atommag. Ezt a csillagot neutroncsillagnak nevezzük. Hatalmas nagy a neutroncsillagok mágneses tere és a forgó neutroncsillagokkal mágneses terük is együtt forog. Ezért a forgó neutroncsillagok, a pulzárok igen erős, szabályos sugárzást bocsátanak ki. Van egy pulzár a Rák-ködben is, ez egy, a kínai csillagászok által megfigyelt szupernovarobbanás maradványa. Ennek sugárzási periódusideje kb. 1 másodperc. Eddig már neutroncsillagok százait figyelték meg.

Lehet, hogy a szupernova maradványából képződött neutroncsillag állapot csak egy átmeneti állomás a csillag életében. Olyan hatalmas a neutroncsillag tömege és annyira kicsiny a csillag, hogy a neutroncsillagról való szökési sebesség megközelítheti a fénysebességet. Léteznek olyan nagy tömegű neutroncsillagok is, ahol a szökési sebesség elérhetné illetve meghaladhatná a fénysebességet. Ennyire nem roppanhat össze, egy ilyen neutroncsillag már korábban fekete lyukká alakul. Nem látni a fekete lyukat, mivel annyira erősen görbíti maga körül a téridőt, hogy még a fény sem hagyhatja el. Egy fekete lyuk sugara az összeomlott csillag tömegének megfelelő Schwarzschild sugárnak felel meg, lásd az 2.2.1. szakaszt. Háromszoros naptömegű fekete lyuk Schwarzschild sugara kb. 9 kilométer.

Fekete lyukak. Nem tudjuk pontosan, hogyan roppan össze a neutroncsillag, melyek az összeomlás állomásai. Nem lehet végtelen egy neutroncsillag belső szilárdsága. Szilárdságának oka erők létezése és az erőhatások terjedésének sebessége a relativitáselmélet szerint nem haladhatja meg a fénysebességet. Erőhatások anyagban való terjedési sebessége az anyagbeli hangsebességnek felel meg. Minél szilárdabb az anyag, annál nagyobb a közegben a hangsebesség. A közegbeli hangsebesség sem haladhatja meg a fénysebességet, ám ez lenne a helyzet a Napnál kb. háromszor akkora tömegű neutroncsillagok esetén. Ilyen szilárdságú neutroncsillagok nem létezhetnek, ezeknek össze kell omlaniuk.

Annyira erős a fekete lyukká összezuhant csillag gravitációs terének tőridőgörbbítő hatása, hogy azt még a fénysugár sem hagyhatja el. Ezért a csillag a szó szoros értelmében láthatatlanná válik. Csak gravitációs erőterének hatásait észlelhetjük. Ha a fekete lyuk egy kettős csillag egyik tagja, akkor a látható párja pályamozgást végez a fekete lyuk körül. Továbbá a dagály jelenségéhez hasonlóan a fekete lyuk izzó gázt ragadhat magához a társ csillag felszínéről. Miközben a gáz zuhan a fekete lyukba, hatalmas energiák szabadulnak fel, amit sugárzásként észlelünk.

Fekete lyuk nem csupán egy csillag összeomlása végén alakulhat ki. Hatalmas tömegű fekete lyukak keletkezhetnek a csillagrendszerek közepén. Tejútrendszerünk közepén is van egy négy milliárd naptömegű fekete lyuk. Ilyen fekete lyukak hatalmas kitörések és nagyon erős sugárzások forrásai. A kvazároknak nevezett égitestek is valószínű ilyen óriási fekete lyukak, melyek csillagrendszerek közepén helyezkednek el.

Nem tudhatjuk, mi lehet egy fekete lyukon belül. A fekete lyuk gravitációs tere, ahogy közeledünk hozzá, nagyon erősen nő. Mivel a fejünkre és a lábunkra erősen különböző erő hatna, a fekete lyukhoz való közeledés egyszerűen szétszaggatna bennünket. Továbbá a fekete lyukhoz közeledve nemcsak a tér változik nagyon erősen, hanem az idő is lelassul. Tétélezzük fel, nem szakadunk szét és bejutunk a fekete lyukba. Fekete lyuk látóhatárán áthaladva - ez a Schwarzschild sugárnyi távolság átlépését jelenti, ezen már a fény sem tud kijutni -, elvesznénk a külvilág számára. Az idő lelassulása miatt a külső megfigyelő azt látná, hogy közeledünk a fekete lyukhoz, de azt sohasem érjük el. Számunkra a saját időnk szerint telnének az események, a látóhatár átlépése nem jelentené valamely különleges határ átlépését.

Időutazás. Fekete lyuk határának átlépése azzal járna, hogy onnan nem térhetünk vissza, mert abból a fény sem jöhet ki. Mint előbb említettük, végtelen ideig tart a bejutás, tehát onnan nem lehet visszajönni. Ha mégis bemennénk és kijönnénk, akkor a külső megfigyelő azt látná, hogy kijöttünk, mielőtt bementünk volna, azaz időutazást téve a jövőből kerülünk vissza.

Ki lehet-e jönni a fekete lyukból? Ha a fekete lyuk nem forog, akkor minden anyag bezuhan a középsébe, ahol végtelen nagy a sűrűség. Ilyen fekete lyukból ezért nem lehet visszajönni. Forgó fekete lyukak esetén már nem ennyire rosszak a kilátások. Követve a beeső anyag útját, egyes modellek szerint az anyag egy másik téridőbe, másik világegyetembe jut át, ahonnan ide, a mi téridőnkbe nem térhet vissza. De a másik világegyetem megfigyelője vajon minek látná az odavezető fekete lyukat? Modellek szerint kifelé törő anyagfelhőnek, ún. fehér lyuknak. Van olyan feltevés, hogy a kvazárok is ilyen fehér lyukaknak felelnek meg. Ezeket a feltevéseket ma már komolyabban vizsgálják, mert meglehet, a kvazárnak megfelelő hatalmas tömegű fekete lyukból új világegyetem születik. Ezt a folyamatot egy, manapság egyre elfogadottabbá váló, esetleg ellenőrizhető kvantumgravitációs elmélet írja le. Meglehet, világegyetemünk is egy ilyen összeroppant hatalmas fekete lyukból képződött. Ez a feltevést hamarosan ellenőrizhetővé válhat.

Megmutatható, skalár terekhez hasonló taszító gravitációs tulajdonságot felmutató, egzotikusnak nevezhető anyag jelenlétében elképzelhető az időutazás. Ekkor a görbült téridő áthidalható, az áthidalók az ún. féreglyukak. Féreglyukak sík mértanú téridő tartományait is összeköthetik, segítségükkel időutazás tehető.

9. Naprendszer és a Föld

Eddigi ismereteink szerint a Földön kívül máshol a Naprendszerben, a Tejútrendszerben, más csillagrendszerekben az égitestek felszínén nincs élet. Nem találjuk a Földön kívüli felszíni élet nyomait. Ez felveti azt a kérdést, hogy miért éppen itt a Földön jött létre az élet, mennyiben lehet a Naprendszer, a Föld kivételesen kedvező hely az élet keletkezése és fennmaradása számára. Ennek a kérdésnek a vizsgálatához röviden áttekintjük, mit tudunk a Naprendszer és a Föld keletkezéséről.

Naprendszer keletkezése. Tejútrendszerünkben az évmilliárdok során sokmillió szupernovarobbanás történt. A robbanások pora belekeveredett a Tejútrendszer gázfelhőibe. Ezek a gázfelhők egyensúlyban vannak és hacsak valamilyen külső hatás nem befolyásolja őket, abban is maradnak. Csillag önmagában nem keletkezik, a csillagbölcsők óriási gázfelhők, amelyeknek peremén külső hatásra beindul a csillagok keletkezése. Ha ennek eredményeként egy szupernova is keletkezhetett, akkor az annak robbanásakor keletkező lökéshullám további egyenlenségeket hoz létre a gázfelhőben. Így önmagát gerjeszti a csillagképződési folyamat és hamarosan a teljes gázfelhő anyaga csillagokba tömörül. Amikor térségünk is ilyen csillagbölcső része volt, a későbbi Naprendszer anyagát szolgáltatató gázfelhő közelében kb. 4,567 milliárd éve történtek szupernovarobbanások. Naprendszerünk felhője ütközött a robbanások során keletkezett hatalmas gáz és porfelhővel. Ennek eredményeképpen az addig nyugvó gázfelhő egy része összesűrűsödött és magához vonzotta a felhő többi részét is. Megindult a Nap kialakulása, tömege a Naprendszer tömegének 99,85%-a. Naprendszerünk anyagának 1-2 százalékát alkotják héliumnál nehezebb elemek.

Úgy ütköztek a szupernovarobbanásokból származó lökéshullámok és anyagfelhők a Naprendszer gázfelhőjével, hogy az egygyólvadt és összehúzódó felhő forogni kezdett. A gázfelhő perdülete miatt a képződő Nap nem tudta a teljes anyagmennyiséget magába vonzani. Annak több mint egy ezreléke kívül maradt. Ez az anyag a bolygók és a bolygóközi anyag alkotórészévé vált. Így Napunk, a bolygók, a Naprendszerben lévő kisbolygók, meteoritok együtt alakultak ki, nyersanyaguk közös. Nézve a különböző vegyi elemek izotópjainak földi arányait, azt találjuk, hogy ezek megegyeznek a Nap, a Hold, a meteoritok vegyi elemeinek izotóparányaival. Ez azt bizonyítja, hogy az egész Naprendszer egyszerre, egyetlen anyagfelhőből jött létre.

Miközben a Nap anyagát alkotó gázfelhők a központ felé húzódtak, a bolygók övezetében lévő por és kőzetdarabkák is vonzották egymást. Ütközések hatására összetömörödtek, egyre nagyobb darabokká álltak össze. Egy almányi kőzetdarab összetömörüléséhez kb. száz év szükséges, földnyi bolygó százmillió év alatt jött létre. Földünk teljes kialakulásához kb. százötven millió év kellett.

Maga a Nap már jóval hamarabb működni kezdett. Nagyenergiájú protonok és hélium atommagok törnek ki az izzó Napból, ezek alkotják a napszelet. Amint a napszél ionjai billiárdgolyóként ütköztek a

Naphoz közelebbi övezetekben lévő hélium atomokkal és hidrogén molekulákkal, kiütötték őket a Naprendszer külső tartományába. Egyébként is illékonyabbak a könnyebb gázok a hőmozgás miatt. Ez a hatás is hozzájárult ahhoz, hogy a belső bolygók légkörében nincs hidrogén molekula és hélium. A meleg Naphoz közel kristályosodott fém-oxidokból és fém-szilikátokból épültek ki a belső égitestek: Merkúr, Vénusz, Föld, Hold, Mars. A Naptól távoli bolygók, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz hatalmas gázfelhőkből, hidrogénből, héliumból, metánból alakultak ki.

Földünk születéséről. A Földet alkotó, összetömörödött szemcsék a gravitációs összehúzódás, az ütközések valamint az alkotó elemek radioaktív bomlásakor felszabadult hő hatására megolvadtak. Földünk belsejében még ma is sokezer fokos a hőmérséklet, aminek fenntartásához a radioaktív bomlások során keletkezett energia is hozzájárul. 4,5 milliárd évvel ezelőtt a radioaktivitás szintje még sokkal magasabb volt. Legmagasabb hőmérsékletek a Föld belsejében alakultak ki. Ide süllyedt le a megolvadt vas és nikkel.

Még bőven tartalmaztak gázokat és rájuk fagyott vizet a belső bolygókká tömörülő por és kőzetdarabkák. Csak a szemcsékhez kevésbé kötött illó anyagokat tudta eltávolítani a napszél. Amint a kőzetek megolvadtak, gáz és gőztartalmuk felszabadult. Később és még ma is a tűzhányók működése során tör a felszínre. Földünk ősi légköre tehát másodlagos folyamatok eredménye, a szemcsék által megkötött gázokból és gőzökből származik. Egy további része a légkör anyagának a Naprendszer belsejét rendszeresen látogató üstökösök anyagából került ide. Ezek nagy mennyiségű vízgőzzel, széndioxiddal és kisebb szerves molekulákkal terítették be a Földet. Lecsapódott a vízgőz a vékony, megszilárdult földkérgre, kialakult az őstenger. Szárazföldek még nem alakultak ki, csak a tűzhányók létrehozta szigetek emelkedtek a vízszint fölé. Elsősorban széndioxid, kevés nitrogén és vízgőz alkották a Föld légkörét. Nyomokban volt benne még ammónia, metán, kénsav és sósav is. Ütköző kisbolygók, meteoritok óriási tölcseréket hoztak létre a földkérgen. Akár a tenger vizét is felforralhatta az ütközések energiája és törmelékei szigeteket építhettek. Ha a becsapódó bolygó tömege eléggé nagy, akkor a földkéreg is beszakadhat. Ekkor a felszínre törő izzó anyag a teljes földkérget is megolvaszthatja.

Mivel a légkör széndioxid tartalma igen magas volt, az üvegházhatás növelte a felszín hőmérsékletét. Ugyanakkor a víz és a savak hatására beindult a kémiai mállás. Ennek során a savas kémhatású víz old bizonyos kőzeteket, minek során kalcium szabadul fel. Ez megköti a légkör széndioxidját miközben mészkő keletkezik. Ha a légkörben kevesebb a széndioxid, alacsonyabb lesz a hőmérséklete. Ekkor vízpára csapódik ki a légkörből és még kedvezőbbé válik a széndioxid légkörből való kivonásának feltétele. Miközben az öngerjesztő folyamat eredményeként csökken a Föld felszíni hőmérséklete, a tengerben lévő víztömeg egyre nő.

A világuőrből eredő becsapódások kb. négy milliárd évvel ezelőtt kezdtek ritkulni. 3,8 milliárd éve történt az utolsó nagy, a földkérget is átszakító becsapódás. Innen számítjuk a szárazföldek keletkezésének korát, körülbelül ilyen idők lehetnek a legidősebb kőzetek. Földünk légkörét, felszínének jellemzőit ezek után az élet kialakulása is erősen befolyásolta.

Föld lakhatósága. Ha a szupernovarobbanás felhőjének tömege vagy a felhő sebessége, mozgásiránya egy kicsit is más lett volna, a Naprendszer felépítése, a Nap tömege, a bolygórendszer szerkezete, az egyes bolygók nagysága, helye is más lenne. Naprendszerünk keletkezése kaotikus folyamat, nagyon sok függ a kezdeti feltételektől. Ha a Naprendszer anyagául szolgáló felhő lassabban forog, nagyobb lesz a Nap tömege, kisebbek lesznek a bolygók és másutt helyezkednek el. Máshogy oszlott volna el az anyag a Naprendszerben, nem lenne a Földnek holdja. Újabb megfigyelés szerint csak a naprendszerek kb. 5vegyi összetétele, forgási sebessége. Mindezek a feltételek mássá tették volna az élővilágot vagy egyáltalán, itt a Földön lehetetlenné vált volna az élet kialakulása. Minél részletesebben tanulmányozzuk az élet feltételeit, annál inkább meggyőződhetünk arról, hogy a felszíni élet földi létezése számos tényező szerencsés egybeesésének köszönhető.

Az élet létezésének alapfeltétele a víz folyékony halmazállapotban való létezése. Ha a víz gőz vagy jég állapotban van jelen, nincs esély a bonyolultabb összetételű szerves vegyületek kialakulására. A kedvező

felszíni hőmérséklet, amely a víz létezésének feltétele, az égitest nagyságától, csillagtól való távolságától, pályának alakjától, légkörének összetételétől, és még sok más tényező összjátékától függ. Egyes égitestek felszínén egy időre megjelenhet a víz, de el is tűnhet, példa erre a Mars, ahol 3,5 milliárd éve még volt víz. Földünk éppen annyira van távol a Naptól és olyan nagy a tömege, hogy meg tudta őrizni illó gázfelhőinek egy részét. Ennek köszönhetően víz halmozódhatott fel rajta. Ha a Naphoz közelebb lenne, a napszél lefújta volna róla a vizet.

Nézzük meg röviden néhány más tényező hatását. Élőlények csak olyan bolygón jelenhetnek meg, amelyek egy, a Naphoz hasonló csillag körüli ún. 'lakható zónán' belül helyezkednek el. Lakható bolygó pályája nem nagyon térhet el a körtől, mert elnyúltabb ellipszis pályán keringő bolygó néha túl közel, máskor túl messzire kerül az energiát sugárzó csillagtól. Emiatt elnyúlt pályájú bolygón igen nagyok az időjárási szélsőségek. Ezek lehetetlenné tehetik a nagyon összetett élő rendszerek fejlődését. Hasonló módon a bolygó forgási ideje, a nappal hossza sem lehet akármekkora. Ha a nappal túl hosszú, akkor a hosszú éjszaka miatt a sötét oldalon nagy lesz a lehűlés és az időjárás ismét túlságosan szélsőséges.

Nagy tömegű kísérő bolygónk, a Hold, az árapály jelenségeken keresztül meghatározó módon befolyásolta a földi élet kialakulását. Továbbá ha nincs a Föld mellett egy ilyen nagy tömegű bolygó, forgástengelye erősebben ingadozhatna. Ekkor a viszonyok annyira szélsőségesek lennének, hogy felszíni élet fejlődése nem lett volna lehetséges. Szintén a körülmények szerencsés összejátzásának tulajdonítható, hogy a Föld felszínén nincs mindent elborító köd, nincsenek hatalmas porviharok. Évmilliárdok óta nagyjából egyenletesen működik az üvegházhatás. Ha a Naprendszer egyéb égitestjeit és a Jupiter nagyméretű holdjait nézzük, jobban megérthetjük, mennyire sok tényező játszik szerepet abban, hogy a Földön évmilliárdok óta hullámoznak tengerek, és nagyjából azonos a Föld felszínének átlaghőmérséklete. Újabb felismerések szerint a Jupiternek nagy szerepe van abban, hogy a Földet viszonylag ritkán sújtják világűrbeli érkező becsapódások. Ez az óriási bolygó magához vonzza a világűrbeli törmelékek túlnyomó részét, amelyek így elkerülik bolygónkat.

Bolygónk felszíni viszonyainak évmilliárdokon át létező viszonylagos kiegyensúlyozottsága örökös változásokon keresztül munkálódik ki. Légköri viszonyainak állandósága kapcsolódik ahhoz, hogy a földkéreg állapotváltozásai is hasonlóan viselkednek. Végősoron az állandó változás egyensúlyozza ki az rendszer egészét.

A Föld felszínének 71%-án óceánok terülnek el, 29% a szárazföldek aránya. Ez a viszony a földkéreg tevékenységére vezethető vissza. Ha a kéreg merev lenne, akkor a víz, a szelek pusztító hatása egyenletesre koptatná a szilárd anyagot. Ekkor a szárazföldeket szerte a bolygón mindenütt azonos mélységű vízréteg borítaná. De a földkéreg állandó változásban van. Kb. tucatnyi nagyobb és jónéhány kisebb lemezre van szabdalva, amelyek lassú mozgásban vannak. Ez a földrészvándorlások magyarázata. Amerika és Európa évente pár centit távolodnak egymástól. Azért mozognak a kéreglemezek, mert a Föld belseje izzó. Még nem süllyedtek le mind a nehezebb elemek a Föld belsejébe. Emiatt a belső rétegek átalakulása folyamatban van, a rajtuk lévő lemezek pedig csúsznak, mozognak. Lemezek találkozása hegységek keletkezéséhez vezet, mindezt tűzhányók működése, földrengések kísérik. Határt szab a hegységek magasságának, hogy akármekkora nyomást a kőzetek nem bírnak el. Akkora a legmagasabb hegységek súlya, hogy a hegységet tartó kőzetlemezekre elviselhetetlenül nagy nyomás nehezedik. Emiatt a tartó kőzetlemezekben töredezni kezdenek az atomi és molekuláris kötések. Így a nyomás növekedésével a kőzet szilárdsága csökken. Szépen belesüllyed a hegység a földkéregbe, addig, amíg az alapjára ható nyomás annyira le nem esik, hogy az alapon lévő kőzet megszilárdulhat. A Himalája magassága kb. a lehetséges magasság közelében van, a Mount Everestnél sokkal magasabb hegycsúcs nem létezhet.

A víz és a szél egyenletessé koptatja a felszínt, az eső, a szél és a folyók a magasabban fekvő anyagot alacsonyabban lévő helyekre hordják. Az így keletkezett anyag és a tengeri állatok maradványai által képzett üledék a lemezek összetorlódásakor a forró köpenybe kerül. Ott megolvad, keveredik a köpeny anyagával, majd az így átdolgozott anyagot a tűzhányók a felszínre vetik. Ez a folyamat már többször is lejátszódott bolygónkon, összehordva majd széttörve a szárazföldeket.

Bolygónk felszíne az önszerveződő kritikusság állapotában van, kisebb-nagyobb összeomlások ennek

természetes velejárói. A Föld felszíne mint önszerveződő kritikus rendszer természetesen összehasonlíthatatlanul bonyolultabb viselkedést mutat, mint a önszerveződő kritikuság példjaként tárgyalt homokdomb. Felszíni viszonyai alakulásának igen fontos tényezője a Föld élővilága.

10. Élet és örökítőfonata

Nehéz pontosan meghatározni, mit nevezünk élőnek. Szaporodási és növekedési képességgel élettelen is rendelkezhet. Terjed a tűz, növekednek a kristályok is. Igazából nehéz az élő és az élettelen közötti határt megvonni. Például a vírus csak a gazda szervezetének segítségével tud szaporodni. De ha a vírust elszigetelt állapotában vizsgáljuk, csak száraz por.

Mindenképp az élő sajátja a magas fokú szervezethez. Egy élő meghatározásához hatalmas mennyiségű adat szükséges, ennek hordozója az örökítőfonat, a DNS (deoxiribonukleinsav). Élő szervezetek közös jellemzője, hogy valamennyi szervezethez az örökítőfonatra, a DNS-molekulára épül. Az örökítőfonat az élőlény minden egyes sejtmagjában teljes egészében jelen van. Egy adott sejtben az élőlény örökítőfonatának csak az a része tevékeny, amely a sejt működéséhez szükséges. Az örökítőfonat tartalmának tárolását a nyelv szabályaihoz hasonlíthatjuk. Rendszeres, ütemes ismétlődés, ami a kristályokat jellemzi, nincsen. Egy verssor 'Hazádnak rendületlenül..' nem tartalmaz egyszerű ismétlődő sorozatokat. Hasonlóan az örökítőfonaton lévő gyöngyök (bázisok) sorozata sem jellemezhető valamiféle szabállyal. Nem az egyszerű fizikai vagy vegytani törvényekből kiindulva, hanem mint hatalmas mennyiségű adatot kezelő rendszert érdemes az örökítőfonatot tanulmányozni.

Fehérjék. Fehérjék termelődése, működése szabályozza a sejtek életét. Fehérjemolekulák az enzimek és hormonok nagy része is az. Az örökítőfonat az életfolyamatok vezérléséhez szükséges fehérjék készítéséhez ad leírást. 20 alapvető aminosav építi fel a fehérjéket. Egy fehérje általában ötventől tízezerig terjedő számú aminosavból áll. Az örökítőfonat a fehérjét felépítő aminosavakat címzi, meghatározva a fehérjetermelés folyamatát, azt, hogy mikor, melyik aminosav épüljön be a fehérjét alkotó láncba. Fehérje alakja, villamos és egyéb tulajdonsága érzékenyen függ attól, milyen a fehérjét felépítő aminosavak sorrendje. Egyes aminosavak meghatározott módon kötődhetnek egymáshoz. Ezért akár egyetlen aminosavnak egy másikra való cseréje is komoly változást idézhet elő. Ha ugyanis az adott helyen egy másik aminosav szerepel, akkor ott másféle módon csavarodhat a fehérjelánc, és emiatt más lehet a fehérje egészének alakja és változhatnak tulajdonságai is. Kivéve a hemoglobint és néhány más fehérjét, a fehérjék színe fehér, akár a kemény tojás fehérjére. Alakjuk, szerkezetük hihetetlenül változatos.

10.1. Genetikai kód

Most nézzük meg, miként építeti fel az örökítőfonat a 20 alapvető aminosavból a fehérjéket. Míg a számítástechnika kettős számrendszerben dolgozik, az örökítőfonat címzése négyes alapú, merthogy négyféle gyöngy (bázis) létezik. Jelöléseik T, C, A, G, az örökítőfonat ezeket használva címezheti meg a 20 aminosavat. Fél évszázada sikerült megfejteni a genetikai kódot, azaz azt, miként jelölik ki az örökítőfonat gyöngyei a fehérjék felépítéséhez szükséges aminosavakat.

Egy aminosavat az örökítőfonat hárombetűs szavakkal címezi meg, azaz 3 egymás melletti gyöngy mondja meg, éppen milyen aminosav következik a fehérjeláncban. Mivel négyféle gyöngy létezik, $4^3 = 64$ különböző gyöngyhármas állítható belőlük össze, azaz 64 aminosavat lehetne velük megnevezni. Fehérjegyártás közben az örökítőfonat a sejtben marad. A sejt többi részével való kapcsolattartás és a fordítás egy másik nukleinsav, az RNS (ribonukleinsav) feladata. A genetikai kód táblázatában a T betű helyett az U betű szerepel, mivel az örökítőfonatról leolvasott adatokat közvetítő RNS molekulában a T jelű gyöngynek az U jelű gyöngy felel meg. Mivel csak 20 aminosav játszik szerepet, ugyanazt az aminosavat többféle gyöngyhármas is jelölheti, például a GUU, GUC, GUA, GUG gyöngyhármasok ugyanazt az aminosavat,

a valint, a GAA és GAG gyöngyhármasok pedig a glutaminsavat kódolják. Aminosavak jelölésére a 64 gyöngyhármas közül csak 61 szolgál, három gyöngyhármas a gén kezdetét illetve végét jelöli ki. Egyetemes a genetikai kód, minden előre azonos. Ez is az élővilág közös eredetét bizonyítja.

Génnek az örökítőfonat egyetlen fehérjét címző szakaszát nevezzük. Nagyon hosszú a teljes örökítőfonat, embernél két méternyi, 3,2 milliárd gyöngy van rajta. Alakját tekintve a DNS-lánc ezért nem egyetlen hosszú láncként létezik. Megfelelően felcsavarodott alakzatokban tartalmazzák a kromoszómák az örökítőfonatot. 23 pár kromoszómája van az embernek. Megkettőződve tartalmazzák a géneket a kromoszómák, ugyanannak a génnek két változata is vannak, amelyek különbözhetnek egymástól. Egyik gén apai, másik anyai eredetű. Hogy a kettő közül éppen melyik határozza meg a szóban forgó fehérjét és így a megfelelő tulajdonságot, részben a genetika törvényei másrészt a környezet szabják meg.

Az örökítőfonat az adatokat két egymás felé forduló szálaban megkettőződve tartalmazza. Ezért ha az egyik szálat valamilyen külső hatás elszakítja, megrongálja, a javító enzimek a másik szálon lévő gyöngyöket felhasználva gyorsan helyreállítják az eredeti állapotot. Szálszakadását általában valamilyen maró vegyület idéz elő. Ezeket mérgekként ismerjük. Radioaktív sugárzás is elsősorban így, maró vegyületeket keltve rongálja meg az örökítőfonatot. Ritkább az, hogy közvetlenül sugárzás szakítja el a szálat. Míg az egyszeres szálszakadást a javító enzimek szinte azonnal eredményesen kezelik, a kétszeres szálszakadást okozó támadás már nem javítható ki, mivel ekkor a megsérült örökítőfonatban nincs meg a javításhoz szükséges eredeti minta. A kétszeres szálszakadások a sejt működési zavaraihoz, pusztulásához vezethetnek. Ha a megsérült sejteket a szervezet védekezőrendszere nem azonosítja és pusztítja el, rákos folyamatok kiinduló állapotát képezhetik.

A genom a genetikai állomány, az örökítőfonatban lévő gének összességét jelöli. Mint tervraktárt foghatjuk fel. Mi valósulhat meg belőle, az már a környezettől is függ. Mint említettük, minden génből eleve kettő van bennünk. Csak a legegyszerűbb tulajdonságok vezethetők vissza egyetlen génre vagy egy-két gén együttműködésére. Általában jóval több gén finoman hangolt együttműködése szükséges valamilyen feladat teljesítésére. Nem merev gépezet az egész, az adott munkát végző fehérjék hálózata komoly hibátűréssel rendelkezik. Felfoghatjuk az örökítőfonatot úgy is, mint raktárat, melyben ott vannak az alapanyagok. Van részletes szakmai irodalom, de minden mérnök (itt a környezet) mást-mást hoz ki belőle.

Legegyszerűbb élőcske (baktérium) génjeiről. Erősen vitatott kérdés az élet eredete. Ennek a kérdésnek a tisztázását is segíti a legegyszerűbb élőlények vizsgálata. Ezek baktériumok, élőcskének is nevezhetnénk őket, mert a legegyszerűbb élők. Nemrég még úgy tudtuk, hogy a legegyszerűbb ismert élőcske 517 génnel rendelkezik. Ezeket pontosan feltérképezték. Ismert, hogy az élettevékenységekhez az örökítőfonat nem minden egyes génje ugyanolyan fontos, vannak olyan gének is, amelyek ugyan ott vannak az örökítőfonatban, de eddig szükségtelennek vélték őket. Feltételezik, hogy ezek ténylegesen sem valók semmire, már ami a fennmaradáshoz és szaporodáshoz kapcsolódna. Találomra megrongálva géneket, meg lehet mérni, hány gén játszik tényleges szerepet az élőcske életében. E vizsgálatok szerint a valóban szükséges gének száma 265-350 között van, ezek közül kb. száz gének a szerepét még nem ismerik.

Most azon dolgozik a baktérium genomját feltérképező csoport, hogy elkészítse az első mesterséges genomot. Ez azt jelenti, hogy egy fenti élőcskéből eltávolítják az eredeti örökítőfonatot és egy mesterséges módon előállított örökítőfonatot építenek be az élőcskébe. Ezek után megvizsgálják, ugyanúgy viselkedik, táplálkozik, szaporodik-e az élőcske, mint korábban. Ha igen, akkor a genomról való ismereteink tényleg helytállóak és teljesek lehetnek. 2006 októberében közölték egy még egyszerűbb baktérium leírását és géntérképét. Ennek az élőcskének 182 génje van.

Hemoglobin készítésének előírása. A gének működésének szemléltetésére nézzük meg, hogyan néz ki a hemoglobin készítésének eljárását megadó gén. A hemoglobin molekula többek között négy fehérjeláncot is tartalmaz, két ún. alfa és két béta láncot, mind a 4 lánc 146 aminosavból áll. Itt a béta lánc aminosav-sorrendjét adjuk meg. Felső sor emberre, alsó sor nyúlra vonatkozik. Az aminosavakat az irodalomban

szokásos módon nagybetűvel jelöljük, például V a valint, H a hisztidint, L a leucint, E a glutaminsavat kódolják.

VHLTPPEKSAVTALWGKVNVDVEVGGEALGRLLVVYPWTQRFFESFGDLSTPDVAVMGNPKVKAHGKKVLGAFSD emberben; 1-78

VHLSSEKSAVTALWGKVNVEEVGGEALGRLLVVYPWTQRFFESFGDLSSANAVMNNPKVKAHGKKVLAAFSE nyúlban; 1-78

GLAHLNLIKGTAFATLSELHCDKLVDPENFRLLGNVLVLAHFFGKEFTPPVQAAYQKVVAGVANALAHKYH emberben; 79-146

GLSHLDNLKGTFAKLSLHCDKLVDPENFRLLGNVLVIVLSSHFFGKEFTPPVQAAYQKVVAGVANALAHKYH nyúlban; 79-146

Látható, ember és nyúl hemoglobinjának béta lánc 91%-ban közös. Ember és szarvasmarha hemoglobinjának béta lánc 85%-ban azonos, a tyúkra ez az érték 69%, pontyra 53%. Ember és gorilla hemoglobinjának béta lánc csak egyetlen aminosavban tér el, azaz a hasonlóság 99%-os. E hasonlóságok értelmezésével később foglalkozunk.

Most azt vizsgáljuk meg, mi történhet, ha az ember megfelelő génszakasza, amely a hemoglobin béta lánc esetén $3 \cdot 146 = 438$ gyöngyből áll, csupán egyetlen gyöngyben is eltér a fenti aminosavsorrendet meghatározó génszakasztól. Erre jól ismert példa a sarlós vérszegénység kórképe, amely az afrikai fekete népeségben meglehetősen gyakori. Ekkor a fenti 146 aminosav közül hatodik helyen nem E, azaz glutaminsav, hanem V, valin áll. A két aminosavat kódoló gyöngyhármasok E-re GAG, V-re GUG, azaz a két aminosavat kódoló rész a gyöngyhármas második tagjában tér el egymástól. Egyetlen aminosavban való eltérés ahhoz vezet, hogy míg a fenti 148 aminosav lánc gömbbé csavarodik fel, addig a hatodik aminosavban eltérő lánc ugyan gömb lesz, de a gömbből kinyúlik egy kis farkinca. Emiatt a hemoglobin molekulák egymáshoz tudnak tapadni és ezzel megváltozik a vér vörösvértestjeinek alakja is. Ez a mikroszkópon látható sarló alak a gömb helyett, ami vérkeringési zavarokat, súlyos betegséget okoz.

10.2. "Hulladék" örökítőfonat

Bár már voltak korábban is elbizonytalanító ismeretek, de teljes örökítőfonat, így az emberi genom feltárásáig, 2001-ig nagyjából azt lehetett gondolni, hogy egy gén egy fehérjét ad meg és az örökítőfonat meghatározó részei a géneket tartalmazó szakaszok. Csupán felesleges, valahogy ottragadt, hulladéknak minősülő tartomány a többi, - az embernél az örökítőfonat-lánc csaknem 98,7%-a, ami valahogy megmaradt az öröklődés során. Ez állt a híres mondás, a 'génjeink túlélőgépei vagyunk' mögött. De pár éve, már ebben az évezredben, a genomok feltárásakor kiderült, hogy az embernek a várt 140 ezernél sokkal kevesebb, legfeljebb 24-25 ezer génje van, ami nem sokkal több, mint egy nagyon alaposan tanulmányozott, ám száz sejtneél kevesebből álló fonálféreg 19 ezer génje. Ráadásul ez a két génkészlet jelentősen át is fed. Ekkor rájöhettünk arra, mennyire keveset tudunk arról, mi is az örökítőfonat. Továbbá kiderült, az egy gén - egy fehérje alapfeltételezés sem tartható. Ugyanaz a gén másféle sejtben más feladatot kaphat. Úgy is, hogy a belőle készülő fehérje gyártásához csak a gén egy területe van felhasználva.

Korábbi eredmények már utaltak arra, hogy a hulladéknak minősített örökítőfonat-szakaszoknak is kell, hogy legyen szerepük. Nyilván a sejtek nem másolgatnák igen nagy anyag- és energiaráfordítással évszázmilliók óta. Miután kiderült, hogy vannak bennük olyan szakaszok, amelyek egymástól távol lévő fajokban is igen hasonlóak maradtak, megkezdődött a géneken kívüli örökítőfonat szakaszok alaposabb vizsgálata. Kiderült, az egyes gének kifejeződésében, ki- és bekapcsolásában szerephez jutó rövid RNS-molekulák a "hulladék" örökítőfonatban vannak valahogyan címezve.

Valószínű, hogy a géneken kívüli örökítőfonat tartománynak fontos szerepe lehet a törzsfajlás folyamatában is. Minél fejlettebbnek nevezhető az élőlény, annál nagyobb benne a "hulladék" örökítőfonat súlya. Míg az élőcske örökítőfonat állománya nem sokkal több, mint a génjeinek az összege, addig az emberi genom túlnyomó része csak "hulladék". Összevetve az ember és a csimpánz génjeit, a különbség csak 0,1%-nyi. Viszont a "hulladék" örökítőfonatban ez a különbség negyvenszeres, kb. 4%-nyi. Feltételezhető, hogy a csimpánz és az ember közötti különbségek sokkal inkább a gének ki- és bekapcsolását, kifejeződését szabályzó rendszerben vannak jelen.

Génkifejeződések. Mikor lép működésbe az örökítőfonat egy génje, azaz mikor épül fel, készül el az általa kódolt fehérje, kulcsfontosságú kérdés. Ha a fehérje nem a megfelelő időben készül el, az a sejt működési zavaraihoz, a szervezet megbetegedéséhez vezet. Az örökítőfonat génei és a sejtben akkor működő fehérjék kölcsönhatása szabja meg, hogy éppen milyen géneknek kell működésbe lépni ahhoz, hogy az életműködés megfelelő állomásaként újabb fehérjék termelődjenek. Van olyan gén, amelyik 50 másikat szabályoz. Általában úgy történik a szabályzás, hogy egy gén elkezd termelni egy fehérjét, az pedig beindít vagy leállít egy másik gént. Nagyon bonyolultnak tűnik a gének hálózata, melyik gén milyen más génekkel és hogyan áll kapcsolatban. Jelenlegi tudásunk állapotát a földalatti vasútházak térképének hiányos ismeretéhez hasonlíthatnánk. Ugyan ismerjük már, milyen állomások vannak (ismerjük a géneket), de hogy melyik állomásról ténylegesen hová, min keresztül utazhatunk (milyen kapcsolatban állnak a gének egymással) alig tudunk valamit.

Géneket vezérlő különböző bekapcsoló, összehangoló rendszerek erősen függhetnek a környezeti hatásoktól. Korábban azt hitték, hogy az egyes betegségek egyszerűen az egyes gének másulatainak (mutációinak) tulajdonítható, lásd a fenti példát a sarlós vérszegénységre. Mára már máshogyan vélekednek. Egy sejt működése nem az egyes gének működésének az egyszerű összege. Különböző gének által termelt fehérjék és maguk a gének kölcsönhatnak egymással és ezek a kölcsönhatások, visszahatások döntik el, hogyan működik a sejt. Mivel a sejtbe kívülről is bejutnak molekulák, a szervezet egésze is hat arra, miként viselkedik a sejt. Szervezetünk egésze pedig alkalmazkodik környezetünkhöz. A betegség a szervezet egészének a zavara. Egyre több megbetegedésről mutatják ki, hogy számos gén egyidejű hibás működése a baj okozója. Ha mondjuk a féltucatnyi rosszul működő génből csak egy is megfelelően teljesítené a feladatát, az adott rákbetegség egyszerűen nem fejlődhetne ki.

Hogy mennyire erős a környezeti hatások szerepe, azt az egypetűjű ikrek egészségi állapotának összevetése is mutatja. Ha különböző környezetben élnek, ahogy öregszenek, a génkifejeződési rendszerük egyre jobban eltér egymástól. Lehetséges, hogy egyikük cukorbeteg, miközben a másik teljesen egészséges. Bár külsőleg összetéveszthetően hasonlítanak, egészségi állapotuk egyre jobban különbözik.

Eddig is sokat segített az emberi genom feltárásában az élesztő genomjának tanulmányozása. Sok közel azonos génünk van és a genomot érintő folyamatok is azonosnak vagy rokonok. A kb. 24000 génből álló emberi genomot kb. 1700 átíróanyagból álló hálózat szabályozza. Ezeknek a feltárása is folyamatban van. Ha sikerülne például megtalálni, hogy a sejtek szaporodását milyen átíróanyagok irányítják és ezeknek mely működési zavarai vezetnek a sejtek burjánzásához, azaz a rákos daganat képződéséhez, eljárásokat találhatunk a rák megelőzéséhez és gyógyításához.

Epigenetika. Egyre több bizonyíték van annak, hogy a környezetnek a szülőkre gyakorolt hatása meg tudja változtatni az utódok génkifejeződési rendszerét. Azaz a környezeti hatások a DNS-lánc korábban hulladéknak minősített tartományaiban nyomot hagynak és az így módosult örökítőfonat jelenik meg az utódokban. Ennek a nagyon izgalmas, új területnek a kutatásával az epigenetika foglalkozik.

10.3. Az élet keletkezéséről

Élőt jellemző adattömeg származásáról. Honnan származik az élőlények hordozta sok-sok adat? Adattömeg magától nem jön létre, keletkezéséhez munka szükséges. Arról tanúskodik a világűrből érkező háttérsugárzás mért színe, hogy keletkezése után 380 ezer évvel a világegyetem pontosan a hőmérsékleti egyensúly állapotában volt. Ez pedig az entrópia felső határának felel meg. Hőmérsékleti egyensúly esetén a világegyetem állapotának jellemzéséhez elegendő hőmérsékletének és sűrűségének ismerete. Emiatt a világegyetem kezdetben szinte egyáltalán nem tartalmazott információt. Mai világegyetemünk leírásához viszont óriási adattömeg szükséges, mivel az igencsak messze van a hőmérsékleti egyensúly állapotától.

Honnan a munka, ami az adattömeg létrejöttéhez kellett? A szükséges energia az egyensúlyi állapotot megszüntető tömegvonzási folyamatok során szabadult fel. Energia szabadul fel az anyag összecsomósodásakor, és ez felmelegíti a rendszert. Ez egyre erősebben sugároz, a csillagok is a gravitációs összehúzó

és a belsejükben lezajló magösszeolvadásos folyamatok energiatermelése miatt sugároznak. Ez a csillagok által kisugárzott energia szolgálhat információ forrásául. Ezért mondhatjuk, hogy bár az úrból érkező háttérsugárzás színe hőmérsékleti egyensúlyra utal, a tömegvonzás miatt nem beszélhetünk igazi egyensúlyról. Nem a lehető legnagyobb, hanem egy alacsony entrópiájú állapotban volt a korai világegyetem. Azaz az egyenletesen eloszló, szerkezet nélküli, ám tömegvonzásos gázfelhő hallatlanul összetett módon viselkedő rendszereket alakíthat ki. Ahogy a rendszer a tömegvonzás által előidézett csomósodás közepette fejlődik és távolodunk az egyensúly állapotától, úgy indul meg az adattömeggel jellemezhető rendszerek, például élő szervezetek kialakulása.

Bár az élet vegytani jelenségnek tűnik, vannak olyan vélemények, miszerint az élet lényegét nem a vegytanban, vegytani folyamatok tanulmányozásában, hanem az adatokat kezelő jellemzőiben kellene keresni. Ugyanis az élőlény egyben egy nagyon összetett, adatokat feldolgozó rendszer is. Központi kérdés, hogyan keletkezik az örökítőfonatban felhalmozott adattömeg. A választ a véletlen másulat (a továbbiakban ezt a kifejezést használom az idegen eredetű mutáció helyett, mivel igen képszerű), és a természetes kiválasztódás folyamatának tanulmányozása adja meg. Az örökítőfonat csak azon másulatai maradhatnak meg, amelyeket a természetes kiválasztás úgymond visszaigazol, utalván arra, hogy a keletkezett változat életképes. Így az adatokat a környezet a természetes kiválasztódás közvetítésével írja be a örökítőfonatba.

Az adatok keletkezésében oly fontos másulatok, mint zajszerű képződmények, zavarják az adatátvitelt és adatok elvesztését is eredményezhetik. Minél összetettebb az örökítőfonat, az adattartalma annál védettebb. Azaz a biztos adatátvitel nagyobb fokú összetettséget, azaz minél több adat átvitelét követeli meg. Emiatt nem világos, hogyan jöhettek létre az első élőlények, amelyek örökítőfonata nyilván jóval kevesebb adatot tartalmazott. Emiatt örökítő anyaguk továbbadását a másulatok okozta zaj igen erősen zavarhatta. Ez az ellentmondás egyike annak a számos képtelenségnek, amelyek az első élőlény kialakulásának elméleteit jellemzik.

Hol szülehetett meg az élet. Mindmáig megoldatlan tudományos rejtély az élet keletkezése. Ha a természet történetét az ősröbbanástól máig tekintjük, talán a legnagyobb. Számos elképzelés létezik, amelyek a kialakulás helyszínében és egyéb természeti feltételeiben is eltérnek egymástól. Darwin az élet keletkezésének helyéül szerves vegyületekben gazdag, meleg vizű tavacsákat tételezett fel. Korszakok során a vegyületek egyre bonyolultabbakká váltak, összekapcsolódtak, majd az egymásbakapcsolódott vegyi körfolyamatok igen egyszerű, de már élőnek tekinthető szervezetként kezdtek viselkedni. Darwin fenti elképzelése majdnem száz éven át meghatározta az élet keletkezéséről alkotott elképzeléseket. Tó helyett az élet születésének helyéül tengert tételeztek fel és megkísérelték megérteni, milyen lépések során jöhettek létre az élet építőkövei.

1953-ban sikerült olyan kísérletet elvégezni, melynek eredményét sokáig perdöntőnek fogadták el. Miller egy üvegedényben olyan körülményeket hozott létre, amely a korabeli felfogás szerint leírt ősi földi környezetet jellemezte. Az üvegben lévő víz a tengernek, a metán, ammónia és hidrogén az ősi légkörnek felelt meg. Szikrakisüléseket is keltett az üvegedényben, ez a villámlások hatását utánozta. Egy hét után Miller az üvegedényben többféle szerves vegyületet, közöttük nagy mennyiségű aminosavat talált. Mivel ez utóbbiak a sejt fehérjéinek építőkövei, az élet rejtélyét sokan megoldottnak kezelték.

Mostanára a fenti elképzelés támadások keresztüzébe került. Újabb adatok szerint az ősi légkörben nem volt jelentősebb mennyiségű metán, ammónia vagy hidrogén. Továbbá, bár Millernek sikerült a fehérjék építőköveit előállítani, sok kutató azt tételezi fel, hogy a fehérjegyártást vezénylő RNS molekula a fehérjék keletkezése előtt jött létre. Régebbi kövületek vizsgálata azt bizonyítja, hogy az élet nem valamely kellemes, langyos vizű tengerben, hanem inkább egy nagynyomású fazékhoz hasonló környezetben jöhetett létre. Meglehetősen gyorsak lehettek a keletkezést jellemző vegyi folyamatok. Ilyen helyeken, mint például mélytengerek fenekén felfakadt hőforrásokhoz közel, bőven lehetnek megfelelő szerves vegyületek, és az összetettebb vegyületek képződéséhez szükséges természettani feltételek is jóval kedvezőbbek. Ahogy fent is említettük, az utolsó nagyobb becsapódást követően, miután a Föld átszakított majd megoldott kérge

újra megszilárdult, gyorsan megjelent az élet. Életnek mélységekben, barátságatlannak látszó körülmények között való keletkezését a mélyen a kőzetekben élő szervezetek felfedezése egyre jobban elfogadottá teszi.

Élet mélyen a felszín alatt. Mélyen a felszín alatt is vannak élő szervezetek, az őket kutató tudományág gyakorlatilag az utóbbi harminc év során született meg. Egészen máig azt hittük, hogy a felszín gazdag élővilága alatt ott vannak még a talajban élő szervezetek, de a talajban bizonyos mélységektől kezdve, vagy főleg ha a kőzetekre gondolunk, már nem élhet meg semmi. Ez nem így van, több kilométer mélyen a kőzetekben is találtak élő szervezeteket. Az élet számára az egyetlen igazi korlátnak a lefelé növekvő hőmérséklet tűnik. Az eddigi csúcst a kb. 5 km mélyen, 113 C⁰-on élő szervezetek adják, van viszont már bizonyíték 169 C⁰ hőmérsékleten élő apró lényekre is.

Mélyben létező, más élőktől évmilliók óta elzárt szervezetek életmódját az anyagcsere különleges változatai és a nagyon lassú szaporodás jellemzi. Anyagcseréjükhez szerves vegyi folyamatok energiáját használják fel. Különböző hőmérsékleteken más-más vegyi folyamatok szolgálhatnak erőforrással. Mélyben élő apró lények általában a belső tűzhányói működés során felszabaduló vegyületeket is átalakíthatják és így ásványtani változásokat okoznak. Egyes becslések szerint a mélységben élők összömege 0,1%-a a felszínen élők összömegeinek, de az is lehet, hogy összemérhető vele.

Nagyon egyszerűeknek, ősieknak tűnnek a mélyben élő szervezetek. Függetlenek az eddig ismert élőktől, a baktériumoktól és eukariótáktól. Archaeák néven az élővilág törzsfájának harmadik ágát alkotják. Míg a felszínen az élőcskék (baktériumok) és eukarióták gyors genetikai változásokon mentek át, addig a tőlük kb 3,8 milliárd éve elszakadt archaeák jobban megőrizhették az ősi élővilág jellegzetességeit.

Élet terjedése a világűrben. Bármely bolygón, melynek a belseje forró és így ahol van tűzhányói tevékenység, létezhetnek kőzetekben élő szervezetek. Mivel ilyen bolygók szerte a Mindenségben gyakran előfordulhatnak, a világegyetem akár hemzseghet az ilyen szintű élettől. Jóval ritkább lehet a felszínen kialakuló, fénymegkötésre épülő élet, mivel ennek megjelenéséhez és megmaradásához számos feltétel teljesülése szükséges. Értelmes élet pedig csak hosszabb törzsfajlódási folyamat során alakulhat ki. Ez megköveteli, hogy a kedvező feltételek egész hosszú időn keresztül fennálljanak. Ezért az értelmes élet megjelenésének esélye csekély.

Kőzetekben élő paránylények átkerülhetnek, át is kerülhetnek egyik bolygóról a másikra. Egy, a világűrben becsapódó nagyobb tömegű test a bolygó felszínének ütközve kőzetdarabokat robbanthat ki és ezek a bolygó vonzásából kiszabadulva más bolygók felszínére juthatnak. Ilyen módon a bolygók folyamatos kölcsönhatásban állnak egymással. Viszonylag védett környezetben, a nagyobb kövek belsejében utazó betokozódott paránylények a teljes Naprendszerben elterjedhetnek. Egy bolygónkra becsapódó marsi kődarab átlagosan kb. tízmillió évet repül a világűrben. Nagyon kedvező pályaadatok mellett akár száz éven belül is átjuthat a Földre. A belső bolygók kőzeteiben lakozó paránylények hasonló módon eljuthatnak a Naprendszer külső tartományaiban lévő égitestek, például a Jupiter holdjainak a felszínére is.

Az üstökösök közvetítésével akár naprendszerek között is közlekedhetnek életet hordozó kőzetdarabok. 3,8 milliárd éve, amikor a Föld és a Mars felszíni viszonyai hasonlóak voltak, ezek egyik bolygóról a másikra kerülhettek és ott elterjedhettek. Így ha a Marson Föld-jellegű élet maradványait fedeznék fel, egyesek szerint nem okozna különösebb meglepetést, mivel ilyen életnek a Marson valaha léteznie kellett. Ezért csak az ismerttől eltérőnek mondható élet utalhatna biztonsággal a földtől független élet létezésére.

Létezik-e, vagy létezhet-e egyáltalán az ittenitől különböző élet, vagy az ismert élet egy helyen, vagy különböző helyeken alakult-e ki, alapvetően fontos, tisztázásra váró kérdés. Ha a megfigyelésekből kiderül, hogy az élet a Mindenséget jellemző általános jelenség, és az egyes bolygókon akár egymástól függetlenül is kialakulhat, akkor az élet felé fejlődését előíró eddig ismeretlen törvényszerűségek létre találunk bizonyítékot.

Meghatározott-e az élet fejlődése. Amikor a NASA egyes terveiről, mint marsi élet, általában Naprendszerben való élet utáni kutatásáról olvasunk, nem is nagyon tudatosul bennünk, mennyire izgalmas és ellentmondásos kérdéssel találkozunk. Amikor a NASA abból indulnak ki, hogy a Marson vagy a Naprendszer más tartományaiban is lehetséges az élet és annyira közönséges jelenség, hogy az életműködések jelei vagy maradványai akár a mai eszközeinkkel is felfedezhető lehet, akkor az élet mibenlétéről, eredetéről olyan feltételezést tesznek, amely egyáltalán nem nyilvánvaló. Amikor a Galileo űrszonda képeit értékelve a Jupiter holdján, az Európán 1997 áprilisában felfedezték az első Földön kívüli tengert, a hírmagyarázók számára magától értetődőnek tűnt, mivel ott van víz, az élet is jelen lehet. Mintha a földihez hasonló körülmények, víz, szerves vegyületek jelenlétéből következne az, hogy ott is kifejlődhet az élet. Ez a szemlélet hallgatólagosan azt foglalja magában, hogy a természettan matematikai alakban megfogalmazható törvényei valamilyen módon kedvezőek az élet kialakulásához, annak ellenére, hogy a puszta valószínűségek mérlegelése ez ellen szól.

A földönkívüli értelmes lények után kutató SETI program még ennél is tovább megy, mert feltételezi, hogy a természet törvényei nemhogy az élet, hanem egyenesen az értelmes élet megjelenésének is kedveznek. Megrázóbb kifejezést használva, mintha az értelem megjelenésének lehetősége eleve bele lenne foglalva a természet törvényeibe, azaz a törvények egyelőre ismeretlen módon ugyan, de előírják az őket felfogni, megérteni képes rendszerek kialakulását is.

Az ilyen nézetek képviselői elsősorban fizikusok, vegyészek, csillagászok. Erről a biológusok nagy többsége hallani sem akar. Valóban, ha kiderülne, hogy vannak bizonyos, eddig még nem eléggé értett vagy ismert törvényszerűségek, amelyek élet és értelem felé mutató fejlődést írnak elő, alapjaiban kérdőjeleznék meg azt a nézetet, miszerint a törzsfajlásban nincs semmi elrendeltség, minden csupán a céltalan véletlenek és a természetes kiválasztódás összjátékának az eredménye. A biológusok meghatározó többsége azt tételezi fel, hogy a vegyi folyamat, amely az első élő kialakulásához vezetett, nagyon kicsiny valószínűségű és nem sok remény van arra, hogy ezt a rendkívül ritka folyamatot egyáltalán valaha is azonosítani tudjuk és részleteiben tanulmányozhassuk. Ezt gondolva az élet kivételesen ritka jelenség, talán egyedül csak a Földön létezik, minthogy a keletkezéséhez vezető események sora nem valószínű, hogy bárhol másutt a világegyetemben lejátszódhatott volna. Egy 1996-ban folytatott vitában, ahol a földönkívüli értelmes lények kutatásáról volt szó, a biológus Ernst Mayr így érvelt a SETI-párti Carl Sagan ellenében: A Földön milliósámszámra létező fajok, leágazások, a talán 50 milliárd fajképződési esemény közül eddig egyetlen egy vezetett értelmes lényhez. Ennélfogva az értelem keresése máshol reménytelennek látszik. Stephen Jay Gould szerint ha egy világűrűből becsapódó égitest a legapróbb lények szintjéig megsemmisítené a földi élővilágot, az újrainduló törzsfajlás folyamatban semmi sem tehetné biztossá azt, hogy az újra az ismert módon zajljék le. Azaz hogy a halakon, kétélűeken, hullőkön, emlősökön keresztül elvezessen az értelmes emberig.

Ez jól mutatja, a biológusok alapvetően véletlen folyamatnak tekintik, hogy a törzsfajlás során éppen milyen új fajok jelennek meg. Majd a fajképződési esemény után a természetes kiválasztódás dönti el, megmarad-e a kialakult új faj. Hogy ténylegesen véletlen esemény-e egy új faj megjelenése, pontos megfigyelések erre eddig nem voltak. 2006 tavaszán olyan eredményt közöltek, amely egy új faj nem véletlenszerű, hanem valamiféle törvény által szabályzott megjelenésére utalhat. Folyamatosan növelve a hőmérsékletet, egy melegt kedvelő baktérium egy anyagcserét meghatározó génjének változásait vizsgálták. Miközben napi fél fokkal 55 Celsius fokról 73 Celsius fokra emelték a közeg hőmérsékletét, 1500 nemzedék élete követte egymást. De a megismételt kísérlet során a gén várt véletlen változásai helyett ugyanolyan időközönként ugyanazokat a molekuláris változásokat figyelhették meg. Azaz az adott esetben a változások nem véletlenszerű, hanem megszabott pályát követnek. Hasonló eredményt közöltek 2007 őszén giliszta-fajták egy adott szervének fejlődéstörténetét megvizsgálva. Ugyan a szerv minden egyes gilisztafajban nagyjából ugyanolyan és ugyanúgy működik, a szerv kifejlődésének molekuláris útját elemezve nincs szó véletlenszerű változások sorozatáról hanem szabályszerűségek által jellemzett folyamatokkal szembesülünk.

Meglehet az ember megjelenése sem egyszerű véletlen. Az ember kitüntetett szerve a nagyagy. Ilyen agy nem egyedül az ember sajátja. Hasonló szervezetszerű, jobb és bal féltekével rendelkező agya van a delfineknek is. Tehát az értelem és az öntudat hordozására képes szerv kialakult más, tőlünk annyira

sok mindenben különböző emlős szerveként is. Úgy kb. százmillió évvel ezelőtt élhetett a főemlősök és a delfinek közös őse. Tengerben és a szárazföldön a környezeti nyomás jellege különböző. Nincsenek a delfineknek természetes ellenségei, legfeljebb saját közvetlen rokonaik, és a létfenntartás sem különösebb gond számukra. Emiatt a környezeti nyomás egész más jellegű a szárazföldön, mint a tengerekben. Ennek ellenére a kialakult roppant összetett rendszer, a nagyagy felépítése és működése ember és delfin esetén nagyon sok hasonlóságot mutat.

Ez a példa arra utal, hogy a törzsfajlás során nem csak a véletlen másulatok, az alkalmazkodás és a természetes kiválasztódás játszanak szerepet. Könnyen meglehet, ezek csak a mélyebben fekvő örökléstan, élettani törvényszerűségek érvényesülésének eszközei. Ezért kellő óvatossággal kell mérlegelnünk azokat a még ma is tanított feltevéseket, hogy az embert a munka tette emberré. Inkább azt kell gondolnunk, az ember azért képes a munkára, mert az agya a megfelelő törvényszerűségek működésének hatására rohamos fejlődésnek indult. Munkát a delfinek nem végeztek, mégis kifejlődött az emberéhez hasonló, vagy talán még annál is kifinomultabban működő agyuk.

Jogosnak tűnhet tehát a feltevés, az értelem, az öntudat kialakulását bizonyos, még nem ismert törvények hordozzák. Ha így van, akkor az ember létezése nem mondható egyszerű véletlennek. A most alakuló új természetkép, a fizikusok, csillagászok, asztrofizikusok erre hivatkoznak. Eszerint a természet történetét áttekintve megfigyelhetjük, van fejlődés, az idő múlásával egyre összetettebb rendszerek jelennek meg. Azaz a természeti folyamatok során bizonyos teremtő képesség nyilvánul meg. Nem is beszélünk igazán arról, hogy az élő és élettelen között nagyon nagy lenne a különbség. Az élet kialakulása eszerint csak egy, bár igen fontos állomás abban a folyamatban, amelynek fő jellemzője az anyag egyre magasabb szintű szerveződése. Ha az anyag rendelkezik ezzel az önszerveződést mozgató tulajdonsággal, akkor az élet bárhol megjelenhet, ahol megfelelőek a feltételek. Ott akár értelmes lények is kifejlődhetnek. Ezért a Földön kívüli, az ittenitől független élet felfedezése döntő bizonyíték lenne az élet keletkezését pusztán véletlennek tekintő felfogással szemben.

A törzsfajlás folyamatáról. Egy élő szervezet a törzsfajlás folyamatában kettős szerepet játszik. Egyik szerint génei hordozója. Mint ilyen, a környezete által nyújtott esélyeket kihasználva igyekszik túlélni és szaporodni. Arra, hogy egy adott faj génkészlete mennyire különböző változatokat képes létrehozni, jó példa lehet kedvenc háziállataink változatossága. Bár a kutyák egyetlen fajt alkotnak, mégis igen különbözően néznek ki. Nagyság szerint az egészen kistermetű fajtáktól a borjú nagyságúakig mindenfélét találhatunk közöttük. Ám a kutyafajták csak háziállataként életképesek, természetbe kivette nem állnak meg helyüket. Vadon csak az ősök, a farkasszerűen élő és az ilyen kinézetű lenne sikeres, a természet ezt a fajtát választaná ki közülük.

Manapság a természetes kiválasztódást meghatározó környezet fogalmát is alaposabban vizsgálják. Kiderült, hogy csak a mikroorganizmusok igen kicsiny hányada az, amely megél élők nélküli környezetben is. Valamennyi más élő környezetének nélkülözhetetlen eleme más élőlények jelenléte. Egy élő szervezet mint önszerveződő rendszer nem egyszerűen csak alkalmazkodik a környezetéhez. Anyagcseréje és egyéb tevékenysége során módosítja helyi és tágabban értelmezett környezetét, részben rombolva, részben építve azt. Élő környezetet és táplálékot választhat magának. Fészket épít, lyukat ás, odút, vackot, földalatti járatokat készít, hálót sző, bebábozódik. Vegyületek kibocsájtásával is változtathatja környezetét. Utódneveléshez környezetet választhat, amit védhet és ahol kedvező körülményeket teremhet. Ezért maga a törzsfajlás is egy, az egyes fajok és saját maga által állandóan változtatott, alakított környezetben zajlik. Ez azt jelenti, hogy a törzsfajlás menetét nem pusztán az élettelen környezet, mint a hőmérséklet, nedvesség stb. szabja meg, hanem maga a környezet is együtt változik és fejlődik a benne élő szervezetekkel. Az élőlények tevékenysége lényegesen változtatja a természetes kiválasztódás folyamatát, a reájuk, utódaikra és egyéb élőlényekre ható kiválasztási tényezőket. Mindez jóval összetettebbé teszi a törzsfajlás egészének értelmezését.

Élet megjelenése és fejlődése. A Föld létezésének első ötszáz millió évében az egymást követő hatalmas becsapódások, megolvasztva a földkérget, a korábbi fejlődés eredményét semmissé tették. Rögtön a 3,8 milliárd évvel utolsó nagy becsapódás után, az újonnan alakult szárazföldek és tengerek érintkezési pontjain, a partvidékeken már megjelent az élet. Van olyan feltételezés, hogy a korábban a Földből kiszakadt és az ide később visszatérő kőzetekben betekosodott apró lények honosították meg újra az életet. Lehetséges az is, hogy ezek a Marsról kerültek ide.

Első életre utaló jelek Grönlandról származnak, koruk 3,8 milliárd év. Nyugat-Ausztráliában 3,5 milliárd éves kőületekben már tucatnyi különböző fajt találtak, amelyek a világon ma is mindenütt megtalálható kék-zöld algák közeli rokonainak tekinthetők, azok elődeinek feleltethetők meg.

A felszíni élővilág első képviselői, a főleg kénnel táplálkozó és máig fennmaradt bíbor baktériumok még oxigén nélküli légkörben éltek. Ahogy azonban az ilyen baktériumok a táplálékforrások közelében felszaporodtak, az efféle táplálékok ritkábbá váltak. Ez behatárolta a vegyületek energiáit felhasználó baktériumok életlehetőségeit. Azok a felszíni szervezetek válhattak inkább sikeresekké, amelyek, a Napból merítve az ehhez szükséges energiát, maguk készítettek maguknak táplálékot. A fentebb már említett kék-zöld algák, másnéven kékoszatok ilyen szervezetek. Fénymegkötés, idegen eredetű szóval fotoszintézis során a vízből kivonják a hidrogént, miközben oxigén szabadul fel. Fénymegkötéskor a fény energiája szerves vegyületekben raktározódik el. Kékoszatok mindenütt megjelentek ahol volt víz. Ezek voltak a legfejlettebb élőlények, uralták a Földet. Az általuk termelt oxigént egy ideig a földkéreg kőzetképződési folyamataiból és a tűzhányók működése során felszabaduló gázok azonnal megkötötték. Az élővilág fejlődésének és légkört kialakító szerepének fordulópontja mintegy kétmilliárd éve következett be. Ekkorra annyira felszaporodott az oxigén, hogy azt a kékoszatok már nem tudták elviselni, oxigénmérgezést szenvedtek. Elvesztették életterüket, kénytelenek voltak oxigénmentes helyekre, a tavak, mocsarak, tengerek iszapjába húzódni, ahol máig is élnek.

További következménye a légköri oxigén felszaporodásának a felsőbb légkörben kialakult ózonréteg megjelenése. Ez mint egy pajzs kiszűri a Nap ibolyántúli sugárzását. Ezzel lehetővé tette az addigiaktól különböző, összetettebb szerveződésű lények kialakulását. Az élővilág továbbfejlődését a fénymegkötés egy újabb módjának a megjelenése jelentette. A legelső egysejtű, sejtmaggal rendelkező lények 1,8 milliárd éve jelentek meg. Ezeket már a sejten belüli sokkal magasabb fokú munkamegosztás jellemzi.

Az egysejtűek egyre szerveződöttebbekké váltak, lassan elérték a maiakhoz hasonló fejlettségi szintet. Majd az egysejtű lények együttélése, munkamegosztása odáig fejlődött, hogy 900 millió évvel ezelőtt megjelentek a legegyszerűbb soksejtűek. Ilyen lények például a szivacsok. Ezután a fejlődés ugrásszerűen felgyorsult. 600 millió éve jelentek meg az első állatok. Kb. 570 millió éve, a kambriumban egyszerre nagyon sokféle állat jelent meg, mert az akkortól mutatkozó mésspáncél, a csontok egyszerű lehetőségeket biztosítottak a fejlődésre. Az 570 millió évtől 245 millió ezelőtti korban, a paleotikumban jelentek meg a halak, kétélűek, a szárazföldi növények és rovarok valamint a hüllők kezdetleges változatai. 225 millió éve alakultak ki a dinoszauruszok, 160 millió éven át uralták a Földet és 64 millió éve pusztultak ki. Eltűnésük lehetőséget adott arra, hogy a náluk jóval magasabb szervezetségi fok elérésére képes emlősök életterhez jussanak.

Az élővilág törzsfája és a molekuláris törzsfejlődéstan. Pár évtizeddel ezelőttig a rendszertan alapja az élővilág kétágú törzsfája volt. Két nagy ágra, a sejtmag nélküli baktériumok és a sejtmaggal rendelkező eukarioták ágára oszlottak az élőlények. Azt jelképezte a törzs, hogy a baktériumok és az eukarioták közös őstől származnak. Eukarioták az egysejtűek és a bonyolultabb szervezetek, a növények és az állatok is. A törzsfejlődést, a törzsfán belüli kapcsolatokat kutató tudomány a törzsfejlődéstan (filogenetika), ez korábban elsősorban az alaki sajátságok alapján állapított meg rokonsági fokokat, rajzolta fel a törzsfát.

Az örökítőfonat felfedezése és főleg a gének szerkezetének tanulmányozása forradalmasította a törzsfejlődéstan kutatásokat. Ennek a molekuláris törzsfejlődéstanak nevezett módszer alapja a következő. Törzsfejlődés során a másulatok a gének szerkezetét változtathatják. Ha olyan változás következik be,

amely a gének működését rontja, gondoljunk például a sarlós vérszegénység kórképére, az súlyosabb esetben nem maradhat fent, mert hordozója elpusztul. Ha azonban lényegtelenebb változás következik be, akkor a gén általa gyártott fehérje változatlanul működőképes marad. Ugyanis lehetséges, hogy egymástól gyöngyökben eltérő gének ugyanakkor az aminosavsorrendnek, így ugyanakkor a fehérjének az előállítói. Ez azért fordulhat elő, mert ugyanazt az aminosavat többféle gyöngyhármas is kijelölheti, lásd például a valin esetét.

Minél hosszabb idő telik el, az azonos feladatot ellátó gének közötti alaki eltérés egyre nő, mivel a feladatot komolyabban nem befolyásoló változások felhalmozódnak a génekben. Ezt úgy mondják, hogy nő a genetikai távolság. Mennél korábban váltak el a közös őssel rendelkező élőlények, a megfelelő fehérjét kódoló génjeik annál jobban eltérnek egymástól, lásd a hemoglobin béta láncának eltéréseit ember, gorilla, nyúl, szarvasmarha, tyúk és ponty estére. Ilyen módon, megfelelő számú gén evolúciós változásait tanulmányozva pontosan fel lehet térképezni a fejlődés szakaszait, a rokonsági fokozatokat. Nemcsak rokonsági fokokat, hanem elválások időszakát is meg lehet adni, ugyanis tudjuk milyen időközönként történik másulat, ezzel van hitelesítve az idő mérése. Ilyenmódon meg lehet mondani, hogy milyen ágak körülbelül mikor váltak el. Földrajzi, éghajlati változások miatt elvált csoportok génjei egyre jobban különböznek egymástól. Esetleg annyira, hogy egymás között már nem képesek a szaporodásra, ekkor új fajok kialakulásáról beszélhetünk.

Molekuláris törzsfajlódástani módszer eredménye volt az archaeák felfedezése, a baktériumoktól való elkülönítése is. Miután így megszületett a három ágból álló törzsfá, kezdték kutatni, melyik ág miként kapcsolódik egymáshoz, melyek az ősi, a közös őshöz közelebb álló. Most kezd kiderülni, hogy valószínű nem volt közös ő, ugyanis nincs olyan jellegzetes génkészlet, amely mindhárom főágra közös volna. Páronként a főágak génkészleteiben van komolyabb közös rész, de a háromra együtt nincs. Ez azt jelenti, hogy a törzsfának nincs törzse. Tényleg faszerű szerkezetet mutat a törzsfá eukariótákat tartalmazó része, a baktériumok, archaeák és eukarióták azonban nem egy közös őstől, hanem nagyon ősi, kezdetleges, egyenként talán életképtelen képződmények csoportjától szereztek génjeiket. Újabb eredmények szerint az eukarióták őse egy baktérium és egy archaea összeolvadásával alakulhatott ki.

Ember megjelenése. Még nem teljesen ismert a főemlősök törzsfája. Genetikai távolságok vizsgálatából az adódott, hogy az emberhez vezető ágtól a gorilla kb. 7-9, a csimpánz kb. 6-7 millió éve vált el. Legközelebbi élő állati rokonunk a csimpánz és a bonobónak nevezett törpemajom, ez utóbbi kettő 2,5 millió éve vált el a közös őstől. Örökítőfonat láncaink eltérése, a gyöngyökben (bázisokban) 4%, azaz 96%-ban azonos alakúak, a részleteket lásd a 10.2 szakaszban. Az, hogy a csimpánzoktól való elválás után milyen események történtek, még csak részben ismert. Emberhez vezető fajok közül 9, maradványaiból ismert fajról tudunk és a becslések szerint még 6 további ilyen faj létezhetett. Kivéve az embert, valamennyi eltűnt. A neandervölgyi ember, amelynek agymérete a mi agyméreteinket is meghaladta, kb. 300000 éve jelent meg és 27000 éve tűnt el. Genetikai távolságok vizsgálata és alaktani összevetések szerint tőlünk külön fajt képeztek, nem olvadhattak velünk össze. Kb. 400 ezer éve váltak le a mai emberhez vezető ágtól, örökítőfonatukban több a csimpánzzal közös rész, mint a mienkben. Meglehet, hogy a mi őseink pusztították ki őket, ugyanis Európában a mai ember és a neandervölgyi ember azonos területeken, egyidőben élt, egészen addig, amíg a neandervölgyi ember el nem tűnt. Egy másik hasonló emberszerű lény, a Homo Erectus egy változata szintén együtt élt a mai emberrel és kb. ötvenezer évvel ezelőtt pusztult ki.

2004 novemberében közölték le, hogy az indonéz szigetvilág egy távoli csücskén, Flores szigetén, a törpe elefántok és az óriásgyíkok földjén egy törpe emberi faj csontmaradványait fedezték fel. A kb. méternyi magas törpe ember az emberfélék talán legkülönösebb képviselője. Csoportosan vadászott, zsákmányát tűzön készítette el. A leletek szerint kb. 18 ezer éve élt, de leszármazottaik, ha a helybeliek történeteinek hinni lehet, akár még ma is élhetnek. A törpe ember, amely a Homo Florensis nevet kapta, valószínű a Homo Erectus eltörpült változata. Természetes környezet könnyen kiválaszthat törpe fajokat, valószínű egy ilyen sikerült most találni.

Génrégészet. Az emberi genom megismerése pontos és hatékony módszereket szolgáltat a régészet és a történelemtudomány számára. Az ember keletkezésének és vándorlásának története a csontmaradványokban található örökítőfonat láncokból felderíthető. Ez a munka már elkezdődött és a genetikai távolságok vizsgálatából nagyon sok minden kielemezhető. Az ún. mitokondriális örökítőfonat csak a női ágon, az Y-kromoszóma csak a férfi ágon öröklődik. Ez lehetővé teszi az egyes népek, embercsoportok rokonsági fokának, sőt ez egyes egyének származásának a kutatását is. A genetikai vizsgálatok által vázolt, az emberiséget jellemző rokonsági kapcsolatok és a nyelvészek által készített, nyelvek rokonságán alapuló származási táblázatok jól fedik egymást. Az európai kivételek közé tartozik a magyar nép genetikai eredete és a nyelvi rokonsága, amelyek nem fedik egymást. Azaz az európai nyelvrokonainkkal genetikailag nem vagyunk szorosabb kapcsolatban, akikkel pedig génjeinket tekintve rokonok volnánk, másfajta nyelveket beszélnek.

Tömeges kihalások és a világuőrből eredő csapások. Az őslénytani leletek komoly összeomlásokról árulkodnak. Természetes jelenség a fajok kihalása, az élettér megváltozása, az alkalmazkodásra való képesség a faj pusztulására vezet. Általában 5-6 millió éven belül a fajok 10-20%-a kihal. Vannak azonban olyan korszakok, amikor nem csupán az átlagosnak tekinthető kihalásról van szó, hanem fajok nagy száma tűnik el rövid időn belül. Ha a fajok 30-90%-a pusztul ki egyszerre, tömeges kihalásról beszélünk. Igaz, hogy mennyire gyors a tömeges kihalás, az őslénytan eszközeivel nem dönthető el pontosan. Lehet, hogy a folyamat néhány tízezer évig tartott, de lehet, hogy napok, hetek alatt lezajlott. Tömeges kihalások a tengeri és szárazföldi fajokra egyaránt vonatkoznak, jelezve, hogy bolygóméretű csapás sújtotta az élővilágot.

Legjobban ismert tömeges kihalás a dinoszauruszok eltűnése 64 millió évvel ezelőtt, a kréta kor végén. Ekkor a fajok 47%-a kipusztult. Fajok tömeges eltűnését valószínű égből jövő csapás, egy kisbolygó Földdel való ütközése okozta. A becsapódó kisbolygó hatalmas, 250 km méretű tölcserűt ütött a felszínen. Ezt a mélyedést a Mexikói-öbölben, a Yucatán-félszigetnél találták meg. Ütközésre további bizonyíték a robbanás során szétszóródott irídiumszemcsék nagy arányú előfordulása a korabeli rétegben, amely határozottan kisbolygó becsapódásának a jele. Kisbolygó becsapódásakor hatalmas kőzetdarabok repülnek mindenfelé. Ezek mint egy kilőtt rakéta, nagyon magasra is feljuthattak és az ütközés helyétől nagy távolságra, hatalmas robbanást okozva csapódtak be a felszínre. Ezért a kisbolygó becsapódását hatalmas robbanások, tűzvészek követték, szerte a Földön. Ezek következményeképpen óriási mennyiségű füst, por és korom jutott a levegőbe, amely hetekre elhomályosította a napot. A hirtelen lehűlést és időjárási viszontagságokat a nagytetű állatok nem tudták elviselni, kipusztultak.

A Hold felszínén látható kráterek mind becsapódások eredményei. Nyilvánvaló, hogy a Földre is hasonló sűrűségben csapódtak be kisbolygók, de a felszín átalakulása elmosta nyomaikat. Megfigyelések szerint 1000 olyan, legalább 1 km átmérőjű kisbolygó létezik, melynek jelenlegi pályája lehetővé teszi a Földdel való összeütközést. Megkezdtek az ilyen égitestek rendszeres figyelését, nyilvántartását, ugyanis a műszaki fejlődés idővel lehetőséget adhat arra, hogy időben közbeavatkozva, a közeledő kisbolygó pályáját kissé módosítva elkerülhető a bolygónkkal való ütközés.

A 64 millió évvel ezelőtt történt tömeges kihalás nem az egyedüli, mégcsak nem is a legnagyobb az élővilág történetében. 439, 357, 250 és 198 millió évvel ezelőtt ennél több fajt eltűntető pusztulás sújtotta az élővilágot. Nemrég közölt eredmények szerint a 250 millió évvel ezelőtt, a perm-triász határán történt tömeges kipusztulást, melyben a fajok kb. 80-95%-a tűnt el, egy közeli szupernóvarobbanás okozhatta.

A szupernóvarobbanás a Naprendszer közelében, innen kb. 30 fényévnnyire történhetett. Szupernóvarobbanás pusztítását több tényező együttese okozza. A szupernóva pár hétre csaknem olyan fényessé válik, mint a csillagrendszer összes többi csillaga együttvéve. A Föld légköre, az ózonréteg az ide érkező sugárzást nem tudja eléggé megszűrni, sőt maga az ózonréteg is leépül, a pusztítás első fokozata a sugárkárosodás okozta halálos betegségek soraként jelentkeznek. A halálos sugárzást kb. egy évvel követi majd a legnagyobb energiájú, fénysebességnél azért kisebb sebességgel érkező részecskesugárzás, amely nagyon nagy energiájú elektronokból, protonokból és egyéb nehezebb atommagokból áll. Ezek az ózonréteget teljesen elpusztítják és szinte akadálytalanul jutnak le a Föld felszínére. Ezer vagy néhány ezer év múlva megérkezik a szupernóva szétszóródott plazma és porfelhője. Ezek belepve a Föld felszínét, bejutnak a táplálékláncokba és a

radioaktivitásuk az élőlény belső szerveit károsítja.

Egy most megjelent munka szerint a tömeges kihalások egy lehetséges oka még a neutroncsillagok összeomlásakor felszabaduló hatalmas energiájú és sűrűségű sugárzás. Ez a sugárzás a légkör felső rétegében az ott lévő atommagokkal ütközve nagyenergiájú müonokat kelt. A nagysebességű müonok áthatoló képessége nagyon nagy, víz és föld alá akár százméterekre is behatolhatnak. Akkora a keletkezett müonok száma, hogy mind a felszíni, mind a tengerben található élőlényeket elpusztíthatja.

Radioaktivitás által pusztító csapások a túlélő egyedekben számtalan másulatot kelthetnek. Közülük a természetes kiválasztódás válogatja ki az életképes fejlődési vonalakat. A pusztítások után újjászülető élővilág számos új fajjal gazdagodik, amelyek néhány tízmillió éven belül elfoglalják a kipusztított fajok életterét.

Úgy tűnik, a tömeges kipusztulást okozó égi eredetű csapások a törzsfajlódás természetes velejárói, a változások hajtóerői. Az élőlények egymásra utaltsága, amivel a következő fejezetben foglalkozunk, előbb-utóbb az élővilág egyensúlyi viselkedésére vezet. Kisebb helyi változás fajok eltűnését okozhatja, amelyeknek életterét más fajok töltik be. Tömeges kihalások, amelyek akár a fajok 90-95 százalékát eltűntetik és másulatok óriási számát hozzák létre, a legnagyobb méretű összeomlásoknak feleltethető meg. Maga a törzsfajlódás az önszervező kritikus állapotnak felel meg, ahol a helyi szintű állandó változások biztosítják a bolygónyi méretű egyensúlyi állapot kialakulását és fennmaradását.

11. Ökorendszerek

Az ökorendszer a növényeket, állatokat és a környezetüket foglalja magába. Ökorendszer lehet egy bokor, a rajta élő valamennyi élőlényvel együtt, vagy a tó a benne lévő növényekkel és állatokkal. Ökorendszert képez a Hortobágy, vagy a Kárpát-medence, és maga az élő természet egésze a környezetével együtt. Akkor beszélünk ökorendszerről, ha nem az egymástól független dolgok összességét látjuk, hanem az egészet mint egységet tekintjük. Korábban a tudósok, köztük a biológusok is, az összetevő részekre való visszavezetés módszerét követve, csak az egyes dolgokra, azok tulajdonságaira figyeltek. Kevés figyelmet fordítottak arra, hogy az élő hogyan befolyásolja a környezetét és más élőket. Csak az utóbbi pár évtizedben honosodott meg az a közelítés, hogy a dolgokat a környezetükkel összefüggésben, rendszerben vizsgáljuk.

Egy ökorendszer nem vizsgálható a fizika régi, jól megszokott módszereivel, miszerint a kísérlet során a vizsgált dolgot a környezettől elkülönítjük és a megfelelő modellt alkalmazva kísérreljük meg megérteni az egyes jelenségeket. Ökorendszerben lehetetlenség, hogy a kísérlet során egy-két dolgot engedjünk csak változni, miközben az összes többi állandónak tartjuk, ahogy ez a fizikában szokásos.

Ökorendszerekben érvényesül az ún. nem kívánt következmények elve. Ez azt mondja ki, ha valahogyan beavatkozunk a rendszerbe, olyan történik, amit nem láttunk előre. Erre példa két tó ökorendszerének összeomlása.

Az Aral-tó és környezetének pusztulása. Az Aral-tavat tápláló folyók, a Szír-darja és Amu-darja vizét öntözésre használták fel, Közép-Ázsia mezőgazdaságát gyapottermesztésre szakosította a szovjet rendszer. Túl sok vizet használtak el, mind kevesebb jutott az Aral-tóba, mely sós vizű állóvíz. Egyre csökken a tó területe, mert kiszáradóban van. Mivel a tó felületének mind nagyobb részéről tűnik el a víz, fenekéről egyre több só kerül szárazra. Vad sivatagi szelek kavarrják és hordják szét a sót. Ez a sós por hatalmas területet tett és tesz terméketlenné, lakhatatlanná. Így a virágzó, gyapottermelésre szakosított mezőgazdaság álma szertefoszlott, a területeket világszerte példátlan méretű ökológiai katasztrófa sújtja.

Viktória-tó ökorendszerének összeomlása. Afrika legnagyobb édesvizű tava a Viktória-tó. Mellékén emberek milliói élnek, kiknek életét a halászat, a tó határozza meg. Ám a valaha halban gazdag tó halálló-

mánya tönkrement, mert új fajt telepítettek bele, a nílusi sügért. Ezt kb. 50 éve egy sporthorgász tette, arra gondolva, hogy a nagyméretű nemes halra való horgászat majd megnöveli a tó vendégvonzó erejét.

Hamar megtizedelte a falánk ragadozó a tavat benépesítő halak állományát. Ezek kisméretű algákon és élősködőket is hordozó csigákkal táplálkoztak. Korábban a környék lakói ezeket a halakat fogyasztották. E halak számának csökkenése miatt az algák elszaporodtak és az elpusztult algák a tó fenekére süllyednek. Lecsökkentették az algák bomlástermékei a tó oxigéntartalmát, elpusztítva ezzel a tó mélyvizi halállományát. Elszaporodtak a csigák is, súlyos betegségeket terjesztenek.

Helyi halászok most a nílusi sügért fogják ki és ezeket a hatalmas halakat tűzön főzik meg. Korábban a kisebb halakat szárítva fogyasztották. Főzéshez fa kell, ezért a környék erdei vésszesen pusztulnak. Ennek következtében gyorsan pusztul a talaj, tovább rombolva a tó egyedülálló ökoszisztémáját. Egyetlen ember saját szempontjából józan cselekedete teljes ökoszisztémát tett tönkre.

Ökoszisztémák energiaháztartása. Az ökoszisztémák energiaháztartásának alapja a naperő. A fényenergiát a növények a fénymegkötés során szerves vegyületekben tárolt energiákká alakítják. Ez az energia rövidebb-hosszabb ideig az ökoszisztémában marad, de a rendszeren belül alakja változik. Csak kis részét, néhány százalékát tudják a növények az őket érő napsugárzás energiájának megkötni. Nincs olyan növény, amely a napenergiát 10%-nál magasabb határfokkal hasznosítaná.

Ha az ökoszisztémában az energiahasznosítás módját nézzük, és az egyes csoportokba az energiát azonos forrásból szerző szervezeteket rakjuk, akkor az első csoportba a fényt megkötő szervezeteket, a növényeket sorolhatjuk. Következő csoportba a növényevő állatok tartoznak. A növényekkel táplálkozó állatok az elfogyasztott energiát szintén rossz határfokkal használják fel. A megevett vegyületek energiájának kb. 10%-a hasznosul a nyúl, tehén és más állatok szervezetében. Ahogy egyik csoportról a következőre átmegyünk, a hasznosított energia aránya kb. ekkora marad. Ez a 10%-os energiahasznosítási arány végeredményben a hőtan II. főtételének a következménye. Hő szabadul fel, távozik a környezetbe az átalakítások során és emiatt az erőforrás hasznosítása mindig jóval alacsonyabb száz százaléknál.

A tápláléklánc következő csoportját a növényevő állatokat vadászó ragadozók tartoznak. A tápláléklánc csúcsa a csúcsragadozók. Vannak még más csoportok is, mint a dögevők és a lebomló szervezetek vegyi energiáját felhasználó lények. Vannak olyan lények is, mint az ember, amelyek növényi és állati táplálékot egyaránt fogyasztanak.

Talajélet. Ami az ökoszisztéma energia- és anyagforgalmát illeti, körfolyamatok sokasága alkotja. Ezek a körfolyamatok egymásba is kapcsolódnak. Egyes tápláléklánccok, mint például a levél > levéltetű > hétpettyes katica > veréb > karvaly mind nagyobb körfolyamatok részei. Szárazföldi körfolyamatok létezésének alapfeltétele a növényzetet tápláló talaj megfelelő állapota. Ennek meghatározó eleme a talaj szervesanyag tartalma és az azzal táplálkozó élővilág. Televényföldnek, idegen eredetű szóval humusznak nevezzük a talajnak ezt az összetevőjét.

Szinte a talaj valamennyi fontos tulajdonságát, mint termékenységét, vízháztartást és lazaságát stb. a televényföld állapota határozza meg. A talajban élő apró lényeket a szervesanyagok lebontásakor felszabaduló energia táplálja. E lebontás termékei a növények számára szükséges és felvehető tápanyagok. A televényt a talajba jutott szerves anyag elteti. Talajt tápláló szervesanyag források a lehullott levelek, korhadó növényi részek, állati anyagcseretermékek és az elhullott állatok tetemei. Fenti, a levéltől a karvalyig terjedő tápláléklánc is ebbe a rendbe illeszthető. Ugyanis a levelet hordozó szárazföldi növényt a talaj elteti, a talajt szervesanyaggal pedig a korhadó növényi részekon kívül a fenti állatok anyagcseretermékei és a karvaly teteme táplálja.

Lemming a tundrán. Jól szemlélteti az ökoszisztémák működését a kopár, évenként hónapokig sötét, fagyos északi tundrák élővilágának viselkedése. Itt az örök fagy birodalmában nagyon rövid a növényi

életműködés időtartama. Az egybeolvadó két-három hónapos tavaszi-nyári időszakra a fagy csak a talaj felső rétegében enged ki. Csupán pár növény, sások, füvek, egy-két törpe cserje él itt meg. Egyedüli fő növényevő a prémes bundájú sarki egér, a lemming. A lemming négyévenként nagyon elszaporodik, annyira, hogy a közhit szerint elindulnak a partra és a sziklákról a tengerbe vetik magukat.

E négyévenkénti nagy változás oka a növényzet és az lemmingek közötti élelmi körforgás. Amikor a lemmingek nagyon elszaporodnak, mindent felennének. Mind lerágják a számukra fontos tápanyagokat, foszfort és kalciumot tartalmazó növényi részeket. Emiatt az agyonlegelt növényzet elsattul, nem tudja magát helyrehozni, mert a sovány, már kisebb mélységben is fagyott talajban kevés a tápanyag. Élelmet keresve bolyonganak a tundrán a lemmingek. Tömegesen pusztulnak éhen, kevesebb mint egy százalékuk éli túl a növényzet tönkremenetelét.

Amint a lemmingek elpusztulnak, a sarki fagyok miatt a tetemeikben tárolt anyagok csak lassan alakulnak át növények számára is felvehető tápanyagokká. Ahogy a lemmingek testéből felvehető tápanyag kialakul, úgy kezd a növényzet magához térni. Négy év elteltével a növényzet megújul, új hajtásokat, leveleket hoznak, a tundra csodálatosan szépen kivirul. Ekkor a lemmingek újra elszaporodhatnak, lelegetnek mindent. Megint bekövetkezik az összeomlás.

Befolyásolja a lemmingek négyéves körfolyamata a belőlük élő ragadozók, így a sarki róka táplálkozását is. Ahogyan a lemmingek száma változik, annak megfelelően ingadozik a sarki rókák népessége is. Ez hat a vidéken élő madarak életére is. Ha a rókák nem tudnak lemmingeket fogni, rákapnak a madarak tojására és a fiatal madarak vadászatára. Emiatt a madarak népessége is négyéves ingadozásokat mutat.

11.1. A Gaia modell

A Gaia modell - Gaia a görög hitregékben a Föld istennője -, szerint a teljes földi élővilágot egyetlen élő szervezetként értelmezhetjük. Földi élőlény önmagában, a többi élő nélkül nem létezhetne és természetesen nem létezhetne élettelen környezete nélkül sem. Egymásra vannak utalva az élőlények, akár csak egy élő szervezet testrészei. Egy élő szervezetet bonyolult önszabályzó folyamatok, visszacsatolások tartanak életképesen. Ezek biztosítják az élethez szükség feltételek viszonylagos állandóságát. Ilyen közel állandó jellemzők a testnedvek összetétele, vagy akár a emlősöknél a test hőmérséklete.

Az élővilág egésze, a Gaia is igyekszik létfeltételeit állandónak tartani. Említettük, hogy a légkör összetételét a földi élővilág alakította ki. Vagy gondoljunk arra, hogy tengerek, világtengerek sótartalma is állandó. Ennek okát, a szabályzó rendszer működését igazából még nem is értjük. Idők folyamán, itt évmilliárdokban is gondolkodhatunk, a Föld felszínének átlagos hőmérséklete is közel állandó, habár a Nap egyre fényesebben süt. Ha emelkedik a bolygó hőmérséklete, elszaporodnak a növények. Kivonják a légkörből a fénymegkötés folyamatához szükséges széndioxidot. Ezzel az üvegházhatás gyengül, a Föld több hőt képes kisugározni. Ha csökken a hőmérséklet, a növényzet pusztulása megnöveli a levegőbe jutó széndioxid mennyiségét. Erősebb lesz az üvegházhatás, a hőmérséklet emelkedik.

Az élővilág folyamatait, akár csak az élő életműködését, körfolyamatokként ragadhatjuk meg. Gondoljunk például víz, szén, nitrogén, foszfor, kálium stb. körforgására a természetben. Egyes körfolyamatok rövidebb-hosszabb időtartamúak lehetnek, egymásba is kapcsolódhatnak, kapcsolódnak. Körfolyamatok összjátéka élteti az élővilágot, teszi alapvető jellemzőit viszonylag állandóvá. Ha az élővilág és környezetének valamely eleme sérül, ez nem jelenti az egyensúly végleges elvesztését. Működésbe jönnek a visszacsatoló, helyreállító folyamatok és az élővilág megváltozva ugyan, de fennmarad.

Élővilág egésze és élő szervezet közötti hasonlóság alapja végül is az, hogy mind az élővilág, mind az élőlény önszerveződő rendszert alkotnak. A bennük közös elemek, az alkotórészek egymással való szoros kapcsolata, a körfolyamatok, a körfolyamatok feltételeit biztosító állandó mennyiségek beszabályozottsága, mind az önszerveződő rendszerek általános jellemzői.

12. Az emberről

Korábban a fejlődés jelei a termet, a csontozat és az izomzat méreteiben, a táplálkozás, a mozgás a szaporodás folyamatainak hatékonyságában jelentkeztek. Emberré válásunk folyamatának legfontosabb élettani jellemzője az agy térfogatának és szerveződöttségének igen gyors növekedése. 3-4 millió évvel ezelőtt élt elődeink agymérete kb. 400 cm^3 volt. A 100000-200000 éve elért és azóta állandósult emberi agytérfogat 1350 cm^3 körüli értéknek felel meg.

Nehezen tekinthető az ember földi megjelenése csupán a törzsfejlődés egy állomásának. Világegyetemünk fejlődését tekintve az ember a világmindenség értelmessé váló elemének tekinthető. Benne ébred önmaga tudatára a világmindenség, tanulmányozza, mi van a látható dolgok mögött. Megismeri a világot leíró, kormányzó elveket, törvényeket, feltárja saját múltját és elgondolkodik létezésének jelentőségén, értelmén.

Valamennyi szervünk közül az agyunk működése a leginkább összetett. Tudatos viselkedésünk agyunk különleges mivoltával hozható kapcsolatba. Agyunknak nem is annyira a tömege, hanem felépítése bír megkülönböztető sajátosságokkal. A majmok és az emberszabású majmok csupán egyetlen szerv, az agykéreg fejlettségében különböznek az többi emlőstől. Az agykéreg további rohamos fejlődése az a tényező, ami az embert kiválasztotta tette. Agyunk a majmokéhoz képest jelentős szerkezeti különbségeket is mutat. Ezért az ember nem nevezhető egyszerűen egy okosabb majomnak. Az emberi agy és a gerincvelő mintegy egybillió idegsejtből épül fel, az agykéreg százmilliárd idegsejtből vagy más néven neuronból áll. Agykérgünkben kb. ezerszer annyi neuron van, mint a macska hasonló szervében.

Az agykéreg a nagyagy féltékéit borítva helyezkedik el. Szürkeállomány néven is ismerjük, vastagsága kb. 2 mm. Sejtsűrűsége nagyjából egyenletes, minden egyes mm^2 felületéhez 148000 neuron tartozik. Különböző helyen lévő részei nagyjából mind ugyanúgy néznek ki, függetlenül attól, hogy érzékelések feldolgozásával vagy beszéddel foglalkoznak. Egyes agysejteknek több ezer vagy tízezer kapcsolódása lehet más agysejtekhez. A fehérállomány anyaga az agysejtek közötti összeköttetést adó huzalozódásnak felel meg. Kiterítve az agykéreg felületét, az 2200 cm^2 -nyi, mintegy négy A4-es lapot tehetne ki.

Az agykéreg sejtszintesen rétegekbe rendeződnek, általában hat réteget különböztethetünk meg. A mélyebb rétegekből indulnak a kimeneti huzalok, a kérget elhagyva a kéreg alatti központokba vagy a gerincvelőbe tartanak. A középső rétegek neuronjai a kívülről érkezett huzalokat fogadják, a felszíni rétegek neuronjai a szomszédos vagy más kéregterületekkel tartják a kapcsolatot. Az agykéreg függőleges szerveződésének alapegységei az oszlopocskák. Ezek kb. 100 agysejtet tartalmazó $0,03 \text{ mm}$ átmérőjű hengerecskék, amelyek a kéreg felszínétől lefelé a fehérállományig húzódnak. Az oszlopocskák sejtszintjének bemeneti huzalozódása közös, azonos feladattal foglalkoznak. A látókéreg egy oszlopocskája pl. bizonyos szögben álló tárgyak körvonalaira érzékeny. Nagyobb egységekbe szerveződnek az oszlopocskák, azok azután még nagyobbakba. Rangsor szerint felépülő rendszert képez így az agykéreg szerveződése.

12.1. Agyfejlődés

Agysejtek a magzati kor nyolcadik hetétől a tizennyolcadik hétig alakulnak ki, ebben az időszakban perceként kb. 200000 új agysejt keletkezik. Bár az agysejtek összekapcsolódásainak lehetőségét a genetikai állomány szabályozza, viszont, hogy ténylegesen miként kapcsolódnak az agysejtek hálózatokba, azt már külső, ismétlődő ingerek vezérlik. Agysejteink huzalozódása már a magzati lét harmadik hónapjában elkezdődik. Ugyanis a magzat nagyon szoros kapcsolatban áll az anya szervezetével, érzékeli az anya érzelmeit, életének folyását. A születéskor még létező százmilliárd idegsejtből egyéves korra már csak harmincmilliárd marad, mivel azok az agysejtek, amelyek nem kaptak elég sok ingert, természetes módon felszívódnak.

Ember és állat közötti különbség egyik meghatározó eleme az emberi agy fejlődésének folyamata. A legtöbb állat idegrendszerének kialakulása a születéssel lezárul. Ugyan az állatok is képesek tanulni, de

csak annyira, amennyire agyuk születéskor rögzült állapota megengedi. Az emberi agy, bár alapvető sejtjeinek, az agysejtek száma a születés után már nem növekszik, mégis képes a fejlődésre, élettani értelemben is. Azon agyterületek körzetében, amelyeket erősebben dolgoztatunk, a hajszálerek kiterjedtebb, sűrűbb hálózattá szerveződnek. Ez a folyamat, az agy, az idegrendszer végleges kialakulása a testi növekedés lezárulásával fejeződik be, tehát kb. 18 éves korig tart. A neuronok közötti huzalozódási rendszer azonban átlagosan 48 éves korig finomodhat, fejlődhet. Ez arra utal, hogy a szellemi képességeink eddig a korig még fokozhatók.

Mivel az emberi gondolkodást az átvett minták és nem a rögzült genetikai program határozza meg, az emberi társadalom nagyon gyorsan, egy-két nemzedéken belül képes lehet arra, hogy alkalmazkodjon környezetének változásaihoz.

Tudat és idegrendszer. Tudatunk létezése, bár legalapvetőbb tapasztalatunk, egyúttal azonban létezésünk legrejtélyesebb vonása. Tudatos viselkedésünkről igen sokat tudunk. Csupán az a gond, hogy mindezt nagyon nehéz összegyeztetni egyéb ismereteinkkel. Egyáltalán miért létezik a tudatunk, hogyan teszi azt, amit tesz, mint válik tudatossá mindaz, amit az agyunk idegrendszeri folyamataiként tanulmányozhatunk, nem világos. Az agy működése, ha a folyamatot természettani, vegyi folyamatként írjuk le, viszonylag érthető. Olvasva egy szöveget, fotonok ütköznek a szem látóhártyájának érzékelő sejtjeire. Idegszálak közlik a jelet a megfelelő agyterülettel. Az feldolgozza, azonosítja a lapra írt betűket, szavakat. Valahogy el is raktározza mindazt, amit olvasok. Mindez azonban személyként, tudatos módon is megélem. Leírt szövegek érzelmeket képesek kelteni, gondolatok ébrednek bennem. Egy felfogott gondolat tudatom részévé válik, mint egyén egy kicsit meg is változom általa. Lehet, hogy elégedettséget érzek, jobb lesz a kedvem, az is lehet, hogy bosszússá válok. Mindezeket a tudatra utaló jelenségeket természeti folyamatok hordozzák. Nem tudjuk, pontosan hogyan, azt sem, hogy miért van mindez. Tudatosságunk központja az agyon belül nem azonosított. Mintha az agykéreg együtt hordozná azt, amit öntudatnak nevezünk.

Intelligencia és mesterséges intelligencia. Agyhoz kötött, röviden természetes intelligencia röviden a rögtönzésre, a találgatásra való képesség, addig kísérletezünk, míg rá nem hibázunk a megfelelő megoldásra. Számos kísérlet történt a mesterséges, gépi intelligencia kifejlesztésére is, azonban az agyéhez hasonló jellegű intelligenciájú számítógépet nem sikerült kifejleszteni. Ennek végül is az az oka, hogy az idegrendszer valójában nem, illetve nem közvetlenül programozott rendszer. Számítógépnél előírjuk, műveleti utasításokkal rögzítjük, hogy mit várunk el tőle, és ennek megfelelő szerkezettel készítjük el.

Agyi hálózatok működése közben nemcsak az agysejtek közötti kapcsolatok, hanem maguk a neuronok is fokozatosan és állandóan változnak. A kapcsolatok és az agysejtek számos, úgymond feleslegesnek nevezhető változáson is átesnek, és ezek elő nem írható működési, viselkedési módokat tesznek lehetővé. Az agy rangsorolt felépítettségű, az ismeretek feldolgozásában, kezelésében különböző szintű szerveződések működnek közre. Ez a rendszer kísérleteken, tévedésen és sikeren alapuló tanulásra képes. Agyunkban az ismeretek feldolgozása tehát olyan, hogy szerkezet és működés között nincs jól meghatározott viszony. Mivel a számítógépek szerkezete és működése között meghatározott, előírt viszony létezik, emiatt agy és utasításokkal vezérelt számítógép működése között elvi ellentét áll fenn. Emiatt, legalább is egyelőre, nehezen képzelhetők el emberi módon viselkedő számítógépek előállításai. Egyesek szerint az emberi gondolkodás sohasem foglalható képletekbe, algoritmusokba, merev szabályokba. Mások szerint mindez elképzelhető.

Emberi természet és nevelhetőség. Ósréginek mondható kérdés, öröklött adottságok és nevelés közül melyik a meghatározó. Angol szójáték szerint: nature or nurture? Nem egyszerű a válasz. Kutatások igazolják, szülők és gyermekek viselkedése között szoros kapcsolat van. Kedvesen, szeretettel nevelő szülők gyermekei öntudatosak, bíznak magukban, a határozottan viselkedő szülők gyermekei jó magaviseletűek és ha a szülők sokat beszélnek a gyermekeiknek, azoknak jobb lesznek a nyelvi készségei. Ebből sokan azt a következtetést vonják le, hogy a szülőknek kedvesen, határozottan, sokat beszélve kell a gyermeket

nevelni és ha a gyermek mégsem a megfelelő módon viselkedik, az a szülő hibája. De a szülő gyermekeinek azonban nemcsak a nevelést adja, hanem génjeit is. A gyermek és a szülő viselkedését elemezve azt is mondhatjuk, hogy a szülőtől örökölt gének tehetik a gyermeket kedvessé, határozottá, jó nyelvkészségűvé.

Két végletes vélemény küzd egymással. Egyik, a beletörődő, fásult felfogás szerint az emberi természetet olyannak kell elfogadni, amilyen, nem lehet az embert bölcsebbé, kedvesebbé, jobbá tenni és a társadalmat eszerint kell berendezni. Másik, a délibábosnak mondható felfogás szerint az ember a társadalom miatt annyira korlátolt. Ha egy jobb társadalmat hozunk létre, az emberek is sokkal jobbak lesznek. Jobb- és baloldaliságnak ezek a gyökerei. A jobboldali ragaszkodik a hagyományokhoz (mivel az emberi természet olyan, amilyen), gyengébb állam hívei (a kormányzók nem elég bölcsek ahhoz, hogy jól irányítsanak), erős rendőrséget és katonaságot akarnak (mivel a bűn és a hódítás vágya állandóan kísérti az embert) és a szabad piac hívei, (mivel az az egyéni önzőséget a közösség boldogításának eszközévé teszi). A baloldaliak a fenti álláspontokat kishitűeknek és érzéketleneknek minősíti. Egy baloldali szerint ha a nevelési, művelődési, oktatási, sajtó és tájékoztatási rendszerünkön valamint egyéb társadalmi célkitűzéseinken megfelelően változtatunk akkor az emberek értelmesebbek, kedvesebbek, békésebbek és jobblekűek lesznek. Megjegyezzük, a jobb- és baloldaliság fenti jellemzői az Amerikai Egyesült Államok és más fejlett nyugati ország gondolkodását jellemzik, térségünk átmeneti társadalmában a két felfogás erősen keveredik.

A mai agykutatás választ adhat a fenti kérdésre. Agyunk nem csupán a gének működésének az eredménye és nem is csak az egyén tapasztalatainak összessége. Igen összetett hálózati rendszerei vannak, amelyek már a születés előtt alakulni kezdenek és az élet során a gének és környezet kölcsönhatásának eredményeképpen folyamatosan növekednek és változnak. Azaz az emberi agy a gének és a környezet kölcsönhatásának eredményeképpen fejlődik. A társadalom, amely neveli a gyermeket, miként éljen, hogyan gondolkodjon, az agy alakítását a sejtbiológiával és a molekuláris genetikával kölcsönhatásban végzi. Miközben az agy vezérli az emberi cselekvést, az élet visszajelzései folyamatosan alakítják az agyat. Azaz az emberi agy nem állapot, hanem folyamat, mely állandóan változik, alakul.

Megismerés határai és a matematika korlátai . A matematika a természet nyelve. A világmindenség tökéletes megértéséhez az is szükséges volna, hogy ez a nyelv tökéletes legyen. Mindent lehessen vele tárgyalni és ne fordulhasson az elő, hogy valamilyen állítás igazságát vagy hamisságát ne tudjuk eldönteni. Ha a nyelv nem teljes és tökéletes, nem várhatjuk el azt sem, hogy segítségével mindenre választ kaphassunk.

A matematika egyes területeinek felépítése az adott terület axiómáin nyugszik. Például a mértant is axiómák rendszerével fogalmazzák meg. Az axiómák olyan állítások, amelyek igazságát eleve feltételezik. Az axiómarendszer állításai nem mondhatnak ellent egymásnak, továbbá az axiómák segítségével bármely állítás igazsága vagy hamissága eldönthető. Ez utóbbi állítás azt jelenti, hogy az axiómák rendszere teljes.

Kiderült, a matematika, amit a lehető legtisztább, okszerű (logikus), értelmes kifejezési módnak, nyelvnek tarthatnánk, sem mentes ellentmondásoktól, korlátoktól. A már az elemi módon megfogalmazható eldönthetetlen logikai állítások problémája a matematika alapjait képező axiómarendszereket is jellemzi. Megmutatható, hogy ugyan a mértan axiómarendszere teljes, de Gödel tétele szerint egy axiómarendszer, ha eléggé összetett ahhoz, hogy az aritmetikát is magába tudja foglalni, sohasem lehet teljes. Azaz az aritmetika valami olyan rendszert képez, amiben az igazságot szabályok rendszerével nem lehet teljes pontossággal megfogalmazni. Gödel szerint bármely ilyen axiómarendszer esetén lehet egy olyan állítást találni, amelynek igazsága vagy hamissága az adott axiómarendszeren belül nem dönthető el. Ahhoz, hogy ennek az állításnak az igazságát eldöntsük, az axiómarendszert ki kell bővítenünk. Viszont ebben az axiómarendszerben is megfogalmazható egy eldönthetetlen állítás. Erre példa a következő rövid állítás: "Nem mondok igazat." Ha hazudtam, állításom igaz, de akkor nem vagyok hazug. Ha igazat mondtam, állításom hamis, merthogy nem hazudtam. Gödel tétele hasonló logika szerint építkezik.

Gödel tételén kívül másik példa a matematika határaitra a Turing gép működése. Korábban feltételezték, hogy a matematika gépiesíthető. Minden matematikai művelet jól meghatározott elemi lépések segítségével előállítható és így bármely matematikai művelet elvégezhető. A Turing gép ezt a gépesítést oldja meg, persze csak elméletileg. Amire a Turing gép nem képes, azt más eszközökkel sem lehet megoldani.

Kiderült, hogy a Turing gép sem tudhat mindent elvégezni. Létezik a kiszámíthatatlan számok problémája. Azaz léteznek olyan számok, amelyet a Turing gép nem képes kiszámolni. Ezek a számok ráadásul nem választhatók el a kiszámítható számok halmazától.

Gödel tétele és Turing kiszámíthatatlan számainak problémája arra utal, hogy a matematika sem tekintendő teljes értékű megfogalmazási eszköznek. Azaz a lehetséges kérdések nem biztos, hogy egyértelműen megfogalmazhatók és megválaszolhatók. Ezzel elvileg sincs meg az a lehetőség, hogy a világ valamennyi kérdésére valaha is teljesértékű választ kaphassunk. Azaz a világ teljes megismerhetősége már csak a matematikai nyelvezeti korlátai miatt is kétséges.

Gödel tételének értelmezése ma is nagy vitákat vált ki. Egyesek szerint ez a tétel arra utal, hogy az ember agy felette áll a szabályok alapján működő számítógépek lehetőségein, azaz az ember képzelőereje és más gondolkodási képességei által olyanokra képes, mint a számítógép soha.

Ember és az ökörendszer. Ember mint természeti lény annyi energiát használ fel, amekkora tápértékűt anyagcseréjének fenntartásához elfogyaszt. Ez átlagosan napi 2500 kcal, ami átszámítva egy 120 wattos izzót égethetne állandóan. Vagy azt is mondhatjuk, az ember napi 3 deci üzemanyaggal működik, merthogy 2500 kcal kevesebb mint 3 deci étolaj és így gázolaj energiatartalma. Nevezük ezt táperőnek. Ám az ember, a tüzet felfedezése óta külső erőforrást is felhasznál. Ezenkívül állatok háziásításával, szél és víz-erő alkalmazásával a rendelkezésre álló erőforrások az ipari forradalom előtti társadalmakban a táperőnek átlagosan a négyszeresére emelkedhettek. Valamennyi így felhasznált energiaforrás megújuló. Ősmeradványi eredetű erőforrások, a szén, kőolaj és földgáz felhasználásával ma az emberiség átlagban a táperő tizenötszörösét használja fel. Mindez a természetes körfolyamatok rendjének megzavarásához vezetett. Az ökörendszer működésének főbb zavarai a következők:

- Ősmeradványi erőforrások eltüzelése miatt jelentősen megnőtt a légkör széndioxid tartalma. Emiatt felerősödött az üvegházhatás. Az utóbbi 10 évben végsősoron emiatt jelentősen gyengült a Golf-áram.

- Freon légkörbe juttatása miatt megsérült az élővilágot védő ózonpajzs.

- A mértéktelen műtrágyázás megbetegíti a talajt, sőt elpusztítja annak élővilágát.

- Mélyszántások miatt a talajt hatalmas mértékben pusztítja a víz és a szél.

- Szennyvízkezelés miatt a foszfor és a kálium körforgás megsérült. Az emberi anyagcserébe került foszfor és kálium a folyókon keresztül végül is a világtengerekbe jut. Így ezekben az elemekben a szárazföld megszegényedik és a világtengerek feldúsulnak.

- Rohamosan csökken az erőltetett öntözés miatt a talajvizek szintje.

- Az ember a szárazföldi fényenergia kb. 40%-át a maga javára használja. Ezzel megfosztja életterének jó részétől a többi élőlényt. Emiatt rohamosan csökken az élővilág változatossága. Zajlik a földtörténet egyik legnagyobb kihalása.

- 1953 és 2003 között kifogta az ember a világtengerek halászható halainak 90%-át. Ennek az ember gazdasági kárán kívül beláthatatlan ökológiai következményei is lehetnek.

Idegen lények létezéséről. Létünk felveti a kérdést, léteznek-e rajtunk kívül értelmes lények a mindenségben. Mivel legjobb tudásunk szerint a természettan törvényei a világmindenségben mindenütt érvényesek, mondhatjuk, miért ne. Viszont az élet kialakulásának törvényeit még körvonalaiban sem ismerjük. Ezért azt sem tudhatjuk, az ősi Földet jellemző körülmények mennyire lehettek kedvezőek az első élőnek nevezhető szervezet megjelenéséhez. Ennél fogva annak becslése, hogy mennyi az esélye annak, hogy másutt a Tejútrendszerben, vagy a Világmindenségben van értelmes élet, erősen bizonytalan.

Ha az élet mögött szükségszerűség is van - mint tárgyaltuk, maguk a biológusok erről hallani sem akarnak - azt sugallná, hogy nem csak bolygónkon fejlődött ki az élet, hanem sok más helyen is. Egyes

becslések szerint csupán csillagrendszerünkben tíz-, akár százmillió bolygón is megindulhatott az értelmes élet felé mutató fejlődés.

Itt a bolygónkon látjuk, az élet, legyen az akármilyen fajta, igyekszik terjeszkedni, kihasználni a rendelkezésre álló életteret. Igazolja ezt az emberiség történelme is. Alig száz, kétszázézer éve jelent meg a mai ember. Hamar uralma alá hajtotta a Földet és alig negyven évvel az első űrhajó felbocsájtása után a világűr bolygónkat körbevévő szakaszát is felderítette, használatba vette. Józan becslések szerint, hacsak hamarosan össze nem omlik műveltségünk, néhány száz éven belül sor kerülhet arra, hogy nagyobb űrállomásokat útjukra bocsájtva megindulhat a Naprendszeren kívüli térségek felderítése, esetleg gyarmatosítása. Néhányszor tízmillió év elteltével akár a teljes Tejútrendszert is felderíthetjük, birtokba vehetjük. Feltételezhetjük, a máshol esetleg kialakuló műveltségek is hasonló fejlődési pályát követhetnek, mivel a terjeszkedés az élet egyik legáltalánosabb tulajdonsága.

Ha ez így van, jogos a kérdés, hol vannak a Tejútrendszerben létrejött értelmes műveltségek. Akár tízmillió ilyen is létezhetne és mindegyik akár külön-külön is képes benépesíteni a csillagrendszert. Azaz Naprendszerünkben is szinte hemzsegniük kellene a különböző műszaki műveltséget kialakított értelmes lényeknek.

Amennyire Naprendszerünket már felderítettük, a földönkívüli élet nyomaira mindeddig nem találtunk. Nincs arra utaló jel, hogy itt lennének, vagy akár korábban jártak volna errefelé értelmes lények. Nem találjuk műszaki alkotásaikat és a világűr betöltő sugárzási térben sem figyeltünk meg eddig olyan jeleket, amelyek értelemre utaló alakzatokat hordoznának. Több évtizede tartó adatgyűjtés eddigi eredménytelensége arra utal, hogy a Tejútrendszerben mi vagyunk az egyedüli értelmes lények és meglehet, a teljes Mindenségben is egyedül vagyunk.

Zavaró a fenti eredmény, mert nem mondhatjuk azt, hogy az értelmes műveltségek közül az első egyike lehetünk, hiszen a csillagrendszerben naprendszerünk nem tartozik az első közé. Hozzánk hasonló naprendszerekben már milliárd évekkal ezelőtt megjelenhettek volna értelmes lények. Ha egy hatalmas réten csak egyetlen pipacs virít, akkor igen kicsiny annak a valószínűsége, hogy az a pipacs a sokezer közül a legelső. Inkább annak van sokkal nagyobb esélye, hogy ez az egyedüli pipacs a réten. Ezért abból, hogy nem észleljük más műveltségek létezését, joggal gondolhatunk arra, hogy az értelmes élet rendkívül ritka, kivételes jelenség. Vagy pedig a hozzánk hasonló szintre eljutott értelmes lények kimerítették ősmaradványi erőforrásaikat és nem találtak újabbakat helyettük. Ezért a világűrbe is csak 100-200 évre léphettek ki, jeleiket sem sugározhatták hosszabb ideig. Éppen ezért értelemes lények jelzéseinek felfogása hatalmas biztatást adna számunkra, ez bizonyítaná továbbfejlődésünk lehetőségét.

Mindenesetre hamis az az érvelés, hogy a kutatók előítéleteik, maradiságuk miatt tagadnák a földönkívüliek létezését. Inkább az a helyzet, hogy nagyon jelentős befektetéssel kutatják az idegen műveltségekre utaló jeleket, de eddig még nem találtak ilyeneket. Az, hogy a sajtóban, hang- és képsatornákon mégis olyan sok ilyen jellegű cikkel, műsorral találkozunk, abban elsősorban az üzleti megfontolások a meghatározók. Kevesen járhattak olyan UFO előadáson, ahol ne szedtek volna többszáz forintos belépőt és az UFO folyóiratok számára is biztosítani kell az anyagot. Ezért az általuk szolgáltatott leírások kétes értékűek. Meg kell jegyezni, az emberi lélek jelenségei elképzelhetetlenül gazdagok. Bizonyos vegyületek, szesz, kábítószer, érzékcsalódást előidéző szerek hatására bárkinek lehetnek látomásai. Szemei előtt olyan dolgok jelenhetnek meg, amelyeket korábban sohasem látott és el sem tudott volna képzelni. Bizonyos helyi elektromágneses zavarok hatására is lehetnek egyes, egyébként teljesen egészséges embernek érzékcsalódásai. Ezért az ilyen beszámolók nem fogadhatók el a földönkívüliek létezése cáfolhatatlan bizonyítékaként.

Építmények, alkotások pedig, melyek Földünk egymástól távolieső pontjain a történelemtudomány számára egyelőre megmagyarázhatatlan rejtélyt jelenthetnek, nem foghatók fel az idegenek létezésének bizonyítékaként. Sokkal kézenfekvőbb lehet például egy olyan magyarázat - gondoljunk az Occam elvre, lásd a 3. szakaszban -, hogy a történelem előtti időkben már létezett a Földön olyan magas fejlettségű műveltség, amely képes volt a világtengereken való hajózásra, gyarmatosításra. Ez sokkal egyszerűbb, és ezért elfogadhatóbb magyarázat lehet, mint az, hogy ezek a művek a földönkívüliekre utaló alkotások.

12.2. Emberarcú világegyetem

Most azt a kérdést érintjük, mennyire lehet véletlennek, avagy szükségszerűnek tekinteni azt, hogy a világegyetemben megjelent az értelmes élet. Ennek a kérdésnek tárgyalása hosszú ideig csak a bölcsezet és hittudomány illetékességi körébe tartozott.

Korábban tárgyaltuk, hogy a térhez és időhöz köthető valamint az belső szimmetriák létezése meghatározza az elemi részek mozgástörvényeinek és az alapvető erőknek az alakját, lásd a 3. szakaszban. Ami viszont az egyenletekben szereplő természeti állandók értékét illeti, azokat sem szimmetriák, sem másféle természettani elvek sem rögzítik. Ezek az állandók a négy alapvető kölcsönhatás erősségei és a világunkat felépítő elemi részek tömegei. Ezek az értékek szabják meg végül is, milyen rendszerek alakulhatnak ki a világegyetem fejlődése során.

Felmerült a kérdés, mennyire függ az élet kialakulásának, az értelmes ember kifejlődésének lehetősége a fenti állandók értékétől. Bármely élő nagyon sok ismeretet tároló, környezetéből energiát felvevő rendszer. Energiát rendezettebb alakban vesz fel és rendezetlenebb alakban ad le. Az élet kialakulásának feltételül csupán az alapvető kémiai elemek, mint a szén, hidrogén, oxigén, nitrogén, kén, foszfor stb. valamint a kellően hosszú ideig, kellő erősséggel sugárzó csillagok létezését szabták ki. Valóban, a különböző féle elemek léte biztosíthatja csak, hogy az élethez szükséges adattömeget tároló rendszerek kiépülhessenek. Megfelelő csillagokra mint a hosszú törzsfajlódási időszak erőforrásaira van szükség.

Az egységes természettudományos világnézet áttekintést ad arról, miként jutott el a világegyetem az élet megjelenéséig. A fejlődés különböző szakaszait, az akkor keletkezett rendszereket befolyásolja az, milyenek a fenti természeti állandók értékei. Főleg az első három percen belül és a csillagok belsejében zajló folyamatok függenek erősen az állandók értékeitől. Elméleti kutatók eljátszottak azzal a feltételezéssel, mi történt volna, milyen lenne ma a világegyetem, ha a természetben fenti alapvető állandóinak nagysága más lenne. Elégge meglepő az eredmény. Ha az állandók kis mértékben, akár százalékosan is különböznenek a mostanitól, élet egyáltalán nem alakulhatna ki és a világegyetem, ha egyáltalán létezne, teljesen más-hogy nézne ki, mint a mai. Ezek a világegyetek a mostanihoz képest rendkívül sivarak és egyhangúak lennének, változatosságra való képtelenségük zárna ki bármiféle élet kialakulásának lehetőségét. Mondhatjuk, a természetben alapvető állandói finomhangolódtak, a világegyetem az élet hordozására hangolódott. Ez a finomhangoltság az emberarcú világegyetem elvének tartalma.

Nézzük például mivel járna, ha az erős magkölcsönhatás erőssége más lenne, amit amekkorának most mérjük. Ha az erős magkölcsönhatás egy kicsit gyengébb lenne, a magerők nem lennének elég erősek ahhoz, hogy a hidrogénnél nehezebb atommagot hozhassanak létre. Ha a magerők csak egy kicsit is erősebbek lennének, nem maradna a világmindenségben hidrogén és nem léteznének csillagok sem. A magerők életre hangoltsága a legújabb eredmények szerint 0.5%-os.

Ha a gyenge magkölcsönhatás erőssége nagyobb lenne, az első három perc során túl sok hélium keletkezne. Túl sok nehéz elem keletkezne a csillagok belsejében, viszont a szupernova robbanások nem következnenek be, az elemek a csillagok belsejében rekednenek. Ha a gyenge magkölcsönhatás gyengébb lenne, túl kevés nehéz elem keletkezne, a szupernova robbanások ebben az esetben sem jöhetnének létre.

Ha például a tömegvonzás erőssége nagyobb lenne, a csillagok forróbbak lennének, a csillagfejlődés felgyorsulna, a csillagok nem sugároznának elég hosszú ideig. Ha a tömegvonzás gyengébb lenne, a csillagok nem hevülhetnének fel a magfolyamatokhoz szükséges hőmérsékletre.

Ha az elektromágneses kölcsönhatás a mostaninál gyengébb vagy erősebb lenne, nem alakulhatnának ki a megfelelő vegyi kötések. Hasonló lenne az eset, ha az elektron és a proton tömegének aránya más lenne, mint a mostani. Sok más, ezekhez és a fentiekhez hasonló megszorítás fogalmazható még meg.

Élet és a világegyetem. Az emberarcúság elve szoros kapcsolatot teremt az élet és a természetben alap-törvényei, a világegyetem egésze között. Túl erősek a megszorítások ahhoz, semhogy véletlennek tekintetnének azokat. Élet és az őt kialakító, hordozó világmindenség összetartoznak. Értelmes ember nem is

láthatja másnak a világmindenséget, mint amilyenek azt észleli. Ha a világegyetem egy kicsit is más lenne, mint amilyen, élő azt nem figyelhetné meg, merthogy élet akkor nem is létezhetne.

Világegyetemünk finomhangoltságának értelmezése hatalmas kihívást jelenthet a tudomány számára. Lehetséges-e egyáltalán másfajta világmindenség, mint amelyet megfigyelünk, megfigyelhetünk. Egyesek számtalan sok egyéb, számunkra megfigyelhetetlen, a mienktől különböző világegyetem létezését tételezik fel ahhoz, hogy ennek az egynek a finomhangoltságát, életet hordozó képességét magyarázni tudják, lásd a 8.2. szakaszt. Vannak, akik tartózkodnak attól, hogy egy létezőnek a magyarázatára ezt tegyék, gondolván, ez túl bonyolult, csak az adott magyarázatra kiötlött megoldás lehetne.

Feltételezhető az is, hogy a fizika alapvető állandói nem is lehetnek mások, mint amilyenek mérjük őket. Idővel talán megszületik valamilyen új elv alapján felismert nagy egyesített elmélet, amely rögzíti az állandók értékét, megmutatva, miért szükségszerűen veszik fel az általunk mért értékeket. Ekkor viszont majd arra a kérdésre kell a választ keresnünk, miért éppen ezek azok az értékek, amelyek az élet kialakulásának is kedveznek.

Mindenesetre elmondhatjuk, az értelmes, tudattal rendelkező lény megjelenése, amely jelen tudásunk szerint a Tejútrendszerben, sőt talán a teljes világmindenségben is rendkívül ritka, talán egyedülálló fejlemény, a világmindenség fejlődésének megkülönböztetett eseménye. A mindenség fejlődését jellemző általános irányzat, az egyre bonyolultabb rendszerek kialakulásának betetőzéseként megjelent benne egy olyan lény, amelyik képes magát a világegyetemet leírni, értelmezni. Az anyagából létrejött, értelmes lény kutatja a mindenség törvényeit, kialakulásának körülményeit, elgondolkozik a mindenség eredetén, az ember személyében a világegyetem visszatekint saját magára. Ezt a jelenséget, az értelmes ember létezését, úgy tűnik, egyre nehezebb lesz pusztán véletlennek tulajdonítani. Ami talán a tudomány számára még nehezebb lehet, annak megértése, miért volna az élet kialakulása, értelmessé fejlődése szükségszerűség a világmindenség számára.

Önmagát újjászülő világegyetem. A kaotikusan felfűvődő világegyetem korábban tárgyalt modellje szerint, lásd a 8.2. szakaszban, a világegyetem fenti állandói véletlenszerűen adódnak ki. Más buborékokban más tulajdonságú világegyetek keletkeznek, ahol a természetben állandói mások és azokban ezért élet sem alakulhat ki. Ez a modell magyarázatot adhat a világegyetemünk finomhangoltságára. Éppen abban a buborékban vagyunk, ahol lehet élet.

Van egy másik elképzelés is, amely az emberarcúság elvének értelmezésére született. Ezek szerint a világegyetemben a csillagfejlődés során keletkezett fekete lyukak újabb világegyetem forrásaiként szolgálnak. A keletkezett újabb világegyetem, a csecsemő világegyetem természeti állandói csak kissé mások, mint a szülő világegyetem alapvető állandói. Ezért az így keletkezett világegyetemben is megjelennek a csillagrendszerek, csillagok, fekete lyukak, amelyek azután újabb csecsemő világegyetek születéséhez vezethetnek. Ahogyan már a fekete lyukakkal foglalkozó részben említettük, a csillagrendszerek közepén található óriási fekete lyukak újabb világegyetek szülőhelzei lehetnek és a mi világegyetemünk is egy ilyen óriási fekete lyuk belsejében keletkezhetett.

Természettani állandók változása a fenti modell szerint azt a folyamatot részesíti előnyben, amelynek során a csecsemő világegyetekben minél több fekete lyuk keletkezik, azaz ahol a csillagfejlődés feltételei egyre jobbak. Ahogy az emberarcúság elvét tárgyaltuk, a csillagfejlődés egyben az önszervező rendszerek képződésének, az élet kialakulásának az alapfeltétele is.

Világegyetem végzetéről. Mint láttuk, a világegyetem fejlődésben lévő, állandóan változó rendszer. Eddigi létezését az jellemezte, hogy az idő múlásával egyre összetettebb, kifinomultabb rendszerek jelentek meg benne. Kérdés az, meddig tarthat mindez, mi történik később. A válasz természetesen nem emberi időmértékeinkre vonatkozik. Egyre melegebben süt a Nap, lassan a Föld kikerül a lakhatóság zónájából. Az átlaghőmérsékletet évmilliárdokig állandó értéken tartó folyamatok egyes modellek szerint már csak

hatszázmilliótól egymilliárd évig terjedő időszakban képesek megakadályozni a Föld felszínének felforrósodását. Napunk vörös óriás csillaggá válása kb. 5 milliárd év múlva egészen biztosan izzó sivataggá változtatja a Föld felszínét. Addig az értelmes ember máshova költözhetne. Létünk azonban így sem lehet örök.

Örökké táguló világegyetemben a befejezés forgatókönyve a következő. Egy idő után a csillagok üzemanyaga, a hidrogén elfogy. Ezért a csillagok is kihunynak és bekövetkezik az, amit a természetben hőhalál-nak nevez. Félrevezető lehet a kifejezés. Hőhalál nem a magas hőmérséklet miatti megsemmisülést, hanem a hőmérséklet teljes kiegyenlítődését jelenti. Ha a csillagok üzemanyaga elfogy, a hőhalál ténylegesen bekövetkezik. A 19. században a hőhalál okozta világvégét három-négyezer esztendőn belülre várták, gondoljunk Madách Imre Ember Tragédiájára. Ezért a hőhalál elmélete akkor nagyon nagy visszhangot váltott ki. Mai ismereteink szerint a hőhalál csak tízmilliárd évek múltán esedékes, ami számunkra felfoghatatlanul nagy idő.