

# EGY ÚJ TERMÉSZETKÉPRŐL

Debreceni Egyetem, 2004/2005. tanév I. félév, leadta és lejegyezte Végh László

2004. november 30.

## 0.1. Tudnivalók a vizsgázásról

Vizsgázni a karácsony és újév közötti időszakot kivéve előreláthatólag bármelyik munkanapon lehet, de a vizsga előtt jobb ha érdeklődnek, hogy amikor jönne, tényleg itt lesz-e aznap. A szorgalmi időszak és a vizsgaidőszak utolsó napjaira lehetőleg ne tervezzenek nálam vizsgát, mert akkor esetleg órákat is várhatnak, amíg sorra kerülnek. Általában délelőtt 9-12 óra, délután 2-5 óra között kezdődnek vizsgák. Déltájt kb. egy óra hosszát vagyok oda ebédelni. Az, hogy pontosan mikor, a a délelőtti vizsgák befejezésétől függ. Ha valakinek a megadott délelőtti és délutáni időtartamok nem felelnek meg, egyeztetetünk más időpontot is.

A vizsgák helye az Atomki, VIII. épület, II em. 210-es szoba. Az Atomkiba a bejárat a Poroszlai úti portán, a szoba az Elméleti Fizika Tanszék feletti emeleten van.

A vizsgákról érdeklődni lehet személyesen, vagy távbeszélőn az 1359-es egyetemi hívószámon, (városból 417-266), vagy a hálózaton a vl@atomki.hu címen.

A vizsga szóbeli, a feleletre írásban készülhetnek fel, tollat hozzanak.

## Tartalomjegyzék

0.1. Tudnivalók a vizsgázásról . . . . .	1
<b>1. Világképünk jellege és fejlődése</b>	<b>1</b>
1.1. Az egyén öntudatának kialakulása és a világszemlélet . . . . .	1
1.2. A világ rendje és a varázslás . . . . .	1
1.3. A világ rendje és a természetfölötti . . . . .	1
1.4. A világ rendjének jellege . . . . .	2
1.5. A sokistenhit világszemlélete . . . . .	2
1.6. A sokistenhit gyengülése és a világkép átalakulása . . . . .	3
1.7. Az egyistenhit világszemlélete . . . . .	3
<b>2. A mai természettudomány születése</b>	<b>3</b>
2.1. Miért lehetséges a természettudomány . . . . .	4
2.2. Megfigyelés, kísérlet, modell . . . . .	4
2.3. A matematika és a természettudomány . . . . .	5
2.4. Deizmus . . . . .	6
2.5. A világgépezet . . . . .	7

<b>3. Tér és idő</b>	<b>7</b>
3.1. Newton végtelen világegyeteme . . . . .	8
3.2. Tehetetlenségi rendszer . . . . .	8
3.3. A Galilei-féle viszonylagossági elv . . . . .	9
3.4. Tehetetlenség . . . . .	9
3.5. Az abszolút tér . . . . .	9
3.6. Mach-elv . . . . .	9
3.7. Sebességösszeadás . . . . .	10
<b>4. A speciális relativitás elméletéről</b>	<b>10</b>
4.1. A műonok életideje és az általuk befutott út . . . . .	11
4.2. Négykiterjedésű (négydimenziós) tér . . . . .	12
<b>5. Általános relativitáselmélet</b>	<b>13</b>
5.1. Az ekvivalencia elv . . . . .	13
5.2. A fény a gravitációs térben . . . . .	13
5.3. A téridő görbülete és a tömegvonzás . . . . .	14
5.4. A idő a gravitációs térben . . . . .	15
5.5. A téridő egyenletes anyagsűrűség esetén . . . . .	15
5.6. A relativitás elvének fogadtatásáról . . . . .	16
5.7. A relativitáselmélet és a newtoni fizika alkalmazhatósága . . . . .	16
<b>6. Törvények és szimmetriák</b>	<b>16</b>
6.1. A jelenség leírása és a törvény . . . . .	16
6.2. A törvények alakja, szimmetriák és egyszerűség . . . . .	17
6.3. A fizika alapegyenleteinek alakja és a szimmetriák . . . . .	17
6.4. Szimmetriák és megmaradó mennyiségek . . . . .	18
6.5. A szimmetriák fontossága . . . . .	18
<b>7. Szimmetriasértések</b>	<b>18</b>
7.1. A magától megjelenő (spontán) szimmetriasértés . . . . .	18
7.2. Rejtett szimmetria . . . . .	19
<b>8. A kisvilág</b>	<b>19</b>
8.1. Hullámtermészet - a részecskék 'lefényképezése' . . . . .	20
8.2. Interferencia - a kétréses kísérlet . . . . .	21
8.3. Hullámcsomag . . . . .	22
8.4. Határozatlansági összefüggés . . . . .	22
8.5. Hipp-hopp (virtuális) részecskék . . . . .	23
8.6. Schrödinger egyenlet . . . . .	23

8.7.	Az atom szerkezete . . . . .	24
8.8.	Alagúthatás - áthaladás a falon . . . . .	24
8.9.	Mérés - a Schrödinger macskája paradoxon . . . . .	24
8.10.	Nemlokalitás - az Einstein-Rosen-Podolsky paradoxon . . . . .	25
<b>9.</b>	<b>Az elemi részecskék</b>	<b>26</b>
9.1.	Az elemi részecskék osztályozása . . . . .	26
9.2.	Ellenrészecskék . . . . .	27
9.3.	Barionok és mezonok . . . . .	28
<b>10.</b>	<b>Az alapvető kölcsönhatások</b>	<b>28</b>
10.1.	Van der Waals erők . . . . .	29
10.2.	Az erők eredete és a belső szimmetriák . . . . .	29
10.3.	Kvantumtérelméletek . . . . .	30
10.4.	Hipp-hopp részecske-ellenrészecske párok . . . . .	31
10.5.	A Casimir jelenség . . . . .	31
10.6.	Az erős kölcsönhatás . . . . .	32
10.7.	A gyenge és elektrogyenge kölcsönhatás . . . . .	33
10.8.	A nagy egyesített elméletekről . . . . .	34
10.9.	A kvantumgravitáció . . . . .	34
10.10.	A kölcsönhatások mértani eredetéről . . . . .	35
10.11.	Rejtőző dimenziók, Kaluza-Klein modell . . . . .	35
10.12.	Húrok, szuperhúrok . . . . .	35
<b>11.</b>	<b>Rend és szabadság a világban</b>	<b>36</b>
11.1.	Az érzékelhető világ meghatározottsága . . . . .	36
11.2.	Káosz, determinisztikus kaosz . . . . .	37
11.3.	Kiszámíthatatlanság . . . . .	38
11.4.	A kvantummechanikai határozatlanságok és a jövő nyitottsága . . . . .	39
11.5.	Makroszkopikus rendszerek, nanoelektronika . . . . .	39
11.6.	Az egyes rendszerek szabadságáról . . . . .	39
11.7.	Az összetevőkre visszavezető gondolkodás sikerei és korlátai . . . . .	40
<b>12.</b>	<b>Összetett rendszerek</b>	<b>41</b>
12.1.	Entrópia . . . . .	41
12.2.	Arányos (lineáris) rendszerek . . . . .	41
12.3.	Nemlineáris rendszerek . . . . .	42
12.4.	Szolitónok . . . . .	43
12.5.	Önszerveződés . . . . .	43
12.6.	Önszervező kritikusság . . . . .	45
12.7.	Fraktálok . . . . .	46

<b>13. A táguló világegyetem</b>	<b>47</b>
13.1. A végtelen világegyetem és Olbers paradoxona . . . . .	47
13.2. Távolodó csillagrendszerek . . . . .	48
13.3. Az ősrobbanás hagyatékai . . . . .	49
13.4. A "semmiből" kipattanó világmindenségről . . . . .	50
<b>14. A világegyetem fejlődése az atomok megjelenéséig</b>	<b>50</b>
14.1. Az első másodperc . . . . .	50
14.2. Az első három perc - a hélium keletkezése . . . . .	51
14.3. Az első 380000 év . . . . .	52
14.4. Csillagrendszerek . . . . .	53
14.5. A táguló világegyetem jövőjéről . . . . .	53
14.6. A sötét anyag kérdése . . . . .	54
14.7. A világegyetem horizontja . . . . .	54
14.8. A felfűvódó világegyetem . . . . .	55
14.9. Kvantumkozmológia . . . . .	56
14.10. Kaotikus felfűvódás . . . . .	56
<b>15. A tömegvonzás és a csillagok</b>	<b>57</b>
15.1. A tömegvonzás és a méretek . . . . .	57
15.2. A tömegvonzás és a tárgyak alakja . . . . .	57
15.3. Csillagok, szupernova, neutroncsillag . . . . .	58
15.4. Fekete lyukak . . . . .	59
15.5. Időutazás . . . . .	60
<b>16. A Naprendszer és a Föld</b>	<b>60</b>
16.1. A Naprendszer keletkezése . . . . .	60
16.2. A Föld születéséről . . . . .	61
16.3. A Föld lakhatóságának feltételeiről . . . . .	61
<b>17. Az élet és a DNS</b>	<b>63</b>
17.1. Fehérjék . . . . .	63
17.2. Genetikai kód . . . . .	63
17.3. A legegyszerűbb baktérium génjeiről . . . . .	64
17.4. A hemoglobin készítésének előírása . . . . .	64
17.5. A különböző élőlények genomjainak összevetése . . . . .	65
17.6. A gének be- és kikapcsolása . . . . .	66
17.7. Az élet jellemző adattömeg származásáról . . . . .	66

<b>18. Az élet keletkezéséről</b>	<b>67</b>
18.1. Élet mélyen a felszín alatt . . . . .	68
18.2. Az élet terjedése a világűrben . . . . .	68
18.3. Meghatározott-e az élet fejlődése . . . . .	69
18.4. A törzsfejlődés folyamatáról . . . . .	69
18.5. Az élet megjelenése és fejlődése . . . . .	70
18.6. Az élővilág törzsfája és a molekuláris törzsfejlődéstan . . . . .	71
18.7. Az ember megjelenése . . . . .	72
18.8. Génrégészet . . . . .	72
18.9. A tömeges kihalások és a világűrből eredő csapások . . . . .	72
<b>19. Ökorendszerek</b>	<b>74</b>
19.1. Az Aral-tó és környezetének pusztulása . . . . .	74
19.2. A Viktória-tó ökorendszerének összeomlása . . . . .	74
19.3. Az ökorendszerek energiaháztartása . . . . .	75
19.4. Talajélettan . . . . .	75
19.5. Lemming a tundrán . . . . .	75
19.6. A Gaia modell . . . . .	76
<b>20. Az emberről</b>	<b>77</b>
20.1. Az emberi agy fejlődése . . . . .	77
20.2. A tudat és az idegrendszer . . . . .	78
20.3. Intelligencia és mesterséges intelligencia . . . . .	78
20.4. Az emberi természet és a nevelhetőség . . . . .	79
<b>21. A megismerés határai és a matematika korlátai</b>	<b>79</b>
21.1. Az ember és az ökorendszer . . . . .	80
<b>22. Az idegen lények létezéséről</b>	<b>81</b>
<b>23. Az emebrarcú világegyetem elve</b>	<b>82</b>
23.1. Az élet és a világegyetem . . . . .	83
23.2. Az önmagát újjászülő világegyetem . . . . .	83
<b>24. A világegyetem végzetéről</b>	<b>84</b>

# **1. Világképünk jellege és fejlődése**

## **1.1. Az egyén öntudatának kialakulása és a világszemlélet**

A világról, a természetről alkotott képünk jellege nem a tudatosnak mondható tevékenységünk eredménye, hanem már az öntudatra ébredésünk során rögzül bennünk és alapvetően ilyen marad életünk egésze során.

A tudatosságunk élettani alapjai agyunk működéséhez kötődnek. Az agysejtek a magzati lét nyolcadik hetétől a tizennyolcadik hétig alakulnak ki. Ebben az időszakban percenként kétszázezer új neuron keletkezik. Hálózatba rendeződésük azonnal megindul. Az agykéreg sejtjeinek hálózódását alapvetően a külső ingerek, magzatkorban főleg az anyával való kapcsolatok határozzák meg. A szeretet áradását az állat is érzékeli. Nem csodálkozhatunk azon, hogy a magzat és a csecsemő számára ez annyira fontos. A magzatkor és a csecsemőkor első fele az öntudat kialakulásának - az én és a világ létre való ráébredésnek -, kulcsfontosságú szakasza. Ha ekkor a magzat és a csecsemő azt érzi, hogy szeretik, örvendezve várják és jövetele nagyon sokat jelent a környezete számára, akkor egyúttal az emberkében az is tudatosul, hogy ez a világ az ő világa, ebben otthon érezheti magát. Az így létrejövő bizalom és biztonságérzés mélyen meggyökerezik az emberben. Ez határozza meg az egyén egész életét, viszonyát az emberekhez, a természethez és a világhoz. A világot szép, rendezett egységes egésznek érzi. Ennek a zsigerinek mondható érzésnek az eredetével az egyén nincs tisztában, hiszen az igen korai időszakból - ez a bensőnek nevezhető biztonságérzet kb. hathónapos korig alakul ki -, később már nincsenek emlékei.

## **1.2. A világ rendje és a varázslás**

A világ rendjét érző, észlelő ember a régi időkben úgy vélte, hogy a világ egyetlen hatalmas összefüggő egészet alkot. Minden mindennel valamennyire össze van kapcsolva. Az, hogy a dolgok miként kötődnek egymáshoz, ember fel nem foghatja, mert minden annyira összetett. Az összefonódottság viszont az embernek lehetőséget ad arra, hogy befolyásolhasson egyes dolgokat. Bizonyos beavatott személyek, varázslók, bűbájosok, boszorkányok, stb. varázslással hathatnak a világra. A varázs szerint ha megfelelő cselekvések sorát végzem, akkor a világ erői engedelmeskednek akaratomnak. Így varázsolható, hogy essen avagy elálljon az eső, betegségbe zuhanjon avagy meggyógyuljon az állat, valaki szerelembe essen, stb. A varázsbba vetett hit babonaként ma is él. Ez sugallja, hogy ne lépünk rá a küszöbre, ne menjünk át a boltozat alatt, stb.

## **1.3. A világ rendje és a természetfölötti**

A varázslással befolyásolhatónak gondolt világot a rendezettebb körülmények között élők vallásos szemlélete szorította háttérbe. A vallásosság alapvető feltétele a természetfölöttihez való eljutás. Ha vizsgálódunk, vajon mi lehet 'az egész mögött lenni kell valaminek' féle, szunnyadó vallásossággént meghatározható megnyilatkozások hátterében, akkor kiderül, hogy az ilyen vélekedések mögött alapvető emberi tapasztalatok összegződése rejlik. Az egyik ilyen mély emberi tapasztalat a természet rendjének az érzékelése. Az emberek nagy többsége számára a természet, a világ egésze rendezett, összhangzó egységet alkot. Ez zsigeri érzésünk, a benső bizalom, biztonságérzet kifejeződése. 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 szorong, hanem belső bizonytalanságait vetíti ki a természetre.

A másik alapvető, szinte magától értetődő, mindennapos emberi tapasztalat az emberi tevékenységhez kötődik. A sikereinket a világban annak köszönhetjük, hogy értelmes munkánkkal rendet teremtünk magunk körül, házat építünk, kertet művelünk, stb. A világot maga körül rendező ember alapvető tapasztalata, hogy a gazdátlanul hagyott dolgai, mint például a ház rendetlenebbé válnak, szétesnek. A rend

megjelenése a teremő, alkotó munkának, a rend fennmaradása az értelmes gazda kitartó erőfeszítéseinek a következménye.

Ez a két alapvető tapasztalat, mint a természet egészének rendje és a rendet teremő és fenntartó értelmes munka ott lakoznak az ember elméjében. A két dolgot az ember elméje a tudattalan szintjén is összekapcsolja. Azt a kérdést, hogy mitől rendezett a természet, az ember önkéntelenül is a maga mindennapos rendteremő erőfeszítéseire, munkájára gondolva válaszolja meg. Eszerint a természet egészének a rendje és annak fennmaradása valamilyen értelmes létező munkájára utal. Az anyagi világ egyedüli értelmes lény az ember, mi pedig jól tudjuk magunkról, hogy a természet rendjét nem mi hoztuk létre. Mi is csak ennek a rendnek a termékei vagyunk. Ezért az ember számára a természet és a világ egészének rendje és annak fennmaradása valamilyen, a természetén kívüli, természetfölötti tényezővel értelmezhető. Ez lehet a magyarázata annak, hogy vallásos nevelést egyáltalán nem kapott emberekből is kibuknak 'az egész mögött lenni kell valaminek' vagy 'a világ nem létezhet csak úgy véletlenül' jellegű megjegyzések. A vallásosság maga tudatos tevékenység, a benső biztonságérzet önmagában csak a természetfölötti felvetéséhez vezet el.

## **1.4. A világ rendjének jellege**

A világ összefüggő egészet alkot. Azt azonban, hogy az összefüggések jellege milyen, nem egyszerű megérteni. A régi műveltségek természetképét az élő természet rendszereinek, mint például a hangyabolynak vagy más társulásoknak a megfigyelése alakíthatta ki. A hangyaboly egésze csodálatosan szép, összehangoltan létező rendszert alkot. Az egyes hangyák úgy tevékenykednek, nyüzsögnek, hogy a boly összefüggő, önfenntartó egészet képezzen. Még akkor is, ha kisebb-nagyobb zavarok mutatkoznak. A kínai és más keleti műveltségek és Arisztotelész természetképe is ezt a jellegzetességet hangsúlyozták. A természet úgy működik, hogy egyensúlyban lévő egészet alkosson. Részei oly módon kapcsolódnak, úgy hatnak kölcsön egymással, hogy a természet egyensúlya, kisebb-nagyobb megrázkódtatások esetén is fennmarad. A részek működését nem a külső hatások, törvények, hanem az egész rendje határozza meg. Az egész tehát jóval több, mint a részek egyszerű összege. Ezért a részekre figyelni, azokat boncolgatni hiábavalóság. Az egész, a lényeg megértésében nem segíthet.

Józan volt tehát az a feltevés, hogy a világot valamilyen mindent átfogó rendező elvet feltárva lehet megérteni. Ősidők óta felismerték, hogy a földi természet bonyolultsága és az égbolt rendje között kapcsolat van. A világmindenségben uralkodó rendezettség és összhang leginkább szembeötlő jelei éppen az égbolton megfigyelhető mozgások rendje. A csillagok és a bolygók viselkedése egyszerű törvényszerűségeket követ. Már az ősi korok embere is észlelhette ezeket és az első műveltségek naptárai is a szabályszerűen ismétlődő égi jelenségeken alapultak.

Mivel a földi történéseket általában kiismerhetetlennek tartották, a tapasztalt földi rendet, mint például az évszakok szabályos váltakozásait, az égi jelenségekhez kötötték. Ennélfogva a régi korok embere a világ egésze rendjének alapjait az eget rendjében látta és a földi lét mögötti rendszert az ember számára felfoghatatlannak vélte.

## **1.5. A sokistenhit világszemlélete**

A sokistenhívő vallások felfogása szerint a világ egyes történéseit az istenek, felsőbbrendű lények vezérik. Szellemi lények döntései által vezérelt világ nem fogható fel az ember számára, mert az ember nem ismerheti a felsőbbrendű lény gondolkodását, céljait. A világ szent dolgait sérthetetlen dolgok védik. Ez a lehetőségét is kizárta annak, hogy az ember kifürkészhesse az isteni szándékokat. Avatlan módon nem avatkozhat be az isteni világrendbe. A kísérlkezésnek lehetősége sem juthatott eszébe senkinek.

A megismerhetetlen világban élő ember akkor boldogulhat, ha alkalmazkodik az istenek kívánságaihoz. Nem a saját kárán kell mindent megtanulnia, hanem az ősök tapasztalatait kell átvennie. A ilyen világtkép időszemlélete, a napszakok, a Hold járásának, az évszakok változására épülve általában körkörös.

Azaz eszerint minden csak ismétlődés, ezért nincs szó eredetről, beteljesülésről, csupán a körforgás egyes szakaszairól. Az 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 ártalmas.

## **1.6. A sokistenhit gyengülése és a világkép átalakulása**

A természettudományos gondolkodás megjelenését a korábbi istenkép fokozatos átalakulása tette lehetővé. A nagy, sokezer éven át virágzó birodalmak, általában földrajzilag védett, nehezen megközelíthető területeken találhatók. Ezeknek a vallásos szemlélete nem változott komolyabban. A változás olyan földrajzi helyeken történhetett, ahol a történelem forgandósága magával vonta az istenképek jelentős változását is. Ez az övezet Mezopotámia és a Földközi-tenger medencéje volt. Ennek történetét az állandóan beáramló népek vándorlása és letelepedése, az ezzel járó örökös háborúk tették mozgalmassá. Errefelé a sokistenhit súlyos válságba került, mivel a helyi istenek veszítettek tekintélyükből, mert nem tudtak megfelelő védelmet és biztonságot nyújtani. Az emberek egyre kevésbé tartottak isteneiktől és elkezdtek gondolkodni azon, végül is milyenek azok az erők, amelyek ténylegesen kormányozzák a világot. A sokistenhit gyengülése két területen, Görögországban és a zsidó nép földjén különösen szembetűnően jelentkezett.

Kr. e. 600 körül kisázsiai görög bölcselek felvetették, hogy a természeti jelenségek isteni közreműködés nélkül is leírhatók. Nem arról volt szó, hogy ki akarták zárni isteneiket a világból. Ehelyett inkább személytelenné tették és a világot vezérlő törvények jelképeivé tették isteneiket. A görög bölcsélet és tudományosság egyrészt összegezte a korábbi korok eredményeit, másrészt máig érvényes eredményekkel gazdagította az emberi gondolkodást. Platón kettős rendszere szerint a megfigyelhető, az érzékeink által vizsgálható anyagi világ az igazi valóságnak, az eszmények világának csupán az árnyéka, tökéletlen utánzata. A világot alakító, fenntartó szellem az értelem nélküli anyagot az eszmények alkotta minták szerint gyúrja. Igyekszik az anyagot minél tökéletesebbé alakítani, de az örökösen változó anyag állandóan bomlik, kitör a reá kényszerített rendből, mintázatokból. Az ókori gondolkodás számára ez a kétfelé osztás vált meghatározóvá. Mivel ez a földi valóság lebecsülését vonja maga után, a megvetett anyagi világ nem kaphatott kellő figyelmet.

## **1.7. Az egyistenhit világszemlélete**

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. A Biblia szerint az embert Isten a saját képére teremtette. Ez természetesen nem a kinézetre való hasonlóságot jelenti, 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. Az egyistenhit időszemlélete egyirányú. Az idő a teremtéstől a végső időig tart. Közben természetes módon a világ változik. Ezért itt hiányzik a körkörös időszemléletű társadalmak újtól való merev idegenkedése.

## **2. A mai természettudomány születése**

A mai természettudomány a keresztyén világszemlélet és a görög gondolkodás kölcsönhatása révén született meg. A keresztyén Európában a megfelelő szellemi és társadalmi háttérnek köszönhetően lassan megnyílt az út a természet törvényeinek felismeréséhez, rendszeres vizsgálatához, azaz a tudományok fe-



jlődéséhez. A fejlődés a latin kereszténység uralta területeken gyorsult fel. A 12. századtól kezdve az újonnan alapított egyetemeken szabadon vitatkozhattak a különböző irányzatok követői Isten és a világ, Isten és az ember viszonyáról és más kérdésekről. A szabad légkör annak az eredménye, hogy a Biblia kijelentéseit a keresztény egyház nem csak szó szerint értelmezte, hanem egyéb értelmezéseket is elfogadhatónak tartottmegengedte való értelmezést. Eszerint az Isten által sugalmazott Biblia az emberi tudás kimeríthetetlen kincsestára. Nem csupán a betű szerinti üzenet a fontos, hanem emögé még felmérhetetlenül sok tudás, ismeret van beépítve. Ezeknek feltárása örök emberi feladat. Ennek során az ember tévedhet, ezért a Biblia értelmezése állandó szabad eszmecsere tárgya lehet. A közös nyelv, a latin általános használata, a különböző irányzatok képviselői közötti viták, a nézetek szabad ütköztetése és az egyetemeken tanulók és tanítók tanulmányútjai évszázadokon keresztül megfelelő háttérül szolgáltak az 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. Az egyre pontosabb adatokat a korábbi, másfél évezreden át használt, Ptolemaiosz nevéhez fűződő földközéppontú leírás már nem tudta kielégítő módon 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. A newtoni rendszer az égi és a földi jelenségek leírására egyaránt alkalmas. Így kiderült, hogy a világ valóban egységes egészet alkot.

## **2.1. Miért lehetséges a természettudomány**

A természet megismerésének története azt mutatja, hogy azok a törekvések, amelyek egyszerre a világ egészét szándékoztak megragadni, nem vezettek eredményre. Nem lehet a világ rendjét 'mindent vagy semmit' alapon megérteni. Bár a világ dolgait számtalan kapcsolat fűzi egybe, mégis lehetséges az, hogy egyes jelenségek a többitől elkülöníthetők és úgy vizsgálhatók. Azaz lehetséges, hogy valamit úgy vizsgálhassunk, hogy az összes többről semmit sem tudunk. A természet ilyen módon való vizsgálhatósága megdöbbentően érdekes. Einstein ezt úgy fejezte ki, hogy a világnak az a legérthetlenebb tulajdonsága, hogy felfogható, megérthető.

A tudományos módszert éppen az jellemzi, hogy a tudomány nem törekszik rögtön az egész teljes megértésére. Nem akarja 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. A tudomány 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.

## **2.2. Megfigyelés, kísérlet, modell**

A tudományos módszer alapja a megfigyelés, a kísérletezés, a mérés. Egyrészt meg tudjuk figyelni a természet jelenségeit, leírhatjuk azokat. Ilyen, csak a megfigyelésre támaszkodó tudomány a csillagászat. Az égi jelenségekkel, jellegüknél fogva, nem lehet mást tenni, mint hogy megfigyeljük őket és a mérési eredményeket értelmezzük.

Ha nem égi jelenségeket vizsgálunk, hanem a földi dolgokat tanulmányozzuk, és meg akarjuk ragadni egy adott jelenség lényegét, a környezet bonyolultsága zavaró tényező lehet. Ezért, hogy jobban megértsük, mi hogyan történik, kísérleteznünk kell. Ekkor a jelenség tanulmányozásához mesterségesen olyan környezetet teremtünk, hogy minél kevesebb legyen a zavaró tényező, azaz más dolgok hatásai ne fedhessék el a tanulmányozni kívánt jelenséget. A kísérlet maga a mesterséges környezetben végzett megfigyelés. A

kísérlet megtervezése, véghezvitele egyes esetekben igen komoly feladatot jelent és a kísérleti berendezés sokszor egészen más jellegű rendszert alkot, mint amiket a természetben találhatunk.

A 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. A Hold viselkedését magától értetődően nem zavarja az, hogy a csillagászok figyelik, a kémcsőben zajló reakciók sem függenek a megfigyelőtől és az alacsonyabbrendű élőket sem befolyásolja a megfigyelés ténye. Az ember viselkedése viszont már nagyon erősen függhet attól, hogy kísérleteznek-e vele. Például a gyógyszerek hatásának ellenőrzésekor nemhogy a betegek, hanem még a kezelést végző helyi orvos sem tudhatja, melyik beteg kapott valódi hatóanyagot tartalmazó gyógyszeradagot és melyik ahhoz külsőlegesen teljesen hasonló, ugyanolyan ízű, stb, ám hatóanyag nélküli szert, idegen eredetű szóval placebót. Csak a másik, távoli helyen lévő valaki ismeri, mely sorszámú üvegek tartalmaztak hatóanyagot, és melyek anélkül. Később majd tárgyaljuk, nem lehet a hagyományos módon kísérletezni a természet élő rendszereivel sem. Még súlyosabbak a nehézségek a lélektani kísérleteknél. Ha a kísérletben résztvevők tudják, hogy miben vesznek részt, az értékelhetetlenné teszi az eredményt. Ez a lélektani kísérleteket, azoknak értelmezését nagyon nehézé teszi.

A tudós számára a megfelelő, a vizsgált rendszert jellemző tulajdonságok felismerése, és a mennyiségek közötti kapcsolat feltárása a feladat. Ez általában nem egyszerű, mert nem könnyű megtalálni, mik egy jelenségnek a lényegesebb tulajdonságai, mi az, ami egy rendszert igazából jellemez. Nagyon sokszor a rendszer áttekinthetetlen módon, első közelítésben azt is mondhatnánk, összevissza, szabálytalanul viselkedik. A jelenség értelmezéséhez először is modellt kell készíteni. A modellkészítés lényege az, hogy 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 modellt készíteni, akkor, bár sokmindent elhanyagoltunk, számos dologtól eltekintettünk, mégis elég nagy biztonsággal és pontossággal megmagyarázhatjuk, mi, hogyan történik.

A modellek tartalma határozza meg azt is, hogyan tervezzük meg a kísérletet, mire figyeljünk jobban, minek a kizárásáról, vagy legalább is zavaró hatásának a csökkentéséről kell gondoskodnunk. A kísérletezés és a modellek kidolgozása, finomítása egymást kölcsönösen serkentő, tökéletesítő folyamatot képez. A modellek segítségével fogalmazzuk meg, milyen törvényszerűségek állhatnak egy-egy jelenség, jelenségek csoportja mögött. A törvények megadásában a matematika meghatározó szerepet játszik. A természettudomány ragaszkodik ahhoz, hogy a törvényeket lehetőleg matematikai úton fogalmazzuk meg.

A tudomány, a tudományos módszer igen hatékonynak bizonyult. Tudjuk, mennyire sikeres. Egy vonására azért még külön is fel kell hívni a figyelmet. Ez a tudomány tisztessége, becsületessége. Mindezt, amit elfogad, csak komoly elemzés után teszi. Vannak csaló tudósok, vannak, akik saját elképzeléseiket délibábként hajszolva csak annak igazolására összpontosítanak, miközben másra alig figyelnek. A tudományos közvélemény ellenőrző szerepe azonban nagyon erős, ezt is kibírja. Nincs tekintély, az, hogy valaki nagy ember valaha ezt mondta, nem számíthat 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 érzéketlenséggel, vaskalapossággal. A tudós számára nem szégyen tudományos elképzeléseinek állandó felülvizsgálata, hanem létszükséglet.

## **2.3. A matematika és a természettudomány**

A tudomány, a fizika nyelve a matematika. A matematika úgy értelmezhető, mint valamennyi lehetséges mintázat és a mintázatok között létező kapcsolatok összessége. A mintázaton véges számú adattal leírható dolgot értünk. A mintázatok lehetnek például a síkbeli, térbeli alakzatok, a közöttük lévő kapcsolatokat a síkmértan vagy a térmértan tételei fogalmazzák meg. A mintázatok lehetnek a számok, akkor a kapcsolatokat a számelmélet tételei adják meg. A mintázatok lehetnek egy halmaz elemei, akkor a kapcsolatokat a halmazelemeken végezhető műveletek szabják meg. A matematikában az a fontos, ha kiválasztot-

tuk a vizsgált mintázatokat és megadtuk a közöttük lévő alapvető összefüggéseket, akkor a továbbiakban következetesen, okszerűen végezzük a megfelelő műveleteket.

Világos, hogy a matematika sokkal többet tartalmaz, mint amennyi matematikát a természettudós, közgazdász vagy más alkalmazó felhasznál. A matematikus mindig is inkább a matematika kedvéért művelte a tudományt, 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 egy galíciai lak-tanyában. Ott, szabad idejében dolgozta ki a róla is elnevezett mértant. Bolyai arra volt kíváncsi, lehet-e olyan mértant alkotni, amely nem tartalmazza az euklidészi mértan párhuzamossági alaptételét. Sikerült ilyet alkotnia. Munkája megalkotása után sok évtized telt el, míg kiderült, hogy az általa kidolgozott mér-tan mennyire jelentős. Az Einstein által felfedezett általános relativitáselmélet egyik matematikai alapja, a világmindenség egy lehetséges mértana.

Érdekes, hogy miközben a természet a matematika nyelvét beszéli, a matematika egyúttal az emberi elme alkotása. Ezen, mint fentebb tárgyaltuk, nem csodálkozhatunk. Az ember alapvető képessége a világ összefüggéseit, rendjét feltárni képes gondolkodás. Nem csoda, hogy az összefüggéseket következetesen tárgyaló matematikai gondolkodásra is képes. Az, hogy az ember több lépésre előre tud gondolkodni, egyes embereket arra is képessé tesz, hogy összetettebb és elvontabb matematikai tételeket mondjanak ki és bizonyítsanak be.

Mindezeket tudva sem lehet egyszerűen azt mondani, hogy az ember matematikai képessége pusztá törzsfejlődési kényszer lenne. A túléléshez sokkal egyszerűbb gondolkodás is elég volna. A ragadozókkal, mostoha természeti körülményekkel folytatott harc nem teszi szükségessé az elvont gondolkodás ilyen fokú mélységét. Az, hogy az ember gondolkodása annyira összetett összefüggéseket is képes átlátni, mint ami-lyenek a világegyetem kialakulását, fejlődését jellemzik, igencsak figyelemreméltó.

## 2.4. Deizmus

A newtoni természettan hatalmas eredményein felbuzdulva egyes hittudósok arra gondoltak, hogy Isten létét, a hit mélyebb megalapozása céljából, úgymond matematikai pontosságú bizonyítékokkal kellene alátámasztani. A tudományos jellegű gondolkodás viszont nemvárt, nem kívánt eredményekre vezetett. Ezek súlyosan rombolták az egyházi gondolkodás tekintélyét.

A tudományos eredmények nyomán megkisérelték elképzelni, milyen lehet a világ egésze, mihez lehetne hasonlítani Isten munkálkodását. A newtoni természettan sikerei nyomán a világ egészét mint gépezetet fogták fel. A matematikai megközelítés sikerét, a számítások pontosságát, megbízhatóságát tekintve nem lehet csodálkozni azon, hogy a világegyetemet óraműhöz hasonlították. A bolygók, csillagok valóban lenyűgöző pontossággal követték a kiszámított pályákat, és a newtoni természettan törvényei megdöbben-tően 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 visszás eredményekre jutottak. A világ egy gépezet és annak alkotója Isten. Ez volt a kiindulópont. Minél jobban van megszerkesztve valami, annál ritkábban szorul tervezője, építője segítségére. Ismert volt, egy óra annál tökéletesebb, annál ritkábban kell azt felhúzni, minél ügyesebb, jobb az órászmester. 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. A gépezet megy magától is, akár évmilliókon át. Beavatkozás nélkül. Gondoljunk Madách Imre művének, az Ember tragédiájának kezdősoraira.

A fenti gondolatmenet a felvilágosodás korában meghatározóvá vált. Ezt a nézetet, miszerint Isten teremtette a világot, de nincs benne jelen, deizmusnak nevezik. Isten ebben a világban csak egy nyugalmazott mérnök. Vagy ahogy egy másik kép mutatja, csupán lapozgatja a világ történetének előre megírt

forгатókönyvét. A deista nézetek képviselői mint szükségtelen, felesleges intézményeket, hevesen támadták az egyházat.

Amikor a vegytanban felfedezték az anyagmegmaradás törvényét, azt az anyagelvű, idegen eredetű szóval materialista bölcselet művelői érthető módon általánosították a világmindenség egészére. Kimondták, hogy az anyag nem vész el, csak átalakul. Newton a tömegvonzási elméletét a világ egészére alkalmazva arra az eredményre jutott, hogy a világ végtelen, csillagokkal egyenletesen kitöltött tér (lásd később). Ennek alapján a világot térben és időben végtelennek fogadták el. Ez ellentmondott a bibliai leírásnak, miszerint a világot az Isten a semmiből teremtette. A bölcselek ezzel úgymond tudományos alapon tagadták Isten létezését, váltak istentagadóvá. Az istentagadás további erősödését vonta maga után Darwin elméletének korabeli értelmezése is. Eszerint az ember nem a teremtés koronája, hanem csak a legértelmesebb állat. Az anyagelvűség, a világ gépként való szemlélete a XIX. század végére uralkodóvá vált és még ma is meghatározó tényező.

## 2.5. A világgépezet

Ahogy eddig is tárgyaltuk, a gondolkodást az anyagelvűség, annak is a világot gépezetnek tekintő változata jellemezte. Eszerint a tér és az idő mindenektől független létezők. Az anyag részecskékből áll. A részecskék közül a legegyszerűbbek az anyag elemi építőkövei. Mint ilyenek, tömeggel rendelkező, szerkezet nélküli, pontszerűnek tekinthető, változatlan, változtathatatlan, örökké létezők. Nyugalomban vannak, vagy mozognak, egymással kölcsönhatni képes részecskék. A világ folyamataiért az állandónak tekintett részecskék egymással való kölcsönhatása felelős. A természetben eszerint 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 ragyogóan sikeres volt. Nagyon hasznos keretet nyújtott tudományágak fejlődéséhez. Ezért érthető, hogy annyira ragaszkodtak hozzá, és sok tudományág esetén ma is meghatározó módon használják. Akkor is, ha ott nem igazán alkalmazható.

A 20. században kiderült, hogy a világ a fenti egyszerű módon nem értelmezhető. A tér és az idő nem tekinthetők minden mástól független létezőknek. A részecskék sem örökéletűek. A világegyetem nem tekinthető állandónak, hanem egyre összetettebb rendszerré fejlődik. Az élet nem lehet egyszerű véletlen, hanem mély kapcsolatban áll a természettan alaptörvényeivel. Mindezekkel a következő részekben foglalkozunk.

## 3. Tér és idő

A térnek és az időnek a természettan által használt fogalmai a 20. század elején még egyszerűbbek voltak és nagyjából megfeleltek a köznapi elképzeléseknek. A legtöbb ember a tér fogalmát, mivel annyira alapvető, egyszerűen adottnak fogja fel. Nincs rajta különösebb töprengenivaló. Csak akkor ütődünk meg egy kissé, ha azokkal a kérdésekkel kerülünk szembe, vajon végtelen-e a tér, vagy véges, létezett-e a tér mindíg.

A térről alkotott, mondhatni a józan észnek megfelelő elképzelésünk végül is az általános iskolában tanult euklidészi mértanon alapul. A párhuzamos vonalak, - ezt mindenki el tudja képzelni -, a végtelenben sem találkoznak. A mértani tér természetes módon azonosítható a valódi térrel, amelyben életünk zajlik. Történelmileg ez az azonosítás hosszabb folyamat eredménye. A görögök az égbolt megfigyelése alapján a világegyetemet véges gömbnek képelték el. A Föld a gömb középpontjában helyezkedik el. Az égbolt szerkezetét gömbfelületek sokaságával írták le. Ez érthető, ugyanis a különböző gömbfelületek a különböző fajta égitestek, a Nap, a Hold, a bolygók és a csillagok tartózkodási helyei. Nagy kérdés maradt, hogy mi van a legkülső gömbhéjon kívül? A kérdést nem tudták elfogadható módon megválaszolni. 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. A bolygók mozgását sokkal jobban leírhatjuk és megérthetjük, ha feltételezzük, hogy azokat a Nap tartja maga körül pályájukon. Newton felismerte, hogy az égitestek viselkedését a tömegvonzással érthetjük meg. Ezzel az erővel tudjuk leírni és megérteni a bolygók pályáinak milyenségét, ez az erő hat az égbolt csillagai között is.

### 3.1. Newton végtelen világegyeteme

A tömegvonzási erő valamennyi tömeg között fellép. Minden 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. Ezért igaz a csillagokra is. Ebből kiindulva a csillagos égre igen súlyos következtetéseket kell levonnunk. Az égbolt csillagai egymáshoz képest mozdulatlanak látszanak, 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. A Mindenség állandóságát Newton a következőképpen magyarázta.

A csillagok azért nem mozognak egymás felé, mert valamennyi csillagra minden egyes irányból azonos tömegvonzás hat. Egyetlen csillag sem mozdulhat el, mert mindenfelé vannak szomszédai, amelyek 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.

A térben végtelen, időben öröktől fogva létező, állandó világegyetem ellen a bölcselek sem tiltakoztak különösen. Ez a kép számukra kényelmes volt, megszabadultak olyan nehéz kérdésektől, amelyek a kezdetekre, a világ keletkezésére vonatkoztak.

### 3.2. Tehetetlenségi rendszer

A fizikai jelenségek térben és időben való leírásához valamilyen vonatkoztatási rendszer szükséges. A különböző vonatkoztatási rendszerekben a fizika törvényeinek alakja általában más és más. Ha a körhintán ülők mozgását a talajról szemlélem, akkor onnan körmozgást végeznek. Ha viszont a vonatkoztatási rendszer a körhinta egy széke, ebben a rendszerben a körhintán ülőket mozdulatlanak látom. A mozgások leírásához a számtalan sok lehetséges vonatkoztatási rendszer közül olyat érdemes választani, amelyben a természet törvényei a lehető legegyszerűbb alakban írhatók fel. Emiatt a mozgás leírása az ilyen rendszerben a legkönnyebb.

A tehetetlenségi rendszert, vagy idegen eredetű szóval az inerciarendszert alkalmazó tárgyalás 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 valamilyen más test biztosan hatással van rá.

### 3.3. A Galilei-féle viszonylagossági elv

Ha egy tehetetlenségi rendszerben egy test szabad testként viselkedik, akkor valamennyi más tehetlenségi rendszerből is szabadnak látjuk. A tapasztalat szerint a tehetetlenségi rendszerek nemcsak a szabad, hanem bármilyen más mozgást végző test leírása számára is egyenértékűek. Például ha egy zárt helyiségben a fonálinga lengését vizsgálom, az inga mozgástörvényét ugyanaz lesz, ha a helység egy ház szobája, egy sima vízű taven egyenletesen sikló hajó vagy egy egyenletesen mozgó vonat fülkéje. Ha a vonat ablaka el van függönyözve, és a vonat simán, gyorsulás nélkül halad, nincs módszer arra, hogy eldöntsük, áll-e a vonat vagy halad. A tehetetlenségi rendszerek a természettani törvények alakja szempontjából egyenértékűek, azaz valamennyi fizikai törvény az összes tehetetlenségi rendszerben ugyanolyan alakú. Ezt az elvet nevezik Galilei-féle viszonylagossági elvnek. Ebben a viszonylagosság szó - idegen eredetű kifejezéssel relativitás -, arra utal, hogy miközben a tehetetlenségi rendszerek a leírás szempontjából egyenértékűek, a sebesség viszonylagos fogalom. Ugyanis egymáshoz képest mozgó tehetetlenségi rendszerekben tekintve egy adott mozgást, annak 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.

### 3.4. Tehetetlenség

Az egyenesvonalú egyenletes mozgás sebessége a Galilei-féle vonatkoztatási elv szerint viszonylagos. Newton felismerte, hogy a sebesség irány és nagyság szerinti változása, a gyorsulás már nem az. Ha gyorsulunk, mondjuk körhintában, hullámvasúton vagy hirtelen fékező járművön ülve, ezt világosan érezzük. Nem kell látnunk, mihez képest gyorsulunk. A tömeg, ami a test tehetetlenségének mértéke mutatja meg, mekkora a testek 'ellenállása' a mozgásukat változtató hatással szemben. 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. Magyar szavakkal semmitől sem függő térnek nevezhetnénk.

### 3.5. Az abszolút tér

A semmitől sem függő tér fogalma nem idegen tőlünk, mivel a hétköznapi gondolkodásunkban a tér éppen ilyen. Háromféle kiterjedése van, a hosszúság, szélesség és a magasság. Valaminek a 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. Ez a hosszak nem függhetnek attól, hogyan, milyen körülmények között, melyik módszerrel mérjük meg ezeket. A távolság értéke így nem függhet attól sem, vannak-e a térben tárgyak, nagyobb tömegek és hogy mik ezek, miből vannak, mozgunk-e a megfigyelt térrészhez képest vagy sem.

### 3.6. Mach-elv

Newton szerint a semmitől sem függő tér az, ami 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. A semmitől sem függő tér létét sokan vitatták. Mach is elvetette ezt a szerinte megfigyelhetetlen fogalmat. A Mach-elv szerint a test tehetetlen tömege az Mindenség összes tömegének egymással való kölcsönhatásából ered. Azaz az állócsillagokhoz rögzített rendszerben mért gyorsulás oka az állócsillagok és más tömegek által gyakorolt erők eredménye. Azt, hogy ezt miként kellene pontosan érteni, Mach sem tudta pontosabban

kifejteni. A Mach-elv Einsteinre is nagy hatást gyakorolt és befolyásolta az általános viszonylagossági elmélet (relativitáselmélet) megszületését.

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

### 3.7. Sebességösszeadás

A Galilei-féle viszonylagossági elv és a newtoni mechanika az abszolút tér és idő fogalmaira épülnek. Az idő minden egyes tehetetlenségi rendszerben ugyanúgy telik. Ezekben, az idő és a tér abszolútsága miatt, a sebességek egyszerű módon összeadhatók és kivonhatók. Emiatt, 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 az úthoz viszonyított sebessége  $v=V-v'$ .

Ha Newton nem is tudott módszert adni az abszolút tér kimutatására, feltételezték, hogy van olyan eljárás, amellyel az abszolút tér kiválasztható. A 19. század második felében úgy látszott, 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. Az abszolút teret az éterrel azonosították és feltételezték, hogy az éterben való mozgás egyben az abszolút térhez viszonyított mozgás is.

Feltételezték, ha valaki az abszolút térben a fénysebességet méri, az eredmény függni fog attól, miként mozog ez a megfigyelő az abszolút térhez képest. Ha áll benne, akkor minden irányban ugyanazt a fénysebességet kell, hogy mérje. 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 repülőt gyorsabbnak látná.

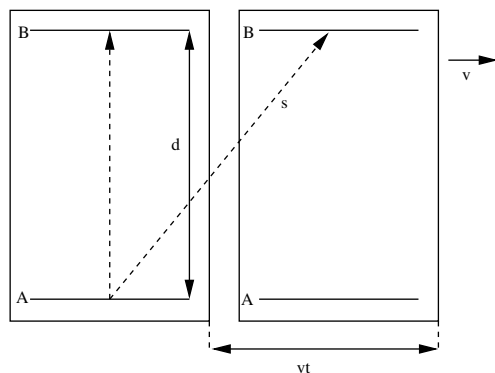
Ha a Föld abszolút térben való mozgását vizsgáljuk és csak a Nap körüli keringését tekintjük, akkor a Föld júniusban és decemberben pont ellentétes irányban mozog. Ez azt jelenti, hogy a júniusban és decemberben mért fénysebességeknek különbözőeknek kell lenniük. Nem nagy a várható különbség, csak tízezred résznyi, mivel a Föld mozgási sebessége a fénysebességhez képest nagyon kicsiny. Nagy meglepetést váltott ki, hogy a fény üres térben mérhető sebességét, bármilyen irányban, bármelyik évszakban mérték is meg, mindig, nagy pontossággal ugyanakkorának találták.

## 4. A speciális relativitás elméletéről

A fenti mérések hitelességében eleinte kételkedtek. Később megkísérelték a newtoni természettan keretén belül valahogyan értelmezni. Ehhez azonban nagyon különös feltevéseket kellett tenni. A kísérletek szemléletünknek nyilvánvalóan ellentmondó eredményét Einsteinnek sikerült értelmeznie. Ennek nagy ára volt. Einstein rámutatott arra, hogy a hagyományos tér és időfogalom tarthatatlan. A fénysebesség a fény által megtett út és az ennek megtételéhez szükséges időtartam hányadosaként adódik. A fény sebességét Einstein szerint úgy állandó, hogy közben a különböző sebességű rendszerekben mért távolság és az időtartam is más és más lesz. Ezzel szakított azzal, hogy egy esemény időtartamát minden egyes tehetetlenségi rendszerben ugyanakkorának kell lennie. Így Einstein kimondta, hogy nincs abszolút, azaz mindentől független idő. Továbbá a távolságok megfelelő függése azt vonja magával, hogy a méterrúdnak, azaz egy tárgynak a hossza is más lesz a különböző sebességű tehetetlenségi rendszerekben. Azaz nincs abszolút tér sem. A tér és az idő viszonylagossá, idegen szóval relatívvá válik.

A fénysebesség egyúttal valamennyi lehetséges kölcsönhatás terjedési sebességének felső korlátja. Ezzel együttjár, hogy a természetben semmi sem mozoghat a fénysebességnél gyorsabban. Ellenkező esetben ugyanis lehetőség lenne arra, hogy a fénysebességnél gyorsabban mozgó test segítségével olyan kölcsönhatás jöjjön létre, amelynek sebessége a fénysebességnél nagyobb. A speciális relativitás elmélete szerint a tömeggel rendelkező test a fénysebességet ugyan tetszés szerint megközelítheti, de soha el nem érheti.

A tér és az idő viszonylagosságának kimondásával Einstein szilárdnak hitt dolgokat rendített meg. Einstein viszont nem csak rombolt. A fénysebesség állandóságának kimondásával olyan alapot vetett meg, amely azóta is lehet építeni. Eszerint bármilyen is legyen a tér és az idő szerkezete, a fénysebesség mért értékének mindenkor és minden irányban ugyanakkorának kell lennie és teljesen független kell hogy legyen a mérést végző személy mozgásától.



1. ábra. Ha a fényóra nyugalomban van, a fény az A és B lemez között haladva  $d$  utat fut be. Az így 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. A fénysebesség állandósága miatt 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  $t$  értéke  $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  lesz.

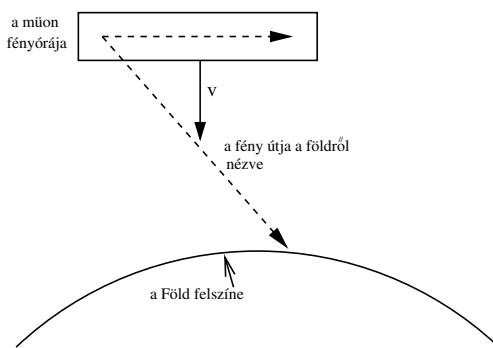
Azt, hogy a fénysebesség állandósága miként vonja magával az esemény időtartamának viszonylagosságát, az 1. ábrán látható, fényórának nevezett berendezés szemlélteti. A fényóra által mért időt úgy kapjuk meg, hogy a fény által befutott utat osztjuk a minden körülmények között ugyanakkora fénysebességgel. 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.

#### 4.1. A müonok életideje és az általuk befutott út

A fényóra által szemléltetett viselkedésre nézzünk egy példát, a magasban keletkezett müonok élettartamának hosszát. A müonokat odafent a világűrből érkező sugárzás kelti és itt a Föld felszínén észlelhetjük őket. A világűr távoli tartományaiból érkező sugárzás nagyon nagy energiájú protonjai átlag kb. 20 kilométer magasságban találhatnak el egy atommagot. A müonok ilyen ütközésben képződnek. Bomlékony részecskék, átlagosan  $2,2 \cdot 10^{-6}$ , azaz 2,2 milliommód másodpercig létezhetnek. Ha a 20 kilométeres utat csaknem fénysebességhez közeli sebességgel tennék 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 a talaj szintjére. 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 fenti  $2,2 \cdot 10^{-6}$  másodperces értéket mérjük.

A világűrből érkező sugárzás által keltett müonokat azért észlelhetjük, mert mialatt a mi óránkon kb. 60 milliommód másodperc telt el, a  $v = 0.999c$  sebességgel mozgó müon "saját" óráján (amely vele együtt





2. ábra. Ha a műion az időt fényórával méri, látszik, hogy a műion a saját rendszerében, - ami a vele együtt mozgó fényórát jelenti -, a fény sokkal rövidebb utat fut be, mint a Föld felszínéről nézve. Ezért a földi megfigyelő ugyanannak az eseménynek az időtartamát jóval hosszabbnak méri. Ez is mutatja, hogy a mozgó rendszerben az események lezajlásához több idő szükséges, azaz mozgó rendszerben az idő lassabban telik.

mozogna, tehát ami 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, függ attól, mekkora sebességgel mozgó rendszerből mérik.

## 4.2. Négykiterjedésű (négydimenziós) tér

A newtoni fizika szerint a tér és az idő abszolút és így egymástól is függetlenek. Einstein szerint a tér és az idő egyaránt viszonylagos, mégpedig úgy, hogy kapcsolat van a kettő között. A kapcsolat matematikai megfogalmazásához célszerű bevezetni az ún. négykiterjedésű téridő fogalmát. Ezt Minkowski tér néven is emlegetik.

A tér háromkiterjedésű (háromdimenziós), egy pontja három koordinátával, az  $x$ ,  $y$ ,  $z$  értékeivel jellemezhető. A téridő egy pontjának megadásához négy értéket kell ismernünk. Az  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordináta mellett szükség van a  $t$  idő ismeretére is. A négykiterjedésű tér koordinátái:  $ct$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ( $c$  a fénysebesség). Ebben a térben a négy koordináta egyenrangú. Ne értsük félre,  $ct$  nem a tér negyedik dimenziója, hanem a téridő egyik kiterjedése. A tér és az idő számunkra nyilvánvalóan különböző fogalmak, csak a természettani leírást tekintve összefonódtak. Azért érdemes így, négykiterjedésű térben dolgoznunk, mert az itteni mértani mennyiségek, négykiterjedésű vektorok, azoknak hosszai, stb. jól használhatóak a természettani leíráshoz.

A négykiterjedésű téridőben a fénysebesség állandóságának követelménye könnyen tárgyalható. Megmutatható, hogy a négykiterjedésű térben értelmezhető távolság, amely egyébként a megfelelő időtartam és térbeli távolság segítségével állítható elő, már nem függ a megfigyelőhöz képest mérhető sebességtől. A négykiterjedésű tárgyalás haszna nem csupán az, hogy megfogalmazza a fénysebesség állandóságát. Valamennyi fizikai mennyiséget négykiterjedésű vektor összetevőjeként kezel. 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. Az energiák számbavételénél azonban figyelembe kell venni a tömegeknek megfelelő  $E = mc^2$  energiákat is.

## 5. Általános relativitáselmélet

A speciális relativitás elmélete kifejezésben a speciális arra utal, hogy az elmélet csak akkor alkalmazható, ha a gravitációs hatások elhanyagolhatóak. Einstein általános relativitáselmélete még erőteljesebb módon változtatta meg a térről, időről alkotott fogalmainkat. Korábban feltételezték, hogy a tér és az idő szerkezete nem függhet a bennük lejátszódó jelenségektől, mennyiségektől. A speciális relativitás elmélete rámutatott arra, hogy a tér és idő viszonylagos fogalmak, mert a távolság és az időtartam függ attól, milyen sebességgel mozog hozzánk képest a megfigyelt esemény. A négykiterjedésű térben mért hosszúságok azonban már semmitől sem függő mennyiségek. Az általános relativitáselmélet a gravitáció általános elmélete, a négykiterjedésű téridő és a tömegek kapcsolatát tárgyalja. Az általános relativitáselmélet alapja az ekvivalencia elv.

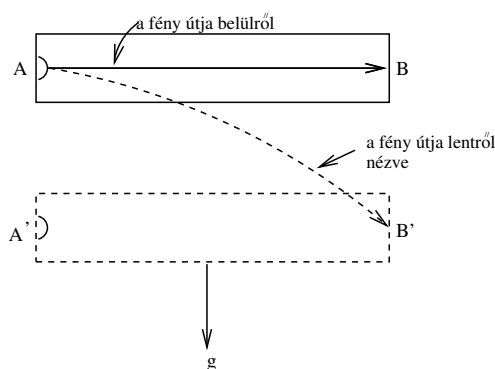
### 5.1. Az ekvivalencia elv

Az általános relativitás elméletének ekvivalencia elve két vonatkoztatási rendszer egyenértékűségére vonatkozik. Az egyik rendszer egy tehetetlenségi rendszer. A másik egy nagy tömeg felé szabadon eső rendszer, mondjuk egy zuhanó lift. A szabadeséssel zuhanó liftben a tárgyak súlytalanná válnak. Nem hat rájuk erő. Ezért a magára maradt test mind a tehetlenségi, mind a szabadon eső rendszerben vagy áll, vagy egyenesvonalú, egyenletes mozgást végez. Einstein ennek nyomán kimondta:

- Egy kisméretű, szabadon eső rendszerben a természettan törvényei ugyanazok lesznek, mint egy tehetetlenségi rendszerben. A szabadon eső rendszer lehet valahol a Földön, akár a Tejútrendszer közép-pontjában, vagy egy fekete lyuk közelében, bárhol a Világmindenségben.

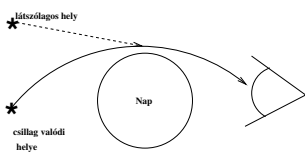
### 5.2. A fény a gravitációs térben

Az ekvivalencia elvből rögtön következik 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.



3. ábra. A fény a gravitációs térben elhajlik. Egy szabadon eső kamrában az A pontban felvillan egy zseblámpa. A kamrában, mivel az ekvivalencia elv szerint 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 megtett útja során a kamrával együtt szabadon esik.

A kamrában lévő számára, mivel az ekvivalencia elv szerint minden olyan, mint egy tehetetlenségi rendszerben, a fény egyenes vonal mentén terjed. A földi megfigyelő viszont ezt úgy látja, hogy a fény a kamrával együtt esik, mintha a fénynek is lenne tömege. A fény ezek szerint a gravitációs térben elgömbül, ezt a mérések is igazolták. Teljes napfogyatkozásakor ellenőrizhető, hogy a Nap mellett elhaladó fénysugár elhajlik, minthogy a Nap mögött lévő csillagot máshol látjuk, mint általában, lásd a 4. ábrát.

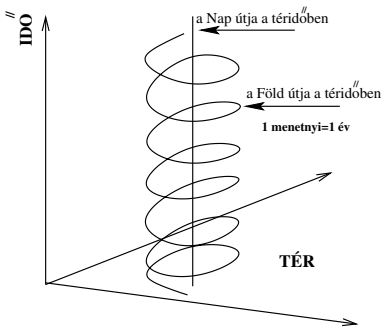


4. ábra. Fényelgömbülés a Nap körül. Ilyen elgömbült fénysugarat mi itt a Földön akkor láthatunk, ha napfogyatkozásakor egy, a Nap által csaknem vagy teljesen elfedett csillag helyzetét határozzuk meg.

Az általános relativitáselmélet megfogalmazása szerint a fény nem azért esik felénk, mert tömege lenne. A fény a legrövidebb idő alatt befutható út mentén halad. Ha elgömbülni látjuk, az azt jelenti, hogy 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. A Nap gravitációs tere is ilyenfelé alakítja maga körül a tér mértanát, ezért látjuk a fénysugár útját görbültnek. A tömegek által létrehozta gravitációs tér erőssége ráadásul nagyság és irány szerint is változik. Például a Földön a magasabb helyeken kisebb a gravitáció, tőlünk távolabb a Föld gömbalakja miatt a mi függőlegesünkkel szöget bezáró irányú a gravitációs tér. Ezzel mindenütt egy kicsit máshogy gömbül el a fény, mint itt, azaz mindenütt egy kicsit más az eltérés az euklidészi mértantól. Einstein általános relativitáselmélete ezt úgy fogalmazza meg, hogy a tömegek elgömbítik a négykiterjedésű téridőt. A tömegek határozzák meg maguk körül a téridő milyenségét. Azaz a térben mérhető távolságok nagyságát, az időtartamok hosszúságát, a négykiterjedésű téridő mértanát a térben lévő anyag szabja meg. A fény és a tömegek a görbült téridő 'egyenesei' mentén mozognak, amelyeket geodetikus vonalaknak neveznek.

### 5.3. A téridő görbülete és a tömegvonzás

Az általános relativitáselméletben nemcsak a fény, hanem a tömegek mozgását is téridő görbülete szabja meg. Azaz a tömegvonzás is a téridő görbületével függ össze. Hangsúlyozni kell, a tömegek a téridő szerkezetét befolyásolják. Tévedés azt gondolni, hogy a tömeg csak a teret görbíti. Például a Föld nem azért mozog a Nap körül ellipszis pályán, mert a Nap így görbítette maga körül a teret. A Nap tömege a téridőt görbíti. A Nap a térben a koordináta-rendszer kezdőpontjában marad ugyan, de az időben a  $ct$  tengely mentén mozog, egy év alatt fényévnnyit. Ezalatt a Föld a térben a kb. 8,5 fényperc sugarú pályán kering, miközben a  $ct$  tengely mentén szintén fényévnnyit utat tesz meg, lásd a 5. ábrát.



5. ábra. A Föld 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 mozog - ekkora a Nap-Föld távolság -, miközben a  $ct$  tengely mentén szintén fényévnnyit utat tesz meg.

Könnyen elképzelhető, hogy a Föld így egy 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 fényévnnyit távolságon. A kicsiny téridőgörbületek

számításakor az általános relativitáselmélet nagyon jól közelíthető úgy, hogy elhagyjuk a négykiterjedésű téridőt, csak a szokásos háromdimenziós térben és az időben számolunk és a térben lévő tömegek között a newtoni tömegvonzási erőt vezetjük be. Innen látható, hogy a tömegvonzási erő a téridő tömegektől való függésének közelítő leírásából ered. Ezzel a tömegvonzást mint geometriához köthető hatást értelmezzük. A Naprendszer bolygóinak pályáit a newtoni tömegvonzással való közelítés nagyon jól leírja. A Nap által létrehozott térgörbület annál nagyobb, minél közelebb jutunk a Naphoz. A Merkúr pályamozgásának leírásához a tömegvonzási erő nem adja vissza pontosan a Merkúr pályájának leírását. Itt már szükség van az általános relativitáselmélet pontosabb közelítéseire. Ez volt az általános relativitás elméletének első megfigyelhető bizonyítéka. Einstein egyenletei pontosan le tudták írni a Merkúr igen furcsának tűnő pályáját.

## 5.4. A idő a gravitációs térben

Az általános relativitáselmélet szerint ha a gravitációs tér nagyobb, a rezgések is lelassulnak. Például 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. Minél közelebb kerülünk egy tömeghez, annál jobban lelassulnak a mozgások, rezgések, lassabban telik az idő.

Az általános relativitáselmélet eredményei jól egyeznek a tapasztalattal, 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 sikerült megmérni, hogy a 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. A 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.

A fenti jelenségnek fontos gyakorlati következményei is vannak. Ha a világűrben működő műholdak jeleit vizsgáljuk, azokat értékeljük, figyelembe kell venni azt, 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.

A gömb alakú,  $M$  tömegű test által meghatározott téridő leírásának fontos mennyisége az ún.  $r_c = 2GM/c^2$  Schwarzschild sugár, ahol  $G$  a gravitációs állandó. A Schwarzschild sugár jelentése a következő. Ha az  $M$  tömeg a hozzá tartozó Schwarzschild sugár belsejében helyezkedik el, akkor a téridő annyira meggörbül, hogy a gömböt még a fénysugár sem hagyhatja el. Ekkor beszélünk fekete lyukról, fekete lyukakkal később a csillagfejlődés tárgyalásakor mint bizonyos tömeg csillagok végső állapotaként találkozunk majd.

## 5.5. A téridő egyenletes anyagsűrűség esetén

Einstein általános relativitáselméletének alapegyenletei természetüknek megfelelően 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. Az Einstein-egyenletek megoldása erre az esetre azt adja, hogy állandó állapotú világegyetem nem létezhet. A világegyetem vagy tágul, vagy összefelé húzódik, köztes, állandó állapot nem lehetséges.

Einstein ez a felismerés, hogy elmélete a newtoni állandó világegyetemet lehetetlennek tartja, mélyen megdöbbenett. Mindenki, így Einstein is annyira hitt a mindenség állandóságában, hogy elrontva egyenleteinek szépségét, bevezetett egy ún. kozmológiai állandót, amely tömegek közötti taszítást ír le.

Hamarosan kiderült azonban, hogy a kozmológiai állandóval kibővített általános relativitáselmélet sem képes igazából állandó állapotú világegyetem leírására. A legkisebb ingadozás is képes a finoman kiegyensúlyozott világegyetem állandóságát megszüntetni és a világegyetem elkezd tágulni, vagy összefelé húzódni.

## 5.6. A relativitás elvének fogadtatásáról

A speciális relativitáselmélet rámutatott arra, hogy a világ nem egy gépezet. A tér, amiben a fény terjed, az üres tér, nem pedig az éter. A fény, bár hullámként terjed, nincs szüksége közvetítő közegre. A mindent gépezetnek tekintő szemlélet szerint, mint már tárgyaltuk, minden hatás kapcsolódások, rezgések által terjed. Mivel a fény terjedéséhez nincs szükség ilyen rezgést továbbadó közegre, a mindent gépies működésként értelmező szemlélet tarthatatlanná vált.

A relativitás elvének volt egy másfajta hatása is. A nagyközönség gondolkodását ez határozta meg. Az elméletet ténylegesen értők tudták és tudják, hogy 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 az idő és a tér fogalma viszonylagos. A kívülállók azonban, igazából nem is értve, mit jelent a relativitás Einstein elméleteiben, lassan mindennek az értékét viszonylagosként fogták fel. A minden relatív, semmiben sem lehetünk biztosak, mindenben kételkedni kell felfogás általánossá vált.

## 5.7. A relativitáselmélet és a newtoni fizika alkalmazhatósága

Ha a speciális relativitáselmélet egyenleteit megvizsgáljuk, látható, hogy a newtoni törvények adta leírástól eltérő eredményeket csak akkor adnak, ha a vizsgált jelenséget jellemző sebességek elég nagyok. Ha a jellemző sebességek a fénysebességhez képest elhanyagolhatóan kicsik, akkor a speciális relativitáselmélet és a newtoni törvények egyező eredményre vezetnek. A természeti jelenségek nagy többségének és a mindennapi életre jellemző jelenségeknek a leírására ezért változatlanul nyugodtan használhatjuk a newtoni törvényeket.

Hasonlóan, ha a tömegek nem túl nagyok, az általános relativitáselmélet egyenletei által leírt téridőgörbítő hatások a tömegvonzási erő segítségével nagyon jól közelíthetőek. Az általános relativitáselmélet egyenleteinek tényleges alkalmazása csak a világmindenség egészének és bizonyos égitestek leírásakor válik szükségessé.

# 6. Törvények és szimmetriák

## 6.1. A jelenség leírása és a törvény

Ha a világ valamennyi dolga, története le lenne írva egy nagy könyvbe, vagy CD lemezekre, akkor igazából nem volna szükségünk a természet törvényeinek ismeretére. Bármilyen érdekelne bennünket, ki tudnánk keresni, meg tudnánk nézni, mi hogyan történik. Ez persze csak elvileg volna így, hiszen a felmérhetetlenül sok ismeret olyan óriási adathalmazt tenne ki, amit nagyon nehezen tudnánk kezelni. Például a Hold pályájának a részletes leírása is könyveket tölthetne meg.

A természet törvényeinek ismerete azért is szükséges, mert az adathalmaz túl nagy lenne. A newtoni mechanika szerint elég, ha a Hold helyzetét és sebességét csak egy adott pillanatban ismerjük, a Hold pályája ebből kiindulva bármely jövőbeni vagy múltbeli időpontra meghatározható. Ezért egy adott jelenség leírását megadó adathalmaz felesleges, ha ismerjük a megfelelő törvényt, melynek segítségével bármit ki tudunk számítani, ami szükséges.

Sokszor azonban nem ismerjük a törvényeket. Ezért hasznosak az olyan elvek, amelyeknek segítségével csökkenthetjük az adathalmaz méretét. Ilyen elvek a szimmetriaelvek. A 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. A 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 irányban bizonyos lépésekben elmozdulunk. Látható, hogy a szimmetriák csökkentik a jelenség jellemzéséhez szükséges adatok számát.

## 6.2. A törvények alakja, szimmetriák és egyszerűség

A szimmetria fogalmát a fenti egyszerű mértani értelmezésen túlra is kiterjesztették. Egy egyenlet szimmetriáján azt értjük, hogy bizonyos matematikai átalakításokat, idegen eredetű szóval transzformációkat elvégezve az egyenletek alakja változatlan marad. Például az  $y = x^2$  egyenlet alakja ugyanaz marad az  $x \rightarrow -x$ , tükrözésnek nevezett átalakítás után. Szakkifejezést használva azt mondjuk, hogy az egyenlet invariáns a tükrözési transzformációkkal szemben.

Az invariancia megszorítást jelent az egyenlet alakjára. A tükrözéssel szembeni invariancia például az  $y = x^2 + x$  egyenletre nem igaz, mivel ez a tükrözés után az  $y = x^2 - x$  egyenletbe megy át. Minél több transzformációval szemben invariáns az egyenlet, az alakja annál inkább rögzített.

A szimmetriák léte segít a törvények alakjának meghatározásában is. A szimmetria a törvényt megadó egyenlet alakjára jelent megszorításokat. A szimmetria léte az egyenletet áttekinthetőbbé, szabályosabb alakúvá, mondhatni szebbé teszi. Miközben a törvények alakját keressük, a szépség, a szimmetriák léte egyfajta útmutatás, amely megkönnyíti a feltevések közötti választásokat, amely akár még a kísérleti ellenőrzés előtt elveti az esélytelenebb modelleket. Az elméleti fizikusok egy új modellt, ha az szép és egyszerű, sokkal inkább hajlamosak elfogadni, még akkor is, ha kísérleti megerősítés még várat magára vagy egyelőre nem lehetséges. Ezért kíváncsi, hogy az elmélet minél szebb formájú, szimmetrikusabb legyen. Ne legyenek benne olyan tényezők, amelyek eredete homályos, amelyeket csak azért kell odavenni, mert épp a kísérleti eredmények értelmezése megköveteli jelenlétét. Az elmélet lehetőleg első elvekből induljon ki és ne a szükség alapján toldozzuk-foldozzuk.

A törvények megfogalmazásában másik fontos szempont az egyszerűség. Ha arról van szó, hogy ugyanazokat az eredményeket két különböző módon is meg lehet magyarázni, a fizikusok gondolkodás nélkül azt a leírást fogadják el, amelyik egyszerűbb, kevesebb feltevést tartalmaz. A másik leírást elvetik és csak akkor kerülhet újra tárgyalásra, ha az egyszerűbb valamilyen új ismeret értelmezésére alkalmatlannak bizonyult. Ezt az eljárást, vagyis a bonyolultabb elvetését a középkori angol filozófus után Occam elv vagy Occam borotva néven emlegeti a szakirodalom. A borotva itt arra utal, hogy minden fölösleges szörszálat el kell távolítani.

## 6.3. A fizika alapegyenleteinek alakja és a szimmetriák

Ha egy fizikai egyenlet invariáns a transzformációkkal szemben, azt jelenti, hogy az egyenlet alakja ugyanaz marad. Ezáltal ugyanazokat a jelenségeket írja le az átalakítás előtt és után is. A fizikai alapegyenletek alakjára vonatkozólag a térbeli és időbeli szimmetriákkal szembeni invariancia megkövetelése komoly megszorítást jelent. Gondoljunk el például, változhat-e a leírt jelenség attól, hogy hol játszódik le. Ha nem, akkor a térben való eltolhatóság érvényes szimmetria. Ilyenkor a fizikai egyenletnek invariánsnak kell lennie a térbeli eltolással szemben. Az egyenletben az eltolás matematikailag azt jelenti, hogy arrébb toljuk a koordinátarendszer kezdőpontját. Ekkor az egyenlet alakja változatlan kell, hogy maradjon. Ez a követelmény rögzíti azt, hogy a részecskék helyzetét megadó vektorok milyen alakban, függvénykapcsolatban jelenhetnek meg az egyenletekben.

Az egyszerű tér- és időbeli szimmetriákon kívül más szimmetriákat is megkövetelhetünk. Megköveteljük még a relativitáselméletnek megfelelő viselkedést is. Ez azt jelenti, hogy az előforduló tér és idő változók a négykiterjedésű tér változóinak megfelelő módon forduljanak elő. Ha a fenti szimmetriákkal szembeni invarianciákon kívül még azt is kikötjük, hogy az egyenletek emellett legyenek a lehető legegyszerűbbek, máris megkapjuk a szabad részecskék mozgását leíró mechanikai és kvantummechanikai mozgásegyenleteket! Köztük a kvantummechanika egyik alapegyenletét, a Dirac egyenletet is. Azaz olyan sok megszorítást adtunk, hogy azok már rögzíthették az egyenletek teljes alakját.

## 6.4. Szimmetriák és megmaradó mennyiségek

A fizika alapvetően fontos törvényei az energia, a lendület, a perdület, az elektromos töltés és még más kevésbé ismert mennyiségek megmaradását megfogalmazó törvények. Kiderült, hogy a szimmetriák léte és a megmaradó mennyiségek között nagyon mély kapcsolat létezik. Ha a térben nincs kitüntetett pont, a természet mindenhol azonos törvények szerint működik. A koordinátarendszer kezdőpontjának eltolása ekkor nem befolyásolhatja a természet törvényeinek alakját. Megmutatható, hogy a lendület megmaradása a térben való eltolhatóság következménye. Ha a jelenséget tekintve nincs kitüntetett időpillanat, akkor leírása nem függhet az időszámítás kezdőpillanatának megválasztásától. Attól, hogy mikortól kezdve mérjük-e az időt, a jelenséget leíró egyenlet ezzel szemben invariáns. Egy rendszerre az energiamegmaradás tétele az időbeni eltolhatósággal szembeni invarianciából származik. Ha a jelenség leírása nem függ attól, hogy a térben elforgatást végzünk, azaz más irányba mutatnak a koordinátarendszer tengelyei, akkor megkapjuk a perdület megmaradásának tételét.

## 6.5. A szimmetriák fontossága

A szimmetriák és a megmaradási tételek kapcsolatának felismerése nagy hatást gyakorolt a tudósok gondolkodására. Igazából azt mondhatjuk, hogy a természet nem az erőkkkel, részecskékkel, hanem a szimmetriákkal takarékoskodik. Úgy tűnik, az igazán alapvető tudás a szimmetriákhoz köthető. Ez az eredetileg Platón által megfogalmazott gondolat a mai részecskefizika egy talán meglepő, 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.

# 7. Szimmetriasértések

## 7.1. A magától megjelenő (spontán) szimmetriasértés

A magától megjelenő szimmetriasértés mibenlétének felismerése a mai fizika kiemelkedő fegyverténye. A jelenség, amiről látni fogjuk, alapjait tekintve egyszerű, a fizika számos területén vezetett új felfedezésekre. A szimmetria, amely megsérül, lehet a mértani térhez és az időhöz kötődő szimmetria vagy valamilyen absztrakt, belsőnek is nevezett szimmetria is.

Lehetséges, hogy az egyenletek szimmetrikusak, de az általuk leírt jelenségek már nem mutatják ezt a szimmetriát. Az egyenleteknek ilyen esetekben több megoldása is van és az eredeti szimmetriát egyetlen megoldás sem mutatja, a szimmetria csak valamennyi megoldás együttesében mutatkozik meg. Ez azonban nem azt jelenti, hogy a természetben minden egyes megoldásra láthatjuk a példát, általában csak egyetlen megoldásnak megfelelő jelenséget tanulmányozhatunk. Ilyen esetben sértett szimmetriáról beszélünk, a leírt jelenséget magától megjelenő szimmetriasértésnek nevezik. Igazából a szimmetria létezik, az egyenlet szimmetriája megjelenik a megoldások teljes rendszerében, ezért talán jobb lenne rejtőző szimmetria kifejezést használni. A spontán szimmetrisértés kifejezés arra utal, hogy az egyenlet szimmetriáját semmi sem

sérti meg, a szimmetria sérülése úgymond magától, spontánul a megoldásokban jelentkeznek. Lássunk erre néhány példát.

Gondoljunk el egy vacsorát, ahol a társaság egy kerekasztal körül foglal helyet. Teljesen körbeülük az asztalt. Mindenki előtt van teríték és a terítés rendje szerint a terítékek között ott a pohár. A kerekasztalnál ülők előtt kezdetben a jobb és bal irány egyenértékű, mivel mindenki számára egyformán 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 a bal irányt ki kell választani.

Másik egyszerű példának vegyünk egy függőleges helyzetű, tökéletesen egyenletes szerkezetű acél-szálat. Hasonn reá felülről egy lefelé irányuló nyomóerő. A rendszer a rúd függőleges tengelye körül tekintve hengersizimmetriát mutat. Ha a nyomóerő fokozódik, egy idő után a szál elgörbül, valamire kitér. Hogy merre, véletlen. A rendszer hengersizimmetriája elveszett, a sérülés itt is spontán módon jelentkezett.

Nemcsak az acélpálca görbülésében és más egyszerű jelenségekben sikerült szimmetria spontán sérülését észlelni. A spontán szimmetriasértés fontos szerepet játszik az alapvető kölcsönhatások alakjának milyenségében is. Ezzel majd később foglalkozunk.

## 7.2. Rejtett szimmetria

A szimmetriák sérülésével kapcsolatos másik fontos jelenség a rejtett szimmetriák fellépte. A rejtett szimmetria léte utalhat az, ha valahol sok, egymással rokon részecskével, dologgal találkozunk. Amelyek ugyan megkülönböztethetők, de mégis nagyon hasonlítanak egymáshoz. Annyira, hogy akár egyetlenegy valami különféle változatainak is tekinthetők.

Erre a szimmetriára tárgyalt példáink inkább az absztrakt, azaz nem a mértani térben megfogalmazható szimmetriákra vonatkoznak. Az absztrakt szimmetriák mibenlétét sem túl nehéz elképzelni. Gondoljunk a férfi és nő közötti különbségtételre. Igaz rájuk az 'emberi' szimmetria, mert mindkettő ember, a felszerelésük ezen nem változtat. Hasonló módon gondolhatunk a proton és neutron közötti eltérésre is. A két részecske nagyon hasonló egymáshoz, tömegük csaknem azonos, csupán elektromos töltésükben különböznek. A magfolyamatokban a neutron és proton, töltésüktől eltekintve, azonos módon viselkednek, a töltés is általában csak címként szolgál, nem tényleges különbség jelölője. Ezért a fizikusok a protont és a neutront csupán mint egyetlen részecske kétféle változataként kezelik, amelyet nukleonnak neveznek.

Kiderült, ha nem is annyira nagy a hasonlóság, de van még 6 másik részecske, amelyek a protonhoz és neutronhoz valamint egymáshoz hasonló módon viselkednek. Ezeket a részecskéket a világűrben érkező igen nagy energiájú sugárzások kelthetik. Így az ún. kozmikus záporokban lehet megfigyelni és nagyenergiájú gyorsítóban lehet előállítani. A gyorsítóban előállítható nagyszámú részecskét rejtett szimmetriáik felismerésével sikerült rendszerezni.

## 8. A kisvilág

Newton törvényei a mindennapi méreteken történtek leírását adják. A newtoni természettan nagyon jól alkalmazható, ha a tárgyak sebessége jóval kisebb, mint a fénysebesség, ha a tömegek nem túl nagyok, és ha a méretek nem túl kicsik. Ha a sebességek a fénysebességgel összemérhetők, akkor a négykiterjedésű téridővel dolgozó speciális relativitáselméleti leírással kell dolgoznunk. Ha a tömegek túl nagyok, figyelembe kell venni a tömegek téridőt görbítő hatását. Ezekkel az előzőekben a relativitáselméletek ismertetésekor foglalkoztunk.

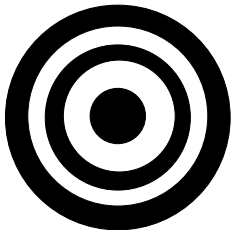
Most azt tárgyaljuk, hogy Newton törvényei akkor is érvényüket veszítik, ha a méretek eléggé kicsik. Egyszerűen azért, mert a világ kicsiben nem pont olyan, mint nagyban. A kisvilág (idegen szóval mikrovilág) viselkedését másféle törvények szabályozzák, például nem beszélhetünk pálya mentén mozgó



részecskéről. A kisvilág törvényeit a kvantummechanika fogalmazza meg. A továbbiakban a kvantummechanikai leírás néhány jellegzetességével ismerkedhetünk meg.

## 8.1. Hullámtermészet - a részecskék 'lefényképezése'

Nézzük, miként határozhatjuk meg, hogy az egyes nagyon kicsiny részecskéknak mekkora a mérete. Az alakot, a méreteket a részecskék 'lefényképezésével' vizsgálhatjuk. Egy tárgyról akkor tudunk éles képet készíteni, ha a megvilágításhoz használt fény hullámhossza jóval kisebb, mint a tárgy jellemző méretei.



6. ábra. Fényelhajlás. Ha a lyuk mérete összemérhető a hullámhossz méretével, akkor a lyuk képe az ernyőn nem egyszerűen kör, hanem ekörül még egy gyűrűs szerkezet is megjelenik. Ha a hullámhosszat csökkentjük, akkor a gyűrűs szerkezet először sűrűsödik, majd egy idő után elenyészik.

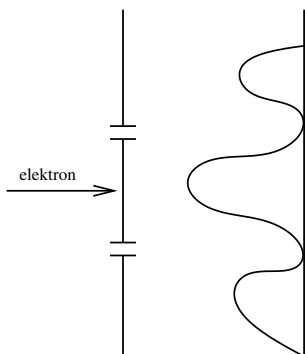
Minél kisebb a felvételhez használt fény hullámhossza, annál pontosabb, részletesebb képet kapunk a tárgyról. Ha a fény hullámhossza körülbelül akkora, vagy nagyobb, mint a vizsgált tárgy mérete, akkor is kapunk valamilyen képet, lásd a 6. ábrát. Ez az úgynevezett elhajlási, vagy idegen szóval diffrakciós kép alkalmas arra, hogy ha a részleteket nem is, de a legalább a tárgy méreteit, mértani alakját meg tudjuk határozni.

A kisvilág tárgyainak, mint a molekulák, atomok, atommagok 'fényképezéséhez' nem csupán fényt, hanem tömeggel rendelkező részecskéket is használhatunk, ugyanis a kvantummechanika szerint részecskék is rendelkeznek hullámtulajdonságokkal. Az  $m$  tömegű részecske hullámhossza, az ún. deBroglie hullámhossz  $\lambda = h/p = h/mv$ , 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 egy ábrát rajzol ki. Ez az ábra ugyanolyan elhajlási képet jelenít meg, mint amelyet az adott tárgyra eső, a bombázó részecske  $\lambda$  hullámhosszával azonos hullámhosszú fénnel kaphatnánk. A képlet szerint a nagyobb tömegű részecskék hullámhossza kisebb, ezért minél nagyobb tömegű valami, a hullámtulajdonságai annál kevésbé jelentkezik. Hullámszerű viselkedést csak a legkisebb tömegű részecskéktől, például az elektronoktól várhatunk.

A nagyon kis, atommagot és annál kisebb méreteket lefényképezni képes fény előállítására nagyon kis hullámhosszú, azaz nagyon nagy energiájú elektromágneses sugárzás létrehozását jelentene, ami igen nehéz feladat. Ennél könnyebb a megfelelő hullámhosszú, azaz a hullámhossz képlete szerint nagy sebességű, azaz nagy energiájú részecskék előállítása. Az elektronok hullámtulajdonságát felhasználó fényképező berendezés az elektronmikroszkóp is, amely felgyorsított elektronokat használva készít felvételeket. A nagysebességű részecskenyalábokat gyorsítóknál hozzák létre. Az egyre nagyobb energiájú gyorsítókkal egyre kisebb hullámhosszú részecskéket kaphatunk, így a vizsgálandó dolgokról egyre jobb felbontású felvételeket tudunk készíteni. Az, hogy egy részecske pontszerűnek tekinthető, azt jelenti, hogy a világ legnagyobb energiájú gyorsítójának nyalábját használva is azt kapjuk, hogy a részecskének nem látszik a mérete, azaz biztosan jóval kisebb, mint amekkorát a gyorsítóval még észlelni lehet, 'meg lehet látni'.

## 8.2. Interferencia - a kétréses kísérlet

Az elektron vagy más részecske hullámszerű viselkedését nemcsak az akadályon való elhajlás jelensége mutatja, hanem az interferenciára való képesség is. Képzeljük el, hogy egy elektronnyalábot lövünk egy ernyőre, melyen két vékony párhuzamos kis rés található. Tegyük az ernyő mögé egy lemezt, melyen a becsapódó elektron foltot hagy. Ha egy idő után megnézzük, milyen kép keletkezett a lemezen az elektronnyalábbal való bombázás után, a következőt látjuk.



7. ábra. Kétréses interferencia. A kétlyukú lapon elektronok haladnak át. Az ernyőn a becsapódó elektronok olyan eloszlásban érik el, mint amelyet a kétlyukú lapon átjutó azonos hullámhosszú fénysugár hozott volna létre.

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

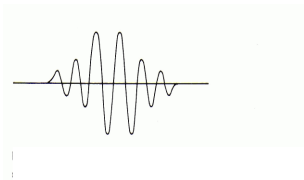
Tegyük fel, hogy csökkentjük az elektronnyaláb erősségét. Ugyanannyi elektront lövünk rá a két rést tartalmazó ernyőre, de mivel az elektronnyalábban másodpercenként kevesebb elektron repül, hosszabb ideig tart a kísérlet. Az ernyő mögötti elektroneloszlás képe ezzel nem változik meg. Az interferenciakép akkor is ugyanaz marad, ha annyira lecsökkentjük az elektronnyaláb erősségét, hogy egyszerre csak egy elektron haladhat át az ernyő résein keresztül.

Tehát a megfigyelt jelenség csak azzal magyarázható, hogy az elektron úgy kerül az ernyő 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 meghatározzuk, melyik résen ment át az elektron, az ernyő mögött észlelt kép más lesz. Akkor olyan eredményt kapunk, mintha az elektron részecskeként, golyóként ment volna át. Az ernyő mögötti eloszlás ekkor nem mutatja a hullámokat jellemző interferenciaképet, a két résen átjövő két eloszlás egyszerű összege lesz.

A 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 így a mérés okozta zavarnak tulajdonították és a mérés által okozott lendületváltozás nagyságrendjét a helyre és lendületre felírt határozatlansági összefüggésből származtatták. 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. Az interferencia kép most is eltűnt, de nem azért, mert nagy volt a közölt lendület, hanem egyedül csak azért, mert meghatározták, hol mentek át az egyes elektronok.

### 8.3. Hullámcsomag

Ha hullámként viselkedik valami, akkor joggal merül fel a kérdés, milyen is a mérete. A hullámcsomag kifejezésben a "csomag" éppen arra utal, hogy a méretek végesek.



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

A hullámok összegzésének matematikai tulajdonságait vizsgálva a következő derül ki. Egy 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 össze, lásd a 8. ábrát. Ekkor a hullámok, kivéve egy adott térrészt, mindenütt másutt a térben kioltják egymást. Minél jobban kiszélesedik a keveréshez felhasznált rezgésszámsáv, annál kisebb méretű lehet a hullámcsomag. Fordítva, minél határozottabb rezgésszámú a hullámvonulat, a hullámcsomag annál kiterjedtebb.

Egy gerjesztett atom által kibocsátott fénycsomag is véges méretű, mert a kisugárzott hullámvonulat véges hosszúságú. Azaz egy, a térben mozgó hullámcsomagként terjed. Ez azzal jár együtt, hogy a kisugárzott fénycsomag frekvenciája nem pontosan meghatározott értékű, hanem sávra szélesedett. Ha a fénycsomag kibocsátása egy  $t$  időtartamon belül történt, akkor kb. ekkora a kibocsátási idejének a bizonytalansága is. Ez alatt a fénycsomag kb.  $ct$  utat tehet meg, ahol  $c$  a fény sebessége. Így a hullámcsomag hosszvetőleges hossza  $ct$ . A  $t$  ideig tartó kibocsátás, megmutatható, azt jelenti, hogy a kibocsátott fénycsomag  $f$  rezgésszámának bizonytalansága  $\delta f = 1/t$ . Az  $f$  rezgésszám bizonytalansága egyúttal megadja azt is, mekkora a fénycsomag lendületének a bizonytalansága, ahol  $h$  a Planck-állandó. Ha a hullámcsomag  $ct$  hosszát és lendületének  $\delta p = h\delta f/c$  bizonytalanságát összeszorozzuk, eredményként éppen a Planck-állandót kapjuk.

### 8.4. Határozatlansági összefüggés

A kvantummechanikai leírás fontos jellemzője a határozatlansági összefüggések léte. A hullámcsomag hosszára és rezgésszámának bizonytalanságára most levezetett összefüggés a fotonra felírt határozatlansági összefüggésnek felel meg. A részecske hullámtermészetének megfelelően a részecske térbeli viselkedését a részecskét jellemző hullámcsomaggal írjuk le. A szabad elektron térbeli terjedését a 8 ábrán látható hullámcsomag mozgásával jellemezhetjük. Az atomba kötött elektron mozgását az atom térfogatán belül kialakuló állóhullámhoz hasonló alakú 'csomag' jellemzi.

Mivel a részecskéknél is van hullámtermészete, határozatlansági összefüggések rájuk is érvényesek. Például az atomban lévő elektronnak nem ismerhető meg egyszerre pontosan a helye és a lendülete, ezért nem lehet az elektronnak az atomban pályája sem. Az elektron helyét ugyan tetszőleges pontossággal megismerhetjük, de akkor nem tudhatjuk, mekkora az elektron lendülete. Hasonlóan, az elektron 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 haladjon a  $h$  Planck-állandó nagyságát.

Nem csak a helyre és a lendületre, hanem más fizikai mennyiségek párojaira is léteznek határozatlansági összefüggések. A számunkra a későbbiekre tekintettel a legfontosabb a folyamat időtartamára és energiabizonytalanságára vonatkozó határozatlansági összefüggés. A fotonra a fenti összefüggéseket felhasználva megmutatható, hogy a fénycsomag kibocsátási idejének és a fénycsomag 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.

## 8.5. Hipp-hopp (virtuális) részecskék

Az állapot energiabizonytalanságára és élettartamára vonatkozó kapcsolat szokatlan jelenségeket is megenged. Eszerint a határozatlansági összefüggés szerint még az energiamegmaradás is megsérülhet, igaz, csak nagyon kis időre. Minél nagyobb mértékű a sérülés, annál rövidebb ideig tarthat.

Egészen megdöbbentő az, hogy az energiamegmaradás sérülése úgy is megtörténhet, hogy a teljesen üresnek vélt térből részecskék is előbukkanhatnak. Ez egyrészt azzal sérti az energiamegmaradás tételét, hogy a részecskéknek 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, ennek mértéke is növeli az energiamegmaradási tétel sérülését. A fenti határozatlansági összefüggés értelmében minél nagyobb a kipattanó részecske tömege, annál rövidebb ideig létezhet.

Ezeket a térből csak úgy kipattanó részecskéket hipp-hopp részecskéknek nevezhetjük. Létük közvetlen méréssel nem mutatható ki, de a megengedett igen rövid időn belül tényleg léteznek, hatásuk kimutatható. Hipp-hopp 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.

## 8.6. Schrödinger egyenlet

A kvantummechanika alapegyenlete a Schrödinger egyenlet. Az egyenlet a rendszer hullámszerű viselkedését jellemző ún. hullámfüggvény időbeli fejlődését szabja meg. Például a hidrogénatomban lévő elektront az elektron hullámfüggvényének segítségével írjuk le.

A hullámfüggvény komplex függvény. A komplex szó itt a matematikában értelmezett komplex számra utal. A hullámfüggvény a rendszer állapotának a jellemzője, segítségével a rendszer tulajdonságai közül mindent ki tudunk számolni, amit csak lehetséges. Maga a hullámfüggvény azonban nem feleltethető meg fizikai mennyiségnek, nem köthető közvetlenül mérhető adatokhoz. A mérhető mennyiségek, mint az energia, perdület, 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 meghatározta kisvilágbeli rendszer tulajdonságait mérjük, akkor csak ritkábban kapunk meghatározott értékeket.

Ha egy adott fizikai mennyiség értékére vagyunk kíváncsiak, a komplex hullámfüggvény csak azt határozza meg, hogy mik lesznek a lehetséges értékek, és melyik értékre milyen valószínűséggel számíthatunk. Méréskor így az adott fizikai mennyiségre akár különböző értékeket is kaphatunk. Nem tudhatjuk előre, mikor éppen melyiket, ez igazi véletlen. Csak az egyes értékek mérésének valószínűségét határozhatjuk meg.

Ha egy molekula vagy atom állapotáról az adott pillanatban mindent tudok, amit tudhatok, akkor sem tudom megmondani, pontosan milyen mennyiségekkel jellemzett állapotban lesz a következő pillanatban. Ha a molekula például gerjesztett állapotban van, nem tudom bizonytalannal 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.

A Schrödinger-egyenlet a kisvilág jelenségeinek leírására csak akkor használható, 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 elektronra felírt relativisztikus hullámegyenlet a Dirac-egyenlet.

## 8.7. Az atom szerkezete

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.

A 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. A keringési pálya leírásához pedig az adott pillanatban való helyzet és sebesség ismeretére lenne szükség.

A hidrogénatom elektronja csak bizonyos meghatározott energiájú állapotokban lehet. Az állapotokat leíró hullámfüggvény alakja állóhullámhoz hasonlítható, amely körülöleli az atommagot. Minél erősebben kötött az elektron, a hullámfüggvénye annál közelebb van az atommaghoz. A legalacsonyabb energiájú, azaz a legjobban kötött állapot a hidrogénatom alapállapota. A hidrogénatom alapállapotban lévő elektronja fotont elnyelve magasabb energiájú, ún. gerjesztett állapotba kerülhet. A gerjesztett állapotú hidrogénatom legerjesztődhet. Ekkor fotont bocsát ki. A foton energiája a gerjesztett állapot és az alapállapot energiája közötti különbséggel egyenlő.

## 8.8. Alagúthatás - áthaladás a falon

Képzeljük el a következő esetet. Egy tűzhányó csúcsán, a kráterben van egy golyó. A hegy lábához képest hatalmas nagy helyzeti energiája van. Ha valahogy kijutna a kráterből, a hegy lábáig gurulva igen nagy sebességre gyorsulhatna fel. A newtoni törvények szerint a golyó a kráterből magától semmiképpen sem juthat ki. A kisvilágban azonban van esély arra, hogy a részecske kiszabaduljon.

Vizsgáljuk meg a radioaktív  $\alpha$ -bomlás esetét. Ekkor az atommag egy  $\alpha$ -részecskét kibocsátva alakul másik atommaggá. Az  $\alpha$ -részecske egy hélium atommag, két proton és két neutron alkotja. Az  $\alpha$ -részecske helyzete a bomlás előtt a kráterbe záródott golyó állapotához hasonló. Az atommag belsejéből a perem felé tartó  $\alpha$ -részecskét taszító erő űzi vissza az atommag belsejébe. Az atommagban lévő  $\alpha$ -részecske, bár volna elég energiája, csak akkor juthat ki az atommagból, ha átjut a gáton.

Az  $\alpha$ -bomlást az  $\alpha$ -részecske hullámtermészete teszi lehetővé. Ha az  $\alpha$ -részecske csak egy golyó lenne, akkor belülről a falhoz jutva lepattanna a falról és állandóan ide-oda pattogva maradna a bezárt helyen. De az  $\alpha$ -részecskének van hullámtermészete is. A hullám, egy felülethez érve, nemcsak egyszerűen visszaverődik, hanem egy része behatol a közegbe. Így viselkedik a fény is, egyrészt visszaverődik a felületről, kisebb része viszont behatol a felület anyagába. Ha ez a közeg vékony, a fény egy része áthatolhat rajta.

A vékony tükrön átjutó fényhullámhoz hasonlóan, az  $\alpha$ -részecske is átmehet a gát falán. Az  $\alpha$ -bomlás megtörténhet. Minél magasabb, szélesebb ez a gát, a bomlás valószínűsége annál kisebb. Az ilyen bomlást a kvantummechanikában alagúthatásnak nevezik. Az  $^{238}\text{U}$  atommagjának bomlásának felezési ideje 4,51 milliárd év. Átlagosan ennyi időbe kerül, míg egy  $\alpha$ -részecskének sikerül átjutni a gát falán.

## 8.9. Mérés - a Schrödinger macskája paradoxon

A kvantummechanika az  $\alpha$ -bomlás leírását is, mint mindent, a hullámfüggvény segítségével végzi el. Az  $\alpha$ -részecske helyét a hullámfüggvény nem tudja pontosan megadni. A részecske helye a komplex értékű hullámfüggvény adott helyen felvett értékének a négyzetével arányos. Így az  $\alpha$ -részecske nagy valószínűséggel ott van, ahol a hullámfüggvény értéke a legnagyobb.

Ahogy tárgyaltuk, a Schrödinger egyenlet a hullámfüggvény időbeli változását írja le. Az alagúthatás leírása a következőt jelenti. Az  $\alpha$ -részecske állapotát leíró hullámfüggvény az idő során egyre jobban 'belefűrődik' az atommag felületébe, így a hullámfüggvény egyre nagyobb hányada 'lóg ki' az atommagból. A hullámfüggvény az atommagba zárt állóhullámból és a távozó  $\alpha$ -részecskét leíró hullámcsomag

együtteséből áll. Ahogy telik az idő, az atommagba zárt rész hányada csökken és ezzel együtt a távozó hullámcsomag részaránya egyre nő. Ezért az idővel egyre nagyobb annak a valószínűsége, hogy az  $\alpha$  részecske átjutott a gát alatt. A hullámfüggvény azonban nem mondhatja meg, pont mikor történik a bomlás.

Einstein ez a leírás kifejezetten zavarta. Azt állította, a kvantummechanikai leírás nem teljes, mert nem tudja megmondani, hogy ténylegesen mikor bomlik el az atommag, azaz mikor repül ki az  $\alpha$ -részecske. Ha az  $\alpha$  részecske egyszer átjutott a gát alatt, akkor az őt leíró hullámcsomag gyorsan el is hagyja a mag környezetét. A hullámfüggvényes jellemzés szerint - mivel a bomlás pontos ideje nincs eleve rögzítve - viszont az  $\alpha$ -részecske egyszerre lehet 'bent és kint', azaz a kvantummechanikai állapot a 'bent és kint' egyszerre létezése, összefonódása, idegen kifejezéssel szuperpozíciója. Csak a tényleges megfigyelés, a mérés során válik az valósággá, hogy kint van-e az  $\alpha$ -részecske, vagy még nem történt meg a bomlás.

Schrödinger, akit a hullámfüggvény fenti értelmezése szintén zavart, a kérdést a végsőkéig élezte. Felismerve azt, hogy az  $\alpha$ -részecske kijutása a magból magát az emberléptékű világot is erősen befolyásolhatja, a következő gondolat kísérletet fogalmazta meg. Legyen a kvantummechanikai rendszer egy, a külvilágtól elzárt dobozba rakva. Legyen ott az  $\alpha$ -bomló atommag, a kirepülő  $\alpha$ -részecskét észlelni képes számlálócső, egy kalapács, egy üvegcsényi mérge gáz és egy macska. Ha az atommag elbomlik, az  $\alpha$ -részecske megszólaltatja a számlálót, a számláló jelének hatására a kalapács az üvegcsére zuhan, széttöri azt és a kiáramló mérge gáz elpusztítja a macskát. Legyen az  $\alpha$ -bomlás bomlás felezési ideje egy óra. Tételezzük 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, ez felel meg az állapoton végzett megfigyelésnek, mérésnek, a kvantummechanikai állapot az élő macska és elpusztult macska egyszerre létezése, szuperpozíciója. A valóság csak akkor nyilvánítja ki önmagát, ha megnézzük, él-e még a macska, ekkor nyilván csak az egyik lehetőség észlelhető. Amíg azonban meg nem nézzük, nem végzünk mérést, addig a szuperpozíció, az 'összefonódott lét' létezik, számtalan más kísérlet, persze nem a macskával, mind ezt igazolta, igazolja.

Ez az értelmezés képtelenség, a macska léte nem lehet egy élő és elpusztult macska összefonódása. Az, hogy pontosan hol sántít a gondolatmenet, a mai napig nem világos.

## 8.10. Nemlokalitás - az Einstein-Rosen-Podolsky paradoxon

Einstein talán leghíresebb gondolat kísérlete a kvantummechanika tökéletlenségének bizonyítására a határozatlansági összefüggések képtelen voltát igyekezett beláttatni. Mint tárgyaltuk, egy részecskének nem lehet egyszerre pontosan meghatározott helye és lendülete.

A részecske helyét vagy lendületét nem csak úgy mérhetjük meg, hogy magának a részecskének mérjük a helyét és a lendületét. Gondoljuk el, a két részecske együtt, nyugalomban van. Belső kölcsönhatás eredményeként a két részecske szétrepül. Kezdetben az összes lendület nulla és a tömegközéppont is nyugszik. A lendületre és a tömegközéppontra vonatkozó megmaradási tételek természetesen a kvantummechanikában is érvényesek. Ha mérjük az egyik kirepülő részecske lendületét, akkor a lendületmegmaradási tétel értelmében tudjuk 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. Ebben az esetben semmiféle kölcsönhatás ne lehet közöttük. Az egyiknek mérjük meg nagy pontossággal a lendületét, a másiknak ugyanakkor nagy pontossággal a helyzetét, ezt a lehetőséget a kvantummechanika megengedi. A két mérést együtt kiértékelve pontosan meg tudjuk határozni az egyes részecskék helyét és lendületét, ami a kvantummechanika szerint lehetetlen. Ez képtelenség, ami arra utal, a kvantummechanika tökéletlen. Ha mégis a kvantummechanika bizonyul igaznak, akkor az azt jelenti, hogy a két részecske között létezik valamiféle helyhez nem kötött távolbahatás, bármilyen távolságot átfogó végtelen gyorsan megjelenő kapcsolat, ún. nemlokális hatás.

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 hatások nemcsak atomi méretekben, hanem nagy, akár méteres távolságokon is érvényesülhetnek. Ha két részecske valamikor egymástól mikroszkopikus távolságra volt, hiába távolodtak el egymástól, a kvantummechanikai hatás valamilyen része megmarad. A nemlokalitás szerint így valami, ha 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 egy oszthatatlan rendszert képez, mert valaha az egész együtt egy kisvilágbeli, kvantummechanikai rendszert alkotott, ezzel később foglalkozni fogunk. Azt, hogy ez az összefonódottság ténylegesen mit jelent, nem sokat tudunk, egyelőre csak kísérletek vannak arra, milyen módon lehetne ezt a jelenséget gyakorlati célokra is felhasználni. Továbbá fontos kérdés, van-e a nemlokalitásnak kimutatható hatása a világegyetemre vagy annak egyes részeire.

## 9. Az elemi részecskék

A természetet sok-sok egymástól különböző tárgy népesíti be. A sokféleség azonban néhány alapvető részecske különböző módokon való összekapcsolódásával magyarázható. A mai fizika egyik kulcskérdése az, hogy miket is tarthatunk elemi részeknek. Elemi részen a tovább már nem osztható részecskéket értjük. Az elemi részeknek nincs belső szerkezetük, bármilyen, eddig elvégzett kísérletben pontszerűen viselkednek.

Bár az elemi részeket kiterjedés nélkülinek tekintjük, mégis lehet saját perdületük, amit spinnek neveznek. Egy részecske spinje a kvantummechanika szabályai szerint a megfelelő egységben feles vagy egész értékű lehet. A feles spinű részecskéket fermionoknak, az egész spinűeket bozonoknak nevezik. A Pauli-elv, miszerint egy adott pályán egyszerre csak egy elektron lehet, a fermionok alapvető sajátosságát fogalmazza meg. A Pauli-elv valamennyi fermionra igaz, tehát egy adott kvantummechanikai állapotban egyszerre csak egy fermion lehet. Vannak olyan részecskék, amelyek spinje egész, ezeket bozonoknak nevezik. A bozonokra nem igaz a Pauli-elv, egy adott állapotban egyszerre akárhány is lehet.

### 9.1. Az elemi részecskék osztályozása

Az atom egyik alkotórésze, az elektron elemi részecskének tekinthető, szerkezet nélküli, pontszerű. Az atommagokat más atommagokkal bombázva felfedezték, hogy az atommag pozitív töltésű protonokból és a körülbelül ugyanolyan tömegű, elektromosan semleges neutronokból áll. A protonokról és neutronokról azonban kiderült, hogy nem tekinthetők elemi részecskének. A kísérleti eredmények elemzéséből az adódott, hogy véges térbeli kiterjedéssel rendelkeznek és más olyan tulajdonságaik is vannak, amik összetettség-re, szerkezetre utalnak.

A protonok és neutronok belsejét, akárcsak az atom szerkezetét, ütköztetésekkel sikerült feltárni. Amikor protonokat nagyon nagy energiájú, azaz nagyon kis hullámhosszú elektronokkal 'fényképezték', lásd a 8.1 szakaszt, az elhajlási képet csak úgy lehetett értelmezni, ha feltételezték, hogy a proton pontszerűnek vehető, elektromosan töltött részecskékből áll. Ezeket kvarkoknak nevezik, a proton és neutron egyaránt három darab kvarkból áll. A kvark töltésének nagysága tört számmal adható meg, az  $u$  kvark töltése a proton töltésének  $2/3$  része a  $d$  kvark töltése  $-1/3$  proton töltés. A protont két  $u$  és egy  $d$ , a neutront két  $d$  és egy  $u$  kvark alkotja. Meg kell jegyeznünk, hogy a kvarkok szabadon nem fordulhatnak elő. Ezt a tapasztalati tény a kvarkok egymás közötti kölcsönhatását vizsgálva lehet megérteni.

A hetvenes évekre elfogadottá vált, hogy csak kétféle, az anyag építőkövének vehető elemi részecske létezik, a lepton és a kvark. A leptonok közé az elektron mellett még a neutrínó tartozik, de vannak nehezebb leptonok is. A neutrínót az atommag  $\beta$  bomlásában fedezték fel. Emlékeztetőül annyit, hogy a  $\beta$  bomlás során az atommag töltése eggyel változik, miközben a tömegszám változatlan marad. Azaz az atommag egy protonja neutronná, vagy egy neutronja protonná alakul át. Az ilyen folyamatokban keletkező neutrínó tömeg és töltés nélküli, fénysebességgel mozgó részecske. 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 legújabb mérések szerint a neutrínónak is van tömege, igaz az nagyon kicsi, az elektron tömegének milliomod része.

A világegyetem anyagának túlnyomó része elektronból, az ún. elektron-neutrínókból,  $u$  és  $d$  kvarkokból, illetve a belőlük felépülő protonok és neutronok alkotta atommagokból áll. A fenti négy 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, a  $c$  kvark és az  $s$  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 a  $b$  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. Az anyag építőköveinek tekinthető elemi részek táblázata. Az első oszlopban a leptonok, a harmadik oszlopban a kvarkok találhatók. A második és negyedik oszlop a részecskék elektromos töltését tartalmazza. A felosztásnak megfelelően három részecskecsaládról beszélünk. A müon és a tauon bomlékonyak és hasonlóképpen bomlékony valamennyi olyan részecske is, amelynek összetevő kvarkjai között van olyan, amelyik a második vagy harmadik részecskecsaládhoz tartozik.

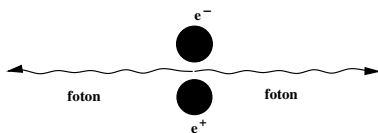
Az anyagot felépítő kvarkokon és leptonokon kívül elemi rész még a foton és néhány, hozzá hasonló, ám tömeggel is rendelkező részecske, amelyek a kölcsönhatások létesítésében játszanak alapvető szerepet. A foton és társai bozonok, a spinjük egységnyi. A fotont az alapvető részek között ható elektromágneses erőter közvetítőjeként, az elektromágneses erőter alapegységeként, kvantumaként értelmezzük.

Az elemi részek harmadik csoportjába az ún. skalár részecskék tartoznak, ezeknek a spinje nulla, tehát bozonok. Ilyen részecskéket még nem figyeltek meg, de feltételezik, hogy létezniük kell. Jelentőségükkel később foglalkozunk.

## 9.2. Ellenrészecskék

Az ellenrészecskék (antirészecskék) létezését a relativisztikus hullámegyenletek jósolták meg. Például az elektronra felírt Dirac-egyenlet egyben leír egy, az elektronnal egyébként teljesen azonos tulajdonságú, ám vele ellentétes töltésű részecskét is. Igaz az, hogy a legtöbb részecskének létezhet ellenrészecskéje is. Az ellenrészecske tömege megegyezik a megfelelő részecske tömegével, más tulajdonságai is ugyanolyanok, mint a részecskének, csak éppen az elektromos töltése, és más hasonló jellemzője is ellentétes előjellű. Az elektron ellenrészecskéje a pozitron, a kvark ellenrészecskéje az ellenkvark, a protoné az ellenproton, a neutroné az ellenneutron. Bár a neutron és ellenneutron elektromos töltése egyaránt nulla, mégis különböznek, mert a neutron kvarkokból, az ellenneutron ellenkvarkokból áll.





9. ábra. Ha egy  $e^-$  elektron és egy  $e^+$  pozitron találkoznak, mindketten megsemmisülnek. Az energiájukat két ellentétes irányba repülő, egyenlő energiájú foton viszi el.

A részecske és a neki megfelelő ellenrészecske ha egymással találkoznak, megsemmisülnek. A tömegüknek megfelelő energia sugárzásként távozik. Például ha egy elektron és egy pozitron összetalálkozik, mindketten eltűnnek és a tömegüknek megfelelő energiát két akkor keletkező foton viszi magával, lásd a 9. ábrát.

Az, hogy a részecskék és az ellenrészecskék megsemmisülhetnek, azt jelenti, hogy nem lehet őket örökéletűnek tartani. Továbbá nem lehet anyagmegmaradásról sem beszélni, hiszen például az elektron és pozitron megsemmisülésekor tömegek vesznek el. Mielőtt Einstein az  $E = mc^2$  összefüggést felfedezte, úgy gondolták, létezik az egymástól független energiamegmaradási és anyagmegmaradási törvény. A speciális relativitás elmélete kimondja, hogy csak egyetlen megmaradási törvény létezik. Az energia jóval alapvetőbb mennyiségnek tűnik, mint a tömeg, ezért csak az energiamegmaradásról beszélhetünk. Ez viszont magába foglalja az  $E = mc^2$  összefüggésnek megfelelően a tömegeket is.

### 9.3. Barionok és mezonok

Mint már említettük, a kvarkok szabadon nem fordulhatnak elő, csak részecskék belsejében. Erre két lehetőségük van. Egyrészt hármassával bezárva, a protonok, a neutronok és más, hozzájuk hasonló, náluk nehezebb részecskék, az ún. barionok alkotórészeiként fordulnak elő. A másik lehetőség a két összetevőből, a kvarkból és ellenkvarkból álló mezonokba való bezáródás. A protonnál nehezebb barionok és a mezonok bomlékonyak. Csak nagyon nagy energiájú ütközésekben keletkezhetnek és a keletkezés után gyorsan elbomlanak. Maga a neutron is bomlékony, átlagos élettideje kb. 15 perc. A hatféle kvark csak a barionok és mezonok alkotórészeiként észlelhetők. Amint a müon és tauon is, a mezonok valamint a protonnál és a neutronnál nehezebb barionok is csak a világűrből ered nagyenergiájú kozmikus sugárzásban vagy a nagyon nagy energiájú gyorsítókban keltve figyelhetők meg.

## 10. Az alapvető kölcsönhatások

Az elemi részek tulajdonságait csak kölcsönhatásaik ismeretében tárgyalhatjuk. A természetben előforduló bonyolult, sokszínű folyamatok igencsak kifinomult kölcsönhatási módokról árulkodnak. Kiderült, hogy a világ jelenségeinek elképesztő gazdagsága végül is csupán néhány, valóban alapvetőnek tekinthető erő működésére vezethető vissza.

Eddigi ismereteink szerint négy alapvető kölcsönhatás létezik: gravitációs kölcsönhatás, elektromágneses kölcsönhatás, gyenge kölcsönhatás és erős kölcsönhatás. A gravitációs kölcsönhatást Newton fedezte fel, az általános tömegvonzás törvényének felel meg. Az elektromágneses kölcsönhatás legismertebb formái a két elektromosan töltött test között fellépő Coulomb erő és a mágnesek között ható erők. Mind a gravitációs, mind az elektromágneses erők nagyobb távolságokon hatnak. Ez a tömegvonzás esetén nyilvánvaló, minden tömeg vonz minden más tömeget. A gravitáció a kozmikus méreteket uraló kölcsönhatás.

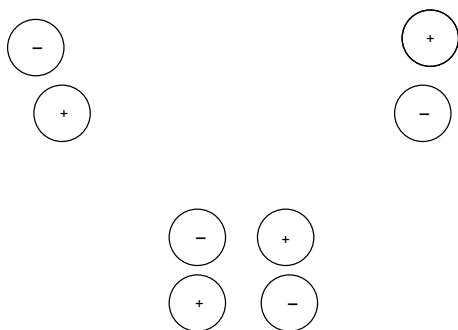
A gravitációs és Coulomb erőknek a kölcsönható részecskék távolságától való függése ugyanaz, az  $r$  távolságtól az  $1/r^2$  törvény szerint függ. Ha összehasonlítjuk a két proton között fellépő Coulomb és tömegvonzási erők nagyságát, azt kapjuk, hogy a Coulomb erő 37 nagyságrenddel erősebb. A természetben az anyagok általában elektromosan semlegesek, mert azonos mennyiségű pozitív és negatív töltést tartalmaznak. A Coulomb erő gyakorlatilag az atomok és molekulák belsejébe van zárva, mert az atommagok

pozitív és az elektronok negatív töltése leárnyékolják egymást. Ezért nagyobb távolságokat tekintve csak a tömegvonzás játszik meghatározó szerepet.

A gyenge és erős kölcsönhatások csak az atommagok illetve annál kisebb méretű rendszerek viselkedését határozzák meg. Az erős kölcsönhatás a kvarkok között ható erőnek felel meg. A nukleonok, azaz a protonok és neutronok között ható erők is az erős kölcsönhatás megnyilvánulásai, ezek az erők tartják össze az atommagot. Az atommagban uralkodó erők hatótávolsága nagyon kicsiny, nem haladja meg az atommag sugarát. A gyenge kölcsönhatás működésére szintén az atommagban zajló folyamatok utalnak. A gyenge kölcsönhatás, melynek hatótávolsága szintén nagyon rövid, felelős az atommag  $\beta$  bomlási folyamataiért.

## 10.1. Van der Waals erők

A köznapi életben észlelt kölcsönhatások szinte valamennyien az alapvetőnek vett gravitációs és elektromágneses kölcsönhatásokra vezethetők vissza. A bonyolultabb, atomok és molekulák közötti kölcsönhatásokat az alapvető erőnek tekinthető Coulomb erő segítségével származtathatjuk. Nézzük meg két egymástól távolabb eső semleges atom, mondjuk hidrogénatom viselkedését. Mivel mindketten elektromosan semlegesek, a proton és elektron össztöltése nulla, a két atom között ható erők nagyobb távolságokon elhanyagolhatóak, mivel a tasztítások és vonzások leárnyékolják egymást. Ha a két atom egymás közelében van, az egyik atom elektronja már érezhetően más távolságra kerülhet a másik atom elektronjától, mint annak protonjától, lásd a 10. ábrát. A közelség eredményeképpen, 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. A 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 egy gyenge, rövidhatótávú vonzó erő lép fel.

Az ilyen típusú, úgynevezett Van der Waals erők szerepet játszanak 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.

## 10.2. Az erők eredete és a belső szimmetriák

A korábban tárgyalt egyszerű, tér-időbeli szimmetriákon kívül bonyolultabb, úgynevezett belső szimmetriák is léteznek. Ezeknek eredete nem világos. Továbbá azt sem tudjuk, mi annak az oka, hogy az alapegyenletek éppen azokkal a belső szimmetriákkal szemben invariánsak.

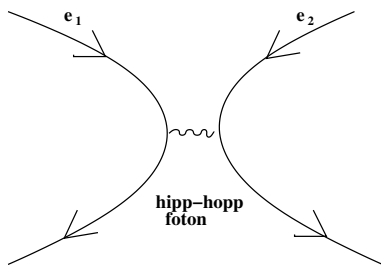
Vegyük példának a szabad elektronok viselkedését leíró Dirac egyenletet. Követeljük meg, hogy a Dirac-egyenlet alakja maradjon ugyanaz, más szóval a Dirac-egyenlet legyen invariáns, ha a benne szereplő hullámfüggvényen egy bizonyos belső szimmetriának megfelelő átalakítást végzünk. Kiderül, hogy ez az invariancia csak akkor állhat fenn, ha léteznek a fotonok, amelyeknek viselkedését pontosan a Maxwell

egyenletek írják le. Tehát a teljes elektrodinamika, a Coulomb kölcsönhatás alakja azzal kapcsolatos, hogy a Dirac-egyenlet invariáns marad, ha egy bizonyos szimmetriaműveletet végzünk rajta!

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

### 10.3. Kvantumtérelméletek

A kölcsönhatásokat a nagyobb méretek világában erők, erőterek léteével magyarázzuk. Az elektromosan töltött részecskék közötti erőket például az elektromos erőterrel írjuk le. Hasonlóképpen beszélhetünk például mágneses, gravitációs erőter létezéséről. Ha a kölcsönható részecskék csak nagyon rövid ideig vannak egymás közelében, azaz nagyon gyorsan mozognak egymáshoz képest, akkor az erőterrel való leírás nem kielégítő. A kölcsönhatási folyamatokat csak a kvantumtérelmélet tudja pontosan megfogalmazni.



11. ábra. Két nagyon gyors elektron, jelölésük  $e_1$  és  $e_2$ , közvetítő részecske segítségével kerül kölcsönhatásba egymással. Az energiát leadó elektron által átadott energiát és lendületet egy hipp-hopp foton juttatja el a másik elektronhoz.

Ha két részecske, mondjuk két elektron rugalmasan összeütközik, mindkét elektronnak megváltozik a sebessége. Ezt a folyamatot 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 egy közvetítő részecskének és az az energiát a másik elektronhoz 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 számítások az elektromágneses tér kvantumtérelméletének tárgyai, az elektromágneses jelenségek kvantumtérelmélete a kvantumelektrodinamika.

Ha az ütközés nem túl gyors, akkor a kvantumtérelméleti leírás nagyon jól közelíthető úgy, hogy a közvetítő részecskés leírás helyett az erőter fogalmát használjuk. Ezzel a közvetítő részecskés leírást megadó kvantumtérelméletet a klasszikus fizikából jól ismert erőteres leírás váltja fel. Az atomok viselkedését is erőterrel, az atommag és az elektronok között ható Coulomb erővel magyarázhatjuk meg. A kvantumelektrodinamikai hatások csak nagyon kis járulékot adnak a hidrogénatom energiaszintjeihez. Ezek a számolt járulékok tíz értékes jegyig egyeznek a kísérleti értékekkel. Ez az egyezés az elméleti fizika egyik csúcsteljesítménye.

Az elektromágneses kölcsönhatást közvetítő részecskék természetüket tekintve hipp-hopp részecskék. Ilyenek létéről az állapot élettartamának és energiabizonytalanságának kapcsolatát tárgyaló határozatlansági összefüggést ismertetve már beszéltünk. A két elektron közötti kölcsönhatás közvetítője a hipp-hopp foton. Az általunk jól ismert foton, amit fény formájában látunk, valódi részecske, valódi foton. A hipp-hopp

részecske, így a hipp-hopp foton energiája és sebessége között nem teljesül az energia és lendület megmaradási tételek által megkövetelt összefüggés. Amint a hipp-hopp részecske elnyelődik, a megmaradási tételek sérülése megszűnik.

A megmaradási tételek ilyen korlátozott időtartamon belüli megsérülését a kvantummechanika már említett határozatlansági összefüggése, a folyamat időtartama és energiabizonytalansága közötti kapcsolat szabályozza. Eszerint minél nagyobb a keletkezett hipp-hopp részecske energiája, annál rövidebb kell, hogy legyen az élettartama. Eszerint minél kisebb a hipp-hopp részecske tömege, annál nagyobb lehet az általa közvetített erő hatótávja. Ugyanis a nagy tömegű hipp-hopp részecske felbukkanásához nagyobb energia kell, ezért az ilyen hipp-hopp részecskék csak rövidebb ideig létezhetnek. Ezalatt a kis idő alatt rövidebb utat futhatnak be, ezért az általuk közvetített erő is rövidebb hatótávú.

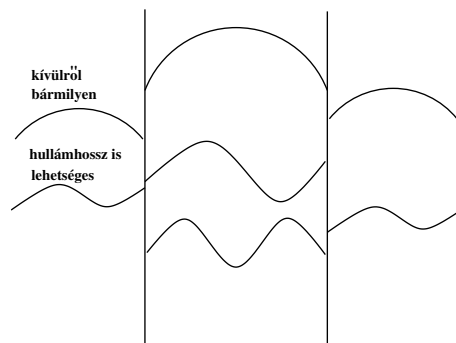
Ha a közvetítő részecske tömege nulla, az erő végtelen hatótávú. Ekkor a nagyon kis energiájú részecske hosszabb ideig is létezhet. Ezalatt fénysebességgel futva messze is eljuthat. Mivel a foton tömege nulla, az elektromágneses kölcsönhatás hatótávja végtelen.

## 10.4. Hipp-hopp részecske-ellenrészecske párok

Töltött részecske, például hipp-hopp elektron önmagában nem keletkezhet. Ekkor ugyanis megsérülne a töltésmegmaradás törvénye, amely semmilyen körülmények között, rövid időre sem sérülhet meg. De ellenrészecskéjével párban bármilyen hipp-hopp részecske kipattanhat a térből. Az energiamegmaradás tételén kívül ugyanis más tétel ekkor nem sérül meg. Például a hipp-hopp elektron - pozitron, proton - ellenproton, stb. párok ezért mindig, mindenütt létezhetnek és befolyásolják az egyébként üresnek tekinthető tér tulajdonságait. A hipp-hopp fotonok tényleges létezését a Casimir jelenség meggyőzően bizonyítja.

## 10.5. A Casimir jelenség

Képzeljünk el két párhuzamos fémlamezt. Az elektromosságtanból ismert, hogy csak olyan elektromágneses tér létezhet a két fémlemez között, amely eltűnik a lemezeken. A teret előállító hullámoknak ezért nem lehet akármilyen hullámhossza, a lemezeken a hullám amplitudójának nullának kell lennie. Ezért a legnagyobb előforduló hullámhossz a lemezek közötti távolság kétszerese, ekkor éppen egy félhullámhossz van a lemezek között. A többi megengedett hullámhossz ennek a fele, harmada, negyede, stb, lásd a 12. ábrát.



12. ábra. A Casimir-effektus. Az elektromosságtanból ismert, hogy két fémlemez között csak olyan elektromágneses tér létezhet, amely eltűnik a lemezeken. Ezért a legnagyobb előforduló hullámhossz a lemezek közötti távolság kétszerese. A többi megengedett hullámhossz ennek a fele, harmada, negyede, stb. Mivel a kívül keletkező hipp-hopp fotonok hullámosszaira nincs korlátozás, a lemezeknek kívülről több hullám ütközik és ezért a lemezeket ezek nyomóereje összefelé nyomja.

A lemezekre eső fotonok a lemezről visszaverődnek és eközben a lendület megmaradásának értelmében lendületet adnak át a lemeznek, azaz erőt gyakorolnak rá. Az ilyen jelenség jól ismert, a szabadon lebegő tükör az általa visszavert fény hatására elmozdul.

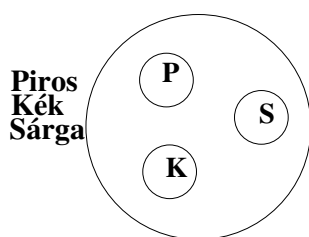
A hipp-hopp fotonok hullámként ugyanúgy viselkednek, mint a tényleges fotonok. A teljesen üres térbe tett két párhuzamos lemez megváltoztatja a térben kipattanó és eltűnő hipp-hopp fotonok viselkedését, ugyanis a két lemez között csak a fent megadott hullámhosszú fotonok szerepelhetnek. A lemezeken kívül lévő térben a hipp-hopp fotonok hullámhosszára nincs hasonló kikötés, ezért a lemezeknek kívülről több hipp-hopp foton ütközik, mint belülről. Az eredmény a lemezeket összefelé nyomó erő fellépte. Ezt az erőt kísérletileg is kimutatták, az értéke pont akkora, amekkorát Casimir, a jelenség felismerője kvantumelektrodinamikai modelljével előre megjósolt.

## 10.6. Az erős kölcsönhatás

Az erős kölcsönhatás kvantumtérelméletének modelljéül a kvantumelektrodinamika szolgált. Az eredeti, alapvető erők a kvarkok között hatnak. Ennek az erőnek a nagyságát a kvarkoknak az 'erős' töltése, határozza meg. Az erős töltést színtöltésnek szokás nevezni. A kvarkok kölcsönhatásait leíró kvantumtérelmélet a kvantumszíndinamika. A szín kifejezés itt természetesen nem igazi színekre vonatkozik, ennek a jelzőnek a használata csak jelképes.

Hasonlóan a Coulomb erőhöz, a két színtöltés között ható erő a színtöltések szorzatával arányos. A leptonok színtöltése nulla, ilyen erők közöttük nem hatnak. A kvarkok között ható, színesnek nevezett erők sokkal erősebbek, mint az ugyanazon kvarkok között fellépő, elektromos töltésüknek megfelelő Coulomb erő.

Az egyfajta elektromos töltéssel szemben, amin a pozitív töltést és ellentétét, a negatív töltést értjük, háromféle színesnek nevezett töltés létezik. Ezt eredetileg azért tételezték fel, mert fedeztek fel olyan bariónokat, amelyek három azonos kvarkból állnak és mindhárom kvark azonos állapotú. Mivel a kvarkok fermionok, ez tiltott. Ezért tételezték fel, hogy a kvarkoknak kell még valamilyen addig ismeretlen tulajdonságának lenni, amelyben aztán különbözhetnek. Ez a tulajdonság a szín, ezeknek a háromféle értékét önkényesen pirosnak (P), kéknek (K) és zöldnek (Z) nevezték el. Az elnevezés eredete az, hogy a bariónokban, így a protonban illetve neutronban három, egymástól különböző színtöltésű kvark fordul elő, úgy, hogy a barion ill. a proton és a neutron teljes színes töltése nulla, lásd a 13. ábrát. Utalva arra, hogy a fénytanban is a három alapszín adja ki a színtelen fényt, nevezték el a színes töltéseket a fentiek szerint.



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

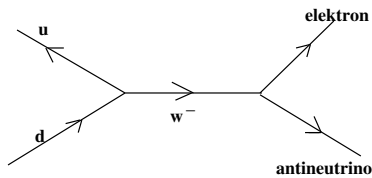
A kvarkok közötti kölcsönhatás eredete a tömeg nélküli gluonok cseréjével értelmezhető. A gluonok maguk is lehetnek színesek, azaz a kölcsönhatás közben megváltozhat a kvarkok színe is. A két színes kvark között a vonzóerő a távolságuk növekedésével növekszik. A kvark-kvark közötti erő ilyenfajta távolságfüggése durván úgy írható le, mintha a két kvarkot egy rugó tartaná össze. Mennél jobban feszítjük a rugót, annál erősebb a visszahúzó erő. Így a kvark nem szakadhat ki a protonból vagy neutronból, ezért nem láthatjuk szabadon.

Az atommag protonjaira és neutronjaira ható erők, amelyeket magerőknek neveznek, nem tekinthetők alapvető erőknek. A magerők viselkedésükben a semleges atomok között ható Van der Waals erőkhöz

hasonlítanak. Csak akkor lépnek működésbe, ha a protonok, neutronok annyira közel van egymáshoz, hogy az összetevő kvarkok jelentősebben érezhetik a másik nukleon kvarkjainak térbeli eloszlását. Ezért a magerők csak származtatott erők, az igazi erős kölcsönhatás a kvarkok között ható, gluonok közvetítette erő.

## 10.7. A gyenge és elektrogyenge kölcsönhatás

A legismertebb gyenge kölcsönhatás vezérelte folyamat az atommagok béta bomlása. Ennek során az atommag egy neutronja protonná bomlik, miközben egy elektron és a neutrínó az ellenrészecskéje, ellenneutrínó keletkezik, lásd a 14. ábrát.



14. ábra. Neutron protonná való bomlásakor a neutron belsejében egy  $d$  kvark  $u$  kvarkká alakul. Az átalakulás során egy hipp-hopp  $W^-$  bozon keletkezik, ami elektronná és ellenneutrínóvá bomlik el.

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

Alaposabb tanulmányozás után kiderült, hogy az 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 van egymáshoz, a kölcsönhatási folyamat milyenségét a közvetítő részecske tömege 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. A foton 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. elektrogyenge 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 már említett elemi részeket, a skalár részecskéket használják 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. Az elektromos tér a potenciálkülönbségekből adódik. Ha az egész világegyetem 220 voltos potenciálon lenne, senki sem venné észre a létezését, ez a potenciál egyszerűen az üres teret, a vákuumot jellemezné. Hasonló módon nem vesszük észre a skalár tereket sem.

A skalár terek betöltik a mindenséget és befolyásolják az elemi részek tulajdonságait. Az elektrogyenge kölcsönhatás elméletének skalár részecskéi a Higgs részecskék. Háromféle is kell hogy legyen belőlük, pozitív, negatív és semleges elektromos töltésű változatai vannak. A Higgs részecskék felfedezése hamarosan várható, az már bizonyos, hogy a tömege a  $W$  és  $Z$  részecskék tömegénél is nagyobb. A  $W$  és a  $Z$  részecskéknek pedig pont azért nagy a tömege, mert kölcsönhatnak a Higgs részecskéknek megfelelő terekkel, a foton azért tömeg nélküli, mert nincs ilyen kölcsönhatásban. A világegyetem fejlődésének legelején valamennyi részecske tömeg nélküli volt és a részecskék, mint az elektron is, a világegyetem tágulásának egy igen kezdeti szakaszában, a skalár terekkel való kölcsönhatásban nyertek tömeget.

## 10.8. A nagy egyesített elméletekről

A nagy egyesített elméletek kiindulópontja az, hogy az elektromágneses és gyenge valamint a kvantumszándinamikai elméletek szerkezete nagyon hasonló. Lehetséges olyan modellt készíteni, amelyben az elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatási folyamatok egyetlen alapvető kölcsönhatásként tárgyalhatók. Az ilyen elméletek a kvarkokat és a leptonokat is egyetlen részecske különböző változataiként fogja fel és egy új jelenséget, a kvark-lepton átmenetek létezését is megjósolja. Két kvark kölcsönhatásának eredményeképpen belőlük egy lepton és egy ellenkvark keletkezhet. 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 elektromágneses és gyenge egyesítéshez szükséges skalár tér mellett feltételezi két újabb skalár tér létezését is.

Egy ilyen leírás csak rendkívül kicsiny, körülbelül  $10^{-29}$  centiméteres méreteken belül érvényes. Azaz akkor alkalmazható, ha a kölcsönható részecskék ilyen vagy ennél kisebb távolságra vannak egymástól. A proton bomlása akkor következhet be, ha a protonon belül két kvark ennyire közel kerül egymáshoz. 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.

Az, hogy a proton bomlását mindeddig nem sikerült megfigyelni, nem jelenti, hogy a nagy egyesített elmélet alapfeltevése hibás. Lehetséges az is, hogy a proton ugyan elbomolhat, de annyira kicsiny a bomlás valószínűsége, hogy a jelenlegi mérőberendezések alkalmatlanok kimutatására. A proton bomlásán kívül más, az egyesített elmélet által jósolt eredmény a jelen körülmények között nem ellenőrizhető. Az ilyen vizsgálatokhoz a korai, az ősrobbanást követő  $10^{-40} - 10^{-35}$  másodpercben létező,  $10^{-30} - 10^{-25}$  cm átmérőjű világegyetem az egyetlen alkalmas laboratórium. Ezért az egyesített elméletek igazi próbáját a világegyetem kezdeti fejlődését leíró modellekből kapott eredmények és a kísérleti adatok összevetések adhatják.

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

## 10.9. A kvantumgravitáció

Amint az elemi részek világával foglalkozó részben tárgyaltuk, a térből nagyon kis időtartamra részecske-ellenrészecske párok pattanhatnak ki, amelyek nagyon gyorsan el is nyelődnek. Ezeknek a hipp-hopp részecskepároknak a létrejöttét a kvantummechanika törvényei szabályozzák. A kvantummechanika időben változatlan téridőben van megfogalmazva. Ha a kipattanó részecskék létezésének időtartama nagyon kicsiny, a kipattanó részecskék tömege igen nagy lehet. Igen nagy tömegek viszont megváltoztathatják maguk körül a tér és az idő szerkezetét. Viszont az általános relativitáselmélet feltételezi, hogy a tömegek nagysága nagyon kicsiny időszakokon belül nem változik nagyon gyorsan. Ennélfogva nagyon kicsiny időtartamokon és távolságokon belül a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet feltevései kizárják egymást. Itt mindkét elméleti leírás, alapfogalmaival, a térrel és az idővel együtt alkalmazhatatlanná válnak.

Azt az időtartamot és távolságot, amelyeknél kisebbek már nem értelmezhetők, a következőképpen határozhatjuk meg. Egy  $M$  tömegű test kvantumos természetét, mint a 8.1 szakaszban tárgyaltuk, a  $\lambda = h/Mv$  DeBroglie hullámhosszal jellemezhetjük, ahol  $h$  a Planck állandó és  $v$  a test sebessége.  $v$ -re felső határt a  $c$  fénysebesség ad, ezért  $\lambda$  lehető legkisebb értéke az  $M$  tömegre  $\lambda_{kv} = h/Mc$ . Ugyanakkor, ahogyan a 5.4 szakaszban megadtuk, az  $M$  tömegű test Schwarzschild sugara  $r_c = 2GM/c^2$ , amely a tömeg térre gyakorolt hatásainak 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, amelyekkel egyesíteni lehet a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet nyújtotta leírásokat. Ezt az elméletet, amit kvantumgravitációnak neveznek, eddig még nem dolgozták ki. A kvantumgravitációs elmélet hiányában csak a másodperc egy igen kicsiny töredékétől kezdve, a Planck idő eltelte után van szilárdabb alapokon nyugvó elméleti modellünk arra, mi történt kezdetben.

## 10.10. A kölcsönhatások mértani eredetéről

Az általános relativitás elmélete szerint a gravitáció eredetét azzal magyarázhatjuk, hogy a tömegek elgörbítik a téridőt. A gravitáció mint a téridő görbületének megnyilvánulása az jelenti, hogy a gravitációs erőt a téridő mértánának viselkedésére vezethetjük vissza. Ezt úgy szokás megfogalmazni, hogy a tömegvonzási erő mértani eredetű. Felmerül az a kérdés, mi az eredete a másik három alapvető kölcsönhatásnak, az elektromágneses, az erős és a gyenge kölcsönhatásnak.

## 10.11. Rejtőző dimenziók, Kaluza-Klein modell

A gondolat, hogy a térnek esetleg háromnál több kiterjedése létezhet, nem új. Amikor Einstein megalkotta az általános relativitáselméletet, még csak két kölcsönhatást, a tömegvonzási és az elektromágnesest kölcsönhatást ismerték. Nemsokkal azután, hogy Einstein elmélete megszületett, Kaluza megmutatta, hogy az elektromágnesesség is leírható a mértan segítségével. Az elektromágnesesség az ötkiterjedésű téridő görbületével kapcsolható 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, illetve ne 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 léteznek. Ahogy egy drót messziről egy vonal, de közelről látjuk, van vastagsága, a negyedik dimenziót Klein úgy szemlélteti, hogy ami távolról nézve a vonal egy A pontja, közelről az egy egy kör kerülete, mely a nagyon vékony csövet kerüli meg. Vagy ami a háromkiterjedésű térben egy pont, közelről egy apró kör a negyedik dimenzióban. A kör kerülete annyira kicsiny, hogy az észrevehetetlenségén nem csodálkozhatunk.

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. A nyolcvanas években viszont felmerült az ötlet, hogy mind a négy kölcsönhatás mértani eredetű. Kiderült, hogy Kaluza módszerét követve a négy alapvető kölcsönhatás mértani eredetének levezetéséhez az 1 idő 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 a hét nem mutatkozó térkiterjedés.

A fenti tizenegy dimenziós modell egyik nehézsége az, hogy a részecske spinjét nem kezeli a megfelelő módon. 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.

## 10.12. Húrok, szuperhúrok

A kvantumelektrodinamika és más kvantumtérelméletek matematikai megfogalmazása egyaránt tartalmaz matematikailag bizonytalan elemeket. Végtelenül nagy kifejezések jelennek meg a megfogalmazások-



ban, amelyek kételyt ébresztenek a modellek 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 arra utal, hogy a modellek valamilyen alapvető dolgot tökéletlenül tartalmaznak.

Ezek a bizonytalanságok végül is az elemi részecskék pontszerűként való kezelésére vezethetők vissza. A hetvenes években sikerült kimutatni, ha a részecskék nem pontok, hanem végtelenül vékony szálacskák, húrok, a kvantumtérelméletek fenti matematikai nehézségei eltűnnek. A húrok kb. Plank hossznyi hosszúak. A különböző elemi részeket, a kvarkokat, leptonokat és másokat, mint húrok rezgéseit és egyéb mozgásait értelmezhetjük. Továbbá az elektromágneses, a gyenge és az erős kölcsönhatási folyamatok egyaránt jól leírhatók. A húrelmélet lehetőséget ad arra is, hogy kvantumgravitációs elméletet készíthessünk. Ugyanakkor a húrok többféle bonyolultabb mozgást is végezhetnek és ezek tárgyalása újabb nehézségekre vezetett.

Kiderült azonban, ha a részecskék spinjét megfelelő módon építjük be az elméletbe, úgy, hogy fellépjen a fermion és bozon állapotok szimmetrikus volta, az ún. szuperszimmetria, akkor az ilyen húrok leírása már nem jár semmiféle nehézséggel, a húrok 'rosszul viselkedő mozgásai' kezelhetőekké válnak. A szuperszimmetriát tartalmazó elméletek természetes módon magukba foglalják a gravitáció létezését is. A szuperszimmetrikus húrelméletet szuperhúr elméletnek nevezik.

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

## 11. Rend és szabadság a világban

Az előzőekből láthattuk, hogy a világ csupán néhány eleminek tekinthető részecskéiből épül fel és a részecskék között fellépő kölcsönhatások is nagyon egyszerűek. Ha ennyire egyszerűek az építőkövek és 'vakok' a kölcsönhatások, hogyan jöhetett létre az a kifinomult rend és összetettség, amely a világunkat jellemzi? Honnan ered a szervezethez, miért éppen ilyen rend alakult ki, amelyet láthatunk? Volt-e ebben a világnak szabadsága?

A tudomány azért lehetséges, mert a természet rendezett egységet alkot és megfogalmazhatók a természet jelenségeit leíró törvények. Ezek a törvények írják le a bolygók mozgását, a Föld forgását, így az évszakok és a napszakok változását. Ezeket tekintve a törvények pontosságát, szigorát, kérlelhetetlenségét tapasztalhatjuk. Ugyanakkor észleljük azt is, hogy a törvényes szabályozottság sok jelenségre mintha nem vonatkozna. Az időjárás szeszélyei, a földrengések kirobbanásai stb. a véletlen megnyilvánulásaira utalnak. Hogyan fér meg egymás mellett a szükségszerűség és a véletlen?

A kérdés tisztázásához meg kell vizsgálnunk, hogy a szigorú törvények vajon mindenre vonatkoznak-e vagy vannak-e olyan területei a természetnek, ahol a törvények szabta ok-okozati lánc nem teljesen kötött. Először a érzékelhető világot leíró törvényekkel foglalkozunk.

### 11.1. Az érzékelhető világ meghatározottsága

A érzékelhető világ (idegen szóval makrovilág) az érzékszerveinkkel észlelhető világot foglalja magába. Ebbe beleértjük az érzékszerveink kiterjesztéséül szolgáló egyes műszerekkel, például a fénymikroszkóppal és a távcsövekkel tanulmányozható világot is. A méreteket tekintve felülről nincs korlát, alsó határa a századmikron lehet. Ezt a tartományt a hagyományos természettan írja le. Ennek alapja Newton három törvénye. A századmikronnál kisebb méretű világ, a kisvilág dolgainak, a molekuláknak és a nála kisebb

rendszereknek a leírása már a kvantummechanika tárgya. A kisvilág vizsgálatakor, mint az előző fejezetben tárgyaltuk, a hagyományos fogalmak jó része használhatatlanná válik, és a szemléletes képek alkalmazása nem segít az egyes jelenségek, rendszerek megértésében.

A hagyományos fizikai feladat megoldásának első állomása a rendszer viselkedését megadó egyenlet felírása, amely 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 mozgásának leírásához ismernünk kell a Nap és a bolygók tömegét és a tömegvonzási erőt. Továbbá meg kell oldanunk a felírt mozgásegyenletet is.

A mozgásegyenlet változást ír le, megadja, hogy időről- időre hogyan változik a rendszer. Ha tudni akarom, hogy egy adott időpontban ténylegesen milyen állapotban van a rendszer, ehhez valamilyen kezdeti időpillanatban ismernem kell a rendszer állapotát. Ismerve 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 a legközelebbi teljes napfogyatkozás, mely vonal mentén lesz majd a leghosszabb a teljes fedés, hol, mettől meddig fog majd tartani. Mivel a mozgásegyenletek a megoldása egyértelmű, így a jelen állapotból kifejlődő jövő csak egyféle lehet. Ahogyan a jelen egyértelműen meghatározza a jövőt, ugyanúgy a múlt sem enged másféle jelent, mint amely a rendszert most leírja. A rendszer időbeli viselkedése rögzített. A meghatározottság teljes, a kötöttséget semmi sem oldhatja. Nem beszélhetünk semmiféle szabadságról, a rendszer sorsa meg van 'írva'. Az ilyen rendszer viselkedését idegen szóval determinálnak, magát a rendszert determinisztikusnak nevezzük.

A felvilágosodás korának gondolkodására a megszabottság felismerése óriási hatást gyakorolt. Laplace az egyes rendszerek rögzített viselkedéséből a teljes világmindenség meghatározott voltára következtetett. A világ sorsa szerinte rögzített. Annyira, hogy a jövőjét akár ki is lehetne számolni. Laplace feltételezte, hogy 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, a közöttük ható erőket, akkor fel tudja írni a világ fejlődését megadó egyenletet. Ha még ismeri a világ állapotát egy adott pillanatban, - ez valamennyi részecske helyének és sebességének az ismeretét jelenti -, ebből a kezdeti állapotból kiindulva az egymást követő pillanatokon át 'lépegetve' ki tudja számolni a világ jövőjét. Ez azt mutatja, hogy a világ jövője előre le van rögzítve.

A 19. század természettanának meghatározó jelentőségű fejleménye az elektrodinamika megszületése. Az elektrodinamika alaptörvényei, a Maxwell egyenletek szintén időben pontosan meghatározott jelenségeket írnak le. Felismerésük tovább erősítette a világot megszabottnak felfogó szemléletet.

## 11.2. Káosz, determinisztikus káosz

A meghatározott világban nincs véletlen. A mindennapi élet dolgaiban, ez a természettan szóhasználatát tekintve az érzékelhető világhoz tartozik, mégis nagyon sok mindent véletlennek nevezünk. Véletlenek a kockadobás eredményei, ezek a valószínűségszámítás szigorú matematika törvényeinek iskolapéldái. Mivel a kockavetés az érzékelhető világ folyamata, meghatározott. Hogyan fér össze ebben az esetben a szűkszerűség és a véletlen?

A kockavetés valóban megszabott folyamat. Ha teljes pontossággal ismernénk az eldobás körülményeit, milyen sebességgel, merre, mekkora perdületet adva dobtuk el, milyen a légellenállás, milyen a padló állapota ahová a kocka zuhan, akkor pontosan ki tudnánk számítani, hányast dobunk. A véletlenszerűség a következőkre vezethető vissza. Egyrészt a kockavetés kimenetelét nagyon sok tényező befolyásolja. Ez még nem lenne önmagában gond. Ha az egyes tényezőktől való függés sima lenne, a végeredmény nem látszana véletlennek. A folyamat kimenetele azonban nagyon erősen függhet az egyes tényezőktől. A

kezdeti feltételek igen apró változása már arra vezethet, hogy más lesz a végeredmény. Nagyon kis változásokat már nem tudunk beállítani, hétköznapi eszközeinkkel ellenőrizni. Ennek az az eredménye, hogy a kockadobás hat eredménye egyforma valószínűségű.



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

Ha a rendszer viselkedése nagyon érzékeny lehet a kezdeti feltételekre, akkor azt mondjuk, hogy a rendszer viselkedése kaotikus, lásd a 15. ábrát. Ez a kifejezés fedi a szó hétköznapi értelmezést, ugyanis az ilyen rendszer nem tartható kézben, nem számítható ki. Követhetetlen módon viselkedik. A kockavetés, amellet, hogy meghatározott, egyúttal kaotikus folyamat is. Az ilyen viselkedést determinisztikus káosznak nevezzük. A érzékelhető világ véletlen folyamatai a determinisztikus káosz jelentekezései. Az érzékszerveinkkel felfogható világban nincs igazi véletlen, csak a determinisztikus káosz jeleit tapasztaljuk.

A káosz a kezdeti feltételek bizonyos tartományában, tartományaiban meghatározó jelentőségű. Ennek szemléltetésére szolgál a pillangó hatás. Mint ismeretes, az északi féltekén az uralkodó szél nyugatról kelet felé fúj. A nevezetes példa szerint a Peking felett repkedő pillangó szárnycsapásainak hatása annyira fel erősödhet, hogy két-három hét múlva az USA nyugati partjain forgószél söpör végig. A forgószélért nyilván nem a pillangó, hanem a légkörben felhalmozódott energia a felelős. Az azonban, hogy a forgószél pont milyen utat követ, már nagyon kis dolgoktól is függhet. A kaotikus viselkedést mutató tartományokban a rendszer jövőjének kiszámítása nagyon nehéz, mivel bizonyos kezdőértékeknél a jövő már teljesen véletlen.

### 11.3. Kiszámíthatatlanság

A káosz a kezdeti feltételek bizonyos tartományában, tartományaiban meghatározó jelentőségű. Ezekben a tartományokban a rendszer jövőjének kiszámítása igen nehéz. Bizonyos kezdőértékeknél a rendszer már teljesen véletlen módon viselkedhet. A káoszt jellemző tartomány kiterjedése az egyenletektől függően változik.

A kaotikusan viselkedő rendszer jövőjének leírásához a kezdőértéket teljes pontossággal ismernünk kell. Ha a kezdeti értéket nem ismerjük teljesen pontosan, akkor a kezdeti bizonytalanság egy idő után arra vezet, hogy a jövő ismerete kétségesse válik. Bármilyen kis bizonytalanság egy idő után pontatlanná teszi a jövő ismeretét. A bizonytalanság hatása exponenciális mértékben nagyítódik fel.

A teljes pontosság általános esetben egy szám végtelen sok jegyének ismeretét követeli meg. A kezdeti érték nyugodtan lehet irracionális szám, ekkor a megkövetelt teljesen pontos számoláshoz valamennyi számjeggyel számolnunk kellene. Semennyit sem hanyagolhatnánk el. Egy irracionális számot teljes pontossággal csak végtelen sok számjegyének ismeretében lehet megadni. A végtelen sok számjeggyel való, kerekítések nélküli, teljesen pontos számolás képtelenség. Ezért a világ kiszámíthatatlan, mert emiatt elméletileg sem végezhetünk teljesen pontos számításokat. Bármilyen nagy a számítógép teljesítménye, a digitális elven működő berendezések nem szolgáltathatnak teljesen pontos eredményeket. Ennélfogva Laplace démona már a newtoni világ jövőjét sem számíthatja ki. A világ jövője emiatt megismerhetetlen. A jövőt lejátszani képes módszerek mind tökéletlenek. Azt is mondhatjuk, a világ jövőjét megfelelő módon lejátszani képes rendszer csak egyetlen egy van, ez pedig a világ maga.

A newtoni fizika szemléletét követve, bár a jövő megismerhetetlen, kiszámíthatatlan, és a lejátszására sincs megfelelő módszer, attól még egyértelműen létezik, a jelen magában hordozza. A világ még mindig meghatározott. A kvantummechanika törvényei ezt, a meghatározott jövő létezését is megkérdőjelezzik.

## **11.4. A kvantummechanikai határozatlanságok és a jövő nyitottsága**

Mint már tárgyaltuk, a mikrofizika világát szabályozó törvények jóval gazdagabb jelenségekört írnak le, mint az érzékelhető világot kormányzó törvények. Számos olyan jelenséget, mint például az alagúthatás is megengednek, amelyeknek az érzékelhető világban nincs megfelelőjük. A kisvilágot leíró kvantummechanika törvényei az atomoknál nagyobb rendszerekre, molekulákra, sőt még az óriásmolekulákra, így a DNS-re is érvényesek. A kvantummechanikában az érzékelhető világot jellemző szigorú ok-okozati kapcsolat csak a hullámfüggvényre létezik, a mérhető, tanulmányozható jelenségekre viszont már nem teljesül. Csak valószínűségeket számíthatunk, az, hogy a molekulával végül is miért pontosan az történik, az igazi véletlen, nem vezethető vissza valamilyen előzményre. Például a radioaktív atommagról csak azt tudjuk, hogy mekkora a felezési idő, de azt, hogy egy adott radioaktív atommag pontosan mikor bomlik el, nem rögzített. A kvantummechanika értelmezése szerint nem léteznek ún. rejtett paraméterek, amiket még nem ismerünk, s amik meghatározzák a ténylegesen történeteket. Azaz a kisvilágot jellemző megfigyelhető mennyiségek értékei nem rögzíthetők le előre. Ha a kisvilág hathat az érzékelhető világra, akkor ennek megnyilvánulása nem rögzíthetők előre. Ez valamennyire oldhatja az érzékelhető világ meghatározottságát.

## **11.5. Makroszkopikus rendszerek, nanoelektronika**

Ha egyszerre azonban nagyon sok atomot, molekulát tekintek, a viselkedésük statisztikusan már determinisztikus, azaz ok-okozati kapcsolattal értelmezhető. A rendszer ekkor úgy viselkedik, mintha eleve a newton törvények által leírható rendszer lenne, amelyben az elemek nagyon nagy száma miatt csak statisztikus módszereket alkalmazhatunk. Ekkor az az egyéni esetekre vonatkozó bizonytalanságok kiátlagolódnak. Nagyszámú radioaktív atommagra vagy elektronra már a kvantummechanikai viselkedés statisztikusan meghatározottá válik. Ha pl. egymillió radioaktív atommagunk van, azt ugyan nem mondhatjuk meg, hogy az egyes atommagok éppen mikor bomlanak el, de abban biztosak lehetünk, hogy a felezési időt elérve kb. félmillió atommag már elbomlott. Ezért működik például megbízhatóan a CD, mert ugyan az egyes elektronok mozgása nem jósolható meg, de a nagyon sok elektron összessége már meghatározottan viselkedik.

A tranzisztor is a hagyományos módon leírható rendszer, mert elég nagyméretű és a folyamatokban nagyon sok elektron vesz részt. Ennélfogva a kvantummechanikai hatások kiátlagolódnak. A tranzisztorok mérete azonban nem csökkenthető a végtelenségig. Ezért a mikroelektronika ma még szédületes ütemű fejlődése rövidesen, pár éven belül kifulladás, mert elérjük a tíz nanométer jellemezte elvi korlátot, ahol a kvantumos hatások már nem átlagolódnak ki. A még gyorsabb működést lehetővé tevő nanoelektronika eszközei már közvetlenül a kvantummechanika szabályozta új működési elvekre épülhetnek majd fel. Hogy pont miképpen, egyelőre még nem világos.

## **11.6. Az egyes rendszerek szabadságáról**

A nagy számú részecskére való kiátlagolódás nem feltétlen adott valamennyi rendszerre. A kaotikusan viselkedő rendszerekben előfordulhat, hogy az atomi, molekuláris méretekben véletlen jelenségek érzékelhető méretű változásokká nagyíthatódnak. Ezen kierősödések lehetősége nem zárható ki. A köznap életből gondoljunk az úgynevezett 'egy hajszálon múlt az egész' jellegű történésekre. Kérdés az, hogy a természet rendszereit vizsgálva mely rendszerekben mutatkozhat meg az igazi, a kisvilágból feljövő véletlen hatása. Az ilyen rendszerek nem tekinthetők teljesen kötötteknek, a jövőjük nem teljesen meghatározott. A véletlen elemek megjelenése a szabadság lehetőségét hordozza a rendszer számára.

Azok a rendszerek, amelyek nagyobb méretűek, mert nagyon sok részecskéből, molekulából épülnek fel és a rendszer viselkedését meghatározó vezérlő elemek durva felépítésűek, meghatározottaknak minősíthetők. A newtoni törvények írják le őket, a vezérlő elemek durvasága, érzéketlensége pedig kizárja, hogy a kisvilág véletlenjei érdemben befolyásolhassák a rendszert. A szikla, az időjárás jelenségei, a porszem

sodródása, a víz áramlása, a bolygók keringése stb. mind nagyon jó közelítésben meghatározott jelenségek. Ha véletlen mutatkozik mozgásukban, általában az csak a determinisztikus káosz miatt van úgy.

A természet érzékelhető méretű rendszerei közül az élők sorsa az, amelyek az élő kifinomult szerkezete miatt nem lehet teljesen kötött. Valamennyi élő genetikai állományának kialakulásakor megjelenik az igazi, a kisvilágra jellemző véletlen elem. Példának nézzük az ivarsejtek génállományának kialakulását. A férfi és női ivarsejtekbe véletlenszerűen kerülnek be a szülőktől örökölt gének. Éppen melyik, abba a molekuláris szintű, kvantummechanikai véletlennek is beleszólhatnak. A magzat jövőbeni sorsában a DNS-állományának kialakulásakor történtek meghatározó fontosságúak, azaz a kezdeti véletlen folyamatok eredménye érzékelhető méretűvé erősödik fel. Ez azt jelenti, hogy az élővilágban benne van a szabadság lehetősége. Nem szükségszerűen lett minden olyan, amilyené alakult.

Az élő rendszer élete során is jelentkehetnek a sorsukat meghatározó véletlen elemek. Az állat egyes cselekedeteit idegrendszere vezérli. Az állatok viselkedésében az idegrendszeri szabályozottság miatt nagyobb lehet a szabadság, mint a növényekben. Mennél összetettebb, érzékenyebb az állat idegrendszere, annál nagyobb esély lehet arra, hogy az idegsejtek működését meghatározó molekuláris folyamatok véletlenjei szerephez juthassanak. Minél kifinomultabb az agyműködés, annál kevésbé kötött az állat viselkedése, annál nagyobb az állat szabadsága.

A legnagyobb szabadsággal ezért az ember rendelkezik. Az ember a földi természet legszabadabb lénye. Nyilván ez az egészséges emberre vonatkozik, akinek viselkedése nehezen jósolható meg. Az idős ember viselkedése, ha az agyának képességei lecsökkentek, egyre inkább meghatározott. A rokonság nagyon sokszor jól ismeri, mire mit fog az öreg mondani, mikor mit fog csinálni.

Tehát a világmindenség bonyolult rendszereinek kialakulásában, elsősorban az élő rendszerek keletkezésében és működésében a véletlen elemek megjelenésétől nem tekinthetünk el. Ezért állíthatjuk, a világ nem szükségképpen vált olyanná, amilyennek ismerjük, sorsa másként is alakulhatott volna. Ugyanúgy, jövője sem lehet előre meghatározott. A jövő nemhogy megismerhetetlen, ráadásul határozatlan is. A jelen nem rögzítheti a jövőt, a kisméretű bizonytalanságok minden pillanatban magukban hordozzák a különböző jövőbeni forgatókönyvek megvalósulásának lehetőségét.

## **11.7. Az összetevőkre visszavezető gondolkodás sikerei és korlátai**

A meghatározottság a világ egészére vonatkozik, egyébként pedig csak elméletileg fontos fogalom. A világ egyes rendszereinek működését azonban ténylegesen is vizsgálhatjuk. Most azt elemezzük, miként érthető meg egy rendszer viselkedése, hogyan írhatjuk le keletkezését, működését. Egészen mostanáig az összetevőkre visszavezető, idegen szóval redukcionista módszer szolgált alapvető eljárásként. Ennek lényegét, sikereinek titkát illetve korlátait az alábbiak szerint foglalhatjuk össze.

A módszer szerint a rendszerek tulajdonságai az összetevő elemibb részecskéik és az azok között ható, végsősoron az alapvető erőkből leszármaztatható kölcsönhatások segítségével írhatók le. Például a proton és neutron tulajdonságait az őket alkotó kvarkok és a közöttük működő erős kölcsönhatás határozzák meg. Az atommagokat protonok és neutronok építik fel. Az atommag tulajdonságai a protonok és a neutronok, valamint a közöttük ható magerők segítségével értelmezhetők. A magerők a kvarkok között ható, alapvető erőnek tekintett erős kölcsönhatás segítségével származtathatók. Az atomok tulajdonságait az azt alkotó atommag és az elektronok kölcsönhatásai szabják meg. A kölcsönhatás itt a Coulomb erő. A molekulák tulajdonságait azután az alkotó atomtörzsekre és a kötésben résztvevő elektronokra vezethetjük vissza, az összetartó erők a Coulomb kölcsönhatásból származtathatók.

Az egyszerűbb alakzatok leírására igen jól bevált, az összetevőkre visszavezető eljárást azután összetettebb rendszerekre is érvényesnek tételezik fel. Ennek alapján az élőlény leírható az azt felépítő szerves molekulák és kölcsönhatásaik segítségével. Azaz az élet a szerves kémiára vezethető vissza. Az embert pedig állatként érthetjük meg, minthogy a lélektan végsősoron a biológiára, az idegrendszer, az agykéreg

agysejtek alkotta hálózatainak működésére vezethető vissza. Végül pedig a társadalomtudományok a lélektanra alapozhatók.

Most rátérhetünk arra az alapvető kérdésre, miért annyira sikeres a természet jelenségeinek fenti magyarázati módszere. Belátható, hogy az összetevőkre visszavezető módszer sikere végül is egy matematikai közelítő módszer, a lineáris közelítés sikerein nyugszik, amit hamarosan vázolni is fogunk.

## 12. Összetett rendszerek

Most az összetett rendszerek leírásával foglalkozunk. A nagyon sok részecskéből álló rendszerek jellemzésének alapvető fogalma a rendszer rendezetlenségét megadó entrópia.

### 12.1. 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 az entrópia fogalmával írja le.

Az entrópia a nagyon sok részecskéből álló rendszerek viselkedését jellemző fizikai mennyiség, a rendszer rendezetlenségének mértéke. Minél rendezetlenebb a rendszer, az entrópiája annál nagyobb. Egy rendszer rendezettsége annál magasabb fokú, minél nagyobb zavart okoz az, ha a különböző helyeken lévő részeit felcseréljük. Ilyen felcserélés a tartályba zárt gáz viselkedését nem változtatja meg, ezért ez a rendszer rendezetlen, az entrópiája magas. Az entrópia akkor a legnagyobb, ha a rendszer teljesen egyöntetűvé válik, mert ekkor a felcserélődések semmit sem változtatnak a rendszert jellemző tulajdonságokon. A kifinomultabb összetételű rendszer kis entrópiájú, mert a felcserélések tulajdonságok módosulását hozhatja magával. Például az élő sejt működését nagyon befolyásolhatná az, ha a sejten belül két kis tartományt felcserélnénk.

A hőtan II. főtétele szerint a magára hagyott rendszer entrópiája nőni fog, egészen a teljes kiegyenlítődségig. Egy rendszer entrópiája akkor maradhat alacsony, ha a rendszer nyitott, azaz kölcsönhat a környezetével. A kölcsönhatás során zajló energiacsere, munkavégzés tartja fenn a rendszer rendezettségét. Az, hogy a sokelemű rendszer lehet-e szervezettebb állapotokban, a rendszer energiájától függ. A következőkben áttekintjük, hogy a sok részecskéből álló rendszer miképpen viselkedhet attól függően, mekkora az energiája.

### 12.2. Arányos (lineáris) rendszerek

Egy rendszer akkor arányos, ha a feltételek egy kisebb változása a rendszer viselkedését a feltételek változásával arányosan változtatja meg. Kétszer akkora változtatás kétszeres hatást, fele akkora változtatás fele akkora hatást kelt. Az 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 az arányos rendszerekben kaotikus viselkedés nem fordul elő. Arányosan viselkedik a rugó és más egyszerűbb fizikai rendszer, de lineárisan közelítésben írhatók le egyes összetettebb rendszerek is.

A lineáris rendszereknek vizsgálatát még a következő tulajdonságuk teszi különösen egyszerűvé. Képzeljük el, hogy elvégezve a rendszeren a feltételek egyik fajta változtatását, ennek megjelenik a hatása. Ha egy egy másfajta változtatást végzünk, annak is megvan a megfelelő hatása. Ha a rendszeren a két változtatást egyszerre végezzük el, akkor az eredményként kapott hatás a két egyenkénti hatás egyszerű összege lesz. Ezért lineáris rendszerekre a rendszer egészének vizsgálatát a rendszer elemeinek egyenkénti vizsgálatára

vezethetjük vissza. A lineáris rendszer egésze ezért nem más, mint a részeinek egyszerű összege. A rendszert szabadon szétszedhetjük, összerakhatjuk, semmi sem változik.

A lineáris rendszerekre nagyon jó példák a kis amplitudójú hullámjelenségek. Például az elektromágneses hullámokat leíró Maxwell egyenletek is lineárisak. Ennek köszönhető az, hogy a rádióhullámokat modulálhatjuk, szétszedhetjük, összerakhatjuk. Adáskor az anyagot a vivőhullámra ültetik, vételkor a vivőhullámra vitt anyagot arról leválasztják.

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

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

Az arányos viselkedés csak kevés rendszer sajátja. Nagyon sok rendszer, melyekkel mindennapjainkban találkozunk, az alapállapotnál magasabb energiájú. Ezeket az arányos viselkedés már nem jellemzi. A bonyolultabb viselkedéseket a nemlineáris jelenségek fizikája tárgyalja.

### 12.3. Nemlineáris rendszerek

A természeti jelenségek túlnyomó részét az jellemzi, hogy a rendszeren való változtatás hatása nem arányos a változtatás nagyságával. Kétszeres változtatás vezethet háromszoros vagy akár feleakkorra hatásra is. A változtatások aránytalanul nagyobb hatásokat is kelthetnek, mint amekkorákat a kezdeti kis eltérésekre gondolva várhatók lennének. Az ilyen rendszerek, amelyek a kezdeti feltételektől ennyire áttekinthetetlenül, kaotikus módon függhetnek, nemlineáris rendszerek. A nemlineáris rendszereket nemlineáris egyenletek írják le, ezek megoldásai valóban kaotikus módon viselkednek. Ezek nem csak elsőfokú, hanem magasabb hatványokat, gyökök, stb. kifejezéseket is tartalmaznak.

A lineáris és nemlineáris rendszerek közötti különbségre nézzük a következő egyszerű példát. Szivacsra vizet csöpögtetünk és mérjük a szivacs tömegét. Eleinte a szivacs tömege a cseppek számával arányosan növekszik, ekkor a cseppek száma és a szivacs tömegének növekedése között egyenes arányosság, lineáris függés van. Egy idő után a szivacs kezd telítődni, csepegni kezd belőle a víz, ekkor a tömegének növekedése már kisebb lesz, mint amit az arányosság jelentene. A vízcseppek száma és a szivacs tömegének növekedése között a kapcsolat nemlineárisá válik.

A nemlineáris egyenleteket nem könnyű megoldani. Természetesen a lineáris közelítést nemlineáris rendszerre használva is kaphatunk eredményeket, de azok érthető módon korlátozott érvényűek. Mondjuk a kört nagyon kis szakaszán jól közelíthetjük egyenessel. Gondoljunk arra, hogy a nemlineáris rendszert egy adott időpontban lineárisan közelítünk. Ha csak rövid ideig tekintjük a rendszert, egy kicsiny időszakra a lineáris számolás jól közelítheti a nemlineáris leírás eredményeit. Hosszabb idő elteltével az eredmények már megbízhatatlanná válnak.

Valamennyi kaotikus rendszer nemlineáris. A fordított állítás nem igaz. Vannak olyan nemlineáris rendszerek, amelyek nem mutatnak kaotikus viselkedést. A káosz akkor lép fel, ha a rendszer egy eleme átlagosan elég sok más elemmel kölcsönhat, ekkor ugyanis kis változások is megváltoztathatják az egész

rendszer viselkedését. Egyes nemlineáris rendszerek viszont szabályosan, szervezeten is viselkedhetnek. Erre példa a szoliton hullám kialakulása.

## 12.4. Szolitonok

Még a 19. század első felében figyelték meg egy csatorna mentén a következő nagyon érdekes jelenséget. A csatornában egy hajó hirtelen megállt és ennek eredményeképpen egy egyetlen taréjból álló hullám keletkezett. A hullám kilométereken át haladt anélkül, hogy akár az alakja, akár a sebessége változott volna. A hullámot lóháton követő megfigyelő a furcsa képződményt a csatorna egy kanyarulatánál veszítette szem elől.

A meghökkentő jelenséget értelmező egyenletet a 19. század végén írták fel. Közöséges víz hullám esetén, például amikor követ dobunk a vízbe, a keletkezett hullámfodrozódás gyorsan eltűnik. Ennek oka az, hogy a létrejött hullámvonulat különböző hullámhosszú és magasságú hullámokból tevődik össze. Az összetevő hullámok sebessége csak a hullámhosszaktól függ, a magasságuktól nem. Ilyen hullámok egyszerűen összeadhatók, így lineárisan viselkednek. A nagyobb hullámhosszú hullámok nagyobb sebességűek. A kő csobbanásakor, amikor a hullámvész keletkezik, 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 így a hullámvész elenyézik. Az ilyen módon, közöségesen viselkedő hullámok a 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 hullámhossztól, hanem a hullám magasságától is függ. Ilyen hullámok összeadódása nemlineáris folyamat. A keletkezett hullám terjedési sebessége más lesz, mint amilyen az összetevő hullámok sebességei voltak. Ha a különböző magasságú és hullámhosszú összetevő hullámok megfelelő módon adódnak össze, akkor a keletkezett hullám együtt is maradhat. Ez nem egy különleges eset. Azok az összetevők, amelyek ezt a feltételt nem teljesítik, egyszerűen kiszóródnak az eredő hullámból. A csatornában látott hullám is így alakul ki.

Az erre a feladatra felírható nemlineáris egyenlet, mint a nemlineáris egyenletek általában, nehezen megoldhatóak. 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. Azt a meglepő eredményt kapták, hogy az ütközés, összekeveredés és szétesés után a két hullám megőrzi alakját és sebességét, úgy folytatja a terjedését. Azaz megőrzik azonosságukat. Ezért nevezik az ilyen hullámot szolitonnak, a szoliton magányost jelent. Szolitonok bármely közegben fellépnek, ahol nemlineáris viselkedés mutatkozik, függetlenül attól, hogy mi az 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.

## 12.5. Önszerveződés

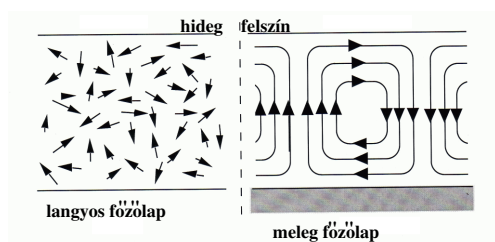
Az önszerveződés akkor léphet fel, ha a rendszer elemei kölcsönhathatnak a néhány szomszédos elemmel. Az önszerveződő rendszerek kis entrópiájú, magas szervezettségű rendszerek, amelyeknek nagyon sok energiájuk van, és a szomszédos elemek közötti kölcsönhatások erős visszacsatolási hatásokat hoznak létre. Az ilyen rendszer viselkedését csodálatosan gazdag, kifinomult mintázatok jellemezhetik. Az önszerveződő rendszer folyamatait tanulmányozva láthatjuk, hogy a gazdag mintázatokot körfolyamatok, körfolyamatok összekapcsolódása, összjátéka hozza létre. Helyi változások a rendszer távolabbi tartományait is befolyásolhatják, de ezek a helyi változások még nem okoznak az egész rendszert gyökeresen átalakító változásokat. Az önszerveződő rendszer, bár működését igen sokféle folyamat és változásra való képesség jellemzi, bizonyos mennyiségek értékét igyekszik állandónak vagy közel állandónak tartani.



Az önszerveződő rendszer nem érthető meg az egyes alkotóelemek egyedi viselkedéseinek összegeként. Inkább az összműködés törvényszerűségei szabják meg az alkotóelemek rendszeren belüli szerepét is.

Az önszerveződés sokat idézett példája a lézer működése. Ha a forró gáz vagy szilárd anyag közel van a hőmérsékleti egyensúly állapotához, úgy világít, mint egy közönséges lámpa. Ekkor az egyes atomok egymástól függetlenül, véletlenszerű módon sugároznak. Megtehetjük azonban, hogy a rendszert olyan módon töltjük fel energiával, hogy az messze eltávolodik az egyensúlyinak állapottól. Egy kitüntetett pontot átlépve a rendszer lézer üzemmódba kerül. Atomok százmilliárdjai egymással összhangban, azonos ütemben, egyszerre, egyirányban sugároznak.

Önszerveződő rendszert alkot az áramló víz is, ha az áramlás sebessége bizonyos határt átlép. Alacsony sebességeknél a víz simán, egyenletesen folyik. A határsebességet átlépve a folyadék mozgását az örvények keletkezésének és elmúlásának végtelen sora jellemzi. Az örvények elsősorban az akadályok környékén, például a hídlábnál keletkeznek. A szükséges energia a gyorsan áramló folyadék mozgási energiájából származik. Az egyes örvények szerkezete szabályos, jellegzetes mintázatot mutat.



16. ábra. Ha a az edény fenéke és a folyadék felszíne között kicsi a hőmérsékletkülönbség, addig a folyadék a molekulák véletlen ütközéseivel juttatja továbbítja felfelé a hőenergiát, lásd balra. Nagyobb hőmérsékletkülönbség esetén a vízmolekulák Bénard alakzatokba szerveződnek, lásd jobbra.

Az önszerveződésre talán az egyik leggyakrabban felhozott példa a Bénard féle instabilitás. Ez a jelenség akkor lép fel, ha a tűzhelyen egy edényben vizet melegítünk. A tűzhely lapja felett lévő vízréteg melegebb vizet tartalmaz, mint a felette lévő rétegek. 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 még képes megakadályozni. Ebben az állapotban a folyadék egyenletes képet mutat. A víz molekulái lassan vezetik felfelé a hőt a folyadékon át, a rendszer közel van a termikus egyensúlyhoz.

Ha azonban a rendszert erősebben melegítjük, a rendszer eltávolodik az egyensúlyi állapottól, drámai változás történik. Ha az edény alsó és felső rétegei közötti hőmérséklet egy kritikus értéket átlép, a folyadék instabillá válik és elkezd áramlani. Megfelelő feltételek mellett az áramló víz makroszkopikus mozgása spontán módon magasan szervezett formákba, hengerekbe vagy hatszögletes sejtekbe rendezi magát, lásd a 16. ábrát. A kezdeti egyöntetűség helyét egy csapásra a hosszú távon keresztül szerveződő rendezettség veszi át. A szervezett alakzatok térbeli mérete sokszorosa a vízmolekulák között fellépő erők hatótávolságainak. Bár az egyes vízmolekulákat a közvetlen szomszédai vakul taszítják vagy vonzzák ide vagy oda, a milliárdszor milliárd vízmolekula egymással összhangban, együttesen mozog.

Az önszerveződésre valamennyi tudományterület szolgáltat példákat. Az egyensúlyi állapottól távol egyes vegyi folyamatok ütemesen megjelenő mintázatokat jelenítenek meg. Ezek az egyenletes eloszlású folyadékból maguktól bukkanak elő. Az önszerveződés leginkább szembetűnő példáit az élővilág szolgáltatja. Gondoljunk arra, miként keletkezik a DNS szálból a magzat. Önszerveződő rendszerként foghatók fel az élő szervezetek, életközösségek és az élővilág egésze is. Gondoljunk például a sáskajárásra. Olyan csoportos jelenségekre, együttműködési módokra vezethető vissza, amelyek semmiképp sem érthetők meg úgymond 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 egy bizonyos értéket átlép, beindulhat a sáskajárás. A rovarok nagyobb területről egyszerre emelkednek a levegőbe és hosszabb távolságot együtt repülve szállnak le ismét.

Az önszerveződő rendszerek kialakulásának és fennmaradásának két általános feltétele van. Egyik, hogy létezzen a rendszer elemei között kölcsönhatás. Elég lehet az is, hogy az elemek csak saját közvetlen szomszédáikkal hatnak kölcsön. Például a vízmolekulák csak a közvetlen szomszédáikkal hathatnak kölcsön, a hatóerők sugara kb.  $10^{-8} \text{ cm}$ , míg a létrejött szerveződés, az örvény mérete ennek durván a milliárdszorosa. A másik általános feltétel az, hogy a rendszer legyen nyitott, azaz álljon kölcsönhatásban a környezetével, mert a rendszer entrópiája csak így maradhat alacsony. A 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.

Az önszerveződő rendszerek igen érzékeny válaszokat adhatnak a környezet változásaira és annyira rá vannak utalva a környezettel való állandó kölcsönhatásra, hogy igazából nem is választhatók el attól. A önszerveződő rendszerek nem merev, állandó szerkezetek, hanem inkább folyamatok, amelyek képesek alkalmazkodni a környezet változásaihoz, akár azon az áron is, hogy maguk is átalakulnak. Igyekeznek magukat minden áron fenntartani, ha arra kényszerülnek, komolyabb változásra is képesek. Ugyanakkor maguk is változtathatják környezetüket. Mennél összetettebb az önszerveződő rendszer, annál erősebben tudja alakítani környezetét, azért, hogy a maga számára kedvezőbb feltételeket teremtsen. Például 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, a vasút vagy a gépkocsi elterjedésére. Ezek úgy alakították át az őket hordozó társadalmi környezetet, hogy az minél jobban rá legyen utalva a vasútra vagy a gépkocsikra.

Az önszerveződő rendszerek viselkedése néha kaotikus jellegű és ezért a jövőjük jósolhatatlan. Ugyanakkor, a külső behatásokra való érzékenyséjük azt is lehetővé teszi, hogy 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 legalább ezeket a jelenségeket bizonyos osztályokba sorolhatjuk. Ezeknek az osztályoknak az egyike lehet az az állapot, amit önszervező kritikusságnak neveznek.

## 12.6. Önszervező kritikusság

Gondoljunk el, felülről egy tölcsérből egyenletesen csorog az asztalra a homok. Eleinte a dombocska egyre meredekebb lesz, de egy bizonyos nagyság elérte után a domb meredeksége állandó marad, értékét egy ún. kritikus szög adja meg. 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. A homokdomb mérete növekszik, de közben az állapota bizonyos értelemben egyensúlyinak tekinthető, mert a lezúduló görgetegek a meredekséget állandó értéken tartják. Az ilyen állapotú homokdomb viselkedését az önszervező kritikusság kifejezéssel jellemzik. A kisebb görgetegek gyakrabban, a nagyobbak ritkábban fordulnak elő. A lavinák nagysága és a gyakorisága hatványfüggvényes összefüggésben vannak egymással.

Az önszervező kritikus állapotot a káosz és a rend összhangja jellemzi. A káosz miatt megjósolhatatlan, hogy az egyes pillantokban pontosan mi fog történni, ugyanakkor az egész rendszer viselkedése mégis áttekinthető, kiszámítható.

A homokdombon kívül számos más, egészen különböző rendszer is leírható az önszervező kritikusság segítségével. Ilyen a vízesés, ahol az egyes helyeken lezúduló sugarak viselkedése egyenként kaotikus, ám a zuhatag egésze kiszámítható módon juttatja le a víztömeget az alacsonyabb szintre. A zsúfolt országúton kialakuló közlekedési viszonyok is ilyenféle rendet mutatnak. Különböző hosszúságú forgalmi dugók alakulnak ki. Ezek léte biztosítja, hogy az országút áteresztőképessége a lehető legnagyobb legyen. Ha a forgalom áramlásában kevesebb torlódás van, akkor vagy nagyon kevés kocsi van az úton, vagy az egész egy hatalmas dugó, ahol a zsúfoltság mindenkit azonos sebességre kényszerít.

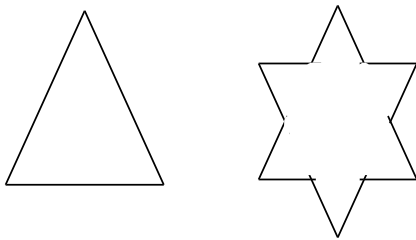
## 12.7. Fraktálok

Most arra fogunk példákat látni, hogy néha még a bonyolultnak látszó rendszerek viselkedése is leírható egyszerű módszerekkel.

Felvetődhet például az a kérdés, hogy a természetben található alakzatok bonyolultsága igazi bonyolultság-e. Ahogy Benois Mandelbrot, a fraktálok geometriájának megalkotója írja híres könyve elején: "A felhők nem gömbök, a hegyek nem kúpok, a partvonalak nem körök, a fakéreg nem sima és nem egyenes vonalú a villám sem."

Vizsgáljuk meg most a partvonalak formájának, hosszúságának a kérdését. Minél finomabb léptékű térképet készítünk, a partvonal annál hosszabbnak adódik. Ami messziről nézve egyenes, közelről már nem az. Mindenféle kiszögelések, bemélyedések jellemzik. Hamar rájöhettünk arra, hogy a partvonal hossza igencsak nehezen meghatározható fogalom. Ez a hossz bizonyos értelemben végtelennek tekinthető.

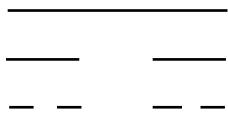
A partvonalak hosszúságának kérdését jól megvilágíthatja az alábbi, pontosan meghatározható matematikai alakzat kerületének a számítása. Ennek a Koch által felfedezett mértani alakzatnak, amit akár hópehelyhez is hasonlíthatunk, az előállítási módja a következő. Induljunk ki egy egyenlő oldalú háromszögből. A következő lépésben mindhárom oldal középső harmadára ültessünk egy 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 17. ábrát.



17. ábra. A Koch vagy hópehely fraktál előállítása. Egy egyenlő oldalú háromszögből indulunk ki. A következő lépésben mindhárom oldal középső harmadára ültessünk egy újabb egyenlő oldalú háromszöget, melynek alapját hagyjuk el. Utána valamennyi oldal középső harmadára ültessünk újabb egyenlő oldalú háromszöget, és így tovább.

Az eljárást a végtelenségig folytatjuk. Az eredmény egy olyan idom, amelynek végtelenül sok kiszögelése van. A kerület lépéseként  $4/3$ -szorosára nő, tehát végtelen sok lépés után végtelenné válik.

Másik egyszerű példa a fraktálokra a Cantor-fraktál, lásd a 18. ábrát.

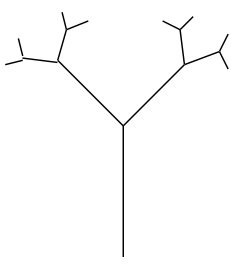


18. ábra. A Cantor-fraktált úgy kapjuk meg, hogy egy egyenes szakaszt három egyenlő részre osztunk és elhagyjuk a középső szakaszt. Ezt ismételjük a két megmaradt szakaszra, és így tovább a végtelenségig.

A Cantor fraktált úgy kapjuk meg, hogy egy egyenes szakaszt három egyenlő részre osztunk és elhagyjuk a középső szakaszt. Ezt ismételjük a két megmaradt szakaszra, és így tovább a végtelenségig. A fraktálját lásd a 19. ábrán.

A fraktálok alapvető jellemzője az, hogy kisebb szakaszait kinagyítva azok az egészhez hasonlóak. Más kifejezést használva a fraktálok önhasonló alakzatok.

A Koch féle görbe kerülete végtelen, bár a terület, amelyet bezár, véges. A szokásos sima görbékhez hasonlítva sokkal több pontból áll, mint azok. Ilyen értelemben egy felülethez hasonlítható, mivel egy



19. ábra. A fa fraktált úgy kapjuk meg, hogy a szakasz hosszának mindig egy adott hányadát vesszük, majd két ilyen hosszú, adott szöget bezáró szakaszt a végpontra felmérünk.

felületnek is sokkal több pontja van, mint egy vonalnak. A Koch-görbe nyilvánvalóan nem felület, de leírható úgy, mint az egydimenziós vonal és a kétdimenziós felület közé elhelyezhető alakzat.

A fraktálok eleinte csupán matematikai különlegességnek számítottak, de mára a fraktálok a tudomány jóformán valamennyi területén megjelentek. Ez nem azt jelenti, hogy például a partvonal tökéletes fraktál, akárcsak a Koch görbe. Inkább azt lehet mondani, hogy a fraktál bizonyos bonyolult rendszerek modellje. Manapság már ezekben mérhető a természetben felismert, fraktál módjára viselkedő, fraktálként modellezhető rendszerek száma. Olyan egymástól annyira távolos jelenségek, mint a csillagrendszerek térbeli eloszlása, a Szaturnusz gyűrűi, a földrengések, a villám cikcakkjai, a hópehely, a tőzsde viselkedése, a folyók folyása fraktálokkal jellemezhetők. A fraktálok geometriája a természeti jelenségek hirtelen változásainak, töréseinek, elágazásainak közös tulajdonságaira mutat rá.

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

## 13. A táguló világegyetem

### 13.1. A végtelen világegyetem és Olbers paradoxona

Bár Newton óta, egészen századunk közepéig, a térben és időben végtelen világmindenség eszméje általánosan elfogadott volt, léteztek jelek, amelyek arra utaltak, 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, a világegyetem térben véges, ezért az égboltot csak részben "fedik" le a csillagok. Továbbá a világegyetem nem állandó állapotú. A csillagok sem élnek örökké, keletkeznek és elmúlnak. Csak azokat látjuk, amelyek éppen olyan életszakaszban vannak, hogy fényük eljuthat hozzánk.

Ma már tudjuk, hogy a fenti két indok, a világegyetem végeessége és a csillagok véges élettartama, egyaránt helytálló. Ez jó példa arra a nagyon általános elvre, hogy az örök világegyetem és a benne folyamatosan létező, megfordíthatatlan fizikai folyamatok nem férnek össze. Az örök világegyetemben a csillagok már végtelen idővel ezelőtt kialakultak és kiégtek volna. A világegyetemünk viszont bővelkedik megfordíthatatlan folyamatokban. Inkább egy egyszer felhúzott, lassan lejáró órára hasonlít. Ez határozottan arra utal, hogy volt kezdet.

A rohamosan fejlődő megfigyelési módszereknek köszönhetően ma már nagyon sokat tudunk a világegyetemről. A 20. század elején még csak a látható fény tartományában vizsgálhatták a világmindenséget, tudtak lemezekre felvételeket készíteni. Ma a nagy távcsövekkel és a megfelelő eljárásokkal a látható fény tartományában négy nagyságrenddel pontosabb megfigyeléseket végezhetünk. Mivel a Föld légköre a világűrbeli érkező sugárzások túlnyomórésztét elnyeli, esély sem volt ezek észlelésére. Manapság a mérési eljárások rohamos fejlődése és a műholdakra telepített mérőberendezések segítségével nagyon sok mindent meg tudunk mérni. Az égbolt nagyon pontosan meghatározható irányából tudunk például ultraibolya, Röntgen vagy infravörös sugárzási színeképeket észlelni. Szinte a teljes elektromágneses színeképben, a méteres rádióhullámoktól a billió elektronvolt energiájú gamma sugarak tartományáig tudunk méréseket végezni. A mérések pontossága jelenleg 10% körül mozog, de hamarosan elérhetik a százalékos pontosságot is. Eljutottunk oda, hogy a különböző jellegű mérésekből kiértékelhető ismeretek nagyon jól kiegészítik egymást. A következőkben áttekintjük, hogyan alakult ki a világegyetemről való mai tudásunk.

## 13.2. Távolodó csillagrendszerek

A 20. század első két évtizedében még azt hitték, 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 [ejtsd hábl] megfigyelései alapján ismerték fel, hogy a Tejútrendszeren kívül vannak más csillagrendszerek is. 1929-ben Hubble azt is felfedezte, hogy a csillagrendszerek távolodnak tőlünk. A távolodás sebessége a csillagrendszerek fényének vöröseltolódásával mérhető. Minél gyorsabban távolodik a csillagrendszer, annál vörösebbnek látszik a fénye. Hubble mérései szerint minél távolabb van egy csillagrendszer, annál nagyobb sebességgel távolodik tőlünk. Hubble felfedezése azt jelenti, hogy a világegyetem tágul.

A csillagrendszerek megfigyelt viselkedésének és a tágulásnak a kapcsolatát a szemléletesség kedvéért a következő képpel írhatjuk le. Képzeljük magunkat egy felfúvódó léggömb felszínére. Azt észleljük, hogy minden, ami a gömb felszínén van, távolodik tőlünk. A távolodás sebessége annál nagyobb, minél messzebb van tőlünk a megfigyelt tárgy. A szomszédságunkban lévő pontok is egyre messzebb kerülnek, de legjobban, legnagyobb sebességgel a léggömb legtávolabbi, átellenes pontja távolodik tőlünk.

Nem mondhatjuk azt, hogy vannak olyan csillagrendszerek, amelyek a táguló világegyetem közepén, más csillagrendszerekről, hogy a világegyetem peremén vannak. A léggömb felszínén sem mondhatja senki, hogy ő van középen. Világegyetemünk természetesen nem olyan, mint a háromdimenziós térben lévő gömb kétdimenziós felszíne. Inkább úgy kellene elgondolnunk, mint a négydimenziós térben lévő gömb háromdimenziós felszínét. Ilyet persze szemléletünk korlátai miatt nem tudunk elképzelni.

Ha világegyetem tágul, akkor a csillagrendszerek régebben nyilván közelebb voltak egymáshoz. Megerve a tágulás mértékét, azt találták, hogy jelenleg a világtér egymillió fényéves szakaszára kb. 10 kilométer/másodperc sebességű tágulást kapunk. Az általános relativitás elméletéből megmutatták, hogy táguló világegyetemhez szükségszerűen egy rendkívül kicsiny, csaknem pontszerűnek vehető kezdeti állapot tartozik. Ennyiből alakulhatott ki világunk is. Ez a kép a nagy ősrobbanás modelljének alapja.

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 is elrontva, bevezette az állandó állapotú megoldást adó ún. kozmológiai állandót.

Érdemes megjegyezni, hogy az általános relativitás elmélete szerint 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. Ezért világegyetemünk hasonlítható a kelésben lévő tésztához is, amelybe mazsolát szórtak. Ahogy a tészta dagad, a mazsolaszemek is távolodnak egymástól és annál nagyobb a távolodásuk sebessége, minél messzebb vannak egymástól.

A kezdetek kezdetén a világegyetem terének valamennyi pontja itt volt a közvetlen közelünkben, és egyik sem vehető a világegyetem középpontjának. Már csak azért sem, mert ahogy később tárgyaljuk, a kezdeti állapot nem tekinthető teljesen pontszerűnek.

A tágulás hatása a többi erő hatásához képest nagyon gyenge. Hasonlatként gondoljuk el, hogy a Balaton vizén két csónak áll egymás mellett. Ha nincsenek egymáshoz erősítve, akkor a lassú hullámzás szét-sodorja őket. Ha azonban csak egy vékonyka kis zsineggel is össze vannak kötve, a hullámzás nem tudja őket elsodorni egymástól. Hasonlóképpen a tér tágulásának hatása sem a Földön, sem a Naprendszeren, sem Tejútrendszeren belül még nem észlelhető. Sőt még a szomszédos csillagrendszerek vonzása is erősebb hatást jelent, ezért a szomszédos csillagrendszerekről érkező fény a kék felé való eltolódást mutatja. Csak a távolabbi csillagrendszerek esetén érvényesül a tér tágulásának hatása, azokra érvényes a Hubble törvény.

Ezt az általános relativitás elméletének segítségével a következőképpen érthetjük meg. Az Einstein-egyenletek úgy adják a táguló világegyetem megoldást, hogy a világegyetemre egyenletes sűrűségeloszlást tételezünk fel. A világegyetem nem teljesen ilyen. Ha akkora térfogatelemekre osztanánk fel, amelyekbe átlagosan nagyszámú csillagrendszer van, akkor ilyen léptékben a világegyetem valóban egyenletes. Kisebb léptékben viszont viszont csomósodások vannak. A csomókon belül még kisebb csomósodások találhatók, mint csillagrendszerek csoportjai, csillagrendszerek, csillagok, naprendszerek, bolygók. Ennél fogva az Einstein-egyenlet megoldása nagyléptékben a világegyetem tágulása, a csomósodó tartományokon belül viszont a helyi téridőgörbületnek megfelelő tömegvonzás hatása a meghatározó. Azaz a világegyetem téridőgörbülete nagy méretekben a tágulásra, kisebb méretekben tömegvonzásra vezet.

### 13.3. Az ősrobbanás hagyatékai

Az ősrobbanás elmélete nem csupán a csillagrendszerek mérhető távolodásán alapul. A világegyetem hajdani kicsiny voltára más bizonyítékok is vannak. A csillagok és a csillagközi anyag fő összetevői a hidrogén és a hélium. Más, nehezebb atomok elvétve vannak csak jelen. Ilyenek csak a csillagok belsejében alakulhatnak ki.

Bármerre nézünk is a világmindenségben, azt észleljük, hogy tömegének kb. negyedét hélium alkotja. Héliumot termelő magfolyamatok csak nagyon magas hőmérsékleten indulhatnak be. Ez a hőmérséklet annyira magas, hogy hélium ma csak a csillagok belsejében termelődhet. A mindenfelé azonosnak mérhető tömegarány a 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.

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. A mért sugárzás színképe hőmérsékleti sugárzás színképének felel meg. A színkép alakja a kibocsátó forrás hőmérsékletétől függ. A világűrből érkező háttérsugárzást egy  $2,726 \pm 0,001$  Kelvin hőmérsékletű test bocsátja ki. Maga a teljes világegyetem az, ami egy 2,726 Kelvinen sugárzó testként viselkedik.

A fizika alapvető törvényeiből következik, hogy a táguló világegyetemnek egyúttal folyamatosan csökken a hőmérséklete. Ezért régebben a világegyetem a mainál sokkal magasabb hőmérsékletű volt. Visszafelé menve az időben eljuthatunk addig a korszakig, amikor a világegyetem még egészen forró volt. A világegyetemben lévő nagymennyiségű hélium ekkor keletkezett. Azóta, az idő múltával világegyetemünk úgy viselkedik, mint egy hűlő kályha.

A csillagok életkora elég jó pontossággal meghatározható a bennük előforduló radioaktív bomlási családok elemeinek korösszetételéből. A legöregebb csillagok életkora 11-12 milliárd esztendőnek adódott. Eszerint világegyetemünk legalább ennyi idős. A tágulás mértékéből kiszámolható, hogy a világegyetem életkora 13,7 milliárd év.

Az ősrobbanás elmélete a mai asztrofizika, csillagászat alapmodellje. A kutatók túlnyomó többsége ebben a modellben teszi fel kérdéseit, ezen a modellen belül értelmezi a kísérletek eredményeit. Az egyre pontosabb adatok, a folyamatosan érkező eredmények egyre jobban megerősítik az ősrobbanás elméletének hitelét. Az egyéb magyarázatok jelenleg nem jelentenek versenytársat az ősrobbanás elmélete számára, amely egyre inkább alapvető tudásunk részévé válik.

### 13.4. A "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 egy icipici térfogatban keletkezett világegyetem nem az üres térben, valamikor pattant ki. A világegyetemünk születése előtt nem lehet távolságokról és időtartamokról sem beszélni. Amikor a világegyetem még nem létezett, tér és idő sem volt.

Valamennyi megmaradási tétel, beleértve az energiamegmaradás, az elektromos és töltések megmaradásainak stb. törvényeit is, úgy teljesül, hogy a világegyetem össztöltése, összenergiája stb. nulla. Olyan módon, hogy a mérlegben szereplő + és - előjelű mennyiségek kiejtik egymást. Mint már tárgyaltuk, a fizikában a relativitáselmélet kidolgozása óta nincs külön tömeg és energiamegmaradási törvény. Az energiamegmaradás törvényének alkalmazásakor viszont be kell számítani a tömegeknek megfelelő  $E = mc^2$  energiát is. Ha az energiamérleget nézzük, megmutatható, hogy világegyetemünk pozitív előjelű energiái, például a mozgási energiák stb. és a tömegeknek megfelelő  $E = mc^2$  energiák összege pontosan kiegyenlítik a negatív, elsősorban gravitációs energiákat. A világegyetem elektromos össztöltése szintén nulla. A világmindenségben lévő protonok száma, ezek a pozitív elektromos töltés hordozói, pontosan megegyezik a negatív töltést hordozó elektronok számával.

A világegyetem kezdőállapotának a tér, az idő és az anyag nélküli, nulla energiájú állapotot tekinthetjük, amelyet a fizikai semmi állapotának nevezhetünk. Ezt az állapotot pontosan leírni, meghatározni egyelőre nem tudjuk. A világegyetem fejlődését leíró elmélet a tér és az idő tulajdonságait a benne lévő tömegekkel magyarázó általános relativitáselmélet. Ennek az elméletnek is vannak azonban korlátai, lásd a 10.9 szakaszt. Ezek, amelyek éppen a nagyon kis tér és időtartamok világára vonatkoznak, nem engedik, hogy az elméletet a kezdetek legkorábbi szakaszára is alkalmazzassuk.

## 14. A világegyetem fejlődése az atomok megjelenéséig

A világegyetem tágul és hűl, a kétszer akkora világegyetem felényi hőmérsékletű. A világegyetem ma mérhető tágulásából és 2,726 Kelvin hőmérsékletéből pontosan ki tudjuk számolni, mikor mekkora volt korábban a világegyetem és pontosan mekkora volt a hőmérséklete. A hőmérsékletből megadható a közeg részecskéinek átlagos mozgási energiája. Minél magasabb a hőmérséklet, annál gyorsabban mozognak a részecskék. Az, hogy milyen gyorsak a részecskék, meghatározza, milyen rendszerek jöhetnek létre, maradhatnak fenn.

Most a világmindenség történetének főbb állomásait ismertetjük, egészen az atomok megjelenéséig. A Planck-idő tájt a világmindenség mérete Planck-hossznyi, azaz  $10^{-33}$  centiméternyi.

### 14.1. Az első másodperc

Körülbelül  $10^{-43}$  másodperc eltelte után már létezik a tér és idő, fogalmaik egyértelműek, az általános relativitáselmélet egyenletei alkalmazhatóak. Ekkor a gravitációs erő elválik a természet egyéb erőitől, a korábban említett gravitációs kvantumeffektusok most már elhanyagolhatóak. A világegyetem hőmérséklete ekkor még elképzelhetetlenül magas,  $\sim 10^{32}$  Kelvin. A gravitációs erő ekkor még annyira hatalmas, hogy az

energiájának rovására a maguktól keletkező részecske - ellenrészecske párok valóságossá válnak. A világegyetem összenergiája így is változatlanul nulla marad, mert a kétszer annyi új részecske keletkezéséhez szükséges energiát a új részecskék megjelenésének következtében fellépő negatív gravitációs energiák elmentélezik.

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. A nagyon nagy tömegű X részecske és ellenrészecskéje a kvarkokat leptonokba és viszont alakító kölcsönhatás közvetítője. Ekkor még, ahogy korábban írtuk, valamennyi kölcsönhatás, az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások egyforma 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 különbözik a mai nagyon sok különbséggel jellemzett világunktól, melyben az X részecske már nem gyakorolhat befolyást.

Az X részecskék és ellenrészecskék a korszak végén kvarkokra, leptonokra, ellenkvarkokra és ellenleptonokra bomlottak el. Az anyagra és ellenanyagra való bomlások arányai azonban nem teljesen azonosak. Ennek oka egy szimmetria nagyon apró, ám következményeiben igen fontos sérülése. Végeredményben tízmilliárdnegy keletkezett kvarkra csak tízmilliárd ellenkvark jutott. Ezzel a világegyetem anyag-ellenanyag szimmetriája megbomlott.

$10^{-35}$  másodperc eltelte után az erős és elektromágneses kölcsönhatás már megkülönböztethetővé vált. Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás azonban még kb. a  $10^{-9}$  másodpercig megkülönböztethetetlen volt. Ebben az időszakban a táguló és hűlő világegyetem hőmérséklete még elég magas volt ahhoz, hogy a kvarkok, ellenkvarkok valamint az erős kölcsönhatást közvetítő gluonok plazma állapotban lehessenek jelen.

$10^{-9}$  másodperc tájt az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás megkülönböztethetővé vált. Az ellenanyag, amelyből az X részecskék  $10^{-35}$  másodpercben bekövetkező bomlásainak következtében picivel kevesebb van, az anyaggal ütközve szétsugárzódik. Például az elektron-pozitron megsemmisülésekben fotonok keletkeznek. 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.

A további hűlés során, az első másodpercig a meghatározó folyamat a protonok és neutronok egymásba alakulása. A folyamatot a gyenge kölcsönhatás jellemzi, elektronok, pozitronok, neutrínók és ellenneutrínók keletkeznek. Az első másodperc tájt az átalakulási folyamatok megszűnnek, a neutrínók ettől fogva 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. Jegyezzük meg, hogy már ez időn belül is megfigyelhető az egyre összetettebb rendszerek kialakulása. 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.

## 14.2. Az első három perc - a hélium keletkezése

A világegyetem létének első másodperce után, az első három perc végéig alakultak ki a legkönnyebb vegyi elemek atommagjai. A hőmérséklet ekkor már csak néhány milliárd fok. Ez az állapot igencsak kedvez a bonyolultabb atommagok képződésének. Az atommagfolyamatokat az igen erős, vonzó magerők szabályozzák, amelyek igen rövid hatótávolságúak. Csak akkor hatnak, ha a proton vagy neutronok egymás közvetlen közelében tartózkodnak, szinte érintkeznek egymással. A világegyetem történetének első perceiben az ütköző atommagok még elég gyorsan mozognak ahhoz, hogy az elektromosan töltött atommagok



közötti taszító erőt legyőzzék. A taszító Coulomb erő ugyanis lassítja a másik töltött atommaghoz közeledő töltött részecskét. Ha a sebességek, azaz a hőmérséklet nem elég nagyok, 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 más atommagokkal is ütköznek és ezért könnyen szét is eshetnek. A világegyetemben az első másodperctől a harmadik perc végéig voltak a feltételek olyanok, hogy összetettebb atommagok képződhettek. A legfontosabb magfolyamatok a következők voltak. Először a neutronok protonokkal való ütközésében deutronok keletkeznek, majd a deutronok egymással ütközve a két protont és két neutront tartalmazó hélium atommagokká alakulnak. Ezen az úton a világegyetem neutronjainak túlnyomó része a hélium atommagok alkotórészévé vált. A világegyetem anyagának nagyobb része protonok, azaz hidrogén atommagok formájában maradt vissza. Az ősrobbanás modellje által számolt kb. 25%-os hélium arány jól egyezik a héliumnak a világegyetemben mért gyakoriságával. Az egyéb, kevésbé gyakori könnyebb atommag kozmikus előfordulási valószínűsége is jól megfelel az ősrobbanás modelljével számoltaknak. Arra a három perc alatt nem volt idő és mód, hogy a hélium atommagok összeolvadásából magasabb rendszámú atommagok is keletkezessenek.

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

### 14.3. Az első 380000 év

Az első három perc utáni körülbelül 380000 évet a fotonok alkotta sugárzási tér és az anyag kölcsönhatása alakította. A világegyetem ekkor a csupasz atommagok, protonok és a hélium atomok magjaiból és elektronokból álló plazma. A neutrínók és ellenneutrínók is jelen vannak, de kölcsönhatásaik elhanyagolhatóak.

Az alapvető folyamatok a töltött részecskék ütközéseivel kapcsolatosak. Az elektron, a proton és a hélium szóródhatnak egymáson. Közben az ütköző részecskék energiát cserélnek és fotonokat sugározhatnak ki, illetve nyelhetnek el. Lehetséges azonban az a folyamat is, amikor a protonnal ütköző elektron befogódik a proton köré. Ezzel egy hidrogénatom keletkezett. Ez a hidrogénatom általában gerjesztett, magasabb energiájú állapotban van. Az elektron ugyanis nem feltétlen a legalsó pályára fogódik be. A gerjesztett állapot foton leadásával bomlik le az alapállapotba, azaz az ütközési folyamatokat általában fény kibocsátása kíséri.

A hőmérséklet ebben az korszakban még túl magas ahhoz, hogy a protonból és elektronból álló hidrogén vagy a hélium atommagból és két elektronból összetevődő hélium atomok meg is maradhassanak. Bár ezek létrejöhetnek, de magas hőmérsékleten a részecskék még nagyon sebesen mozognak. Annyira, hogy ütközéseikben a keletkezett atomok gyorsan szét is eshetnek. A nagy energiájú fotonokkal való ütközések is gerjeszthetik és rombolhatják a keletkezett atomokat.

A fotonok által közvetített elektromágneses kölcsönhatás elég erős ahhoz, hogy megakadályozhassa bármilyen egyéb képződmény kialakulását. Például a 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.

A hőmérséklet 380000 év után annyira lecsökkent, hogy az ütközések a kialakuló atomok létét már nem veszélyeztették tovább. A keletkezett hidrogén atomok jó része hidrogén molekulákká állt össze, a nemesgáz hélium atomos állapotban található. A világegyetem anyaga így elektromosan semlegessé vált. Az ütközésekben nem képződnek és nyelődnek el újabb fotonok. Az elektromágneses kölcsönhatás által megszabott sugárzásos korszak 380000 év elmúltával lezárult. A sugárzás és az anyag kölcsönhatása ezután már jelentéktelen.

A világegyetem hőmérséklete a háromezredik év táján durván 3000 fok. A mindenség tágulásával a sugárzási tér azóta is egyre hűlt, az akkori 3000 Kelvin durván ezredrészére, 2,726 Kelvinre süllyedt. A

kozmosz háttérsugárzás ma mérhető apróbb egyenlenségei a háromszázazredik év környékén mutatkozó kis egyenlenségekre utalnak.

## 14.4. Csillagrendszerek

A világegyetem fejlődésének meghatározó tényezője 380000 év után a tömegvonzás. Amint láttuk, a gyenge, erős és elektromágneses kölcsönhatások jellemezte korszakoknak vége. A fenti három erő már nem kezdeményez jelentősebb változásokat. Hatásaik csak kisebb távolságokon érvényesültek. A tömegvonzási erő egyetemes. 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.

A tömegvonzás a következő módon szervezi az anyagot. Ha az ősi gáztömegben valahol kisebb egyenlenség van jelen, mondjuk kicsit sűrűbb a gáz, ez a sűrűbb tartomány a tömegvonzás központjává válik. Környezetéből kezdi magához vonzani az anyagot. Az eredetileg csaknem jelentéktelen különbségek az önmagát erősítő folyamat eredményeképpen egyre kifejezettebbekké válnak. A tömegvonzás szervező erejének hatására az eredetileg csaknem egyenletesen eloszló anyag csomókba tömörült.

A tömegvonzás vezérelte csomósodási folyamatban keletkeztek a csillagrendszerek, és ennek során jöttek létre a csillagok is. Az első csillagrendszerek és csillagok kb. kilencszázmillió év eltelté után alakultak ki. Ma a világmindenségben lévő csillagrendszerek száma körülbelül százmilliárd. Az egyes csillagrendszerekben körülbelül százmilliárd csillag található. A mi Napunk csak egyike a Tejútrendszer sokmilliárd csillagának és a Tejútrendszer is csak egyike a mindenség százmilliárd csillagrendszerének.

A csillagrendszerek kiterjedésének nagyságrendje százezer fényév. A mi Tejútrendszerünk mérete átlagos vagy kicsit nagyobb csillagrendszer méretnek mondható. A csillagrendszerek közötti átlagos távolság néhány millió fényév. Maguk a csillagrendszerek is vonzzák egymást, csoportokba tömörülnek. A kisebb csoportok még nagyobb csoportokat alkotnak.

## 14.5. A táguló világegyetem jövőjéről

Felmerül az a kérdés, meddig folytatódik a tágulás. A szétrepülő csillagrendszerek között fellépő tömegvonzás fékezi a tágulást, csökkenti annak sebességét. A legújabb mérések szerint viszont, a várakozással ellentétben, a világegyetem tágulásának üteme gyorsul.

Mivel a világegyetem anyagi összetevői egymást vonzva mind lassítják a tágulás sebességét, a gyorsulva tágulást az Einstein egyenletek csak a kozmológiai állandó nemnulla, nevezetesen pozitív értékével írhatják le. Kérdés, milyen jelenség szolgáltathat gyorsuló tágulást. Ilyenek lehetnek a Casimir effektushoz hasonló kvantumtérelméleti hatások. Ezek azonban óriási nagy járulékokat adnak a kozmológiai állandóhoz. A 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 egy olyan skalár tér, amelynek részecskéi a tömegvonzás helyett taszító hatást fejtenek ki és ezek felelősek a kozmológiai állandó pozitív értékéért.

A világegyetem szerkezetét, jövőjét végül is a kozmológiai állandón kívül az határozza meg, mekkora a világegyetem össztömege. A világegyetem kritikus tömegének azt a tömeget nevezik, - a kozmológiai állandó nulla értéke mellett -, amely össztömegnél a világegyetem sem összeroppani, sem szétszóródni nem tud, mert a világegyetem tágulási sebessége fokozatosan lassulva a nulla értékhez tartana.

A világegyetem mértanát a világegyetem össztömege és a kozmológiai állandó együttesen határozzák meg. Nyílt világegyetem esetén a tér mértanát az ún. Bolyai-Lobacsevszkij féle geometria írja le. Az ilyen térben a háromszögek szögeinek összege kisebb, mint 180 fok. A zárt világegyetem geometriája az ún. gömbi geometria. Ekkor a háromszög szögeinek összege nagyobb, mint 180 fok. A sík világegyetem

geometriája a mindenki által ismert euklideszi mértan, amelyben a háromszög szögeinek összege 180 fok. A legújabb mérések szerint a világegyetem mértana egyértelműen az euklideszi mértan.

## 14.6. A sötét anyag kérdése

Az adatok szerint a világegyetem össztömege a kritikus tömeg kb. 30 százaléka. A világegyetem látható, műszereinkkel kimutatható tömege a kritikus tömeg alig 0,5%-a. A világegyetem láthatatlan, atommagként létező tömege a kritikus tömegnek legfeljebb 5%-a. A világegyetem 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. A látható csillagok tömegvonzása ugyanis nem tudná összetartani a csillagrendszereket.

Az ismeretlen állapotú anyagot, mivel az fényt nem bocsát ki, sötét anyagnak nevezik. Ez a kritikus tömegnek durván 25%-át teszi ki, tehát sokszorosa, kb. hatszorosa az ismert állapotú anyagnak. A sötét anyag mibenléte napjaink kozmológiájának talán legizgalmasabb kérdése. A sötét anyag mibenlétéről, hatásáról szinte havonta jelennek meg elképzelések, újabb mérési adatok. Az újabb röntgensugaras mérésekben észleltek egy csillagrendszert, amelyet forró, röntgensugárzást kibocsátó gáz vesz körül. Ennek a forró gázfelhőnek az alakja eltér a attól az alaktól, amilyenek a csillagrendszert látjuk, azaz ahogy a csillagrendszer csillagai eloszanak. A forró gázfelhő alakja csak azzal magyarázható, hogy azt a csillagrendszer csillagainak eloszlástól eltérő sűrűségeloszlású sötét anyag alkotja.

## 14.7. A világegyetem horizontja

A horizont kifejezést az égbolttal kapcsolatban jól ismerjük, csak a horizontig láthatunk, ami azon túl van, láthatatlan számunkra. A táguló világegyetemnek is van horizontja, 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. Az 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. A relativitáselmélet azt viszont 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 elér bennünket. A világegyetem horizontját az a távolság adja meg, amely éppen fénysebességgel távolodik tőlünk. A vöröseltolódásnak nevezett jelenség miatt a távolodó fényforrás fényének rezgésszáma a távolodás sebességével egyre csökken. A horizontról érkező fény a vöröseltolódás miatt már nulla rezgésszámú, azaz a fény már nem észlelhető. A horizonton túli csillagrendszerek, ha vannak ilyenek, tőlünk fénysebességnél gyorsabban távolodnak.

A horizont létezése behatárolja, mit tudhatunk a világegyetemünkről. A mérésekkel csak a horizonton belüli, az ún. megfigyelhető világegyetemet tanulmányozhatjuk. A horizonton túli részekről megfigyeléssel eleve nem tudhatunk semmit. Csak közvetett úton szerezhetünk róluk ismereteket.

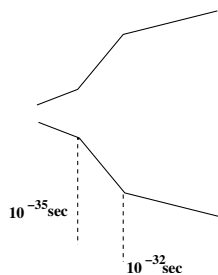
Ha a világegyetem történetét az ősrobbanás fenti hagyományos modellje szerint értelmezzük, súlyos nehézségekkel kerülünk szembe. Az egyik legnagyobb nehézség a kozmikus háttérsugárzás csaknem teljes egyenletes volta. A háttérsugárzás arról a korszakról ad látteleket, amikor a világegyetem hűlésével megszűnt a plazmaállapot és kialakultak a hidrogén molekulák és a hélium atomok. Ez, mint tárgyaltuk, nagyjából az ősrobbanást követő 380000 év tájt történt. A kozmikus háttérsugárzás fotonjai ekkor keletkeztek és mostanra értek ide hozzánk. Az, hogy a sugárzás minden irányból csaknem teljesen egyenletes, azt jelenti, hogy a megfigyelhető világegyetem egészének anyaga még a plazmaállapotban kölcsönhatott egymással.

Az ősrobbanás modellje szerint a világegyetem annyira gyorsan tágul, hogy a háttérsugárzás egyenletességét nem lehet a szokásos, kiegyenlítődést beállító fizikai folyamatokkal megmagyarázni. Nézzük az égbolt két ellentétes irányából érkező háttérsugárzást. Amikor az ősrobbanás után 380000 évvel a sugárzásokat forrásaik kibocsátották, a források egymástól 90-szer akkora távolságra voltak, mint az akkori horizont nagysága. Az ilyen távolságban lévő anyagfelhők soha sem lehettek oksági kapcsolatban egymással. Mégis olyan állapotban voltak, mintha valamikor egymással egyensúlyra vezető kölcsönhatásban álltak volna.

## 14.8. A felfúvódó világegyetem

A felfúvódó modell kiindulópontja az, hogy 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, és a taszító hatások eredményeképpen a világegyetem fergeteges ütemben tágult, lásd a 20. ábrát. A mérete minden  $10^{-35}$  másodpercen belül megkétszereződött. Az adott időszakban a világegyetem térfogata a  $10^{80}$ -szorosára, a 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,  $2 \cdot 10^{-32}$  másodpercenként a kétszeresére duzzadt.

Ez a hatalmas méretű felfúvódás meg tudja magyarázni, miért ennyire egyenletes a világegyetem. A felfúvódó világegyetem modellje szerint a megfigyelhető világegyetem egésze egy olyan 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 szorosan érintkeztek egymással.

A háttérsugárzás nem teljesen egyenletes. Ezt a COBE műhold 1992-es méréseiből tudjuk, mert a 380000 év tájt a világegyetemben sűrűség-ingadozások mutatkoztak. 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. A COBE értékei nem elég pontosak. A mostanában más eszközökkel végzett újabb mérések alátámasztották a Cobe által mért értékeket. A felfúvódó világegyetem modelljének jóslatait azonban 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 az elfogadható modellek számát. A Planck Surveyor műhold

2005-ben kerül Föld körüli pályára. valószínű az évtized végéig kiderülhet, hogy elfogadható-e a felfúvódó világegyetem modellje, vagy inkább más kvantum kozmológiai modellek felé kell fordulnunk.

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

## 14.9. Kvantum kozmológia

A kvantum kozmológiai modellek a korai világegyetem egészét egyetlen kvantummechanikai hullámfüggvénnyel jellemzik és a világegyetem fejlődését a hullámfüggvény időbeni változásaival írják le. A világegyetem 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 kvantum kozmológia hatalmas nehézségekkel küzd. Mindenesetre a Wheeler-DeWitt egyenletnek már számos megoldását tanulmányozták. A felfúvódó világegyetem is egy lehetséges kvantum kozmológiai megoldás.

Van másik, jól megalapozott kvantum kozmológiai 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. A WMAP és a Planck Surveyor mérőberendezéseit arra a célra tervezték, hogy megtudjuk, melyik modell az igazi.

### 14.10. 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 a mi észlelhető világegyetemünk. Ugyanakkor azt is el kell majd fogadnunk, hogy a világegyetem többi részéről nem szerezhethetünk közvetlen módon ismereteket, semmi érdemrit nem tudhatunk róla és korlátaink vannak arra nézve is, mit tudhatunk meg az észlelhető, megfigyelhető világegyetemről.

Ha volt felfúvódás, akkor a kvantum kozmológiai 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 felfújott buborékokból áll. A megfigyelhető világegyetemünk is egy ilyen buborékban van. A különböző buborékokban a legalapvetőbb mozgásegyenletek és a négy alapvető kölcsönhatás alakja ugyan azonos, a fizikai állandók azonban 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, hogy 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 folytatódhatnak. Az, hogy hol, milyen területeken indulhat be újabb felfúvódás, véletlennek tekinthető. Innen ered a kaotikus felfúvódás elnevezés. Minden lehetséges világegyetem megvalósulhat, a kedvezőbb világegyetemek tökéletesebbnek nevezhető alakokban újjászülhetik magukat. A kaotikus felfúvódás modelljének valóságtartalmáról néhány éven belül sokat többet fogunk tudni.



### 15.3. Csillagok, szupernova, neutroncsillag

A gravitációs összehúzódás önmagát erősítő folyamat. Erre nagyon jó példa a csillagok kialakulása. A csillag fejlődésének kezdeti szakaszában egy gravitációsan összehúzódó gáztömeg. A  $3/4$  rész hidrogén molekulából és  $1/4$  rész hélium atomból álló gázfelhő összehúzódása során minél közelebb kerülnek egymáshoz a gáz atomjai és molekulái, annál nagyobb erővel vonzzák egymást, annál jobban tömörödik a felhő, és így tovább. A sötétén kavargó, összefelé tömörülő gáz hőmérséklete az összehúzódás folyamán emelkedik. A helyi hőmérséklet attól függ, mekkora ott a gáz sűrűsége. A gáz hőmérséklete legbelül a legmagasabb, mert ott a legnagyobb a sűrűség. A hőmérséklet emelkedése az jelenti, hogy a gáz atomjai és molekulái egyre hevesebben ütköznek egymással és a jelenlévő fotonok is egyre nagyobb energiájúak. Egy idő után, a hőmérséklet további növekedésével beindul az atomok és molekulák szerkezetének felbomlása.

A szétvert atomok ütközései közben keletkező fény valamint a szétrepülő elektronok és atommagok kifejtette 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. A protonok összeolvadásával járó magfolyamatokban energia szabadul fel. A reakciókban keletkező, szétrepülő részecskék nagy sebességgel repülnek kifelé. Ezek nyomása megállítja a tömegvonzás okozta összehúzódást. A csillag egy hosszabb időtartamra egyensúlyi állapotba kerül. A csillag mindaddig ebben az állapotban marad, amíg a belsejében lévő hidrogén héliummá el nem ég.

A csillag sorsa végsősoron elsősorban attól függ, mekkora a tömege. A Nap összes hidrogénje héliummá alakul, majd a tömegvonzás egy ún. fehér törpévé nyomja össze a Napot. A fehér törpe egy kb. földnyi méretű fehéren izzó csillag, amely összesajtolódott atomokból áll. Ha a csillag tömege a Nap tömegénél nagyobb, akkor a fehér törpe nem héliumból, hanem valamelyik nehezebb elemből, például szénből vagy szilíciumból is állhat. 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. Az összeroppanó és így egyre kisebbé váló csillagban egyre kevesebb az elektronok rendelkezésére álló állapot és a Pauli elv alapján egy pályán csak egy elektron lehet. Az elektronok emiatt nem húzódnak tetszés szerinti térfogatba össze és a nyomásuk meg tudja akadályozni a csillag további összeroppanását. A fehér törpe lehűlve fekete törpévé alakul.

Ha a csillag tömege nagyobb, mint a Nap tömegének 1,4-szerese, akkor nem lehet belőle fehér törpe. A tömegvonzás akkor már annyira erős lesz, hogy a kvantummechanikai hatások sem tudják megakadályozni a csillag összeomlását. Az összeroppanás akkor gyorsul fel, ha a csillag belsejében már nincs energiatermelő atommagfolyamat. Ilyenek a vas keletkezéséig játszódhatnak le. A vasnál nagyobb rendszámú atommagok képződéséhez már energia szükséges. Ha a csillag magja már vassá alakult, többé már semmi sem állhat ellen a tömegvonzás nyomásának. A csillag összeroppanásának forgatókönyvét az határozza meg, mennyire nagy a csillag tömege.

A naptömeg 1,4 részénél nagyobb tömegű csillagok összeomlása egyúttal robbanáshoz is vezet. Miközben a csillag anyaga összeroppan, hatalmas mennyiségű energia szabadul fel. Ezeknek köszönhetően vasnál nehezebb elemek is képződhetnek. A periódusos rendszer vasnál nehezebb elemei ekkor alakulnak ki. Az energia jelentős része az összeomló csillag belsejében keletkezik és neutrínók energiájaként szabadul fel. A neutrínók az anyaggal igen gyengén hatnak kölcsön, ezért kijuthatnak a csillag belsejéből. A csillag összeomlásakor a kifelé tartó sok-sok neutrínó a befelé zuhanó nagysűrűségű anyagra kifelé irányuló nyomást gyakorol. Ennek eredményeképpen az összeroppanó csillag külső rétegei leválnak és szétrepülnek. Ez a folyamat a szupernovarobbanás.

A 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. A távcsövek felfedezése óta a Tejútrendszerben közeli szupernovarobbanás nem történt, viszont 1987-ben Tejútrendszerünk egyik kisebb kísérő csillagrendszerében, a Nagy Magellán-felhőben volt szupernovarobbanás. Ezt részletesen megfigyelhettük. Az eredmények igazolták, hogy a

szupernovákról alkotott modelljeink alapvetően helyesek.

A felrobbant szupernova megmaradt belső tartománya az összeroppanás során egyre jobban sűrűsödik. Olyan nagy lesz a belső hőmérséklet, hogy az atomok elektronjai befogódnak az atommagokba és az atommagok protonjait neutronokká alakítják. A hatalmas nyomás a már csak neutronokból álló csillagot atommag sűrűsége roppantja össze, az egész csillag egyetlen hatalmas atommagnak tekinthető. Az ilyen csillagot neutroncsillagnak nevezzük. A neutroncsillagoknak hatalmas mágneses terük van és a forgó neutroncsillagokkal a mágneses terük is együtt forog. Ezért a forgó neutroncsillagok, a pulzárok igen erős, szabályos sugárzást bocsátanak ki. A Rák-ködben is, amely a kínai csillagászok által megfigyelt szupernovarobbanás maradványa, van egy pulzár. Ennek melynek a 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. A neutroncsillag tömege olyan hatalmas, és a csillag annyira kicsiny, hogy a neutroncsillagról való szökési sebesség megközelítheti a fénysebességet. Vannak ilyen megfigyeléseink, úgyhogy nyugodtan feltételezhetjük, léteznek olyan nagy tömegű neutroncsillagok is, ahol a szökési sebesség eléri illetve meghaladja a fénysebességet. Ezek a neutroncsillagok fekete lyukakká alakulnak. A nem látható fekete lyuk sugara az összeomlott csillag tömegének megfelelő Schwarzschild sugarának felel meg. Háromszoros naptömegű fekete lyuk Schwarzschild sugara kb. 9 kilométer.

## 15.4. Fekete lyukak

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

A fekete lyukká összezuhant csillag gravitációs tere annyira erős, 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 másik, amit mi a fényét látva észlelünk, pályamozgást végez a fekete lyuk körül. Továbbá a dagály jelenségéhez hasonlóan a fekete lyuk izzó gázt ragadhat magához a társ csillag felszínéről. A gáztömegnek a fekete lyukba való zuhanása közben hatalmas energiák szabadulnak fel, amelyeket sugárzásként észlelünk.

Fekete lyuk nem csupán egy csillag összeomlása végén alakulhat ki. Hatalmas tömegű fekete lyukak keletkezhetnek a csillagrendszerek közepén. A Tejútrendszer középpontjában is lehet egy milliós naptömegű fekete lyuk. Az ilyen fekete lyukak hatalmas kitörések és nagyon erős sugárzások forrásai. A kvazároknak nevezett égitestek is valószínű óriási fekete lyukak, amelyek 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. A fekete lyuk horizontján 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 horizont átlépése nem jelentené valamely különleges határ átlépését.



## 15.5. Időutazás

A 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 közepébe, ahol végtelen nagy a sűrűség. Ilyen fekete lyukból ezért nem lehet visszajönni. Forgó fekete lyukak esetén már nem ennyire rosszak a kilátások. A beeső anyag útját követve egyes modellek szerint az anyag egy másik téridőbe, másik világegyetembe jut át, ahonnan ide, a mi téridőnkbe nem térhet vissza. A másik világegyetem megfigyelője vajon minek látná az odavezető fekete lyukat? A modellek szerint kifelé törő anyagfelhőnek, ún. fehér lyuknak. Van olyan feltevés, hogy a kvazárok is ilyen fehér lyukaknak felelnek meg. Ezeket a feltevéseket kevés kozmológus veszi túl komolyan. Mint tárgyaltuk, az általános relativitás elmélete nagyon kis méretekre nem érvényes. A tér és az idő megszakadásának közelében a kvantumgravitációs hatások meghatározókká válnak és az ilyen modellek még nem igazoltak.

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

## 16. A 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 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.

### 16.1. A Naprendszer keletkezése

A Tejútrendszerben az évmilliárdok során sokmillió szupernovarobbanás történt. A robbanások pora belekeveredett a Tejútrendszer gázfelhőibe. Az ilyen gázfelhők egyensúlyban vannak és hacsak valamilyen külső hatás nem befolyásolja őket, egyensúlyban is maradnak. A későbbi Naprendszer anyagát szolgáltató hatalmas gázfelhő közelében kb. 4,57 milliárd éve szupernovarobbanás történt. A Naprendszer gázfelhői ütköztek a robbanás során keletkezett hatalmas gáz és porfelhővel. Az ütközés eredményeképpen az addig nyugvó gázfelhő egy része összesűrűsödött és magához vonzotta a felhő többi részét is. Megindult a Nap kialakulása. A Nap tömege a Naprendszer tömegének 99,85%-a.

A szupernovarobbanásból származó lökéshullám és anyagfelhő a Naprendszer gázfelhőjével úgy ütközött, hogy az eggyéolvadt és összehúzódó felhő forogni kezdett. A gázfelhő perdülete miatt a Nap nem tudta a teljes anyagmennyiséget magába vonzani. Annak több mint egy ezreléke kívül maradt. Ez az anyag a bolygók és a bolygóközi anyag alkotórészeként vált. A Nap, a bolygók, a Naprendszerben lévő kisbolygók, meteoritok tehát együtt alakultak ki, nyersanyaguk közös. Nézve a különböző kémiai elemek izotópjainak földi arányait azt találjuk, hogy ezek megegyeznek a Nap, a Hold, a meteoritok kémiai 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. Az ütközések hatására összetömörödtek, egyre nagyobb darabokká álltak össze. Egy almányi kőzetdarab összetömörüléséhez kb. száz év szükséges, egy földnyi nagyságú bolygó százmillió év alatt jött létre. A Föld teljes kialakulásához kb. száz tíz millió év kellett.

A Nap maga már jóval hamarabb működni kezdett. Az izzó Napból kiáramló nagyenergiájú protonok és hélium atommagok, ezek alkotják a napszelet, ütköztek a Naphoz közelebbi övezetekben lévő gázatomokkal és molekulákkal. Kiűtötték őket a Naprendszer külső tartományaiba. A könnyebb gázok a hőmozgás miatt egyébként is illékonyabbak. 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, a Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz hatalmas gázfelhőkből, hidrogénből, héliumból, metánból alakultak ki.

## **16.2. A Föld születéséről**

A Földet alkotó szemcsék a gravitációs összehúzódnak, az ütközések valamint az alkotó elemek radioaktivitásának hatására megolvadtak. A radioaktív bomlás során energia szabadul fel és ez hővé alakul. A Föld belsejében még ma is létező sokezer fokos hőmérsékletet is a radioaktivitás tartja fenn. 4,5 milliárd évvel ezelőtt a radioaktivitás szintje még sokkal magasabb volt. A legmagasabb hőmérsékletek a Föld belsejében alakultak ki. Ide süllyedt le a megolvadt vas és nikkelt.

A összetömörödött por és kőzetdarabkák még bőven tartalmaztak gőzöket, gázokat és rájuk fagyott vizet. Eredetileg a Nap heve a csak a szemcsékhez kevésbé kötött illó anyagokat tudta eltávolítani. A megolvadt kőzetek gáz és gőztartalma a tűzhányók működése során a felszínre tört. A Föld ősi légköre tehát másodlagos folyamatok eredménye, a szemcsék által megkötött gázokból és gőzökből származik. A légkör anyagának egy további része a Naprendszer belsejét rendszeresen látogató üstökösök anyagából került ide. Az üstökösök nagy mennyiségű vízgőzzel, széndioxiddal és kisebb szerves molekulákkal terítették be a Földet. A vékony, megszilárdult földkérgen lecsapódott a vízgőz, kialakult az őstenger. A szárazföldek még nem alakultak ki, csak a tűzhányók létrehozta szigetek emelkedtek a vízszint fölé. A Föld légkörét elsősorban széndioxid, kevés nitrogén és vízgőz alkották. Nyomokban volt benne még ammónia, metán, kénsav és sósav is. A Földdel ütköző kisbolygók, meteoritok óriási tölcéseket hoztak létre a földkérgen. Az ütközések energiája akár a tenger vizét is felforralhatta és törmelékei szigeteket építhettek. Ha a becsapódó bolygó tömege eléggé nagy, akkor a földkérget is beszakadhat. A felszínre törő izzó anyag megolvaszthatja a földkérget is.

A légkörben lévő széndioxid hatására működésbe lépett az üvegházhatásként ismert jelenség is, amely növelte a felszín hőmérsékletét. Ugyanakkor a víz és a savak hatására beindult a kémiai mállás. A savas víz oldja a kőzetek egyes elemeit. Ezen oldott elemek közül legfontosabb a kalcium. A kalcium megkötö 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 feltételei. Az öngerjesztő folyamat eredményeként a Föld felszíni hőmérséklete egyre csökken, a tengerben lévő víztömeg egyre nő.

A világuírból eredő becsapódások kb. négymilliárd évvel ezelőtt kezdtek ritkulni. Az utolsó nagy, a földkérget átszakító becsapódás 3,8 milliárd éve történt. A szárazföldek keletkezésének korát innen számítjuk, a legidősebb kőzetek körülbelül ilyen idős lehetnek. A Föld légkörét, felszínének jellemzőit ezek után az élet kialakulása is erősen befolyásolta.

## **16.3. A Föld lakhatóságának feltételeiről**

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. A Naprendszer keletkezése is kaotikus folyamat, nagyon sok függ a kezdeti feltételektől. Ha a Naprendszer anyagául szolgáló felhő lassabban forog, nagyobb lesz a Nap tömege, így kisebbek lesznek a bolygók és másutt helyezkedhetnek el. Máshogy oszlott volna el az anyag a Naprendszerben, a Földnek nem lenne holdja. Más lenne a Föld anyagának kémiai 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 alapvető feltétele a víz folyékony halmazállapotban való létezése. Ha a víz gőz vagy jég állapotban van jelen, nincs esély a bonyolultabb összetételű szerves vegyületek kialakulásához. A víz létezése az égitest nagyságától, a csillagtól való távolságától, pályának alakjától, légkörének összetételétől, és még sok más tényező összjátékától függ. Az egyes égitestek felszínén egy időre megjelenhet a víz, de el is tűnhet, példa erre a Mars, ahol 3,5 milliárd éve még volt víz. A Föld annyira távol van 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.

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

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

A Föld felszíni viszonyainak évmilliárdokon át létező viszonylagos kiegyensúlyozottsága örökös változásokon keresztül munkálódik ki. A Föld légköri viszonyainak állandósága kapcsolódik ahhoz, hogy a földkéreg állapotváltozásai is hasonlóan viselkednek. Az állandó változás az egész rendszer kiegyensúlyozottságára vezet.

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. A földkéreg azonban állandó változásban van. Kb. tucatnyi nagyobb és jónéhány kisebb lemezre van szabdalva, amelyek lassú mozgásban vannak. Ez a kontinensvándorlások magyarázata. Amerika és Európa évente pár centit távolodnak egymástól. A kéreglemezek mozgásának oka az, hogy a Föld belseje meleg, de a nehezebb elemek nem süllyedtek le mind a Föld belsejébe, a kéreg megdermedése hamarabb következett be. Emiatt a belső rétegek átalakulása folyamatban van, a rajtuk lévő lemezek pedig csúsznak, mozognak. A lemezek találkozása hegységek keletkezéséhez vezet, mindezt tűzhányók működése, földrengések kísérik. A hegységek magasságának az szab határt, hogy a hegyek súlya akkora erőt gyakorol a hegység alatti kőzetekre, hogy azokban az atomi és molekuláris kötések széttöredeznek. Emiatt a kőzet olvadáspontja nyomásfüggő, a nyomás növelkedésével a kőzet szilárdsága csökken. A hegység szépen belesüllyed a földkéregbe, addig, amíg az alapjára ható nyomás annyira le nem esik, hogy az alapon lévő anyag megszilárdulhat. A Himalája magassága kb. a lehetséges magasság közelében van, a Mount Everest-nél sokkal magasabb hegycsúcs nem létezhet.

A víz és a szél egyenletessé igyekszik koptatni a felszínt. Az eső, a szél és a folyók a magasabban fekvő anyagot az alacsonyabban lévő helyekre hordják. Az így keletkezett anyag, 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. A Földön ez a folyamat már többször is lejátszódott, összehordva majd széttörve a szárazföldeket.

Azt mondhatjuk, hogy a Föld felszíne az önszerveződő kritikusság állapotában van, a kisebb-nagyobb összeomlások ennek természetes velejárói. A Föld felszíne mint önszerveződő kritikus rendszer természetesen összehasonlíthatatlanul bonyolultabb viselkedést mutat, mint a önszerveződő kritikusság példaként tárgyalt homokdomb. A felszíni viszonyok alakulásában igen fontos szereplője a Föld élővilága.

## 17. Az élet és a DNS

Nehéz pontosan meghatározni, mit nevezünk élőnek. A szaporodási és növekedési képességgel az élettelen is rendelkezhet. A tűz terjed, a kristályok is növekednek. Igazából nehéz az élő és az élettelen közötti határt megvonni. Például a vírus csak a gazda szervezetének segítségével tud szaporodni. Ha a vírust azonban elszigetelt állapotában vizsgáljuk, száraz porként jelenik meg előttünk.

A magas fokú szervezettség mindenképp az élő sajátja. Az élő meghatározásához hatalmas mennyiségű adat szükséges, ennek hordozója a DNS(dezoxiribonukleinsav). Az élő szervezetek közös jellemzője, hogy valamennyi szervezettsége a DNS molekulára épül. A DNS az élőlény minden egyes sejtmagjában teljes egészében jelen van. Az élőlény egy adott sejtjében a DNS-nek csak az a része tevékeny, amely a sejt működéséhez szükséges.

A DNS tartalmának tárolását a nyelv szabályaihoz hasonlíthatjuk. Rendszeres, ütemes ismétlődés, ami a kristályokat jellemzi, nincsen. Egy vesszor 'Hazádnak rendületlenül..' nem tartalmaz egyszerű ismétlődő sorozatokat. Hasonlóan a DNS láncon lévő bázisok sorozata sem jellemezhető valamiféle szabállyal. A kódolás mikéntjét nem az egyszerű fizikai vagy vegytani törvények, hanem a biológiai folyamatok milyensége határozza meg.

### 17.1. Fehérjék

A sejt életét fehérjék termelődése, működése szabályozza. Az enzimek és hormonok is fehérjemolekulák. A DNS az életfolyamatok vezérléséhez szükséges fehérjék készítéséhez adja a receptet. A fehérjéket 20 alapvető aminosav építi fel. Egy fehérje általában ötventől tízezerig terjedő számú aminosavból áll. A DNS a fehérjét felépítő aminosavakat kódolja, meghatározva a fehérjetermelés folyamatát, azt, hogy mikor, melyik aminosav épüljön be a fehérjét alkotó láncba. A fehérje alakja, elektromos és egyéb tulajdonsága érzékenyen függnek attól, milyen a fehérjét felépítő aminosavak sorrendje. Az 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.

### 17.2. Genetikai kód

Míg a számítástechnika bináris kódolással dolgozik, a DNS kódja négyes alapú, merthogy négyféle bázis létezik. A jelöléseik T, C, A, G. A másik kémiai nyelvet a 20 alapvető aminosav ábécéje adja meg. A két kémiai nyelv közötti kapcsolat megtalálása, miszerint a DNS bázisai hogyan kódolják a fehérjék felépítéséhez szükséges aminosavakat, jelentette a genetikai kód megfejtését. Egy aminosavat a DNS 3 egymás melletti bázisa jelöl ki. Mivel négyféle bázis létezik,  $3 \text{ bázis } 4^3 = 64$  aminosavat tudna kódolni. A fehérjék gyártása közben a DNS a sejtmagban marad. A sejt többi részével való kapcsolattartás és a fordítás egy másik nukleinsav, az RNS (ribonukleinsav) feladata. A genetikai kódban a T betű az U betű

szerepel, mivel a DNS-ről leolvasott ismeretet közvetítő RNS molekulában a T jelű bázisnak az U jelű bázis felel meg. Mivel csak 20 aminosav játszik szerepet, ugyanazt az aminosavat többféle bázishármas is jelölheti, például a GUU, GUC, GUA, GUG bázishármasok ugyanazt az aminosavat, a valint, a GAA és GAG bázishármasok pedig a glutaminsavat kódolják. Az aminosavak jelölésére a 64 közül csak 61 szolgál, három bázishármas a gén kezdetét illetve végét jelöli ki. A genetikai kód egyetemes, minden előre azonos. Ez is az élővilág közös eredetét bizonyítja.

Az egyetlen fehérjét kódoló DNS-szakaszt génnek nevezzük. A teljes DNS-lánc nagyon hosszú, embernél két méternyi. A DNS ezért nem egyetlen hosszú láncként létezik. A kromoszómák a DNS láncot megfelelően felcsavarodott alakzatokban tartalmazzák. Az embernek 23 pár kromoszómája van. A géneket a kromoszómák megkettőződve tartalmazzák, az egyik gén az apától, a másik az anyától származik. Hogy a kettő közül éppen melyik határozza meg a kódolt tulajdonságot, azt a genetika törvényei szabják meg.

A DNS kettős spirálja az adatokat két egymás felé forduló szálban megkettőződve tartalmazza. Ezért ha az egyik szálát valamilyen külső hatás elszakítja, megrongálja, a javító enzimek a másik szálon lévő bázisokat felhasználva gyorsan helyreállítják az eredeti állapotot. A szál szakadását általában valamilyen maró vegyület idézi elő. Ezeket mérgekként ismerjük. A radioaktív sugárzás is elsősorban így, maró vegyületeket keltve, rongálja meg a DNS-t. Ritkább az, hogy a közvetlenül a sugárzás szakítja el a szálát.

Míg az egyszeres szálszakadást a javító enzimek szinte azonnal eredményesen kezelik, a kétszeres szálszakadást okozó támadás már nem javítható ki. A kétszeres szálszakadások a sejt működési zavaraihoz, pusztulásához vezethetnek. Rákos folyamatok kiinduló állapotát képezhetik.

### 17.3. A legegyszerűbb baktérium génjeiről

A legegyszerűbb ismert baktérium 517 génnel rendelkezik. Ezeket pontosan feltérképezték. Ismert, hogy az élettevékenységekhez a DNS lánc nem minden egyes génje egyformán fontos, vannak olyan gének is, amelyek ugyan ott vannak a DNS-ben, 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 a baktérium életében. A vizsgálatok szerint a valóban szükséges gének száma 265-350 között van, ezek közül kb. száz génnek a szerepét még nem ismerik.

A baktérium genomját feltérképező csoport most azon dolgozik, hogy elkészítse az első mesterséges genomot. Ez azt jelenti, hogy egy fenti baktériumból eltávolítják az eredeti DNS állományt és egy mesterséges módon előállított DNS láncot építenek be a baktériumba. Ezek után majd megvizsgálják, ugyanúgy viselkedik, táplálkozik, szaporodik-e a baktérium, mint korábban. Ha igen, akkor a genomról való ismereteink tényleg helytállóak és teljeseek lehetnek.

### 17.4. A 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. A következő sorokban a béta lánc aminosavsorrendjét adjuk meg. A felső sor az emberre, az alsó sor a nyúlra vonatkozik. Az aminosavakat az irodalomban szokásos módon nagybetűvel jelöljük, például V a valint, H a hisztidint, L a leucint, E a glutaminsavat kódolják.

VHLTPEEKSAVTALWGKVVNVDEVGGEALGRLLVVYPWTQRFFESFGDLSTPDVAMGNPKVKAHGKKVLGAFSD emberben; 1-78

VHLSSEKSAVTALWGKVVNEEVGGEALGRLLVVYPWTQRFFESFGDLSSANAVMNNPKVKAHGKKVLAAFSE nyúlban; 1-78

GLAHLNKLKGTFTLSELHCDKLHVDPENFRLLGNVLVCVLAHHFGKEFTPPVQAAYQKVVAGVANALAHKYH emberben; 79-146

GLSHLDNLKGTFAKLSELHCDKLHVDPENFRLLGNVLVIVLSHHFGKEFTPVQAAYQKVVAGVANALAHKYH nyúlban; 79-146

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

Most azt vizsgáljuk meg, mi történhet, ha az ember megfelelő génszakasza, amely a hemoglobin béta lánc esetén  $3 \times 146 = 438$  bázisból áll, csupán egyetlen bázisban is eltér a fenti aminosavsorrendet meghatározó génszakasztól. Erre a jól ismert példa a sarlós vérszegénység kórképe, amely az afrikai fekete népességben meglehetősen gyakori. Ekkor a fenti 146 aminosav közül a hatodik helyen nem E, azaz glutaminsav, hanem V, valin áll. A két aminosavat kódoló bázishármasok E-re GAG, V-re GUG, azaz a két aminosavat kódoló rész a bázishármas második tagjában tér el egymástól. Az 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 az alakja is. Ez a mikroszkópon látható sarló alak a gömb helyett, ami vérkeringési zavarokat, súlyos betegséget okoz.

## 17.5. A különböző élőlények genomjainak összevetése

A genom a genetikai állomány, a DNS-ben lévő gének összességét jelöli. Az ember életműködéséhez szükséges fehérjék termelését kb. 35000 gén vezérli. Az ember génjeinek feltérképezését mostanában fejezték be.

Korábban azt tételezték fel, hogy az ember és általában a fejlettebb élőlények összetettebb életműködései egyszerűen több gén, azaz többféle fehérje működésének tulajdonítható. Kiderült azonban, hogy az embernek nincs sokkal több génje, mint a nála jóval egyszerűbb szervezetű férgeknek. Az egyik nagyon alaposan tanulmányozott, száznál kevesebb sejtből felépülő fonálféregnek 19000 génje van, ami nem sokkal kevesebb, mint az ember 35000 génje. Ez arra utal, hogy a genom nem egyszerűen a gének egymásmellettségét jelenti. Miközben a gének hasonlóak, ugyanolyan jellegűek, az egyik állomány a fonálférget, a másik az embert építi fel, működteti. Sok gén szinte minden élőben megtalálható. A gének csak egyszerű építőköveknek tűnnek. Mint ahogyan ugyanolyan építőkövekből lehet disznóolat és palotát is építeni, a géneket működtető rendszer a meghatározó, az hogy a szervezet miként használja őket. Szó sincs tehát arról, hogy az élőlények egyszerűen a gének túlélőgépei lennének, ahogyan azt a genetika szélsőségesen értelmezői még pár éve is képelték.

A genom tehát nem a gének egyszerű összessége. Például a DNS-nek ugyanaz a szakasza a szervezet fejlődésének különböző szakaszaiban különböző géneket kódolhat. A magasabban fejlett lényeknek nincs sokkal több génjük. A génjeik bekapcsolása, működésének összehangolása a különböző. Korábban a DNS-nek azokat a részeit, amelyek nem pont valamilyen génnek feleltek meg, egyszerűen feleslegesnek tekintették, amit csak történeti okoknál fogva hurcol magával a DNS. Mostanára kezdik felismerni, hogy a DNS-nek ezek a részei - az emberi DNS-nek csupán 5%-a feleltethető meg génnek, a többit régebben szükségtelennek tartották -, a géneket vezérlő tartományt alkotják.

Az élővilágban a szervezet összetettségét azzal jellemezhetjük, hogy milyen módon aránylik a DNS állomány hossza a benne lévő gének számához. A baktériumok és egyszerű szervezetek, mint a fonálféreg tényleg elsősorban a génjei egyszerű összességének tekinthetők, mert a DNS állományuk nagyrésze működő gén. Minél fentebb jutunk a törzsfán, annál nagyobb lesz az egyetlen génre jutó vezérlő egységek hossza. Az ember esetén a vezérlő egységekben lévő bázisok száma akár hússzor akkora is lehet, mint a ténylegesen működő géneket alkotó bázisok száma.

A géneket vezérlő különböző bekapcsoló, összehangoló rendszerek erősen függhetnek a környezeti hatásoktól. Korábban azt hitték, hogy az egyes betegségek egyszerűen az egyes gének másulatának tulajdonítható, lásd a fenti példát a sarlós vérszegénységre. Mára már máshogyan vélekednek. A sejt működése nem az egyes gének működésének az egyszerű összege. A különböző gének által termelt fehérjék 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. 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.

## 17.6. A gének be- és kikapcsolása

Az, hogy a DNS egy génje mikor lép működésbe, 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. A DNS génjei és a sejtben éppen működő fehérjék kölcsönhatása szabja meg, hogy éppen milyen géneknek kell működésbe lépni ahhoz, hogy az életműködés megfelelő állomásaként újabb fehérjék termelődjenek.

A sejt életfolyamatainak vezérlését, a fehérjék és a gének együttműködésének összehangolását az átírásvézérlők (angolul transcription factors) hálózata végzi. Egy átírásvézérlő több génhez és egy gén több átírásvézérlőhöz kötődhet. Van egy olyan eljárás, amely lehetővé teszi, lássuk, éppen melyik gén került bekapcsolt állapotba, azaz a DNS melyik génjéről történik átírás RNS molekulára. Ez a módszer még nem mutatja meg, miért kapcsolódott be az adott gén, de egy másik eljárással társítva, megfelelő informatikai eszköztárat felhasználva sikerült egy módszert találni és az átírótenyezők működését tanulmányozhatóvá tenni. Míg korábban háromszáz kutató egyévi munkával tudta egyetlen átírótenyező működését feltérképezni, az új módszerrel egyetlen kutató egy hét alatt végzi el ezt a munkát. 2002 októberének végén közzétették, hogy a sütőélesztő 141 ismert átírótenyezőjéből 106-ot sikerült így meghatározni. Az élesztő genomját kb. 6000 gén alkotja, a 106 tanulmányozott átírótenyező az élesztő genomjának 2300 génjének a be- és kikapcsolását vezérli.

Az élesztő genomjának tanulmányozása eddig is sokat segített az emberi genom feltárásában. Sok közel azonos génünk van és a genomot érintő folyamatok is azonosnak vagy rokonok. A kb. 35000 génből álló emberi genomot kb. 1700 átírótenyezőből álló hálózat szabályozza. Ezeknek a feltárása is folyamatban van. Ha sikerülne például megtalálni, hogy a sejtek szaporodását milyen átírótenyezők irányítják és ezeknek mely működési zavarai vezetnek a sejtek burjánzásához, azaz a rákos daganat képződéséhez, eljárásokat találhatunk a rák megelőzéséhez és gyógyításához.

## 17.7. Az élet jellemző adattömeg származásáról

Végül is honnan származik az élőlények hordozta információ? Az adattömeg magától nem jön létre, keletkezéséhez munka szükséges. A világűrből érkező háttérsugárzás mért színképe arról tanúskodik, hogy 300000 évvel a keletkezése után a világegyetem pontosan a hőmérsékleti egyensúly állapotában volt. Ez pedig az entrópia felső határának felelne meg. Hőmérsékleti egyensúly esetén a világegyetem állapotának jellemzéséhez elegendő hőmérsékletének és sűrűségének ismerete. Emiatt a világegyetem kezdetben szinte egyáltalán nem tartalmazott információt. A mai világegyetem leírásához viszont óriási adattömeg szükséges, mivel az igencsak messze van a hőmérsékleti egyensúly állapotától.

Honnan a munka, ami az információt termelte? A szükséges energia az egyensúlyi állapotot megszüntető tömegvonzási folyamatok során szabadult fel. Az anyag összezsugorodásakor energia szabadul fel, és ez az energia a rendszert felmelegíti. A felmelegedő rendszer sugároz, a csillagok is a gravitációs összehúzóerő és a belsejükben lejárvó fúziós folyamatok energiatermelése miatt sugároznak. A csillagok kisugárzott energia információ forrásául szolgálhat. Ezért azt mondhatjuk, hogy bár a kozmikus háttérsugárzás színképe hőmérsékleti egyensúlyra utal, a tömegvonzás miatt nem beszélhetünk igazi egyensúlyról. A korai világegyetem nem a lehető legnagyobb, hanem egy alacsony entrópiájú állapotban volt. Azaz az egyenletesen eloszló, szerkezet nélküli, ám a tömegvonzásos gáztömeg hatalmas mennyiségű adattömeggel jellemezhető 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, hogy 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 a DNS örökítő anyagában 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. A DNS csak azon másolatai 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 DNS-be.

Az adatok keletkezésében oly fontos másulatok, mint zajszerű képződmények, zavarják az adatátvitelt és adatok elvesztését is eredményezhetik. Minél összetettebb a DNS, 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 örökítő állománya nyilván jóval kevesebb adatot tartalmazott. Emiatt örökítő anyaguk továbbadását a másulatok okozta zaj igen erősen zavarhatta. Ez az ellentmondás egyike annak a számos paradoxonnak, amelyek az első élőlény kialakulásának modelljeit jellemzik.

## 18. Az élet keletkezéséről

Az élet keletkezése mindmáig megoldatlan tudományos rejtély. Ha a természet történetét az ősrobbanástól máig tekintjük, talán a legnagyobb. Számos elképzelés, modell létezik, amelyek a kialakulás helyszínében és egyéb természeti feltételeiben is eltérnek egymástól.

Darwin az élet keletkezésének helyéül szerves vegyületekben gazdag, meleg vizű tavacsát tételezett fel. A korszakok során a vegyületek egyre bonyolultabbakká váltak, összekapcsolódtak. A vegyi folyamatok egyre összetettebbé váltak és igen egyszerű, de már élőnek tekinthető szervezatként kezdtek viselkedni. Darwin fenti elképzelése majdnem száz éven át meghatározta az élet keletkezéséről alkotott elképzeléseket. A tó helyett az élet születésének helyéül az tengert tételezték fel és megpróbálták 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 üvegedényben lévő víz a tengernek, a metán, ammónia és hidrogén az ősi légkörnek felelt meg. Az üvegedényben szikrakísüléseket keltett, amely 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. Az elvégzett mérések 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.

Az egyre régebbi kőületek vizsgálata azt bizonyítja, hogy az élet nem valamely kellemes, langyos vizű tengerben, hanem inkább egy nagynyomású fazékhoz hasonló környezetben jöhetett létre. A keletkezést jellemző vegyi folyamatok meglehetősen gyorsak lehettek. 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 megolvadt kérge újra megszilárdult, gyorsan megjelent az élet. Az életnek a mélységekben, barátságtalannak látszó körülmények között való keletkezésének elképzelését a mélyen a kőzetekben élő szervezetek felfedezése egyre jobban elfogadottá teszi.



## 18.1. Élet mélyen a felszín alatt

A mélyen a felszín alatt élő szervezeteket kutató tudományág gyakorlatilag az utóbbi tizenöt év során született meg. Egészen máig azt hittük, hogy a felszín gazdag élővilága alatt ott vannak 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 csúcsot a kb. 5 km mélyen, 113 °C-on élő szervezetek adják, van viszont már bizonyíték 169 °C hőmérsékleten élő apró lényekre is.

A mélyben létező, más élőktől évmilliók óta elzárt szervezetek életmódját az anyagcsere különleges változatai és a nagyon lassú szaporodás jellemzi. Az anyagcseréhez szervesen vegyi folyamatok energiáját használják fel. A mélyben élő apró lények általában a belső vulkánosság során felszabaduló vegyületeket is átalakíthatják és így ásványtani változásokat okoznak. Egyes becslések szerint a mélységben élők össz tömege 0,1%-a a felszínen élők össz tömegének, de az is lehet, hogy összemérhető vele.

A mélyben élő szervezetek nagyon egyszerűeknek, ősieknak tűnnek. Az eddig ismert élőtől, a baktériumoktól és eukariótáktól függetlenek, archaeák néven az élővilág törzsfájának harmadik ágát alkotják. Míg a felszínen a baktériumok és az eukarióták gyors genetikai változásokon mentek át, addig a tőlük kb 3,8 milliárd éve elszakadt archaeák jobban megőrizhették az ősi élővilág jellegzetességeit.

## 18.2. Az élet terjedése a világűrben

A kőzetekben élő szervezetek bármely bolygón, ahol van vulkanikus tevékenység, megélhetnek. Mivel ilyen bolygók szerte a Mindenségben gyakran előfordulhatnak, a világegyetem akár hemzseghet az ilyen szintű élettől. A felszínen kialakuló, fénymegkötésre épülő élet már jóval ritkább lehet, 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.

A kőzetekben élő apró lények átkerülhetnek, át is kerülhetnek egyik bolygóról a másikra. A világűrben becsapódó nagyobb tömegű test a a bolygó felszínének ütközve kőzetdarabokat robbanthat ki és ezek a bolygó vonzásából kiszabadulva más bolygók felszínére juthatnak, lásd a 22. ábrát. Ilyen módon a bolygók folyamatos kölcsönhatásban állnak egymással. A viszonylag védett környezetben, a nagyobb kövek belsejében utazó betokozódott apró lények a teljes Naprendszerben elterjedhetnek. A bolygókra 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 közeiben lévő apró lények 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 létére találunk bizonyítékot.

## 18.3. Meghatározott-e az élet fejlődése

Amikor a NASA egyes terveiről, mint a marsi élet, általában a Naprendszerben való élet utáni kutatásáról olvasunk, nem is nagyon tudatosul bennünk, mennyire izgalmas és ellentmondásos kérdéssel találkozunk. A NASA kutatói, amikor abból indulnak ki, hogy a Marson is 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, hogy mivel ott van víz, az élet is jelen lehet. Mintha a földihez hasonló körülmények, a víz, a 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 pusztán 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, a biológusok nagy többsége hallani sem akar erről. Valóban, ha kiderülne, hogy vannak bizonyos, eddig még nem eléggé értett vagy ismert törvényszerűségek, amelyek az élet és az értelem felé mutató fejlődést írják elő, az alapjaiban kérdőjeleznék meg azt a nézetet, miszerint a törzsfelődésben nincs semmi elrendeltség, minden csupán a céltalan véletlenek és a természetes kiválasztódás összjátékának az eredménye.

A biológusok meghatározó többsége azt tételezi fel, hogy az 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. A földönkívüli értelmes lények kutatásáról 1996-ban folytatott vitában 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 világűrből becsapódó égitest a legapróbb lények szintjéig megsemmisítené a földi élővilágot, az újrainduló törzsfelődési folyamatban semmi sem tehetné biztossá azt, hogy az újra az ismert módon zajljék le. Azaz a halakon, kételtűeken, hüllőkön, emlősökön keresztül elvezessen az értelmes emberig.

A most alakuló új természetkép, végül is a fizikusok, csillagászok, asztrofizikusok erre hivatkoznak, erről másként vélekedik. Eszerint a természet történetét áttekintve megfigyelhetjük, hogy van fejlődés, az idő múlásával egyre összetettebb rendszerek jelennek meg. Azaz a természeti folyamatok során bizonyos teremtmény 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.

## 18.4. A törzsfelődés folyamatáról

Az élő szervezet a törzsfelődés folyamatában kettős szerepet játszik. Az egyik szerint génjei 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. A kutyák egyetlen fajt alkotnak, de mégis igen különbözően néznek ki. Nagyság szerint az egészen kistermetű fajtáktól a borjú nagyságúakig mindenfélét találhatunk közöttük. A kutyafajták csak az ember háziállataként életképesek, a természetbe kivetve nem állnák meg a helyüket. Vadon csak az ősök, a farkasszerűen élő és az ilyen kinézetű lenne sikeres, a környezet ezt a fajtát választaná ki közülük.

A törzsfejlődés alapelvei szerint a megjelenő új fajnak akkor van jövője, ha képes alkalmazkodni a környezetéhez, illetve a környezete erőforrásaiért való harcban meg tud maradni. Az élőnek a környezethez való viszonya azonban nem ennyire egyszerű. Az élő szervezet mint önszerveződő rendszer nem egyszerűen csak alkalmazkodik a környezetéhez. Egy faj az anyagcseréje és egyéb tevékenysége során módosítja helyi és tágabban értelmezett környezetét, részben rombolva, részben építve azt. Az élő környezetet és táplálékot választhat magának. Fészket épít, lyukat ás, odút, vackot, földalatti járatokat készít, hálót sző, bebábozódik. Vegyületek kibocsátásával is változtathatja környezetét. Az utódneveléshez környezetet választhat, amit védhet és ahol kedvező körülményeket teremhet. Ezért maga a törzsfejlődés is egy, az egyes fajok és saját maga által állandóan változtatott, alakított környezetben zajlik. Ez azt jelenti, hogy a törzsfejlődése 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.

Ezért a környezet átalakítása a törzsfejlődésnek olyan fontos tényezője, amely a természetes kiválasztódáshoz hasonlóan befolyásolja a törzsfejlődés menetét. Ezeket a környezetet átalakító hatásokat a törzsfejlődés folyamatának vizsgálatakor eddig csak kevésbé vették figyelembe.

## **18.5. Az élet megjelenése és fejlődése**

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

Az első életre utaló jelek Grönlandról származnak, koruk 3,8 milliárd év. Nyugat-Ausztráliában 3,5 milliárd éves kőzetekben már tucatnyi különböző fajt találtak, amelyek a világon ma is mindenütt megtalálható kék-zöld algák közeli rokonainak tekinthetők, azok maradványainak 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 Naptól merítve az ehhez szükséges energiát, maguk készítettek maguknak táplálékot. A fentebb már említett kék-zöld algák, másnéven kémoszatok ilyen szervezetek. A fénymegkötés, idegen szóval fotoszintézis során a vízből kivonják a hidrogént, miközben oxigén szabadul fel. A fénymegkötés során a fény energiája szerves vegyületekben raktározódik el. A kémoszatok 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 egy fordulópontja mintegy kétmilliárd éve következett be. Ekkorra annyira felszaporodott az oxigén, hogy azt a kémoszatok nem tudták elviselni, oxigénmérgezést szenvedtek. Elvesztették életterületüket, kénytelenek voltak oxigénmentes helyekre, a tavak, mocsarak, tengerek iszapjába húzódní, ahol máig is élnek.

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

Az egysejtűek egyre szerveződtebbekké váltak, lassan elérték a maiakhoz hasonló fejlettségi szintet. Az egysejtű lények együttélése, munkamegosztása odáig fejlődött, hogy 900 millió évvel ezelőtt jelentek meg a legegyszerűbb soksejtűek. Ilyen lények például a szivacsok. Ezután a fejlődés ugrásszerűen felgyorsult. Az első állatok 600 millió éve jelentek meg.

Kb. 570 millió éve, a kambriumban egyszerre nagyon sokféle állat jelent meg, mert az akkortól megjelenő mészpáncél, a csontok nagyszerű lehetőségeket biztosítottak a fejlődésre. Az 570 millió évtől 245 millió ezelőtti korban, a paleotikumban jelentek meg a halak, kételtűek, a szárazföldi növények és rovarok valamint a hüllők kezdetleges változatai. A dinoszauruszokat 225 millió éve alakultak ki. 160 millió éven át uralták a Földet és 64 millió éve pusztultak ki. A dinoszauruszok eltűnése lehetőséget adott arra, hogy a náluk jóval magasabb szervezettségi fok elérésére képes emlősök életteréhez jussanak.

## 18.6. Az élővilág törzsfája és a molekuláris törzsfejlődéstan

Pár évtizeddel ezelőttig a rendszertan alapja az élővilág kétágú törzsfája volt. Az élőlények két nagy ágra, a sejtmag nélküli baktériumok és a sejtmaggal rendelkező eukarioták ágára oszlottak, és a törzs azt jelképezte, hogy a baktériumok és az eukarioták közös őstől származnak. Az eukariotákhoz tartoznak 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 állapította meg a rokonsági fokokat, rajzolta fel a törzsfát.

A DNS felfedezése és főleg a gének szerkezetének tanulmányozása forradalmasította a törzsfejlődéstan kutatásokat. Az ilyen, molekuláris törzsfejlődéstanak nevezett módszer alapja a következő. A 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 bázisokban eltérő gének ugyanakkor az aminosavsorrendnek, így ugyanakkor a fehérjének az előállítói. Ez azért fordulhat elő, mert ugyanazt az aminosavat többféle bázishármas 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. Ezért minél korábban váltak el a közös őssel rendelkező élőlények, a megfelelő fehérjét kódoló génjeik annál jobban eltérnek egymástól, lásd a hemoglobin béta láncának eltéréseit az ember, a gorilla, a nyúl, a szarvasmarha, a tyúk és a ponty estére. Ilyen módon, megfelelő számú gén evolúciós változásait tanulmányozva pontosan fel lehet térképezni a fejlődés szakaszait, a rokonsági fokozatokat. Nemcsak a rokonság fokait, hanem az elválások időszakát is meg lehet adni, ugyanis a másulat gyakorisága megbecsülhető. Ilyen módon meg lehet mondani, hogy milyen ágak körülbelül mikor váltak el egymástól. A 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.

A molekuláris törzsfejlődéstan módszer eredménye volt az archaeák felfedezése, a baktériumoktól való elkülönítése. Miután így megszületett a három ágból álló törzsfa, 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. A törzsfa eukariótákat tartalmazó része tényleg faszzerű szerkezetet

mutat, a baktériumok, archaeák és eukarióták azonban nem egy közös őstől, hanem nagyon ősi primitív, egyedenként talán életképtelen képződmények csoportjától szerezték génjeiket. A legújabb eredmények szerint az eukarióták őse egy baktérium és egy archaea összeolvadásával alakulhatott ki.

## **18.7. Az ember megjelenése**

A főemlősök törzsfája még nem teljesen ismert. A 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, a génjeink különbsége, a bázisokban való különbséget nézve kb 5%, azaz génjeink 95%-ban azonos alakúak. Az, hogy a csimpánzoktól való elválás után milyen események történtek, még csak részben ismert. Az emberhez vezető fajok közül 9, maradványaiból ismert fajról tudunk és a becslések szerint még 6 további ilyen faj létezhetett. Az embert kivéve valamennyi eltűnt. A neandervölgyi ember, amelynek agymérete a mi agyméreteinket is meghaladta, kb. 300000 éve jelent meg és 27000 éve tűnt el. A genetikai távolságok vizsgálata és az alaktani összevetések szerint vizsgálata szerint tőlünk külön fajt képeztek, nem olvadhattak velünk össze. A mai emberhez vezető ágtól legalább félmillió évvel ezelőtt leválhattak. 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.

Most 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, a zsákmányt 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. A természetes környezet könnyen kiválaszthat törpe fajokat, valószínű egy ilyet sikerült most találni.

## **18.8. 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 DNS láncokból felderíthető. Ez a munka már elkezdődött és a genetikai távolságok vizsgálatából nagyon sok minden kielemezhető. Az ún. mitochondriális DNS 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.

## **18.9. A tömeges kihalások és a világúrból eredő csapások**

Az őslénytani leletek kiértékelése komoly összeomlásokról árulkodik. A fajok kihalása természetes jelenség, az élettér megváltozása, az alkalmazkodásra való képtelenség 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. A tömeges kihalások a tengeri és szárazföldi fajokra egyformán vonatkoznak, jelezve, hogy bolygóméretű csapás sújtotta az élővilágot.

A legjobban ismert tömeges kihalás a dinoszauruszok eltűnése 64 millió évvel ezelőtt, a kréta kor végén. Ekkor a fajok 47%-a kipusztult. A fajok tömeges eltűnését valószínű égből jövő csapás, egy kisbolygó Földdel való ütközése okozta. A becsapódó kisbolygó hatalmas, 250 km méretű tölcserűt ütött a felszínre. Ezt a mélyedést a Mexikói öbölben a Yucatán félszigetnél találták meg. Az ütközésre további bizonyíték a robbanás során szétszóródott irridiumszemcsék nagy arányú előfordulása a korabeli rétegben, amely határozottan kisbolygó becsapódásának a jele. A kisbolygó becsapódásával hatalmas kőzetdarabok szét. 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 nagytű állatok nem tudták elviselni, kipusztultak.

A Föld felszínén látható kráterek mind becsapódások eredményei. Nyilvánvaló, hogy a Földre is hasonló sűrűségben csapódtak be kisbolygók, de a felszín átalakulása elmosta nyomaikat. A 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. A 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. A szupernóvarobbanás pusztítását több tényező együttese okozza. A szupernóva pár hétre csaknem olyan fényessé válik, mint a csillagrendszer összes többi csillaga együttevve. A Föld légköre, az ózonréteg az ide érkező sugárzást nem tudja eléggé megsűrni, 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 élőlények belső szerveit károsítja.

A szupernóvarobbanás hatásának legfőbb bizonyítékai a korabeli kőzetekben talált kb. tizedmiliméteres méretű gömböcskék, az ún. szferulák. Ezeknek a szferuláknak az elemösszetétele szupernóva eredetre utal. Az azonos összetételű szemcsék kb. ugyanolyan sűrűségben fordulnak elő Eurázsia különböző helyein található perm-triász kőzetekben.

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

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

A tömeges kipusztulást okozó égi eredetű csapások eszerint a törzsfajlás természetes velejárói, a változások hajtóerői. Az élőlények egymásra utaltsága, amivel a következő fejezetben foglalkozunk, az

éővilág egyensúlyi viselkedésére vezet. Kisebb helyi változás egyes fajok eltűnését okozhatja, amelyeknek életterét más fajok töltik be. A tömeges kihalások, amelyek akár a fajok 90-95 százalékát eltűntetik és a másulatok óriási számát hozzák létre, a legnagyobb méretű összeomlásoknak feleltethető meg. Maga a törzsféjlődés az önszervező kritikus állapotnak felel meg, ahol a helyi szintű állandó változások biztosítják a bolygónyi méretű egyensúlyi állapot kialakulását és fennmaradását.

## 19. Ökorendszerek

Egy ökorendszer a növényeket, állatokat és a környezetüket foglalja magába. Az ökorendszer lehet egy bokor, a rajta élő valamennyi élőlénnel együtt, vagy egy 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.

Az 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. Az ökorendszerben lehetetlenség, hogy a kísérlet során egy-két dolgot engedjünk csak változni, miközben az összes többi állandónak tartsuk, ahogy ezt a fizikában szokásos.

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

### 19.1. Az Aral-tó és környezetének pusztulása

Az Aral-tót tápláló folyók, a Szír-darja és Amu-darja vizét öntözésre használták fel, Közép-Ázsia mezőgazdaságát gyapottermesztésre szakosította a szovjet rendszer. Túl sok vizet használtak fel az öntözésre, egyre kevesebb jutott az Aral-tóba, amely sós vizű állóvíz. A tó területe egyre csökken, mert kiszáradóban van. Mivel a tó felületének egyre nagyobb részéről tűnik el a víz, a fenekéről egyre több só kerül szárazra. A vad sivatagi szelek a sót felkavarják majd széthordják. A sós por hatalmas területeket tett és tesz terméketlenné, lakhatatlanná. A virágzó, gyapottermelésre szakosított mezőgazdaság álma szertefoszlott, a területeket világszerte példátlan méretű ökológiai katasztrófa sújtja.

### 19.2. A Viktória-tó ökorendszerének összeomlása

A Viktória-tó Afrika legnagyobb édesvizű tava. Mellékén emberek milliói élnek, kiknek életét a halászat, a tó határozza meg. A valaha halban gazdag tó halállománya tönkrement, mert egy új fajt telepítettek bele, a nílusi sügért. Ezt kb. 40 éve egy sporthorgász tette, arra gondolva, hogy a nagyméretű nemes halra való horgászat majd megnöveli a tó vendégvonzó erejét.

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

A helyi halászok most a nilusi sügért fogják ki és ezeket a hatalmas halakat tűzön főzik meg. Korábban a kisebb halakat szárítva fogyasztották. A főzéshez fa kell, ezért a környék erdei vésszen pusztulnak. Ennek következtében gyorsan pusztul a talaj, tovább rombolva a tó egyedülálló ökörendszerét. Egyetlen ember saját szempontjából józan cselekedete egy teljes ökörendszert tett tönkre.

### 19.3. Az ökörendszerek energiaháztartása

Az ökörendszerek energiaháztartásának alapja a napenergia. A fényenergiát a növények a fénymegkötés során szerves vegyületekben tárolt energiákká alakítják. Ez az energia rövidebb-hosszabb ideig az ökörendszerben marad, de a rendszeren belül alakja változik. A növények az őket érő napsugárzás energiájának csak egy kis részét, néhány százalékát tudják megkötni. Nincs olyan növény, amely a napenergiát 10%-nál magasabb hatásfokkal hasznosítaná.

Ha az ökörendszerben 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. A következő csoportba a növényevő állatok tartoznak. A növényekkel táplálkozó állatok az elfogyasztott energiát szintén rossz hatásfokkal 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. A 10%-os energiafelhasználási arány végeredményben a hőtan II. főtételenek a következménye. Az átalakítások során mindig hő szabadul fel, távozik a környezetbe és emiatt az energia 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, amely növényi és állati táplálékot egyaránt fogyasztanak.

### 19.4. Talajélettan

Ami az ökörendszer energia- és anyagforgalmát illeti, körfolyamatok sokasága alkotja. Ezek a körfolyamatok egymásba is kapcsolódnak. Az egyes tápláléklánckok, mint például a levél > levéltetű > hétpettyes katica > veréb > karvaly mind nagyobb körfolyamatok részei. A szárazföldi körfolyamatok épségének alapfeltétele a növényzetet tápláló talaj megfelelő állapota. A talaj egészségének meghatározó eleme a talaj szervesanyagtartalma és az azzal táplálkozó élővilág. A talajnak ezt az összetevőjét televényföldnek, idegen eredetű szóval humusznak nevezzük.

A talaj szinte valamennyi fontos tulajdonságát, mint a termékenységét, vízháztartása és lazaságát stb. a televényföld állapota határozza meg. A talajban élő apró lényeket a szervesanyagok lebontásakor felszabaduló energia táplálja. A lebontás termékei a növények számára szükséges és felvehető tápanyagok. A televényt a talajba jutott szerves anyag éteti. A talajt tápláló szerves anyag forrásai a lehullott levelek, korhadó növényi részek, állatok anyagcseretermékei és az elhullott állatok tetemei stb. A fenti, a levéltől a karvalyig terjedő tápláléklánc is ebbe a rendbe illeszthető. A levelet hordozó növényt ugyanis a talaj éteti, a talajt szervesanyaggal pedig a fenti állatok anyagcseretermékei és a karvaly teteme táplálja.

### 19.5. Lemming a tundrán

Az ökörendszerek működését jól szemlélteti 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. Az 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.

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

Amint a lemmingek elpusztulnak, a sarki fagyok miatt a tetemeikben tárolt anyagok a talajban csak lassan alakulnak át a növények számára is felvehető tápanyagokká. Ahogy a lemmingek testéből felvehető tápanyag alakul ki, 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, lelegelnek mindent. Az összeomlás megint bekövetkezik.

A lemmingek négyéves körfolyamata befolyásolja 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.

## 19.6. A Gaia modell

A Gaia modell - Gaia a görög hitregékben a Föld istennője -, szerint a teljes földi élővilágot egyetlen élő szervezetként értelmezhetjük. A földi élőlények önmagukban, a többi élő nélkül nem létezhetnének és természetesen nem létezhetnek az élettelen környezet nélkül sem. Az élőlények egymásra vannak utalva, akárcsak egy élő szervezet különböző testrészei. Az élő bonyolult önszabályzó folyamatok, visszacsatolások tartják a megfelelő állapotban. Ezek biztosítják az élethez szükség feltételek viszonylagos állandóságát. Ilyen közel állandó jellemzők a testnedvek összetétele, vagy akár a emlősnél a test hőmérséklete.

Az élő szervezetek a környezetüket is alakítják, szabályozzák, a környezet pedig feltételeket szab a szervezetek létezésére. A természetes kiválasztódás meghatározza, milyen szervezetek maradhatnak fent. Az élet és a környezet között visszacsatolási hatások léteznek. Ennek eredményeképpen az élő szervezethez hasonlóan az élővilág, a Gaia jellemzői, az élet jelenlegi formáit biztosító feltételek is állandóak. Emeltettük, hogy a légkör összetételét a földi élővilág alakította ki. Vagy gondoljunk arra, hogy a tengerek, világtengerek sótartalma is állandó. Ennek okát, a szabályzó rendszer működését igazából még nem is értjük. Az 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. A fénymegkötés folyamatához szükséges széndioxidot kivonják a légkörből. Ezzel a légkör nyújtotta 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, akárcsak az élő életműködését, körfolyamatokként ragadhatjuk meg. Gondoljunk például a víz, a szén, a nitrogén, a foszfor, a kálium stb. körforgására a természetben. Sorolhatnánk sok egyéb körfolyamatot is. Az egyes körfolyamatok rövidebb-hosszabb időtartamúak lehetnek. A körfolyamatok egymásba is kapcsolódhatnak, kapcsolódnak. A 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.

Az élővilág egésze és az 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.

## 20. Az emberről

Korábban a fejlődés jelei a termet, a csontozat és az izomzat méreteiben, a táplálkozás, a mozgás a szaporodás folyamatainak hatékonyságában jelentkeztek. Az emberré válás folyamatának legfontosabb élet-tani jellemzője az agy térfogatának és szerveződöttségének igen gyors növekedése. 3-4 millió évvel ezelőtt élt elődeink agymérete kb.  $400\text{ cm}^3$  volt. A 100 ezer - 200 ezer éve elért és azóta állandósult emberi agytérfogat  $1350\text{ cm}^3$  körüli értéknek felel meg.

Az ember földi megjelenése nehezen tekinthető csupán a törzsfajlódás egy állomásának. A világegyetem fejlődését tekintve az ember a világmindenség értelmessé váló elemének tekinthető. Az emberben a világmindenség önmaga tudatára ébred, 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. Az 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. Az agykérgünkben kb. ezerszer annyi neuron van, mint a macska hasonló szervében.

Az agykéreg a nagyagy féltekéit borítva helyezkedik el. Szürkeállomány néven is ismerjük, vastagsága 2-3 mm. Az agykéreg sejtsűrűsége nagyjából egyenletes, minden egyes négyzetmilliméter felületéhez 148000 neuron tartozik. Az agykéreg különböző helyen lévő részei nagyjából mind ugyanúgy néznek ki, függetlenül attól, hogy érzékelések feldolgozásával vagy a beszéddel foglalkoznak. Az egyes agysejteknek több ezer vagy tízezer kapcsolódása lehet más agysejtekhez. A fehérállomány anyaga az agysejtek közötti összeköttetést adó huzalozódásnak felel meg. Az agykéreg felülete kiterítve  $2200\text{ cm}^2$ , kb. négy A4-es lapot tehetne ki.

Az agykéreg sejtjei vízszintesen 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 alapegysége oszlopocskák. Ezek kb. 100 agysejtet tartalmazó 0,03 mm átmérőjű hengercskék, amelyek a kéreg felszínétől lefelé a fehérállományig huzódnak. Az oszlopocskák sejtjeinek bemeneti huzalozódása közös, azonos feladattal foglalkoznak. A látókéreg egy oszlopocskája pl. bizonyos szögben álló tárgyak körvonalaira érzékeny. A oszlopocskák nagyobb egységekbe szerveződnek, azok azután még nagyobbakba. Az agykéreg szerveződése így rangsor szerint felépülő rendszert képez.

### 20.1. Az emberi agy fejlődése

Az emberi agysejtek a magzati kor nyolcadik hetétől a tizennyolcadik hétig alakulnak ki, ebben az időszakban percenként kb. 200000 új agysejt keletkezik. A agysejtek kapcsolódásainak a lehetőségét a genetikai állomány szabályozza. Azt viszont, hogy ténylegesen miként kapcsolódnak az agysejtek hálózatokba, azt nem a genetikai előírások, hanem az ismétlődő ingerek vezérlik. Az agysejtek ilyen módon való huzalozódása már a magzati lét harmadik hónapjában elkezdődik. A magzat ugyanis 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.

Az ember és az 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 környezete változásaihoz.

## **20.2. A tudat és az idegrendszer**

A tudatunk létezése, bár legalapvetőbb tapasztalatunk, egyúttal azonban talán létezésünk legrejtélyesebb vonása. A tudatos viselkedésünkről igen sokat tudunk. Csupán az a gond, hogy mindezt nagyon nehezen tudjuk összegyeztetni egyéb ismereteinkkel. Egyáltalán miért létezik a tudatunk, hogyan teszi azt, amit tesz, hogyan 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. A leírt szöveg érzelmeket kelt, gondolatok ébrednek bennem. A 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. A tudatosságunk központja az agyon belül nem azonosított. Mintha az agykéreg együtt hordozná azt, amit öntudatnak nevezünk.

## **20.3. Intelligencia és mesterséges intelligencia**

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

Az 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. Az emberi agyban az ismertek feldolgozása tehát olyan, hogy a szerkezet és működés között nincs jól meghatározott viszony. Mivel a számítógépek szerkezete és működése között meghatározott, előírt viszony létezik, emiatt az agy és a programmal vezérelt számítógép működése között elvi ellentét áll fenn. Emiatt, legalább is egyelőre, nehezen képzelhetők el emberi módon viselkedő számítógépek előállítása. Egyesek szerint az

emberi gondolkodás sohasem foglalható képletekbe, algoritmusokba, merev szabályokba. Mások szerint mindez elképzelhető.

## **20.4. Az emberi természet és a nevelhetőség**

Ősréginek mondható kérdés, hogy az öröklött adottságok és a nevelés hatása közül melyik a meghatározó. Az angol kifejezés szójátéka szerint: nature or nurture? A válasz nem egyszerű. A kutatások azt igazolják, hogy a szülők és a gyermekek viselkedése között szoros kapcsolat van. A kedvesen, szeretettel nevelő szülők gyermekei öntudatosak, bíznak magukban, a határozottan viselkedő szülők gyermekei jó magaviseletűek és ha a szülők sokat beszélnek a gyermekeiknek, azoknak jobbak 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. A szülő gyermekeinek azonban nemcsak a nevelést adja, hanem a génjeit is. A gyermek és a szülő viselkedését elemezve azt is mondhatjuk, hogy a szülőtől öröklött gének tehetik a gyermeket kedvessé, határozottá, jó nyelvkészségűvé.

A kérdésben két végletes vélemény küzd egymással. Az egyik, a beletörődő, fásult felfogás szerint az emberi természetet olyannak kell elfogadni, amilyen, nem lehet az embert bölcsébbé, kedvesébbé, jobbá tenni és a társadalmat eszerint kell berendezni. A 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. A jobb- és baloldaliságnak ezek a gyökerei. A jobboldali ragaszkodik a hagyományokhoz (mivel az emberi természet olyan, amilyen), a gyengébb állam hívei (a kormányzók nem elég bölcsék 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. A 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, hogy a jobb- és baloldaliság fenti jellemzői az Amerikai Egyesült Államok és más fejlett nyugati ország gondolkodását jellemzik, a térségünk átmeneti társadalmaiban a két felfogás erősen keveredik.

A mai agykutatás választ adhat a fenti kérdésre. Az agy nem csupán a gének működésének az eredménye és nem is csak az egyén tapasztalatainak összessége. Az egyén agya igen összetett hálózatok összessége, 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 egy állapot, hanem egy folyamat, amely állandóan változik, alakul.

## **21. A megismerés határai és a matematika korlátai**

A matematika a természet nyelve. A világmindenség tökéletes megértéséhez az is szükséges, 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 geometriát 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, 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 geometria 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 olyat képez, aminek az igazságát szabályok formális rendszere nem tudja teljességgel 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. Azonban ebben az axiómarendszerben is megfogalmazható egy eldönthetetlen állítás. Erre példa a következő rövid állítás: "Nem mondok igazat." Ha hazudtam, az állításom igaz, de akkor nem vagyok hazug. Ha igazat mondtam, az állításom hamis, merthogy nem hazudtam. Gödel tétele hasonló logika szerint építkezik.

Gödel tételén kívül egy másik példa a matematika hatáira az ún. 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 tekinthető 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.

## **21.1. Az ember és az ökorendszer**

Az ember mint természeti lény annyi energiát használ fel, amekkora tápértékű anyagcseréjének fenntartásához elfogyaszt. Nevezzük ezt tápenergiának. Az értelmes ember, a tüzet felfedezve külső energiát is felhasznál. Ezenkívül az állatok házasításával, a szél és a víz energiájának alkalmazásával a rendelkezésre álló energiák az ipari forradalom előtti társadalmakban a tápenergiának átlagosan a négyszeresére emelkedhettek. Valamennyi így felhasznált energiaforrás megújuló. Az ősmaradványi eredetű energiaforrások, a szén, a kőolaj és a földgáz felhasználásával ma az emberiség átlagban a tápenergia tizenötszörösét használja fel. Mindez a természetes körfolyamatok rendjének megzavarásához vezetett. Az ökorendszer működésének főbb zavarai a következők:

- Az ősmaradványi erőforrások eltüzelése miatt jelentősen megnőtt a légkör széndioxid tartalma. Emiatt felerősödött az üvegházhatás.
- A freon légkörbe juttatása miatt megsérült az élővilágot védő ózonpajzs.
- A mértéktelen műtrágyázás megbetegíti a talajt, sőt elpusztítja annak élővilágát.
- A mélyszántások miatt a talajt hatalmas mértékben pusztítja a víz és a szél.
- A szennyecsatornák rendszere 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.
- A talajvizek szintje az erőltetett öntözés miatt rohamosan csökken.

- Az ember a szárazföldi fénymegkötési energiák kb. 40%-át a maga javára használja. Ezzel megfosztja életterének jó részétől a többi élőlényt. Az élővilág változatossága emiatt rohamosan csökken. A földtörténet egyik legnagyobb kihalása zajlik.

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

## 22. Az idegen lények létezéséről

Az ember földi léte felveti azt a kérdést, léteznek-e rajtunk kívül tudatos lények a mindenségben. Mivel legjobb tudásunk szerint a természet 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. Ennélfogva annak a becslése, hogy mennyi az esélye annak, hogy másutt a Tejútrendszerben, vagy a Világmindenségben van értelmes élet, erősen bizonytalan.

A élet létezésének törvényszerűsége - mint tárgyaltuk, maguk a biológusok erről hallani sem akarnak - az sugallja, 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.

A földi élet jellemzője, hogy az élet, legyen az akármilyen fajta, igyekszik terjeszkedni, kihasználni a rendelkezésre álló életteret. Az emberiség történelme is igazolja ezt. A mai ember alig száz, kétszáz ezer éve jelent meg. 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 néhány száz éven belül sor kerülhet arra, hogy nagyobb űrállomásokat újtukra 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 erre felé értelmes lények. Nem találjuk műszaki alkotásaikat és a világűrt betöltő elektromágneses sugárzási térben sem figyeltünk meg eddig olyan jeleket, amelyek értelemre utaló alakzatokat hordoznának. A több évtizede tartó adatgyűjtés eddigi eredménye egyelőre arra utal, hogy a Tejútrendszerben mi vagyunk az egyedüli értelmes lények és meglehet, a teljes Mindenségben is egyedül vagyunk.

A fenti eredmény zavaró, mert nem mondhatjuk azt, hogy az értelmes műveltségek közül az elsőik egyike lehetünk, hiszen a csillagrendszerben naprendszerünk nem tartozik az elsőik közé. Hozzánk hasonló naprendszerekben már milliárd évekkel 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 az a pipacs az egyedüli pipacs a réten. Ezért abból, hogy nem észleljük más műveltségek létezését, joggal gondolhatunk arra, hogy az értelmes élet rendkívül ritka, kivételes jelenség.

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 képcsatornákon mégis

olyan sok ilyen jellegű cikkekkel, műsorokkal 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, érzécsalódást 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 érzécsalódásai. Ezért az ilyen beszámolók nem fogadhatók el a földönkívüliek létezése cáfolhatatlan bizonyítékként.

Azok az építmények, alkotások pedig, melyek Földünk egymástól távolieső pontjain a történelemtudomány számára egyelőre megmagyarázhatatlan rejtélyt jelenthettek, nem foghatók fel az idegenek létezésének bizonyítékként. Sokkal kézenfekvőbb lehet például egy olyan magyarázat, 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.

## 23. Az emebrarcú világegyetem elve

Most azt a kérdést érintjük, mennyire lehet véletlennek, avagy szükségszerűnek tekinteni azt, hogy a világegyetemben megjelent az értelmes élet. Ennek a problémának a tárgyalása hosszú ideig csak a bölcsészet 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. Ami azonban 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. Az energiát rendezettebb alakban veszi fel és rendezetlenebb alakban adja 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. A megfelelő csillagokra mint a hosszú törzsfajlódási időszak energiaforrásaira van szükség.

Az egységes természettudományos világkép 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. Az elméleti kutatók eljátszottak azzal a feltételezéssel, mi történt volna, milyen lenne ma a világegyetem, ha a természettan fenti alapvető állandóinak nagysága más lenne. Az eredmény eléggé meglepő. Ha az állandók kis mértékben, akár százalékosan is különböznenek a mostanitól, élet egyáltalán nem alakulhatna ki és a világegyetem, ha egyáltalán létezhetne, teljesen máshogy nézne ki, mint a mai. Ezek a világegyetek a mostanihoz képest rendkívül sivarak és egyhangúak lennének, a változatosságra való képtelenség zárná ki bármiféle élet kialakulásának lehetőségét. Mondhatjuk, hogy a természettan alapvető állandói finomhangolódtak, a világegyetem az élet hordozására hangolódtott. 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 létezhetnének 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, azonban a szupernova robbanások nem következnenek be, az elemek a csillagok belsejében rekednének. 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.

## 23.1. Az élet és a világegyetem

Az emebrarcúság elve szoros kapcsolatot teremt az élet és a természettan alaptörvényei, a világegyetem egésze között. A megszorítások túl erősek ahhoz, semhogy véletlennek tekinthetnénk azokat.

Az élet és az őt kialakító, hordozó világmindenség összetartoznak. Az 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. Vannak, akik tartózkodnak attól, hogy egy létezőnek a magyarázatára ezt tegyék, gondolván, ez túl bonyolult, csak az adott magyarázatra kiötlött megoldás lenne.

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.

## 23.2. Az önmagát újjászülő világegyetem

A kaotikusan felfűvódó világegyetem korábban tárgyalt modellje szerint, lásd a 14.10 szakaszban, a világegyetem fenti állandói véletlenszerűen adódnak ki. Más buborékokban más tulajdonságú világegyetek keletkeznek, ahol a természettan állandói mások és azokban ezért élet sem alakulhat ki.



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 világegyetemek születéséhez vezethetnek.

A természettani állandók változása a fenti modell szerint azt a folyamatot részesíti előnyben, amelynek során a csecsemő világegyetemekben 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.

## 24. A 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 az emberi idő léptékére van tekintettel. A Nap egyre melegebben süt, lassan a Föld kikerül a lakhatóság zónájából. Az átlaghőmérsékletet évmilliárdokig állandó értéken tartó folyamatok egyes modellek szerint már csak hatszázmilliótól egymilliárd évig terjedő ideig képesek megakadályozni a Föld felszínének felforrósodását. A Nap vörös óriás csillaggá válása kb. 5 milliárd év múlva egészen biztosan izzó sivataggá változtatja a Föld felszínét. Az értelmes ember addig máshova költözhetne. A létünk azonban így sem lehet örök.

Az örökké táguló világegyetemben a befejezés forгатókönyve a következő. Egy idő után a csillagok üzemanyaga, a hidrogén elfogy. Ezért a csillagok is kihunynak és bekövetkezik az, amit a természetan hőhalálnak nevez. A kifejezés félrevezető lehet. A hőhalál, nem a magas hőmérséklet miatti megsemmisülést, hanem a hőmérséklet teljes kiegyenlítődését jelenti. Ha a csillagok üzemanyaga elfogy, a hőhalál ténylegesen bekövetkezik. A múlt században a hőhalál okozta világvéget három-négyezer esztendőn belülre várták, gondoljunk Madách Imre Ember Tragédiájára. Ezért a hőhalál elmélete akkor nagyon nagy vis-szhangot váltott ki. A hőhalál mai ismereteink szerint csak tízmilliárd évek múlva esedékes, ami számunkra felfoghatatlanul nagy idő.