

# TERMÉSZETTAN

Debreceni Egyetem, 2018/2019. tanév I. félév, leadta és lejegyezte Végh László

2018. november 28.

## 0.1. Tudnivalók a vizsgázásról

November végétől délelőttönként 9 órától szinte valamennyi munkanapon lesz vizsga. Ha a Neptunon nem tud vagy még nem tud vizsgát felvenni, vagy már lehetne, de a megadott időpontok nem felelnek meg, a vl@atomki.mta.hu címre írja meg, mikor tudna eljönni. A vizsga helye: Atomki, VIII. épület második emeletén, a tanteremben van a vizsga. A Atomkibe a Poroszlai úti portán jut be, majd jobbra térve egyenesen megy tovább. A VIII.-IX. épületet összekötő nyaktagba belépve jobbra, majd a büfét elhagyva balra térve találja a lépcsőházat és a második emeleten a lépcsővel szemben van a tanterem. Ha az foglalt lenne, akkor az üvegajtó után jobbra a 210-es szobában keressen. A vizsga szóbeli.

## Tartalomjegyzék

0.1. Tudnivalók a vizsgázásról . . . . .	1
<b>1. Erő- és mozgástan</b>	<b>2</b>
1.1. Erők és kölcsönhatások . . . . .	3
1.2. Elektromágneses hullámok . . . . .	4
1.3. Speciális relativitáselmélet . . . . .	6
1.4. Általános relativitáselmélet . . . . .	8
<b>2. Kisvilágtan</b>	<b>11</b>
2.1. Hullámtermészet - részecskék 'fényképezése' . . . . .	12
2.2. Határozatlansági összefüggés . . . . .	13
2.3. Schrödinger-egyenlet . . . . .	14
2.4. Az erőterek kisvilágtani eredete - kvantumtérelméletek . . . . .	15
2.5. Elemi részecskék . . . . .	17
<b>3. Az alapvető kölcsönhatások</b>	<b>19</b>
3.1. Törvények és szimmetriák . . . . .	19
3.2. Erős kölcsönhatás . . . . .	21
3.3. Elektromágneses kölcsönhatás . . . . .	22
3.4. Nagy egyesített elméletek . . . . .	24

<b>4. Világegyetemünk fejlődésének hajtóereje</b>	<b>25</b>
<b>5. Kezdetek</b>	<b>27</b>
5.1. Égi távolságok mérése . . . . .	28
5.2. Színeképek . . . . .	30
5.3. Ósrobbanás . . . . .	32
5.4. A világegyetem jövője . . . . .	34
<b>6. A kezdetektől a csillagvárosokig</b>	<b>37</b>
6.1. A természeti semmiből induló világegyetem . . . . .	37
6.2. Első másodperc . . . . .	37
6.3. Első percek . . . . .	39
6.4. 380 ezer év . . . . .	40
6.5. A világegyetem sötét korszaka . . . . .	41
6.6. Csillagvárosok . . . . .	42
6.7. Csillagok . . . . .	44
6.8. Bolygók . . . . .	49
<b>7. Naprendszer és Föld</b>	<b>50</b>
7.1. Naprendszerünk születése . . . . .	50
7.2. Föld fejlődése . . . . .	51
7.3. Körforgások a Földön . . . . .	53
<b>8. Élet és fejlődése</b>	<b>57</b>
8.1. Az élet kialakulását és fejlődését mozgató elv . . . . .	57
8.2. DNS és gének . . . . .	58
8.3. Génkifejeződés, epigenetika, törzsfejlődés . . . . .	60
8.4. Az élet keletkezése és terjedése . . . . .	62
8.5. Élet a Földön . . . . .	63
8.6. Tömeges kihalások . . . . .	64
8.7. Az ember megjelenése . . . . .	66
<b>9. Élőrendszerek (ökörendszerek)</b>	<b>67</b>
9.1. Talajélettan . . . . .	68
<b>10. Az ember</b>	<b>69</b>
10.1. Az ember kialakulása . . . . .	69
10.2. Az emberi elme . . . . .	72

# 1. Erő- és mozgástan

Egészen a 16. század végéig a változás, a mozgás leírása és okainak megértése nagyon sok fejtörést okozott. Elsősorban az volt a zavaró, hogy a megfigyelők ugyanazt a jelenséget különbözőnek láthatták. Attól függően, ki melyik parton van, vagy a hídon állva merrefelé néz, máshogyan írja le, merre folyik a Duna. Az egyik leghíresebb görög bölcsele, Parmenidész egyenesen azt állította, hogy valóság csak egy van, egyetlen egészként és ez mozdulatlan és örök. A tér egészét kitölti, így üres tér hiányában nincs benne hová mozdulni, azaz a mozgás és a változás csak látszat. Parmenidész tanítványa, Zénon paradoxonok sorával szemléltette, hogy a mozgás nem létezhet. Közülük a legismertebb az, hogy a gyors lábú Akhilleusz sohasem érheti utól a teknősbékát.

A mozgás térben és időben lejátszódó jelenség. Leírásához vonatkoztatási rendszerre van szükségünk, amit akkor is választunk, ha ez nem tudatosodik bennünk. Amikor azt mondom, jobbra térek, akkor a vonatkoztatási rendszert a testemhez rögzítem, hozzám képest van valami jobbra, balra, előre vagy hátra. Nekünk ez a természetes, de a természetben élő népek embere az északi, déli, keleti és nyugati irány szerint tájékozódik és általában nincs szavuk a jobbra, balra, előttem, mögöttem fogalmaira. Csak karjával jelzi, és ha magára mutat, a mögötte lévőre utal. Táncot tanítva is az északra, délre, keletre és nyugatra utasításokat adják. Nehéz a kicsinek megtanulnia, merre van észak és nyugat, de már 7-8 éves korára bármely napszakban teljes biztonsággal tájékozódik.

A természetesnek ható, a megfigyelő testéhez rögzített vonatkoztatási rendszer használata félreértések sorához vezetett. Elsősorban ez magyarázhatja, hogy csak a 16-17. században sikerült a mozgás egyértelmű leírásához szükséges fogalmakat megalkotni. A tér és idő természettani fogalmai attól fogva, a 20. század elejéig még egyszerűbbek voltak és nagyjából megfeleltek köznapi elképzeléseinknek, miszerint a tér adott és az euklidészi mértan írja le pontjai távolságát és egyéb tulajdonságait.

**Tehetetlenségi rendszer.** Különböző vonatkoztatási rendszerekben a mozgásegyenlet más és más lehet. Például a körhintán ülő a talajról nézve körmozgást végez, ha viszont a körhintán ülök, az előttem ülő számomra nyugalomban van. De ha valamelyik vonatkoztatási rendszerben a mozgásegyenlet ismert, akkor egyszerű matematikai átalakításokkal bármely más vonatkoztatási rendszerben felírható.

A számtalan lehetséges vonatkoztatási rendszer közül azt érdemes választani, amelyikben a magára hagyott, azaz külső hatás alatt nem álló test mozgásának leírása a lehető legegyszerűbb. Ez a tehetetlenségi rendszer, vagy idegen eredetű szóval inerciarendszer, melyben a magára hagyott test tehetetlen, azaz vagy mozdulatlan, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Mozgásegyenlete  $v = v_0$ , ahol  $v$  a test sebessége. Ez az alak valamennyi tehetetlenségi rendszerben ugyanaz, miközben  $v_0$  értéke a különböző tehetetlenségi rendszerekben más és más lehet. Így a 80 km/óra sebességgel mozgó vonatból nézve a benne ülő nyugalomban van, itt most  $v_0 = 0$ , addig egy másik tehetetlenségi rendszerből, az állomásról nézve  $v_0 = 80 \text{ km/h}$ .

Ha a tehetetlenségi rendszerben a testre  $\vec{F}$  erő hat, akkor a sebességének nagysága vagy iránya változik, a test  $\vec{a}$  gyorsulása  $\vec{a} = \vec{F}/m$  lesz lesz. Láthatjuk, minél nagyobb a test  $m$  tömege, a test annál tehetetlenebb, azaz annál nehezebb a mozgásállapotán változtatni. Járművön utazva érezzük a kanyarodást vagy a sebesség nagyságának változását. Ha nem kapaszkodnánk, zsákként, tehetetlenül dőlnénk el. Nem kell látnunk, mihez képest gyorsulunk, a gyorsulás valamennyi tehetetlenségi rendszerben azonos.

A mozgásegyenlet megoldásához egyrészt ismerni kell a rendszer állapotát valamely korábbi pillanatban, valamint tudni kell, milyen erők hatnak a rendszert alkotó testek között. Így amikor a Hold Föld körüli pályát számítjuk, ha a Hold helye és sebessége most ismert, akkor tudjuk, hogy hol lesz a Hold a következő pillanatban. A  $\vec{a} = \vec{G}/m$  egyenletből, ahol  $G$  a Föld és a Hold között ható tömegvonzási erő, kiszámoljuk a gyorsulást, és ebből megkapjuk, mekkora lesz a Hold sebessége a következő pillanatban. Ezekből kiszámíthatjuk a Hold helyzetét és sebességét a rákövetkező időpillanatban, és így folytatva megkapjuk a Hold pályáját. A megoldás pontosan meghatározott, akár évezredekre előre pontosan kiszámolható a Hold Föld körüli pályája, és az is, hol volt az égen a Hold egy évezredekkel ezelőtti napon este nyolckor.

Newton feltételezte, hogy van olyan tehetetlenségi rendszer, amelyhez valamennyi, térben és időben történő változás viszonyítható. Ilyen létezhet, ha a tér és idő az anyagtól és ennek mozgásától független létező, azaz jellemzői mindig és mindenütt azonosak. A mindentől függetlenül létező teret független térnek (abszolút térnek) és a mindentől független időt független időnek (abszolút időnek) nevezik. Newton szerint a független tér az állócsillagokhoz rögzített térnek feleltethető meg.

Newton szerint gyorsuláskor a független tér hat a testre. Sokan vitatták a független tér létét és Mach is elvetette ezt a szerinte megfigyelhetetlen fogalmat. A Mach-elv szerint a test tehetetlensége a Minden-ség tömegeinek reá gyakorolt hatásából eredeztethető. Azaz Newton független terében, az állócsillagokhoz rögzített rendszerben mért gyorsulás az állócsillagok és más tömegek által gyakorolt vonzóerőknek tulajdonítható. Einsteinre nagy hatást gyakorolt a Mach-elv és befolyásolta az általános relativitáselmélet megszületését.

**Galilei-féle relativitási elv.** Tehetetlenségi rendszerekben a sebességek a sebesség összeadás szabályával számíthatók át. Ennek megfelelően, ha a  $V$  sebességű gépkocsiból a mozgás irányába  $v'$  sebességgel kidobnak egy dobozt, akkor az az úthoz képest  $v = V + v'$  sebességgel mozog. Ha ellentétes irányba dobják, az úthoz viszonyított sebessége  $v = V - v'$ . Számszerű példával, ha valaki a vonatban 4 km/óra sebességgel menetirányba mozog, és a vonat 60 km/óra sebességgel közeledik az állomáshoz, akkor az állomás épületéhez képest a vonaton gyalogló sebessége 64 km/óra.

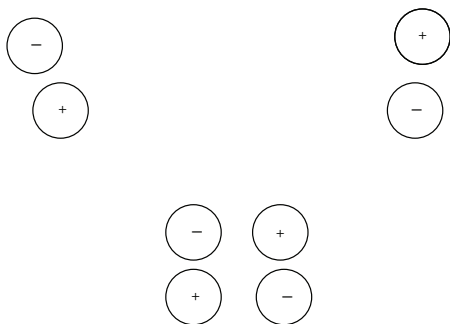
A tapasztalat szerint a tehetetlenségi rendszerek nemcsak a szabad, hanem bármilyen más mozgást végző test leírása számára is egyenértékűek. Így ha zárt helyiségben a fonálinga lengését vizsgáljuk, az inga mozgástörvénye ugyanaz lesz, függetlenül attól, hogy egy ház szobájában, a sima vizű tavon egyenletesen sikló hajón vagy az egyenletesen mozgó vonat fülkéjében vagyunk-e. Ha a vonat nem gyorsul, zárt vasúti fülkében nem végezhető olyan kísérlet, amelynek segítségével eldönthetnénk, hogy mozog-e a vonat. A tehetetlenségi rendszerek egyenértékűségét a Galilei-féle relativitási elv mondja ki: a természettani törvények valamennyi tehetetlenségi rendszerben ugyanolyan alakúak. A relativitás (magyarul viszonylagosság) szó arra utal, hogy eközben a test sebessége viszonylagos, függ attól, melyik tehetetlenségi rendszerben vagyunk.

## 1.1. Erők és kölcsönhatások

Valamennyi, a mindennapi életben észlelt természeti jelenség végső soron az alapvetőnek tekinthető tömegvonzási és elektromágneses kölcsönhatásokra vezethető vissza. Az elektromágneses jelenségek közül a töltések között fellépő erőkre és a mágnesességre már az ókorban is felfigyeltek. A mozgó töltések és az áramok valamint a mozgó mágnesek által kiváltott hatásokat leíró, Faraday által felállított törvények szerint az elektromosság és mágnesesség összefüggnek egymással.

A tömegvonzási erő és a töltések között fellépő Coulomb erő távolságtól való függése azonos, az  $1/r^2$  függvény írja le mindkettőt. Összevetve a két proton között fellépő Coulomb taszítást és a tömegvonzást a töltések taszító hatása 36 nagyságrenddel nagyobb, mint a tömegek között fellépő vonzás. A természetben az anyagok általában villamosan semlegesek, mert azonos mennyiségű pozitív és negatív töltést tartalmaznak.

A semleges atomok és molekulák közötti fellépő Van der Waals erő a Coulomb kölcsönhatásból származtatható le. Nézzük két egymástól távolabb lévő semleges atom, mondjuk két hidrogénatom viselkedését. A hidrogénatom sugara kerekítve ötmilliárdod centiméter. Mivel a proton és elektron össztöltése nulla, a két hidrogénatom között nagyobb távolságokon csak a tömegvonzási erő lép fel, mert a két hidrogénatom protonjai és elektronjai között fellépő taszító és vonzó erők kiegyenlítik, leárnyékolják egymást. De ha a két atom egymás közelébe kerül, alkotórészeik kölcsönösen érzékelik a másik szerkezetét. Ekkor az egyik atom elektronja már érezhetően más távolságra kerülhet a másik atom elektronjától, mint annak protonjától, lásd a 1. ábrát. Emiatt gyenge, rövid hatótávú vonzó, Van der Waals erőnek nevezett, az eredeti Coulomb kölcsönhatásokból származtatható erő lép fel a két atom között.



1. ábra. Van der Waals erő. Ha két semleges atom egymás közelében van, a két semleges atom között gyenge, rövid hatótávú vonzó erő lép fel.

**Kölcsönhatási energia.** A két test kölcsönhatási energiája akkor vehető nullának, ha nincs közöttük kölcsönhatás, vagy ha van, az elhanyagolhatóan kicsiny. A tömegvonzás és a Coulomb kölcsönhatás esetén ez akkor teljesül, ha a testek nagyon messze vannak egymástól. A kölcsönhatási energiát helyzeti vagy potenciális energiának is szokás nevezni, mivel a kölcsönható részek egymáshoz viszonyított helyzetétől függ.

Vizsgáljuk meg, milyen előjelű lesz a kölcsönhatási energia, ha két egymást vonzó test közel van egymáshoz. Távolításukhoz erőt kell kifejtenuünk és eközben munkát végzünk, kezdetben többet és ahogyan mind távolabb kerülnek, egyre kevesebbet. A végzett munka a rendszer energiáját növeli. Ha a két testet jó messzire eltávolítottuk egymástól és a végzett munkát hozzáadjuk az eredeti kölcsönhatási energiához, nullát kapunk. Azaz, a vonzás kölcsönhatási energiája negatív. Hasonlóan kaphatjuk, hogy a taszítás kölcsönhatási energiája pozitív.

A kötött rendszer kölcsönhatási energiája negatív, mivel a kötött rendszert vonzó kölcsönhatás tartja össze. Mivel negatív számoknál a nagyobb abszolút értékű a kisebb, mennél kötöttebb a rendszer, annál kisebb lesz a kölcsönhatási energiája. Így a lazábban kötött vegyület kölcsönhatási energiája nagyobb, mint az erősebben kötött vegyületé.

Kötési energián azt a munkát értjük, amellyel a kötött rendszer részeinek egymástól való eltávolításához szükséges. Pontosabban ahhoz, hogy annyira messze vigyük őket egymástól, hogy a további távolításukhoz szükséges munka már elhanyagolhatóan kicsinek legyen vehető.

A rendszer összenergiáját az őt alkotó részecskék mozgási és kölcsönhatási energiáinak összege adja. Ha egy rendszer nem hat kölcsön a környezetével, zárt rendszernek nevezzük. A zárt rendszer összenergiája az idő teltével ugyanaz marad, azaz megmaradó mennyiség.

## 1.2. Elektromágneses hullámok

Maxwell a Coulomb-erőt, a mágnesek kölcsönhatásait valamint Faraday és mások eredményeit a róla elnevezett, 1865-ben közölt Maxwell-egyenletekben foglalta össze. Feltűnt neki, hogy az egyenletrendszer szimmetrikus lenne - az egyenletrendszer szimmetriájának fogalmát lásd később a 3.1. szakaszban - ha a négy egyenlet egyikében még egy tag ott lenne. Bár addig nem figyelték meg az ennek megfelelő jelenséget, a térben igen nagy sebességgel terjedő elektromágneses hullámokat, ezt a tagot is bevette az egyenletrendszerbe.

Maxwell jóslatát több mint 30 évvel később H. Hertz igazolta. Hertz 1896-99 között laboratóriumban végzett mérései szerint az elektromágneses hullámok léteznek és a fény sebességével terjednek. Megmutatta, hogy az elektromos és mágneses terek a hullám terjedésének irányára merőlegesen rezegnek. Mérve a terjedő elektromos tér erősségét, visszaverődését és polarizációját azt kapta, hogy a kísérleteiben előállított 4 méter hullámhosszú elektromágneses hullám és a 400-700 nanométeres sávban eső látható fény tulaj-

donságai csak a hullámhosszaikban térnek el egymástól és mindketten a Maxwell egyenleteket kielégítő elektromágneses hullámok.

A gerjesztett állapotból alacsonyabb állapotba kerülő atom, molekula, vagy atommag is bocsát ki elektromágneses sugárzást. Valamennyi fénysebességgel terjed és egymástól csak a sugárzás hullámhosszában, így rezgésszámában különböznek. Minél nagyobb a sugárzás hullámhossza, annál kisebb a rezgésszáma. A sugárzás energiája rezgésszámával arányos, minél szaporábban rezeg, annál nagyobb energiájú. A napfényt üvegprizmával tudjuk színeire bontani. A kisebb hullámhosszú, ezért nagyobb energiájú határon az ibolyaszín, a nagyobb hullámhosszú, kisebb energiájú határon a vörös szín látható. Azaz nem a vörösebb, hanem a kékebb sugárzás a nagyobb energiájú. Ez könnyen megjegyezhető, mivel a kék sugárzásnál is nagyobb rezgésszámú, így nagyobb energiájú ibolyántúli ultraibolya vagy UV sugárzás veszélyes az egészségre.

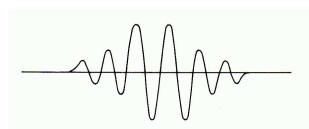
Valamennyi  $T > 0$  Kelvin hőmérsékletű test elektromágneses sugárzást bocsát ki és a sugárzás hullámhossz vagy rezgésszám szerinti eloszlása csak a test hőmérsékletétől függ. Az eloszlásfüggvényt színképnek vagy spektrumnak nevezzük. Napunk hőmérsékleti sugárzása egy 5780 Kelvin hőmérsékletű test sugárzása, lásd később a 7.1. szakaszban. A látható fény tartományába eső része a szivárvány színeinek megfelelő színes sávokból áll, lásd később a 17. ábrát.

Haladjunk a fénytől az alacsonyabb energiájú sugárzások, azaz a növekvő hullámhosszak felé. Az infravörös, általunk hőként érzékelhető sugárzás sávja következik, ez a 700 nanométertől a milliméteres hullámhosszakig terjed, és a molekularezgés és forgás energiatartományának felel meg. Testünk 36,5 Celsius, azaz  $273,16 + 36,5 = 309,66$  Kelvines sugárzása az infravörös tartomány 10 mikrométeres részébe esik. Infravörös távcsővel figyelhető meg.

Milliméteres hullámhossztól 10 centiméteresekig terjed a mikrohullámok tartománya. Mikrohullámú sütőink a 12 centiméteres tartomány körül működnek. A tíz centiméteresektől az ezer méteresig tart a rádióhullámok tartománya. Egy FM adás átlagos hullámhossza 3 méter, a TV sugárzása 2 méter, a közép-hullámú átlagos hullámhossz 300 méter. A kilométernél hosszabb hullámhosszú elektromágneses hullámok a nagyon alacsony rezgésszámok tartományába esnek.

Ha a látható félynél alacsonyabb hullámhosszak felé haladunk, az ibolyántúli tartomány a 400 nanométertől egy nanométerig terjed. Ibolyántúli sugárzás az atomok külső héjaiban történő átmenetek során keletkezik. Utána következik a röntgensugarak tartománya, amely a nanométertől az ezred nanométerig, a pikométerig tart. Röntgensugárzás az atomok belső héjaiban történő átmenetekben bocsátódik ki. A pikométernél kisebb hullámhosszú gamma sugárzás atommag legerjesztődésekor sugárzódik ki.

**Foton.** A Nap által kibocsátott, fénysebességgel terjedő fény közel 500 másodperc alatt éri el Földünket. Korábban feltételezték, hogy a napfény és a többi elektromágneses sugárzás is a víz- vagy a hanghullámokhoz hasonlóan valamilyen ismeretlen, akkoriban éter névvel illetett közeg rezgéseként terjed. Einstein 1905-ben ismerte fel, hogy az elektromágneses sugárzás szaggatottan, véges hosszúságú hullámvonulatokban, hullámcsomagokban terjed. Ezeket fotonoknak nevezzük, a hullámcsomag kifejezés a hullámvonulat véges méretére utal. A foton tömege nulla és fénysebességgel mozog.



2. ábra. Hullámcsomag. Ha a hullám jobb felé terjed, akkor a balra található részen már áthaladt, most éppen előttünk van és fénysebességgel haladva egy másodperc múlva 300000 kilométerre lesz tőlünk. Matematikailag a véges méretű hullámvonulat különböző rezgésszámú szinuszhullámok megfelelő arányú keverésével állítható elő.

Ha a hullámok összegzésének matematikai tulajdonságait vizsgáljuk, a következő derül ki. Egy adott rezgésszámú hullám végtelen kiterjedésű, azaz a térben mindenütt jelen van, akár a szinuszhullám. Véges

méretű hullámvonulat lásd a 2. ábrát, különböző rezgésszámú szinuszhullámok keverékeként állítható elő. Minél szélesebb a keveréshez használt rezgésszámok sávja, annál keskenyebb a hullámcsomag. Fordítva, minél keskenyebb ez a sáv, a hullámcsomag annál kiterjedtebb.

A fény nemcsak hullám, hanem egíben részecskeszerű is, mivel az energiával valamint lendülettel és perdülettel is rendelkező foton ütközéskor ezeket hordozó részecskeként hat kölcsön. A foton energiája az  $f$  rezgésszámával arányos, értéke  $E = hf$ , ahol  $h$  a Planck állandó.

Az elektromágneses sugárzás forrása egyrészt akkor erősebb, ha időegység alatt több foton bocsát ki, másrészt a forrás akkor is nagyobb teljesítményű, ha fotonjai magasabb energiájúak.

Könnyű megérteni, miért lehet veszélyes az élő számára az UV-sugárzás. Míg a kisebb energiájú, hőérzetet keltő vörös foton a molekulát mint egészet rezgeti és forgatja és így nem roncsol, addig az UV-sugárzás nagyobb rezgésszámú és így nagyobb energiájú fotonjai a molekulák szerkezetét is megbonthatják. Szemléletesen egy kis szikladarabot könnyebb mozgatni, mint eltörni. Ezért az erősebb vörös színű sugárzást is jól tűrjük, hiszen ha nagyon sokan volnának is, csupán az egyenként ártalmatlan vörös fotonok bombáznak bennünket. Viszont a molekulákat hasítani képes UV fotonokból már kevesebb is árthat.

### 1.3. Speciális relativitáselmélet

Bár Newton nem tudott pontos módszert adni, mint adható meg a független tér, feltették, hogy létezik módszer a kiválasztására. Az elektromágneses sugárzások felfedezése után feltételezték, hogy az éter a független teret kitöltő közeggel azonos, így az éterben való mozgás egyben a független térhez viszonyított mozgás is. Mivel akkoriban a világegyetemet a Tejútrendszerrel azonosították és a Tejútrendszer közép-pontjának hallgatólagosan a Naprendszert tartották, a Föld Nap körüli keringése és a Földön való mozgás egyúttal az éterben való mozgást is jelentette volna.

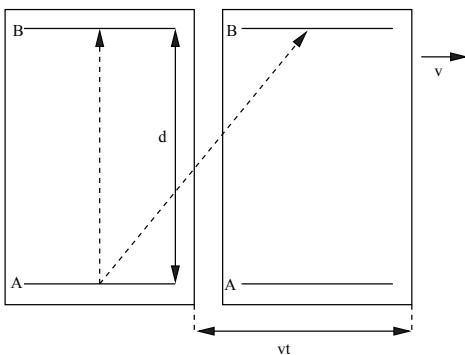
Ha van éter, a fénysebesség mérésének eredménye függ attól, miként mozog a megfigyelő az éterhez képest. Ha áll, akkor a fény irányától függetlenül mindig ugyanaz a fénysebesség. Ha viszont mozog az éterben, akkor a haladásának irányába kibocsátott fénysebességet kisebbnek, a haladásával ellentétes irányban mozgó fényt nagyobb sebességűnek fogja mérni. Ezért a Földön mért fénysebességnek is függnie kellene attól, hogy a fénysugár milyen irányba terjed. Nem nagy a várható különbség, csak tízezred résznyi, mivel a Föld mozgási sebessége a fénysebességhez képest nagyon kicsiny. Azonban a fény üres térben mérhető sebességét valamennyi mérésben mindig, nagy pontossággal ugyanakkorának találták. Azaz a sebesség összeadási szabálya a fényre nem teljesül. Eleinte kételkedtek a mérések megbízhatóságában, majd el kellett fogadni, hogy a mérések hitelesek és eléggé pontosak. Bárhogyan is kísérelték meg a fénysebesség állandóságát a newtoni természettan keretén belül értelmezni, nem jártak sikerrel.

**Maxwell-egyenletek, Lorentz-transzformáció.** A Maxwell-egyenletekben is szerepel a fénysebesség és ha igaz a relativitási elv, akkor a Maxwell-egyenletek alakja és ezzel a fénysebesség valamennyi tehetetlenségi rendszerben azonos. De ekkor a Maxwell-egyenletek által leírt jelenségekre nem igaz a sebesség összeadási szabálya, mert eszerint a fény sebessége a különböző sebességű tehetetlenségi rendszerekben más és más.

Térjünk át az egyik tehetetlenségi rendszerről egy másik, hozzá képest  $v$  sebességgel mozgó rendszerre. A Maxwell-egyenletek alakja két tehetetlenségi rendszerben akkor azonos, ha a tér- és idő koordinátáik közötti kapcsolatot a Lorentz-transzformációnak nevezett átalakítás adja meg. Ha a  $v$  sebesség a fénysebéségnél sokkal kisebb, akkor két sebesség összeadására a Lorentz-transzformáció és a sebesség összeadási szabálya igen jó közelítéssel azonos. Ha a fénysebesség végtelen lenne, a két képlet megegyezne. De ha a  $v$  sebesség a fénysebességgel összemérhetővé válik, a Lorentz-transzformáció és a sebesség összeadási szabálya különböző eredményt ad.

**Speciális relativitáselmélet.** A fénysebesség megfigyelt állandóságát Einstein 1905-ben közölt speciális relativitáselmélete értelmezte. Eszerint a relativitási elv igaz, a természettörvények alakja valamennyi tehetetlenségi rendszerben azonos. Továbbá a fény  $c$  sebessége megegyezik a kölcsönhatások terjedési sebességével, értéke vonatkozási rendszertől független, egyetemes természeti állandó. Így a Lorentz-transzformáció a helyes, a sebesség összeadási szabály csak kis sebességekre való közelítése. Semmi sem mozoghat a fény terjedési sebességénél gyorsabban. Bár a tömeggel rendelkező test sebessége tetszés szerint közelíthet a fénysebességhez, sohasem értheti el azt.

A Lorentz transzformáció képletei szerint mozgó rendszerben lassabban telik az idő és rövidebb a távolság, azaz a tér és az idő viszonylagos fogalmak. Helyettük a fénysebesség a mindentől független. Bármilyen is legyen a tér és az idő szerkezete, a fénysebesség mért értéke mindenkor, mindenhol és minden irányban ugyanakkora és független a fényforrás és a fénysebesség mérését végző személy mozgásától. Emiatt a független tér és a független idő, így az éter sem létezik.



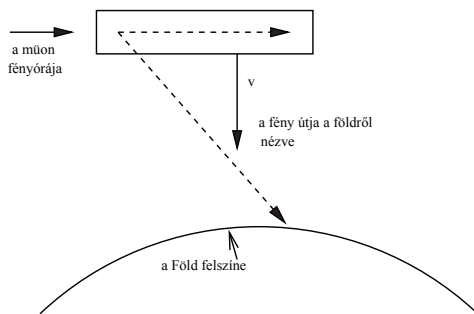
3. ábra. Ha a fényóra nyugalomban van, a fény az A és B lemez között haladva  $d$  utat fut be és a mért idő  $t_0 = d/c$ . Ha a fényóra  $v$  sebességgel mozog, akkor a fény átló mentén mozog és a Püthagorasz tételnek megfelelően  $s = \sqrt{d^2 + v^2 t^2}$  utat tesz meg. Mivel a fénysebesség állandó, a derékszögű háromszög átlójának befutásához szükséges  $t = s/c$  idő hosszabb lesz, mint a nyugvó rendszerben mérhető  $t_0 = d/c$  idő. Könnyen kiszámítható, hogy  $t = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , ezt adja a Lorentz transzformáció is.

Hogy mennyi idő telt el, úgy is mérhető, hogy megnézzük, közben mekkora utat futott be fény. Hogy miként vonja magával a fénysebesség állandósága az esemény időtartamának viszonylagosságát, a 3. ábrán látható, fényórának nevezett berendezés szemlélteti. Úgy kapjuk meg a fényóra által mért időt, hogy a fény által befutott utat osztjuk a minden körülmények között azonos fénysebességgel. Ha a fényóra mozog, akkor a nyugvó külső megfigyelő számára a fény hosszabb utat fut be és ezért számára az óra többet mutat, mint a fényórával együtt mozgó rendszer órája. Azaz a mozgó rendszerekben lassabban telik az idő.

**A müonok életideje és az általuk befutott út.** Az idő viszonylagossága a magasban keletkezett müonok viselkedésén is megmutatkozik. A világűr távoli tartományaiból érkező nagyon nagy energiájú protonok átlagosan 20 kilométer magasságban ütköznek az atommagokkal és az ütközésekben csaknem fénysebességgel mozgó müonok is képződnek. Mivel a müon bomlékony, átlagosan csak  $2,2 \cdot 10^{-6}$ , azaz 2,2 milliómod másodpercig élhet. Ha a 20 kilométeres utat csaknem fénysebességhez közeli sebességgel teszi is meg, 2,2 msec alatt legfeljebb 660 métert repülhetne. Mégis, a Föld felszínén, 20 km befutása után is észlelünk müonokat. Mindez független attól, hogy az utat függőlegesen teszi meg. Hasonló sebességű, gyorsítóban előállított müon a felszínén is be tudja futni a 20 kilométeres távolságot. Ha a müon lassú, élettartamára a fent megadott  $2,2 \cdot 10^{-6}$  másodperces értéket mérjük.

Azért észlelhetjük a világűrből érkező sugárzás által keltett müonokat, mert mialatt a mi óránkon kb. 60 milliómod másodperc telt el, a  $v = 0.999c$  sebességgel mozgó müon "saját" óráján (ez vele együtt mozog, azaz hozzá képest mozdulatlan) eltelt idő ennek csupán 1/30-ad része, 2 milliómod másodperc, lásd a 4. ábrát. Azaz a müon életideje függ attól, mekkora sebességgel mozgó rendszerből mérjük.





4. ábra. Ha a  $v$  sebességgel lefelé mozgó müion az időt fényórával méri, látszik, hogy a saját rendszerében, - számára az időt a vele együtt mozgó fényóra méri - a fény jóval rövidebb utat fut be (vízszintes szaggatott vonal), mint a Föld felszínéről nézve (ferde szaggatott vonal). Ezért a földi megfigyelő ugyanannak az eseménynek az időtartamát sokkal hosszabbnak méri. Azaz a müionnal együtt mozgó rendszerben az idő lassabban telik.

**Négykiterjedésű (négydimenziós) téridő.** A relativitáselmélet a négykiterjedésű (négydimenziós) téridőben a legkönnyebb megfogalmazni. Míg a háromkiterjedésű (háromdimenziós) tér egy pontja három koordinátával, az  $x, y, z$  értékeivel jellemezhető, addig a négykiterjedésű téridő koordinátái:  $x, y, z, ct$  ( $c$  a fénysebesség,  $t$  az idő.). Ne értsük félre,  $ct$  nem a tér negyedik, hanem a téridő egyik kiterjedése, a téridőben az  $x = 0, y = 0, z = 0$  pontban nyugvó test a negyedik tengely mentén az időben  $c$  fénysebességgel mozog. Tér és idő különbözőek, csak a téridőt használó természettani leírás fonja őket össze. Érdeemes a négykiterjedésű térben dolgoznunk, mert a négykiterjedésű vektorokat és azok hosszait használva a relativisztikus mozgásegyenletek egyszerűbben fogalmazhatók meg és jóval könnyebb velük számolni.

A téridőben valamennyi természettani mennyiség négykiterjedésű vektor összetevője. Megmutatható, hogy a lendület vektor 3 kiterjedése mellé rendelhető negyedik kiterjedés az energia. Ebből a kapcsolatból következik a tömeg és az energia egyenértékűségét megadó  $E = mc^2$  képlet is. Míg korábban az energia és a tömeg megmaradása egymástól független, külön-külön érvényes törvényszerűség volt, a négykiterjedésű tárgyalás szerint csak egyetlen megmaradási törvény létezik. Mivel az energia alapvetőbb mennyiség, csupán az energia marad meg, miközben az energia értékének számításakor figyelembe kell venni a tömegeknek megfelelő  $E = mc^2$  energiákat is.

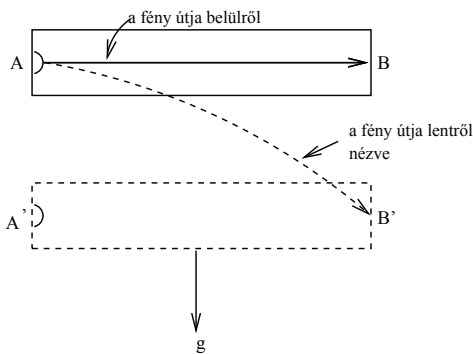
## 1.4. Általános relativitáselmélet

A speciális relativitás elmélete csak a tömegvonzás elhanyagolhatósága esetén alkalmazható. Miután a tömegvonzást is sikerült belevennie a tárgyalásba, Einstein 1916-ban tette közzé az általános relativitáselméletet. Ez egyben a tömegvonzás általános elmélete is, amley a téridő és a tömegek kapcsolatát tárgyalja. Kiindulópontja az ekvivalencia elv. Akárcsak a Galilei-féle relativitás elvének kimondásakor, most is vonatkoztatási rendszerek egyenértékűségét taglaljuk. Kétféle vonatkoztatási rendszert vetünk össze, egyik a tehetetlenségi rendszer és a nagy tömeg felé szabadon eső rendszer, mondjuk egy zuhanó felvonó a másik. A szabadon eső felvonóban a magára hagyott test súlytalanná válva lebeg vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez, akárcsak a tehetetlenségi rendszerben a magára hagyott test. Einstein feltételezte, hogy az azonos viselkedés nemcsak a magára hagyott testre igaz. Kimondta:

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

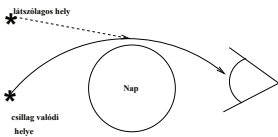
Ha a tehetetlenségi és a szabadon eső rendszer egyenértékű, rendszeren belül végzett megfigyelésekkel, kísérletekkel nem dönthető el, hogy tehetetlenségi avagy zuhanó rendszerben tartózkodunk-e. Valamennyi jelenség mindkettőben ugyanúgy zajlik. Nemcsak a testek mozgását, hanem minden mást, így a fény terjedését is ugyanolyan alakú törvény szabályozza.

**Fény gravitációs térben.** Az egyenértékűségi elv szerint a fény a gravitációs térben elhajlik. Képzeljünk el egy szabadon eső kamrát, melyben a kamra falánál felvillan egy zseblámpa, lásd a 5. ábrát.



5. ábra. Elhajlik a fény a gravitációs térben. Szabadon eső kamrában az  $A$  pontban felvillan egy zseblámpa. Mivel az ekvivalencia elv szerint a zuhanó kamrában minden úgy zajlik, mint egy tehetetlenségi rendszerben, a fény az  $A$  és  $B$  pontok között egyenes mentén terjed. Viszont a földi megfigyelő szerint a fény a kamrával együtt szabadon esik.

Mivel az egyenértékűségi elv szerint a zuhanó kamrában minden úgy zajlik, amint egy tehetetlenségi rendszerben, a fény a kamrabeli megfigyelő számára egyenes vonal mentén terjed, miközben a földi megfigyelő szerint a fény a kamrával együtt esik. Mintha a fénynek is lenne tömege. Természetesen nem azért látjuk görbülni a fénysugarat, mert ott a kamra. Minél nagyobb a tömegvonzás, azaz minél közelebb vagyunk a nagy tömeghez, annál erősebben görbül felé a fény. Ezt a mérések is igazolják. Teljes napfogyatkozásakor ellenőrizhető, hogy a Nap mellett elhaladó fénysugár elhajlik, azaz ekkor a Nap mögött lévő csillagot nem ugyanott látjuk, mint az éjszakai égbolton, lásd a 6. ábrát.



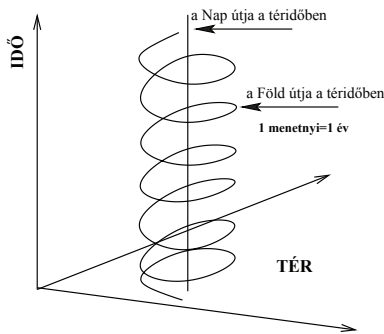
6. ábra. Fényelgömbülés a Nap körül. A Nap mellett haladó, felé görbülő fénysugarat akkor láthatunk, ha napfogyatkozásakor egy, a Nap által csaknem vagy teljesen elfedett csillag helyzetét figyeljük meg.

Ahogy az általános relativitáselmélet kifejti, nem azért esik felénk a fény, mert tömege lenne, hiszen az nincs neki. Egy fénysugár mindig a legrövidebb idő alatt befutható út mentén halad. Ha görbülni látjuk, akkor a tér mértana más, mint a megszokott euklideszi. Ilyen másféle mértan az ún. gömbi mértan is, amelyben a gömb felületére rajzolt háromszög szögeinek összege nagyobb, mint 180 fok.

**Téridőgörbület.** Einstein általános relativitáselmélete szerint a fény a nagy tömeg mellett haladva azért hajlik el, mert a tömeg görbíti a négykiterjedésű téridőt. Eszerint a térben lévő tömeg szabja meg, hogy milyen a téridő mértana. Görbíti a téridőt a Nap is, ezért hajlik el a mellette haladó fénysugár. Másrészt a téridőgörbület, amely a tömegvonzásnak is a forrása, határozza meg a benne lévő tömegek mozgását és a fény terjedését is. Nagyság és irány szerint is változik a téridőgörbület, tömegtől távolabb kisebb.

Hogy milyen az adott tömegeloszlásnak megfelelő téridő, az Einstein-egyenletek segítségével számítható ki. Pontos megoldásuk nagyon nehéz, de néhány egyszerű tömegeloszlásra jó közelítő megoldás áll rendelkezésünkre. Két esetet tárgyalunk, először a gömb alakú tömeg által görbített téridőt, majd az egyenletes tömegeloszlás téridejét.

**Gömb alakú tömeg által görbített téridő - tömegvonzás.** Fény és tömeg egyaránt a legrövidebb úton, a görbült téridő 'egyenesei' mentén mozog. Nézzük meg, mint görbíti a téridőt a Nap. Legyen a Nap a térbeli koordináta rendszer kezdőpontjában, így a térben nyugszik, ám közben a negyedik, a  $ct$  tengely mentén egy év alatt fényévnnyi távolságot fut be. Ezalatt a Föld a térben egy kb. 150 millió kilométer, azaz egy kb. 8 fényperc 20 fénymásodperc sugarú pályán megkerüli a Napot és a  $ct$  tengely mentén szintén fényévnnyi utat tesz meg, lásd a 7. ábrát.



7. ábra. Földünk a téridőben a Nap tömege által görbített térben mozog. Ugyan a Nap a térbeli koordináta rendszer kezdőpontjában nyugszik, de a téridő negyedik tengelye, a  $ct$  tengely mentén fénysebességgel mozog, egy év alatt fényévnnyi téve meg. Ezalatt a Föld a térben a kb. 8 fényperc 20 fénymásodperc sugarú körpályán is mozog - ekkora a Nap-Föld távolság -, miközben a  $ct$  tengely mentén szintén fényévnnyi utat tesz meg.

Látható, a téridőben az évek során a Föld csavarmenethez hasonló pályát fut be, ami a Nap által elgörbített téridő vonalának felel meg. Ennek görbültsége kicsiny, fényévnnyi távolságon fénypercekben mérhető. Ha a téridőgörbület elég kicsiny, az Einstein-egyenletek megoldása jól közelíthető azzal, hogy a háromkiterjedésű térben és időben bevezetjük a térben lévő tömegek között ható newtoni tömegvonzási erőt. Azaz a tömegvonzási erő a téridő tömegektől való függésének közelítő leírásából származtatható le. Így a tömegvonzást a négykiterjedésű mértanhoz köthető hatásként értelmezzük.

Naprendszerünk bolygóinak pályáit, kivéve a legbelső bolygó, a Merkúr elnyúlt ellipszis pályáját, newtoni tömegvonzással való számolás nagyon jól visszaadja. De a Merkúr annyira közel van a Naphoz, hogy az ottani téridőgörbület már nem vehető elegendően kicsinek. Emiatt a Merkúr pályamozgását a newtoni tömegvonzási erő pontatlanul írja le. Akárcsak a többi bolygó, a Merkúr is ellipszis pályán mozog, de napközelbe kerülve egy újabb, az előzőtől eltérő helyzetű ellipszis pályára tér át. Nagyjából úgy, mintha egy virág szirmai mentén haladna és a virág közepéhez érve - azaz napközelben - egyik szíromról a másikra csúszna át. Az általános relativitáselmélet pontosabb közelítése a Merkúr pályáját is visszaadja. Ez volt a Nap menti fényelhajlás megfigyelése mellett az általános relativitás elméletének egy másik bizonyítéka.

**Gömb alakú tömeg által görbített téridő - az idő lassulása.** Ha a tömegvonzás erősebb, lassabban telik az idő. Emiatt az óra a Föld felszínén lassabban jár, mint magasabban, függetlenül attól, milyen órával mérünk, mivel az idő telik máshogyan. Ezt sikerült megfigyelni, egy igen érzékeny magfizikai jelenség, a Mössbauer hatás segítségével egy víztoronyban mérték meg, hogy 10 méterrel magasabban az általános relativitáselmélet által megjósolt módon telik gyorsabban az idő. A mért különbség az ember, mint élőlény számára elhanyagolhatóan kicsiny, de gyakorlati jelentősége is van. A világűrben keringő műholdak órajeleinek elemzésénél a műholdak nagy sebessége miatt fellépő időlassulás mellett, - ez napi 7 msec -, figyelembe kell venni azt is, hogy fenn a műholdakon naponta 46 millimásodperccel gyorsabban telik az idő. Emiatt időről időre a gondoskodni kell az órajelek összehangolásáról (szinkronizálásól). Ha csak másodpercként hangolnák össze őket, akkor a gépkocsi GPS készülékének helymeghatározási hibája durva becsléssel méteres lenne.

Az  $M$  tömegű gömb által meghatározott téridő fontos jellemzője a  $r_c = 2GM/c^2$  Schwarzschild sugár, ahol  $G$  a gravitációs állandó. Ha az  $M$  tömegű test a Schwarzschild sugarán belül található, akkor a körülötte lévő téridő annyira görbült, hogy még a fény sugár sem hagyhatja el. A fekete lyuknak nevezett csillag ilyen állapotban van, ezzel a csillagfejlődés tárgyalásakor foglalkozunk majd.

**Téridő egyenletes anyagsűrűség esetén.** A világegyetem egésze jó közelítésben végtelen, anyaggal egyenletesen kitöltött térnek fogható fel. Erre az esetre az Einstein-egyenletek megoldása a ritkábbá váló, azaz táguló, vagy a sűrűsödő, azaz összefelé húzó tér. Köztes, állandó állapot nem lehetséges.

Einsteint mélyen megdöbbenetette, hogy elmélete nem adja vissza a mindenki által akkor elfogadott newtoni, állandó állapotú világegyetemet. Akárcsak mások, ő is hitt a Mindenség állandóságában és emiatt az egyenleteibe bevezette a tömegek közötti taszítást leíró kozmológiai állandót. De hamarosan kiderült, hogy a kozmológiai állandóval kibővített elmélet sem írhat le állandó állapotú világegyetemet. Már a legkisebb ingadozás is képes a finoman kiegyensúlyozott világegyetem állandóságát megszüntetni és a világegyetem elkezd tágulni, vagy össze felé húzódni.

**Gravitációs hullám.** Ahogyan a töltések eloszlásának változása fénysebességgel terjedő elektromágneses hullámokat kelt, a tömegeloszlás módosulása a téridőgörbület változásával jár együtt, ami fénysebességgel mozgó gravitációs hullámként terjed. A gravitációs hullám az elektromágneses sugárzás hullámához hasonló. Ha a Nap ebben a pillanatban eltűnne, ránk való hatását, a Föld szabaddá válását 500 másodperc múlva észlelnénk, ennyi idő alatt érne ide a változás hatása. A bolygók mozgása miatt a Naprendszer is gravitációs sugárzás forrása, ám ez a két egymás körül keringő csillag által kibocsátott gravitációs sugárzás-hoz képest igen gyenge. További fontosabb gravitációs hullámforrás a szupernóva robbanás. A két csillag egymásba olvadásakor keletkező gravitációs hullám már észlelhető lehet.

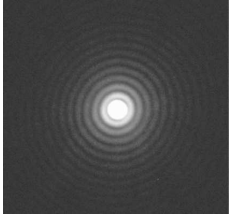
Korábban a gravitációs hullámok létéről csak közvetve sikerült tudomást szerezni. Éveken át figyelték egy kettőscsillag viselkedését és sikerült megmérni, hogy a gravitációs kisugárzásukkal veszített energia miatt miként változott a keringésük ideje. Pontosan egyezik a mért és számolt energiavesztés és a felfedezők 1993-ban Nobel-díjat kaptak. Lézerfényes mérőberendezéssel a gravitációs hullámok kimutatása közvetlenül is sikerült. Ha a lézerfény útját gravitációs hullámzás keresztezi, a téridő változása módosítja a lézerfény interferenciára való képességét. Ahogy nő a lézerfény által befutott út, úgy növekszik a berendezés érzékenysége. 2016-ban jelentették be két, a Földtől 1,3 milliárd fényévnnyire lévő fekete lyuknak nevezett csillag egymásba olvadásának megfigyelését. Azóta több hasonló egybeolvadást sikerült megfigyelni és 2017 augusztusában először sikerült ugyanazt az egybeolvadást kétféle módon, gravitációs hullámzást mérve és távcsöves észleléssel is megfigyelni.

## 2. Kisvilágtan

Newton törvényei az érzékszerveink által érzékelhető méretek világában érvényesek, ebbe beleértjük a távcsöveinkkel és mikroszkópokkal tanulmányozható világot is. Nagyon jól alkalmazhatóak, ha a következő három feltétel teljesül: a tárgyak sebessége jóval kisebb, mint a fénysebesség, a tömegek nem túl nagyok és a méretek nem túl kicsik. Ha a sebesség a fénysebességgel összemérhető, akkor a négykiterjedésű téridőre építő speciális relativitáselméletet, ha a tömegek túl nagyok, a tömegek téridőt görbítő hatását leíró általános relativitáselméletet kell alkalmaznunk. Newton törvényei nagyon kis méretekre sem jók, mert a világ kicsiben nem olyan, mint nagyban. Másféle törvények szabályozzák a kisvilág (mikrovilág), az óriásmolekulák és a náluk kisebb rendszerek mérettartománya világának viselkedését, például nem beszélhetünk pálya mentén mozgó részecskéről. A kisvilág törvényeit a kisvilágtan (kvantummechanika) fogalmazza meg, ennek néhány jellegzetességét ismertetjük.

## 2.1. Hullámtermészet - részecskék 'fényképezése'

Minél kisebb a megvilágító hullámhossz, annál pontosabb és részletesebb a kép. Ha a fény hullámhossza közel akkora, vagy nagyobb, mint a vizsgált tárgy, akkor is kapunk képet, lásd a 8. ábrát. Ez az úgynevezett elhajlási (diffrakációs) kép alkalmas arra, hogy ha többet nem is, de legalább a tárgy méreteit, alakját meg tudjuk határozni.



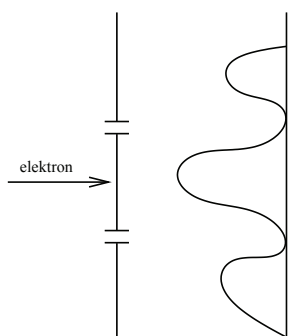
8. ábra. Fényelhajlás korongon. Ha a mérete összemérhető a megvilágító fény hullámhosszának méretével, akkor a képe az ernyőn nem csupán egy korong, hanem ekörül még egy gyűrűs szerkezet is megjelenik. Ha a hullámhosszat csökkentjük, a gyűrűs szerkezet sűrűsödni fog, majd egy idő után elenyészik és marad a korong pontos képe.

A kisvilági részecskék és rendszerek megfigyeléséhez szükséges hullámhosszú sugárzás előállítása nehéz és bizonyos méretek alatt szinte lehetetlen. Szerencsére nem csupán sugárzást, hanem tömeggel rendelkező részecskéket is használhatunk a kisvilági tárgyak, a molekulák, atomok, atommagok és a náluk is kisebbek 'fényképezéséhez', mivel a kisvilágtan szerint a részecske is rendelkezik hullámtulajdonságokkal. Egy  $m$  tömegű részecske  $\lambda$  hullámhossza, az ún. deBroglie hullámhossz  $\lambda = h/mv$  ahol  $h$  a kisvilágtan alapvető állandója, a Planck állandó és  $v$  a részecske sebessége. A bombázó részecske hullámtulajdonsága a következőben nyilvánul meg. Ha nagyszámú részecske bombázza a fenti korongot, a mögötte lévő ernyőn a becsapódó részecskék sokasága ugyanolyan ábrát rajzol ki, mint amelyet az adott tárgyra eső, a bombázó részecske  $\lambda$  hullámhosszával azonos hullámhosszú fényvel kapnánk. Minél nagyobb tömegű a test, annál kisebb a hullámhossza. Ha a test mérete a hullámhosszánál sokkalta nagyobb, a hullámtermészete nem mutatkozik.

Elektronok hullámtulajdonságát felhasználó fényképező berendezés az elektronmikroszkóp is, amely felgyorsított elektronokkal készít felvételeket. Részecskenyalábokat gyorsítóknak hoznak létre. Nagyobb energiára gyorsítva kisebb hullámhosszú részecskéket kaphatunk, így a vizsgált tárgyról jobb felbontású felvételeket tudunk készíteni. Egy részecskét akkor tartunk pontszerűnek, ha a világ legnagyobb energiájú gyorsítójának nyalábjával vizsgálva is pontnak látszik, azaz kisebb méretű annál, mint amekkorát gyorsítóval jelenleg észlelni, 'látni lehet'.

Ahogy gyors elektronokkal kép alkotható, úgy a 20 km magasságban keletkező, a Föld felszínére érkező igen nagy számú gyors müon is felhasználható felvételek készítésére. Segítségükkel röntgenfelvételhez hasonló képet készítettek a 2011 márciusában erősen megrongálódott fukusimai atomreaktorok belsejéről. Mivel a müonok a magasabb rendszámú elemek, így az urán atommagján erősebben szóródnak, a kapott kép megmutatja, hol és milyen állapotban van a reaktormag. Három fukusimai reaktor sérült meg, magjaik hőmérséklete annyira megnőtt, hogy megolvadtak. 2015 márciusában közölték az első reaktor műonfelvételét. Az urántöltet nem látszik. Mivel a felvételen a tartály alsó része nem látható, nem lehet tudni, hogy a megolvadt urán a tartályban van-e még. Lehetséges, hogy a tartályt elhagyva egy része szétfolyt és a többi lefelé tart az épület betonalapjában vagy már azt is elhagyva süllyed lefelé.

**Interferencia - kétréses kísérlet.** Az elektron vagy más részecske hullámszerű viselkedését nemcsak az elhajlás, hanem a hullámok találkozásánál fellépő interferencia is mutatja. Képzeljük el, hogy fénysugár vagy elektronok nyalábjába halad át a két vékony párhuzamos rést tartalmazó lemez résein. Tegyük a lemez mögé filmet, melyen a becsapódó elektron foltot hagy. Ha egy idő után megnézzük, milyen a kép az elektronnyalábbal való bombázás után, a következőt látjuk.



9. ábra. Kétréses interferencia. Kétlyukú lemezen elektronok haladnak át. Ugyanolyan eloszlási képet alakítanak ki a lemez mögötti filmre becsapódó elektronok, mint amelyet a kétlyukú lemezen átjutó azonos hullámhosszú fény hozott volna létre.

Akár az áthaladó fény, az elektronnyaláb is interferenciaképet mutat, lásd a 9. ábrát. A két résen átjutó elektronnyaláb pontosan olyan képet rajzol ki, mintha fényforrással világítottuk volna meg a két rést tartalmazó lemezt. Ez alátámasztja deBroglie elképzelését, miszerint részecske is viselkedhet hullámként. Ha az érzékelő az elektronokat számláló apróbb csövek sokasága, ugyanezt az eloszlási képet kapjuk, csak ekkor a becsapódások gyakoriságát ábrázoló függvény rajzolja ki a hullámszerű viselkedést mutató interferenciaképet.

Gyengítve az elektronnyalábot, lőjjünk ugyanannyi elektront a két rést tartalmazó lemezre. Mivel az elektronnyalábban másodpercenként kevesebb elektron repül, hosszabb ideig tart ugyan a kísérlet, de a lemez mögötti elektroneloszlás képe nem változik. Akkor is ugyanaz marad az interferenciakép, ha annyira lecsökkentjük az elektronnyaláb erősségét, hogy egyszerre csak egy elektron haladhat át a lemez résein. A megfigyelt jelenség csak azzal magyarázható, hogy az elektron úgy jut a lemez mögé, mintha hullámként haladna át a két résen.

Ha két rés helyett két korongot bombázunk, ugyanúgy interferenciaképet kapunk. Ha az összetett rendszert elektron vagy más részecske bombázásával vizsgáljuk, megtudhatjuk, mik vannak benne és azok hogyan helyezkednek el.

## 2.2. Határozatlansági összefüggés

Mint a 1.2. szakaszban tárgyaltuk, a fény véges hosszúságú hullámcsomagként terjed, ezt a fénysebességgel terjedő hullámvonulatot nevezzük fotonnak. Ha a gerjesztett atom életideje  $t$ -ez közelítőleg a kisugárzási időtartamnak felel meg-, akkor a foton mérete, a hullámcsomag hozzávetőleges hossza  $ct$ . Ekkora bizonytalansággal mondható meg, hogy hol a foton, a  $ct$  szakasz hosszúsága egyúttal a foton  $\Delta x$  helybizonytalanságának is tekinthető. A gerjesztett atom által kisugárzott foton lendülete sem pontosan meghatározott értékű, hanem sávvá szélesedett, bizonytalansága  $\Delta p = h/ct$ . Emiatt a két bizonytalanság szorzata legalább akkora, mint a  $h$  Planck állandó,  $\Delta p * \Delta x \geq h$ . Ez a fotonra felírt határozatlansági összefüggés.

Mivel a részecske hullámként viselkedik, a szabad elektron térbeli terjedését is a 2. ábrán látható hullámcsomag írja le. Az atomba kötött elektron térbeli viselkedését az atom térfogatán belül kialakuló, állóhullámhoz hasonló alakú 'csomag' jellemzi. A hullámtermészet miatt a fotonra fent levezetett határozatlansági összefüggés részecskékre, így elektronokra is érvényes. Ezért az atomban lévő elektronnak nem lehet egyszerre pontos helye és lendülete, ezért pályája sincs. Ha a helyét tetszőleges pontossággal ismerjük, akkor nem tudhatjuk, mekkora a lendülete. Hasonlóan, a 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 bizonytalanságának szorzata legalább akkora, mint a  $h$  Planck állandó.

Nem csak a helyre és a lendületre, hanem más fizikai mennyiségek párjaira is léteznek határozatlansági összefüggések. Tekintettel a későbbiekre, a folyamat időtartamára és energiabizonytalanságára vonatkozó

a legfontosabb. Fotonra a fenti összefüggéseket felhasználva megmutatható, hogy a foton kibocsátási idejének és a foton energiabizonytalanságának a szorzata éppen a  $h$  Planck állandó. Hasonlóan kapható, hogy bármely állapot  $\tau$  élettartamának és  $\Delta E h$  energiabizonytalanságának szorzata nem lehet kisebb, mint a  $h$  Planck állandó, azaz  $\Delta E * \tau \geq h$ .

**Van-nincs (virtuális) részecskék.** Az állapot energiabizonytalanságára és élettartamára vonatkozó kapcsolat képtelennek tűnő jelenségeket is megenged. Nagyon rövid időszakon belül az energiamegmaradás is megsérülhet. Akár úgy is, hogy a teljesen üres térből részecske bukkan elő. Ez egyrészt azzal sérti az energiamegmaradás tételét, hogy a részecskének tömege is lehet, és az  $E = mc^2$  összefüggésnek megfelelően a sérülés legalább ekkora. Továbbá a kipattanó részecskének mozgási energiájának is van, ami az energiamegmaradási tétel még nagyobb sérülésével jár együtt. Minél nagyobb a kipattanó részecske tömege, a  $\Delta E * \tau \geq h$  határozatlansági összefüggés értelmében annál rövidebb ideig létezhet és emiatt annál kisebb távolságokat képes befutni.

A térből csak úgy kipattanó részecskét van-nincs részecskének nevezhetjük. Létük közvetlen méréssel nem mutatható ki, de a megengedett igen rövid időn belül tényleg léteznek, hatásuk észlelhető. Van-nincs részecskék mindenütt, mindenhol és állandóan keletkeznek, majd eltűnnek. Létezésük, állandó keletkezésük és eltűnésük miatt az üres tér nem tekinthető igazán üres térnek.

## 2.3. Schrödinger-egyenlet

A kisvilágtan (kvantummechanika) alapegyenlete a Schrödinger-egyenlet, amely a hullámszerű viselkedést megadó függvénynek, az ún. hullámfüggvénynek az időbeli fejlődését adja meg. Például a hidrogénatomban lévő elektront az elektron hullámfüggvénye írja le. Valamennyi, a rendszert jellemző fizikai mennyiség értékét a rendszer hullámfüggvényének segítségével számolhatjuk ki.

A hullámfüggvény nem mérhető közvetlenül, pedig az elektron térben szétterülő hullámfüggvényére gondolva azt várhatnánk, hogy a különböző pontokban elhelyezett mérőberendezések egyidejűleg észlelhetnék az elektront. Ilyet még sohasem sikerült megfigyelni, az elektront, és így hullámfüggvényét egyidejűleg csak egyetlen pontban észlelhetjük. Eszerint a mérés pillanatában a hullámfüggvény összeomlik, egyetlen pontjára zsugorodik. Az összeomlás valós, kísérletileg igazolt jelenség.

Ha a hullámfüggvény által megadott atomot, atommagot és más kisvilágbeli rendszert jellemző mennyiségeket, mint az energiát, perdületet, a lendületet és a helyet mérjük, csak ritkán kapunk meghatározott értéket. Ha adott fizikai mennyiség értékére vagyunk kíváncsiak, a hullámfüggvény segítségével csak az számítható ki, hogy mik lesznek a lehetséges értékei, és melyik értékre milyen valószínűséggel számíthatunk. Méréskor az adott fizikai mennyiségre a lehetséges értékek közül bármelyik adódhat. Nem tudhatjuk előre, mikor éppen mekkora lesz ez a mennyiség, ez igazi véletlen. Csak az egyes értékek mérésének valószínűségét kaphatjuk meg. Például a hullámfüggvény a részecske pontos helyét nem tudja megadni, de a részecske egy adott pontban való tartózkodásának valószínűsége a hullámfüggvény adott helyen felvett értékének négyzetével arányos.

Ha egy molekula vagy atom állapotáról az adott pillanatban mindent tudok, amit tudhatok, ez a mindentudás akkor sem jelenti, hogy megmondhatnám, pontosan milyen mennyiségek jellemzik majd a következő pillanatban. A gerjesztett állapotban lévő molekuláról azt tudhatjuk, hogy az alacsonyabban fekvő állapotok közül melyekbe és mekkora valószínűséggel bomolhat. De hogy a bomlás pontosan mikor következik be, nem tudhatjuk, csak azt, hogy várhatóan meddig marad a gerjesztett állapotban. A bomlás felezési ideje azt jelenti, hogy ezalatt a gerjesztett állapotban lévő molekulák fele bomlik el.

Csak akkor használható a Schrödinger-egyenlet a kisvilág jelenségeinek leírására, ha a részecskék sebessége viszonylag kicsi. Ha a sebességek összemérhetők a fénysebességgel, akkor a relativisztikus tárgyaláshoz a négykiterjedésű téridőben megfogalmazott hullámegyenletet, a Dirac-egyenletet kell használnunk.



**Atomszerkezet.** Az atomszerkezet a kisvilágtan segítségével értelmezhető. Most csak a hidrogénatom szerkezetével foglalkozunk. A hidrogénatom a közepén lévő hidrogén atommagból, ez épp a proton, és a körülötte lévő elektronból áll. Nem mondhatjuk azt, hogy az elektron a proton körül kering, mivel nincs pályája.

Csak bizonyos meghatározott energiájú állapotokban lehet a hidrogénatom elektronja, hullámfüggvényét az atommagot burkoló állóhullámhoz hasonlíthatnánk. Minél erősebben kötött az elektron, a hullámfüggvénye annál közelebb van az atommaghoz. A legalacsonyabb energiájú, azaz a legjobban kötött állapot a hidrogénatom alapállapota. Mivel az atomi és molekulapályák energiái csak meghatározott értékeket vehetnek fel, gerjesztéskor csak olyan fotont nyelhet el az atom vagy molekula, melynek energiája a két atomi vagy molekulapálya közötti energiakülönbséggel egyenlő. Ha az atom vagy molekula gerjesztett állapotban van, legerjesztődik. Ekkor fotont bocsát ki, melynek energiája a gerjesztett állapot és az alapállapot energiája közötti különbséggel egyenlő.

**Alagúthatás - áthaladás falon.** Képzeljük el a következő esetet. A tűzhányó csúcsán, a bemélyedésben van egy golyó. Mivel magasan van, nagy a helyzeti energiája. Ha kijuthatna a bemélyedésből, a hegy lábáig gurulva nagy sebességre gyorsulhatna fel. De a newtoni törvények szerint a golyó magától semmiképpen sem juthat ki. Viszont a kisvilágban az ilyen helyzetű részecske is kiszabadulhat.

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

Kijutását, az  $\alpha$ -bomlást az  $\alpha$ -részecske hullámtermészete teszi lehetővé. Ha csak golyó lenne, a falig jutva onnan lepattanna és ide-oda pattogva bezárva maradna. De az  $\alpha$ -részecske mint hullám, felülethez érve, nemcsak visszaverődhet, hanem be is hatolhat a közegbe. Akár a fény, mely részben visszaverődik a felületről, részben viszont behatol a felület anyagába. Ha ez a közeg vékony, a fény egy része átjut rajta. Akár a vékony tükrön áthatoló fényhullám, az  $\alpha$ -részecske is áthatolhat a gáton. Mintha alagutat találna. Minél magasabb, szélesebb ez a gát, az áthatolás, azaz az  $\alpha$ -bomlás valószínűsége annál kisebb. 4,51 milliárd év az  $^{238}\text{U}$  atommagjának bomlásának felezési ideje. Átlagosan ennyi időbe kerül, míg egy  $\alpha$ -részecske kijuthat az  $^{238}\text{U}$  atommagjából.

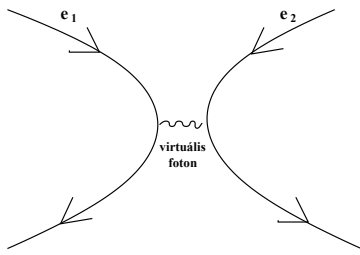
## 2.4. Az erőterek kisvilágtani eredete - kvantumtérelméletek

Erők, erőterek segítségével írjuk le a kölcsönhatásokat, legalább is az érzékelhető méretekben. Például az elektromosan töltött részecskék közötti erőket elektromos erőterrel tárgyaljuk. Hasonlóképpen beszélhetünk a mágneses és a gravitációs erőter létezéséről. Kiderült, ha a kölcsönható részecskék nagyon közel kerülnek egymáshoz, vagy ami ugyanazt jelenti, lásd a 2.2. szakaszban, hogy nagyon gyorsan mozognak egymáshoz képest, az erőterrel való tárgyalás nem kielégítő. Ekkor a kölcsönhatást a kvantumtérelmélet fogalmazza meg. Az elektromágneses tér kvantumtérelmélete a kvantumelektrodinamika.

Ha két részecske, mondjuk két elektron rugalmasan ütközik, mindkét elektronnak megváltozik a sebessége. A kvantumtérelmélet szerint a két elektron közötti kölcsönhatást, az energia és lendület átadását a térben kipattanó van-nincs fotonok közvetítik. Ha a két elektron egymáshoz képest nagyon gyorsan mozog, azaz nagyon nagy ütközési energiák, csak igen rövid ideig vannak egymás közelében. Ekkor egyetlen van-nincs foton cseréje is elegendő, lásd a 10. ábrán.

Ha a mozgás lassabb, a két foton közvetítésével lejátszódó folyamatokra is lesz idő és az átvitt energia és lendület mennyisége megoszlik a két foton között. Még lassabb ütközéseknél az átvitt energia és lendület három és még több, sőt nagyon sok van-nincs foton között oszlik meg és ezek járulékát is figyelembe kell vennünk. Minél kisebb az ütközési energia, annál jobb lesz a hagyományos, Coulomb-erőteres leírás.





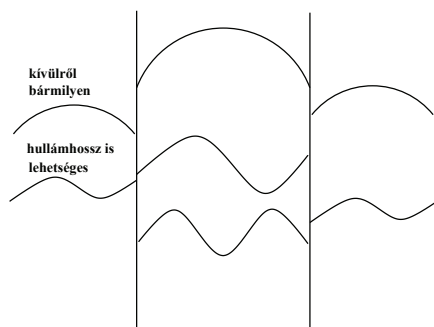
10. ábra. Két nagyon gyors elektron, jelölésük  $e_1$  és  $e_2$ , közvetítő részecske, egyetlen van-nincs (virtuális) foton segítségével kerül kölcsönhatásba egymással. Azaz az energiát és lendületet egy van-nincs foton viszi át egyik elektronnól a másikra.

Erőtérrel, a Coulomb-erővel tárgyalhatjuk az atomi és molekuláris folyamatokat is, mert a gerjesztett állapotok bomlásai kvantumtérelméleti szempontból igen lassúak. De vannak a hidrogén atomnak olyan állapotai, amelyeknek a Coulomb-erővel számolt energiaszintjei azonosak, viszont a kvantumelektrodinamika szerint különbözőek, a különbség a hidrogén kötött állapot energiájának kétszázötöd része. Sikertelenül két ilyen állapot energiaszintjei közötti különbséget megmérni és a mért és a kvantumelektrodinamikai módon számolt energiaszintek nagyon jól egyeznek.

Van-nincs részecske, így a van-nincs foton megjelenése is, az energia és lendület megmaradási tételek megsértésével jár együtt. Amint a van-nincs részecske elnyelődik, a megmaradási tételek sérülése megszűnik. Minél nagyobb a keletkezett van-nincs részecske energiája, annál rövidebb az élettartama. Ennélfogva minél kisebb a van-nincs részecske tömege, annál nagyobb az általa közvetített erő hatótávja. Ugyanis a nagy tömegű van-nincs részecske felbukkanásához a tömegének nagysága miatt eleve több energia kell. Emiatt a nagy tömegű van-nincs részecske, mivel csak rövidebb ideig létezhet, csupán rövidebb utat futhat be, ezért az általa közvetített erő is rövidebb hatótávú. Ha a közvetítő részecske tömege nulla, akkor, akár a foton, fénysebességgel mozog és az erő végtelen hatótávú lesz.

**Casimir-hatás.** Meggyőzően bizonyítja a van-nincs fotonok létezését a Casimir-hatás. Ismert az elektromosságтанból, hogy két fémlemez között csak olyan elektromágneses tér létezhet, amely a lemezek között eltűnik, azaz lemezen a térerősség nulla. Ezért a lemezek között a tér hullámainak nem lehet akármekkora a hullámhossza. Csak olyan hullámhosszak fordulhatnak elő, amelyeknél a két lemezen a hullám kitérése nulla. Ezért a legnagyobb előforduló hullámhossz a két párhuzamos lemez esetén a távolságuk kétszerese, ekkor éppen egy félhullámhossz van a lemezek között. Ennek a fele, harmada, negyede, stb. lesz a többi megengedett hullámhossz, lásd a 11. ábrát. A lemezre eső és onnan visszaverődő foton lendületet ad át és ezzel erőt gyakorol a lemezre. Ez a jelenség jól ismert, a szabadon lebegő tükör az általa visszavert fény hatására elmozdul.

Mint hullám, a van-nincs foton valódi fotonként viselkedik, ugyanúgy rendelhető hozzá hullámhossz. Ha a teljesen üres térbe két párhuzamos fémlemez rakunk, ez megváltoztatja a térben kipattanó és eltűnő van-nincs fotonok viselkedését, ugyanis a két lemez között csak a fent megadott hullámhosszú van-nincs fotonok keletkezhetnek. Mivel a lemezek kívül lévő térben a van-nincs fotonok hullámhosszára nincs korlátozás, ezért a lemezekbe kívülről több van-nincs foton ütközik, mint belülről. Emiatt a lemezeket összenyomó erő lép fel, amelyet kísérletileg is kimutattak és az erő éppen akkora, amekkorát Casimir kvantumelektrodinamikai számolása megjósolt. Nemrég mutatták ki a már korábban megjósolt dinamikus Casimir jelenséget. Eszerint mozgó tükör esetén a van-nincs fotonok közül egyesek valóssá válnak, emiatt a teljesen üres sötét térben fényfelvillanások észlelhetők.



11. ábra. Casimir-hatás. Két fémlemez között csak olyan elektromágneses tér létezhet, mely eltűnik a lemezeken és ez korlátozza, hogy milyen hullámhosszú fotonok lehetnek a lemezek között. Mivel a kívül keletkező van-nincs fotonok hullámhosszaira nincs korlátozás, kintről több hullám ütközik a lemezeknek és ezek nyomóereje összefelé nyomja őket.

## 2.5. Elemi részecskék

Sok-sok egymástól különböző test van a természetben, de valamennyien elemi részecskékből tevődnek össze. Eleminek a tovább már nem osztható, belső szerkezet nélküli, bármely eddig elvégzett kísérletben pontszerűen viselkedő részecskét tartjuk. Bár az elemi részecskét kiterjedés nélkülinek tekintjük, mégis lehet saját perdületük, amit spinnek neveznek. Egy részecske spinje a kisvilágtan szabályai szerint a megfelelő egységben csak feles vagy egész értékű lehet. A feles spinű részecskék neve fermion, az egész spinűek neve bozon. Az elektron is fermion. A Pauli elv szerint egy adott állapotban egyszerre csak egy fermion lehet. Az egész spinű részecskéket bozonoknak nevezük. Bozonokra nem igaz a Pauli-elv, egy adott állapotban akárhány lehet közülük.

**Elemi részecskék osztályozása.** Az elektron elemi részecske. Az atomokat rádióaktív alfa sugárzással bombázva fedezték fel, hogy az atom belseje csaknem teljesen üres és a tömegének a túlnyomó részét egy, az atom közepén lévő igen piciny térfogatú rész, az atom magjának nevezhető rész tartalmazza. Később az atommagot alkotó részecskékről, a neutronról és a protonról is kiderült, hogy ők sem elemi részecskék, mivel véges a térbeli kiterjedésük és más összetettségre, szerkezetre utaló tulajdonságuk is van. Belsejüket, akárcsak az atom szerkezetét, ütköztetésekkel sikerült feltárni. Amikor nagyon nagy energiájú, azaz nagyon kis hullámhosszú elektronokkal 'fényképezzük' a protont és a neutront, lásd a 2.1. szakaszt, a kapott kép szerint a proton elektromosan töltött részecskéket tartalmaz. Kvarkoknak nevezik őket, pontszerűek, legalább is ha  $5 \cdot 10^{-18}$  centiméternél nagyobb méretűek lennének, azt már észlelnénk.

A proton és neutron egyaránt három kvarkból áll. Tört töltésűek, az  $u$  kvark töltése a proton töltésének  $2/3$  része, a  $d$  kvark töltése  $-1/3$  proton töltés. A proton két  $u$  és egy  $d$ , a neutron két  $d$  és egy  $u$  kvarkból áll. Szabadon kvark nem fordulhat elő. Ezt a tapasztalati tény a kvarkok közötti kölcsönhatást 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 náluk nehezebb leptonok is. Lepton a korábban már említett müon is. A neutrínót az atommag  $\beta$  bomlásában fedezték fel.  $\beta$ -bomláskor az atommag töltése eggyel változik, miközben a protonjai és neutronjai számának összegét megadó tömegszám változatlan marad. A  $\beta$  bomlás során az atommag egy protonja neutronná, vagy egy neutronja protonná alakul át. A neutrínó töltés nélküli, nagyon jó közelítéssel fénysebességgel mozgó részecske. Tömege az elektron tömegének alig milliomod része lehet. Igen nehéz észrevenni, mert az anyaggal csak nagyon ritkán hat kölcsön. Egy köbcentiméterben minden pillanatban 340 neutrínó van jelen, túlnyomó többségük észrevétlenül hatol át az anyagon.

A világegyetem anyagának túlnyomó része elektronból, az ún. elektron-neutrínókból,  $u$  és  $d$  kvarkok-

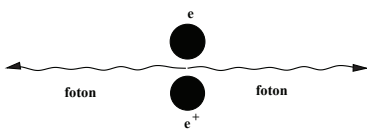
ból, illetve a belőlük felépült protonok és neutronok alkototta atommagokból áll. Ez a négy elemi részecske egy részecskecsaládhoz sorolható és ehhez hasonló két további részecskecsalád is létezik, lásd a 1. táblázatot. Hogy miért nem csak egy, hanem három ilyen család van, nem ismert. A második családhoz az elektronhoz hasonló, de annál több mint kétszázszor nehezebb és bomlékony müon, a müon-neutrínó, a  $c$  kvark és  $s$  kvark tartozik. A harmadik család tagjai az elektronhoz és müonhoz hasonló, de azoknál jóval nehezebb és bomlékony tauon, a tau-neutrínó valamint a  $t$  és  $b$  kvark. Valamennyi olyan részecske bomlékony, melynek összetevő kvarkjai között a második vagy harmadik részecskecsaládhoz tartozó is van.

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 anyagi építőköveknek tekinthető elemi részek táblázata. Első oszlopban a leptonok, harmadik oszlopban a kvarkok találhatóak, a második és negyedik oszlopban az elektromos töltéseiket találjuk. Három részecskecsalád van, a vízszintes vonalak választják el őket egymástól.

Elemi rész a kvarkokon és leptonokon kívül még a foton és néhány, hozzá hasonló, ám tömeggel is rendelkező bozon. A spinjük egész értékű és az alapvető kölcsönhatásokban van szerepük, lásd később. Ahogyan már a 2.1. részben tárgyaltuk, a foton az elektromágneses sugárzás adagja. Elemi részek még a nulla spinű, ezért skalár részecskének nevezett bozonok.

**Ellenrészecskék.** Az ellenrészecske (antirészecske) létezését a Dirac-egyenlet, lásd a 2.3. szakaszt, jósolta meg. Részecske és ellenrészecske mindenben, tömegükben és másban is azonos, kivéve a töltéseiket, ezek ellentétesek. Az elektromos töltésen kívül másféle töltések is léteznek. Az elektronnal egyébként teljesen azonos tulajdonságú, ám vele ellentétes töltésű ellenrészecske, a pozitron. A legtöbb elemi részecskének van ellenrészecskéje, csak a töltés nélkülieknek, így a fotonnak sincs. A kvark ellenrészecskéje az ellenkvark, a protoné az ellenproton, a neutroné az ellenneutron. Bár a neutron és ellenneutron elektromos töltése egyaránt nulla, az ún. bariontöltésükben ellentétes, mert a neutron kvarkokból, az ellenneutron pedig ellenkvarkokból áll.



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

Ha a részecske és ellenrészecskéje egymással találkoznak, megsemmisülnek és a tömegüknek megfelelő energia sugárzásként távozik. Például ha elektron és pozitron találkozik, mindkettő eltűnik és a tömegüknek megfelelő energiát két akkor keletkező foton viszi magával, lásd a 12. ábrát. Mivel részecskék és ellenrészecskék megsemmisülhetnek, az anyag nem elpusztíthatatlan, azaz nincs anyagmegmaradás. Például az elektron és pozitron megsemmisülésekor tömegek tűnnek el. Hasonlóan, nagyenergiájú fotonok elektron-pozitron párt keltve is veszíthetnek energiát, azaz energiából tömegek keletkezhetnek. Csak az energia marad meg és az energiamérleget elkészítve figyelembe kell venni az  $E = mc^2$  összefüggésnek megfelelő energiákat is, lásd a 1.3. rész végét.

Töltött részecske egyedül nem keletkezhet, mivel ez sértené a töltésmegmaradás törvényét, amely semmilyen körülmények között, soha, rövid időre sem sérülhet. De ellenrészecskéjével párban bármelyik van-nincs részecske kipattanhat a térből. Ekkor az energia- és lendületmegmaradás tételén kívül más tétel nem

sérül meg. Például a van-nincs elektron-pozitron, kvark-ellenkvark proton-ellenproton, stb. párok ezért mindig, mindenütt létezhetnek és befolyásolják az egyébként üresnek tekinthető tér tulajdonságait.

**Barionok és mezonok.** Mint már említettük, kvark szabadon nem fordul elő, csak részecskébe zárva. Erre két lehetőség van. Egyrészt három kvark van a protonban, a neutronban és más, náluk nehezebb, együttesen barionnak nevezett részecskében. Másik lehetőség a két összetevőből, a kvarkból és az ellenkvarkból álló mezon. A protonnál nehezebb barion és a mezon bomlékony. Csak nagy energiájú ütközésekben keletkezhetnek és keletkezés után hamar el is bomlanak. A neutron is bomlékony, felezési ideje 10,2 perc. Amint a müon és tauon, a mezonok, valamint a protonnál és neutronnál nehezebb barionok csak a világűrben érkező nagyenergiájú sugárzásban vagy nagyon nagy energiájú gyorsítóknál zajló ütközési folyamatokban keletkezhetnek.

### 3. Az alapvető kölcsönhatások

Ismereteink szerint négy alapvető kölcsönhatás létezik: gravitációs, elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatás. Az elektromágneses tulajdonságok akkor válnak fontossá, ha már az atomok és molekulák szerkezetére is tekintettel kell lennünk, vagy annyira magas a közeg hőmérséklete, hogy az anyag plazma halmazállapotba került.

Csak az atommag illetve annál kisebb méretű rendszerek viselkedését vezérli a gyenge és az erős kölcsönhatás. A protonok és neutronok között ható magerők is az erős kölcsönhatás megnyilvánulásai, ezek tartják össze az atommagot. Igen rövid a magerők hatótávolsága, a magerő szinte csak akkor lép fel, ha a két atommag összeér. Valójában az erős kölcsönhatás a kvarkok között ható erőnek felel meg. A gyenge kölcsönhatás többek között az atommag  $\beta$  bomlásáért felelős. A gyenge és az erős kölcsönhatás elméletének megfogalmazását a szimmetriaelvek felhasználása tette lehetővé.

#### 3.1. Törvények és szimmetriák

Ha a törvények ismeretlenek, a szimmetriák megkönnyíthetik a jelenség tanulmányozását. Például a jobbal szimmetria felére csökkenti a leíráshoz szükséges adatok számát. A szimmetria fogalmát az egyszerű mértani értelmezésen túlra is kiterjesztették. Az egyenlet akkor lesz szimmetrikus, ha valamely matematikai átalakítás elvégzése után változatlan marad az alakja. Így az  $y = x^2$  egyenlet alakja ugyanaz marad az  $x \rightarrow -x$ , tükrözésnek nevezett átalakítás után. A szimmetria léte megszorítja az egyenlet alakját. Például a tükrözéssel szembeni érzéketlenség az  $y = x^2 + x$  egyenletre már nem igaz, mivel ez a tükrözéssel az  $y = x^2 - x$  egyenletbe megy át. Minél több átalakítással szemben marad az egyenlet változatlan, annál rögzítettebb az alakja.

Miközben a szimmetria megszorítja törvényt megfogalmazó egyenlet alakját, léte az egyenletet áttekinthetőbbé, szabályosabb alakúvá, mondhatni szebbé teszi. Mivel Maxwell éppen az egyenletrendszer szimmetrikussá tételével jósolta meg az elektromágneses hullámok létezését, lásd a 1.2. szakaszban, a természettörvényt megfogalmazó egyenlet szépsége még nagyobb értékévé vált. A törvények megfogalmazásának további fontos szempontja az egyszerűség. Ha valami kétféleképpen is magyarázható, a fizikus gondolkodás nélkül az egyszerűbb, kevesebb feltevést tartalmazó leírást fogadja el. Bonyolultabb leírásra csak akkor fanyalodnak rá, ha az egyszerűbb leírás valamilyen új mérési adat értelmezésére alkalmatlan. A bonyolultabb eleve elvetését a középkori angol filozófus után Occam-elv néven emlegetik.

Ha egy fizikai egyenlet egy átalakításra szimmetrikus, akkor az átalakítás előtt és után ugyanazokat a jelenségeket írja le. Így például a fizikai alapegyenlet térbeli és időbeli szimmetriájának megkövetelése komoly megszorítást jelent. Gondoljunk el például, változhat-e a leírt jelenség attól, hol játszódik le. Ha nem, akkor a térben való eltolhatóság érvényes szimmetria. Azaz a fizikai egyenlet alakja nem változhat,

ha arrébb toljuk a vonatkoztatási rendszer kezdőpontját. Megkövetelhetjük még a relativitáselméletnek megfelelő szimmetriát is, ekkor a tér és idő változók a négykiterjedésű tér változóiként jelennek meg az egyenletben. A Maxwell egyenletek relativisztikusan szimmetrikusak.

**Belső szimmetriák.** Léteznek a mértani szimmetriákon kívül más, elvontabb szimmetriák is, ezeket az egyenlet belső szimmetriáinak nevezik. Közöttük is vannak olyanok, melyek fontos szerepet játszanak a természet alapvető törvényeinek megfogalmazásában. Így ha a szabad elektronok viselkedését leíró Dirac-egyenlet hullámfüggvényén egy bizonyos egyszerű matematikai átalakítást végzünk, és megköveteljük a szimmetriát, kiderül, hogy ez csak akkor lehetséges, ha léteznek a Maxwell-egyenletek által leírt elektromágneses jelenségek! Így a teljes elektrodinamika, a Maxwell-egyenletek alakja a töltött részecskét leíró Dirac-egyenlet egy bizonyos szimmetriájának megköveteléséből vezethető le.

Azonos jellegű, csak kissé bonyolultabb belső szimmetriákon alapul a gyenge és erős kölcsönhatás valamint az ún. nagy egyesített elméletet leíró egyenletek megfogalmazása is. Nem tudjuk, miért pont ezek a belső szimmetriák a fontosak, mivel van hozzájuk hasonló szimmetria bőséggel, de azok a természet leírásában nem játszanak szerepet. Továbbá meg kell mondani azt is, a szimmetriák, bár rögzítik az egyenletek, erőtvények alakját, nem mondanak semmit arról, miért éppen akkorák az elemi részek tömegei és a kölcsönhatások erősségei, mint amilyenek. Távol vagyunk attól, hogy tökéletes, végső elméletről beszélhessünk.

**Szimmetriasértések.** A természettan alapegyenleteinek nemcsak a szimmetriái, hanem azok sérülései is matematikailag leírható törvényszerűségeket követnek. A megsérülő szimmetria mértani vagy belső szimmetria egyaránt lehet. Az önsérülő, azaz magától sérülő szimmetria felismerése a fizika számos területén vezetett új felfedezésre.

Matematikailag az önsérülés azt jelenti, hogy a jelenséget leíró egyenlet ugyan szimmetrikus, de az általa leírt folyamat már nem mutatja azt. Ekkor több megoldása is van az egyenletnek, azaz különféle folyamatokat, eseteket írhat le. Külön-külön egyetlen megoldás sem mutatja az eredeti szimmetriát, csak valamennyi megoldás együttese. Ez nem azt jelenti, hogy a természetben valamennyi lehetséges megoldásnak megfelelő jelenség megjelenik, általában csak egyetlen megoldásnak megfelelő jelenséget tanulmányozhatunk. Az önsérülő szimmetria kifejezés arra utal, hogy az egyenlet szimmetriája nem sérül, a szimmetria sérülése csak úgy magától, a megoldásokban jelentkezik. Lássunk erre néhány példát.

A vacsorázó társaság kerekasztal körül ül. Mindenki előtt van teríték és a terítékek között ott a pohár. Kezdetben a jobb és a bal egyenértékű, most még bárki választhat, jobbra vagy balra nyúl-e a pohárért. Amint valaki már választott, a szimmetria megsérült, ezután mindenki csak egyfelől vehet poharat. Meg kell a kezdeti szimmetriának sérülnie, valamelyik, a jobb, vagy bal irányt ki kell választani.

Másik egyszerű példánk a függőleges helyzetű, tökéletesen egyenletes szerkezetű, hengersizimmetrikus acélszál, melyet felülről lefelé irányuló erő nyom. Ha a nyomóerő fokozódik, egy idő után a szál elgörbül, valamire kitér. Hogy merre, véletlen. Elveszett a hengersizimmetria, a sérülés itt is csak úgy magától jelentkezett. Nemcsak az acélpálca görbülésében és más egyszerű jelenségben sikerült szimmetria önsérülését észlelni. Szerephez jut az önsérülő szimmetria az alapvető kölcsönhatások alakjának meghatározásában is.

Másik fontos, a szimmetriák sérülésével kapcsolatos jelenség a rejtett szimmetriák fellépte. Akkor mutatkozhat, ha valahol sok, egymással rokon részecskével, dologgal találkozunk. Ugyan megkülönböztethetőek, de mégis hasonlítanak egymáshoz. Annyira, hogy akár egyetlenegy dolog változatainak is tekinthetők. Példa erre a férfi és nő közötti különbségtétel. Igaz rájuk az 'emberi' szimmetria, mert mindkettő ember, felcserélésük nem változtat emberi mivoltukon.

Rejtett szimmetriaként tárgyalható a proton és neutron közötti eltérés is. Nagyon hasonlóak egymáshoz, tömegük csaknem megegyezik, csupán elektromos töltésük más. Magfolyamatokban a neutron és a proton, töltésüktől eltekintve, azonos módon viselkedik, a töltés általában csak címkeként szolgál, nem a tényleges

különbség jelölője. Ezért a fizikus a protont és a neutront gyakran mint egyetlen, nukleonnak nevezett részecske két változataként kezeli. Matematikailag mindez belső szimmetriaként tárgyalható.

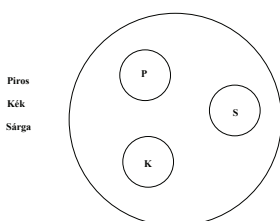
Kiderült, ha nem is annyira nagy a hasonlóság, de van még hat másik részecske, amelyek a protonhoz és neutronhoz, valamint egymáshoz hasonló módon viselkedik. A világűrben érkező igen nagy energiájú sugárzások által keltett kozmikus záporokban vizsgálva fedezték fel őket és nagyenergiájú gyorsítóknál is előállíthatók. Nemcsak a nukleonnal rokon hatot, hanem még nagyon sok másféle részecskét is előállítottak és tanulmányoztak. Ezeket a rejtett szimmetriák segítségével rokonították, rendezték csoportokba. Sőt, a rendszerezés segítségével újabb részecskék létezését és tulajdonságaikat is megjósolták. Leghíresebb eset az volt, amikor 9 rokon részecskét már felfedeztek és látszott, ha a rendszerezés helyes, léteznie kell egy tizediknek is. Jó előre pontosan megadták, milyenek a tizedik részecske tulajdonságai. Ez alapján keresték a részecskét és meg is találták. Éppen olyan, amilyenek az előrejelzés megadta.

### 3.2. Erős kölcsönhatás

Az erős kölcsönhatás kvantumtérelméletének kidolgozásához a kvantumelektrodinamikában használt módszer szolgált útmutatóul. Az alapvető erős erők a kvarkok között hatnak, ezek nagysága a kvarkok 'erős' töltésével arányos. Ugyanis a kvarkoknak nemcsak elektromos töltése, hanem erős töltése is van, amit színtöltésnek szokás nevezni. A kvarkok erős kölcsönhatásait leíró kvantumtérelmélet a kvantumszíndinamika.

Eredetileg a színtöltés létét azért tételezték fel, mert a Pauli-elv sérülni látszott. Ugyanis olyan barionokat fedeztek fel, amelyek mindhárom kvarkja azonos és mindhárom ugyanabban az állapotban van. Mivel a kvarkok fermionok, ezt a Pauli-elv tiltja. Ezért arra gondoltak, hogy a kvarkoknak van egy addig még ismeretlen jellemzője, amelyben különbözhetnek, miközben ennek az értéke az őket alkotó barionra nulla. A fénytáncban is három alapszín keveréke adja ki a színtelen fényt, ez a párhuzam adta az ötletet, hogy az erős töltést színes töltésnek nevezzék. Feltételezték, hogy a barionokban, így protonban illetve neutronban három, egymástól különböző, pirosnak (P), sárgának (S) és kéknek (K) nevezett színtöltésű kvark fordul elő. Így a barionok ill. a proton és a neutron egészének színes töltése nulla, lásd a 13. ábrát. Ezért a színtöltésnek megfelelő erő a barionok és a nukleonok (proton és neutron) között nem lép fel.

Mint ahogyan az elektromosan töltött elektronokkal kapcsolatos kölcsönhatások alakja a szabadon mozgó elektronokra felírt Dirac-egyenlet egy szimmetriájából származtatható, a kvarkok közötti erős kölcsönhatást leíró egyenletrendszer a szabadon mozgó, színtöltött kvarkokra felírt Dirac-egyenlet egy hasonló szimmetriáját megkövetelve kapható meg. Hasonlóan a Coulomb erőhöz, két azonos színtöltés között fellépő erő a színtöltések szorzatával arányos, azonos színtöltések között taszító, különböző színtöltések esetén pedig vonzó. A leptonoknak nincs színtöltése, így köztük ilyen erők nem hatnak. Sokkal erősebb a színes erő, mint az ugyanazon kvarkok között fellépő, elektromos töltésüknek megfelelő Coulomb erő. Szemben az egyfajta elektromos töltéssel, amin a pozitív töltést és ellentétét, a negatív töltést értjük, háromféle színes töltés létezik.



13. ábra. Protonban illetve neutronban három, egymástól különböző színtöltésű kvark fordul elő, ezért a proton és a neutron színtelen

A kvarkok közötti színes kölcsönhatást a tömeg nélküli, gluonnak nevezett részecske közvetíti. A gluon a fotonhoz hasonló nulla tömegű bozon. Mivel a gluonok is színesek, az erős kölcsönhatás a kvarkok színét

is változtathatja. A két nemazonos színű kvark közötti vonzóerő távolságuk növekedésével növekszik, mintha rugók tartanák őket össze. Mennél jobban feszítjük a rugót, annál erősebb a visszahúzó erő, ezért nem láthatunk szabad kvarkot. Ha egy kvark a nagyenergiájú ütközésben kapott igen nagy lendület és energia hatására távolodni kezd, a közöttük lévő térségben két újabb kvark, egy kvark és egy ellenkvark képződik és végül mezonok és barionok sokasága keletkezik.

A protonok és neutronok között fellépő magerők nem alapvető erők, a semleges atomok között ható Van der Waals erőkhöz, lásd a 1.1. fejezetben, hasonlítanak. Csak akkor kezdenek hatni, ha két proton, proton és neutron vagy két neutron annyira közel kerül egymáshoz, hogy összetevő kvarkjaik érzékelhetik a szomszéd proton vagy neutron kvarkjainak térbeli eloszlását. Emiatt a magerő a kvarkok között ható, gluonok közvetítette erőkből származtatható le.

**Atommagok kötési energiája.** Mivel a magerők gyakorlatilag csak a közvetlenül szomszédos protonokra és neutronokra hatnak, emiatt az az atommag válik kötöttebbé, amelyekben több nukleon ( nukleonnak a protont és a neutront nevezzük) van szomszédokkal körülvéve. A mag felületén lévő nukleonok, mivel kevesebb szomszédjuk van, kevésbé kötöttek. Minél nehezebb az atommag, mivel bennük a felületen lévő nukleonok számaránya annál kisebb lesz. Bár ez a nagyobb tömegszámú atommag kötöttebbé tenné, de az atommag valamennyi protonja taszítja egymást. A protonok és neutronok igen erős, ám rövid hatótávú vonzása és az annál jóval gyengébb, viszont valamennyi proton között fellépő taszítás együttesen azt eredményezi, hogy a vasig egyre kötöttebbé válnak az atommagok. Utána viszont a kötöttség egyre csökken és a nehezebb atommagok egyre bomlékonyabbá válnak. Emiatt az uránnál magasabb rendszámú elemek a természetben már nem fordulnak elő.

**Atommagok átalakulására vezető ütközések .** Két atommag egymással való ütközése akkor vezethet az atommagok szerkezetének megváltozására, ha egymás felé repülve szembetalálkoznak, vagy legalábbis a magerők hatósugarán belül repülnek el egymás mellett. Ennélfogva az ütközésük valószínűsége a találkozáskor az atommagerők sugarával megnövelt felületük nagyságával arányos. Felületegységben szokás megadni és hatáskeresztmetszetnek nevezik. Az atommagok által lefedett felületek nagysága csak részben határozza meg a hatáskeresztmetszetet. Tekintetbe kell venni az atommagok hullámtermészetét is, amely megnöveli az atommag által mutatott felületet. Az atommagok mozgásához rendelhető hullámhossz a mozgás sebességével fordítottan arányos, lásd a 2.1. fejezetben. Ezért az ütközés hatáskeresztmetszete az ütközési energia növekedésével csökken. Továbbá az atommagok ütközési hatáskeresztmetszete bizonyos energiáknál rezonanciaszerűen megnőhet. A rezonanciák szélessége annál kisebb és rezonancia annál ritkábban fordul elő, minél kisebb az ütközés energiája.

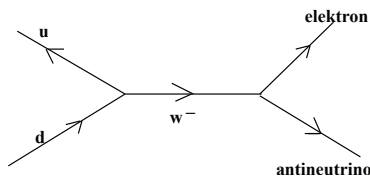
### 3.3. Elektrogyenge kölcsönhatás

A legismertebb gyenge kölcsönhatás által vezérelt folyamat az atommagok béta bomlása. Miközben az atommag neutronja protonná bomlik, elektron és ellenneutrínó keletkezik. Hasonlóképpen, az atommag belsejében a proton neutronná alakulhat át, miközben pozitron és neutrínó keletkezik. Azaz a béta bomlás során a proton vagy neutron egy kvarkja egy másik kvarkká alakul át, hiszen a proton és a neutron csak egyetlen kvarkban különbözik. Feltételezték, hogy a gyenge kölcsönhatást is valamilyen kvantumtérelmélet, lásd a 2.4. fejezetben, írja le. Mivel a folyamat a proton és a neutron belsejében zajlik le, ezért a kölcsönhatást közvetítő töltött van-nincs részecskének csak igen rövid távot befutni képesnek, és ennélfogva nagyon nagy tömegűnek kell lennie lásd a 2.4. fejezet végéfele, és a neutronnak protonná való alakulása során elektronra és ellenneutrínóra bomlónak kell lennie.

A gyenge kölcsönhatást leíró kvantumtérelmélet keresése az elektromágnesesség és a gyenge kölcsönhatás egyesített elméletének megfogalmazásához vezetett. Ez nem csak a béta-bomláshoz szükséges  $W^+$ ,  $W^-$  bozonokat, hanem a semleges  $Z^0$ -bozont is megjósolta. Tömegeik igen nagyok, közel százszorosai a



proton tömegének, egyébként a fotonhoz és a gluonhoz hasonló bozonok. A neutron protonná való bomlásának folyamatát a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra. Neutron protonná való bomlásakor a neutron belsejében egy  $d$  kvark  $u$  kvarkká alakul át. Eközben egy van-nincs  $W^-$  bozon keletkezik ami elektronná és ellenneutrínóvá (antineutrínóvá) bomlik.

Mivel az elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéje a tömegnélküli van-nincs foton, nagy fejtörést okozott, honnan ered a  $W^+$ ,  $W^-$  és  $Z^0$  bozonok tömege. Ehhez fel kellett tételezni az ún. Higgs-terek létezését, a Higgs térrel való kölcsönhatással magyarázható nemcsak ezeknek a bozonok tömegének, hanem minden más tömeggel rendelkező elemi részecske tömegének létezése és azok nagysága is. A Higgs-terekhez hasonló tér a mindennapi életben is létezik. Az elektrosztatikus tér is csak akkor vehető észre, ha potenciálkülönbségek vannak. Ha az egész világegyetem 220 voltos potenciálon lenne, senki sem venné észre az elektrosztatikus tér létezését. Hasonló okoknál fogva nem észleljük a Higgs-tereket sem, sőt ezeket nehezebb észre venni, mint az elektromos potenciált, mert a mindennapokban észlelhető tulajdonságai az üresnek tekintett tér tulajdonságainak feleltethetők meg.

A tömeg nélküli részecske, mint a foton, a relativitáselmélet szerint fénysebességgel mozog. Azért nincs a fotonnak tömege, mert a Higgs-terekkel nem hat kölcsön. Feltételezik, hogy a világegyetem fejlődésének legelején valamennyi részecske tömeg nélküli volt. A tömeggel rendelkező részecskék a világegyetem kialakulásának igen kezdeti szakaszában, a Higgs-terekkel kölcsönhatva nyertek tömeget. Úgy képzelhetjük el a tömeg mibenlétét, hogy a Higgs-terekkel való kölcsönhatás tehetetlenné teszi, nehezíti az addig fénysebességgel száguldó elemi részecske mozgását.

Olyanféle a Higgs-tér a részecskék számára, mint halaknak a víz. Képzeljük el, megfigyelhető a halak mozgása (a részecskék tulajdonságai), de nem látható, miben mozog a hal, mert senki sem látja a vizet. Csak azt észleljük, hogy egyik hal gyorsabb, mint a másik. Bár a tudós nem tudja, mi a víz, semmi nem látszik belőle, de biztos abban, hogy víznek léteznie kell, különben nem tudná megmagyarázni, miként mozoghatnak a halak. A víz létének bizonyítékaul a víz mozulásának, fodrozódásának észlelése szolgálhatna. A Higgs-terek "fodrozódását", hasonlóan, mint az elektromágneses térnél a foton, a Higgs-tereknél a tömeggel rendelkező Higgs-részecske felbukkanása jelzi. Ezért a Higgs-részecske felfedezése az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesítéséhez szükséges Higgs-terek létét bizonyítja. Rávilágít arra, hogy az általunk eddig üresnek gondolt tér nem üres, vannak tulajdonságai.

A Higgs-részecskének háromféle változata van, pozitív, negatív és semleges elektromos töltésű egyaránt lehet. Felfedezésüket a CERN LHC (Large Hadron Collider) gyorsítónál 2012 nyarán jelentették be. A Higgs-részecske tömege a proton tömegének közel 133-szorosa.

A nagyenergiájú elektromágneses és gyenge folyamatok igencsak hasonlóak. Ugyan az erőhatást közvetítő részecskék tömege között nagyon nagy a különbség, de amikor a két kölcsönható részecske elég közel kerül egymáshoz, nem számít, mekkora a közvetítő részecske tömege, mert a kölcsönhatás így is, úgy is lezajlik. Ezért ha a két kölcsönható részecske távolsága  $10^{-16}$  centiméternél kisebb, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatási folyamatok egyformákká válnak. Van-nincs fotonok, valamint a gyenge kölcsönhatást közvetítő nagy tömegű van-nincs  $Z^0$  bozonok egyforma könnyedséggel keletkeznek és cserélődnek. Ilyenkor az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás helyett elég csak az elektrogyenge kölcsönhatást tárgyalni. Ez a kölcsönhatás csak igen magas hőmérsékleteken, nagyon nagy energiákon, a világegyetem fejlődésének egy igen korai szakaszán belül fontos, amikor az igen nagy sebességgel mozgó kvarkok még gyakrabban kerülhettek  $10^{-16}$  centiméternyi vagy ennél is kisebb távolságra egymástól.



### 3.4. Nagy egyesített elméletek

A nagy egyesített elméletek kiindulópontja az, hogy az elektroyenge valamint a kvantumszindinamikai elméletek szerkezete igen hasonló. Lehetséges olyan modellt készíteni, amelyben az elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatási folyamatok egyetlen alapvető kölcsönhatásként jelennek meg. Ez a leírás a kvarkot és a leptont egyetlen részecske két különböző változataként fogja fel és új jelenséget, a kvark-lepton átmenetek létezését is megjósolja. Két kvark kölcsönhatásának eredményeképpen egy lepton és egy ellenkvark is keletkezhet. A kölcsönhatás közvetítője az ún. X-részecske, tömege a proton tömegének kb.  $10^{16}$ -szorososa. A keletkezett ellenkvark a megmaradt kvarkkal mezonná egyesül, és így végül a proton leptonra és mezonra bomlik el. Ha ez a fajta kölcsönhatás létezik, akkor a proton sem örök, el fog bomlani. Az egyesített elmélet mindennek leírásához két további, a Higgs-térhez hasonló tér létezését tételezi fel.

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

Mindeddig ugyan nem sikerült megfigyelni proton bomlását, de ez még nem bizonyítja, hogy a nagy egyesített elmélet alapfeltevése hibás lenne. Lehetséges, hogy a proton bomolhat, de annyira kicsiny a bomlás valószínűsége, hogy a jelenlegi mérőberendezések alkalmatlanok a kimutatására. A proton bomlásán kívül más, az egyesített elmélet által jósolt eredmény jelenleg még nem ellenőrizhető. Ilyen vizsgálatokhoz a korai, az űsrobbanást követő  $10^{-44} - 10^{-35}$  másodpercben létező,  $10^{-33} - 10^{-25}$  cm átmérőjű világegyetem az egyetlen alkalmas hely. Ezért az egyesített elméletek ellenőrzése a világegyetem kezdeti fejlődését leíró modellekből kapott eredmények és a világegyetem megfigyelhető jellemzőinek összevetésével végezhető el.

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

**Kvantumgravitáció.** Amint tárgyaltuk, a térből nagyon kis időtartamra részecske-ellenrészecske párok pattanhatnak ki és ezek nagyon gyorsan el is tűnnek. Keletkezésüket a kisvilágtan törvényei szabályozzák, megfogalmazásukhoz feltételezik, hogy a téridő rögzített. Ha a kipattanó részecskék létezésének időtartama nagyon kicsiny, a kipattanó részecske tömege roppant nagy lehet. Viszont a kipattanó nagyon nagy tömeg megváltoztatja maga körül a téridő szerkezetét, ezzel megváltozik a téridő görbülete, azaz érvénytelenné válik a rögzített téridőben megfogalmazott kisvilágtan (kvantummechanika). De a nagy tömeg kipattanásakor érvénytelenné válik az általános relativitáselmélet is, amely feltételezi, hogy a téridő görbületét meghatározó tömegek nagysága nagyon rövid időszakokon belül állandó. Ennélfogva nagyon kicsiny időtartamokon és távolságokon belül a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet alapfeltevései kölcsönösen kizárják egymást, alapfogalmaikkal, a térrel és idővel együtt alkalmazhatatlanná válnak. Ezt a jellemző nagyon kis távolságot  $r_p = 1.62 * 10^{-33} \text{ cm}$ -t, melyen belül a tér fogalma bizonytalanná válik Planck-hossznak, a megtételéhez szükséges nagyon kis időt,  $t_p = r_p/c = 5.31 * 10^{-44}$  másodpercet Planck-időnek nevezik.

Az ilyen nagyon rövid időtartamok és kicsiny távolságok, a Planck-idő és Planck-hossz tartományában új fogalmak bevezetésére, törvényszerűségek felismerésére volna szükség, amelyekkel egyesíteni lehetne a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet nyújtotta leírásokat. Az ilyen egyesített elméletet kvantumgravitációnak nevezik. Eddig még nem dolgoztak ki megbízhatóan ellenőrizhető kvantumgravitációs elméletet. Nélküle csak a Planck-idő után lehet szilárdabb alapokon nyugvó leírásunk arról, mi történhetett kezdetben.

## 4. Világegyetemünk fejlődésének hajtóereje

Newton törvényei szerint minden előre meg van határozva, nincs véletlen, azaz a világ gépezetként viselkedik. De a Newton erő- és mozgástana csak az érzékelhető méretek világára igaz, a kisvilágtan szerint a jövő nincs pontosan meghatározva, lásd a 2.3. fejezetben, a törvények csak a valószínűségeket rögzítik. Nemrég mutatták ki, hogy valamennyi esemény mögött, beleértve a korábban meghatározottnak vélteteket is, kisvilági véletlenek állnak. Hatásuk előbb-utóbb megnyilvánul. Azaz nincs a világban eleve döntött, lejátszott dolog.

Ugyan a jövő nincs rögzítve, de a természeti jelenségek sokfélesége nem véletlen. Hasonlóképpen a jelenségek összetettségét sem a véletlenszerűség alakítja. Kezdjük megérteni, hogy mindenütt jelenlévő, egységes alapon nyugvó törvény és szabályszerűség áll nemcsak a természetben (fizika), hanem az élettudományok és az emberi viselkedés, valamint a gazdaság és a társadalom jelenségei mögött egyaránt.

Nézzük meg, mit mond a természet a magukat szervezni, fenntartani képes összetett rendszerekről. Először ismerkedjünk meg a sok elemből álló rendszerek leírásának néhány általános fogalmával.

**Arányos rendszer.** Az egyik legegyszerűbb sokelemű rendszer az egyközpontú, melynek elemei csak a központtal hatnak kölcsön. Ha a központ és valamelyik pont kölcsönhatása csupán a távolságuktól függ, akkor a rendszer arányos vagy lineáris. A viselkedését leíró egyenletek az arányos viselkedés miatt csak elsőfokú tagokat tartalmaznak. Ekkor a kezdeti kis változás a rendszer jövőjére arányosan hat, kétszer akkora változás kétszeres hatásnak, feleakkora változás feleakkora hatásnak felel meg. Emiatt az arányos, más néven lineáris rendszer jövője megbízhatóan számolható. Pontosabban ismerve a kezdőértékeket, tetszőlegesen hosszú időre előre meg tudjuk adni a jövődöbéli pályát.

Arányos rendszerben két különböző ok együttes hatása egyszerűen annak a két hatásnak az összegződése, amelyeket a két ok külön-külön hozna létre. Ezért a rendszer részeinek összege. Bármennyire bonyolultnak látszana is, megérthető az egymás mellett, egymás zavarása nélkül létező elemek összegeként. Tetszés szerint szétszedhetjük, összerakhatjuk, ezzel semmi nem vész el és új sem keletkezik, ez igen megkönnyíti leírását. Arányosan csak a nyugalomban lévő, változatlan, a legalacsonyabb energiájú állapotában található egyensúlyi rendszer, így az alapállapotú atommag, atom vagy kristály viselkedik. Nem történhet benne az állapotának változására vezető folyamat, alkotórészei közötti ütközés. Ugyanis az ütközéskor lezajló energiacsere során a rendszer egyik részecskéje magasabb, a másik pedig alacsonyabb energiájú állapotba kerülne. Mivel az alapállapotú, nyugalmi rendszerben nincs alacsonyabb energiájú, betöltetlen állapot, nem ütközhetnek egymással.

**Nemarányos rendszer és kaotikus viselkedés.** Az alapállapotnál magasabb energiájú rendszer már nem viselkedik arányosan, nemarányos vagy nemlineáris rendszerré válik. Minél nagyobb az energiája, annál többféle ütközés, folyamat válik lehetségessé.

A nemarányos rendszer viselkedése az elemek  $N$  és az elemek között lehetséges kölcsönhatások, kapcsolatok  $K$  számának viszonya alapján osztályozható. Ha a rendszer energiája magasabb, akkor  $K$  is nagyobb lesz. Ha  $N \gg K$ , akkor az elemek közötti kapcsolatok száma a elemek számához képest nagyon kicsi, ebben az esetben a rendszer viselkedése az arányoshoz, nyugalmihoz közeli.  $K$  növekedésével a rendszert olyan új, az elemek egyenkénti vagy kisebb csoportokban való viselkedéséből nem következő tulajdonságok kezdik jellemezni. A rendszer még csaknem egyensúlyi vagy egyensúlyhoz közeli állapotú, de már a káosz peremén van.  $K$   $N$ -hez közeli értékeinél a rendszer annyira összefonódottá válik, hogy valamennyi valahol bekövetkező változás végigsöpör a rendszeren, amely ezzel egyensúlytalan, kaotikus állapotba kerül. Az eléggé nagy energiájú, kaotikussá váló rendszer annyira sokféle módon fejlődhet hogy egyre nehezebbé, majd gyakorlatilag, sőt bizonyos állapotokban már elvileg is lehetetlenné válik a rendszer jövőnek kiszámítása.

**A folyamatok iránya.** Vannak szigorúan érvényes természettörvények, ilyen az energia megmaradása, valamint más megmaradási tételek és csak olyan folyamatok játszódhatnak le, olyan rendszerek létezhetnek, amelyekre ezek teljesülnek. De hogy az alaptörvények által megengedett folyamatok közül ténylegesen melyek mehetnek végbe és milyen rendszerek jöhetnek létre, a hőtan főtételei szabályozzák.

A hőtan 2. főtétele szerint, ahogy múlik az idő, a különböző helyek között fennálló hőmérsékleti, nyomásbeli, feszültségbeli, kémiai potenciálbeli és más hasonló különbségeknek csökkenniük kell, egészen a teljes kiegyenlítődésig. Ezek egyúttal a megfelelő helyzeti energiák különbségeinek felelnek meg, kiegyenlítődésük alkalmával munka végződik. Például valahol a részecskék gyorsabbak, így magasabb a hőmérséklet, mint egy másik térségben. Ekkor a magasabb hőmérsékletű térségből áramlás indul az alacsonyabb hőmérsékletű térség felé, eközben munka végződik. Magától sohasem történhet meg az, hogy miközben a rendszer teljes energiája megmarad, a hidegebb hely még jobban lehűl, miközben ahol melegebb van, ott még magasabbra emelkedik a hőmérséklet. A különbségek növeléséhez, mivel ez egyúttal a helyzeti energiák közötti különbségeit is növeli, munkát kell végezni. Nemcsak a különbségek növeléséhez, hanem a fenntartásához is munkát kell végezni, ezért kapcsol be a hűtőszekrény olyankor is, ha nem akarjuk csökkenteni a belső tér hőmérsékletét.

Amikor a helyzeti energiák különbségei kiegyenlítődnek, ott munka végződik és a rendszer teljes energiájának munkavégzésre alkalmas részaránya csökken. Mindezt a hőtan 2. főtétele úgy fogalmazza meg, hogy egy folyamat csak akkor mehet végbe, ha közben a munkavégzésre alkalmatlan energia részaránya, amit entrópiának neveznek, nő. Amikor a 19. század közepén a 2. főtételt megfogalmazták, hallgatólagosan a különbségek rendszertelen, mindenhol közel ugyanúgy zajló kiegyenlítődését tételezték fel. Ez egy idő után valamennyi áramlás megszűnését, eseménytelenséget, szemléletes képpel a hóhalál állapotának beállását jelenti.

A rendszertelenül zajló kiegyenlítődés helyett az a folyamat lesz a legvalószínűbb, amely az adott időpillanatban a legtöbb munkavégzéssel jár. Ezt az elvet a legnagyobb teljesítmény elvének is nevezik és gyakran a hőtan 4. főtételeként említik. A legtöbb munka az építéshez kell, de ekkor a befektetett munka energia különbségekben gazdag képződményt hoz létre. Fenntartásához, mivel a benne lévő különbségek igyekeznek kiegyenlítődni, újabb munkavégzés szükséges. Ahhoz pedig még több munkavégzés szükséges, hogy közben tovább is fejlődjön. Emiatt a hőtan főtételei serkentik az összetettebbé fejlődő, energiában gazdag, energiatároló rendszerek szerveződését, növekedését és szaporodását. Így a világegyetem rendszerei fejlődnek. Éppen azért jöhetnek, jönnek létre, hogy minél gyorsabban, minél több munkavégzésre alkalmas energia használódhasson el. Hogy minél több energiát és anyagot vehessen fel, a fejlődő rendszerek szerkezetét az anyag és energia minél gyorsabb áramlását lehetővé tevő körfolyamatok kialakulása, és ezek összekapcsolódása jellemzi.

A fejlődő rendszer működése emészti környezetét, mert elragadja annak munkavégzésre alkalmas energiáit. Akkor lehet sikeres, ha maradéktalanul ki tudja használni a környezet erőforrásait, de úgy, hogy a közben máshonnan energiát felvevő környezet meg tud újulni. Ez nem azt jelenti, hogy az idő teltével egyre több munka végződik, azaz a rendszer fejlődése folyamatos, mivel a pillanatnyilag lehető legtöbb energiát szétszóró, 'legmeredekebbnek' tekinthető út folyamatos követése 'szakadékokba' vezethet. Ide kerülve jóval kevesebb lesz a felhasználható erőforrás. Ha a fejlődő, egyre összetettebbé váló rendszer környezetének erőforrásai kimerülőben vannak, kezd leépülni, mivel attól fogva a legtöbb munka végződéséhez a rendszeren belüli különbségek is kezdenek leépülni. A bomlásakor felszabaduló munkavégzés a lebontását végző rendszerek fejlődésére fordítódik. A világegyetemben lévő különbségek nem véletlenszerűen, hanem inkább a magasabb szintre szerveződő rendszerek képződése, majd pusztulása során tűnnek el. Ez utóbbi a gyorsabb.

**Pillangó hatás.** A káosz a kezdeti állapotot jellemző adatok bizonyos tartományában, tartományaiban meghatározó jelentőségű. Ezt szemlélteti a nevezetes példa, a pillangó hatás. Mint ismeretes, az északi féltekén az uralkodó szél nyugatról kelet felé fúj. A kaotikus viselkedés miatt a Peking felett repkedő pillangó

szárnycsapásainak hatása annyira felerősödhet, hogy két-három hét múlva az USA nyugati partjainak bizonyos térségét sújtó forgószelel fejlődik ki. Nyilván nem a pillangó szárnycsapásai felelősek a forgószelelért, hanem az, hogy amikor a légkör és felszín hőmérséklete között lévő különbség elég nagy, a forgószeles kiegyenlítődés gyorsabb, mint az örvénylés nélküli széllel történő. De hogy éppen hol okozza a forgószelel a legtöbb kárt, egy kisebb települést tarol-e le, vagy néhány mérfölddel odébb haladva egy ültetvényen pusztít, az már a káosz megnyilvánulása.

## 5. Kezdetek

Kopernikusz óta tudhatjuk, a Föld nem tekinthető a Mindenség középpontjának. Sokkal könnyebben leírhatjuk és megérthetjük a bolygók mozgását, ha feltételezzük, hogy a Nap tartja őket maga körül pályájukon. Mivel a tömegvonzás egyetemes, valamennyi tömeg között fellépő, ható erő, minden egyes tömeg vonz minden más tömeget. Newton elgondolkodott azon, miképpen érthető meg az, hogy az égbolt csillagai a Naphoz és egymáshoz képest mozdulatlanak látszanak, azaz a Mindenség állandó állapotú. Ugyanis a csillagászok az ókori megfigyelésektől fogva ilyennek látták az csillagos eget. (Most csak zárójelben jegyezzük meg, csupán 1929 óta tudjuk, hogy a világegyetem nem állandó állapotú.)

Ugyan a tömegvonzás valamennyi csillag között fellép, a newtoni érvelés szerint azért nem közelednek egymás felé a csillagok, mert valamennyi csillag mindenfelől nagyjából ugyanakkora vonzást érez, azaz egy adott csillagot szomszédos csillagai ugyanakkora erővel húzzák minden egyes irányba. Ez csak akkor lehetséges, ha az eget mindenhol, minden irányban egyenletesen töltik ki a csillagok. Ez meglehetősen súlyos következménnyel jár. Ha a fenti érvelés igaz, a csillagokkal egyenletesen kitöltött égboltnak a térben minden irányban végtelennek kell lennie. Sehol sem lehet széle, mert akkor a peremen lévő csillagokra csak befelé húzó erők hatnának és emiatt befelé kezdenének mozogni. Előbb vagy utóbb a tömegvonzás valamennyi csillagot mozgásba jönné és egy idő után az összes csillag a világegyetem tömegközéppontjába zuhanna. Newton feltevése, a végtelen és állandó állapotú világmindenség hosszú évszázadokra a csillagászati tudás alaptételévé vált.

**Végtelen Mindenség és Olbers paradoxona.** Ha a Mindenség térben és időben végtelen, és a benne a csillagok eloszlása egyenletes, akkor az éjszakai égbolt máshogyan nézne ki, mint amilyenek látjuk. Képzeljük el, a rengeteg erdőben vagyunk. Bárhová nézünk, csak fát látunk. De ha egy kisebb erdőben nézünk körbe, akkor a fák között itt-ott kiláthatnánk az erdőből, azaz tudnánk, hogy az erdő véges. Olbers paradoxona erről szól. Sehol sem lehetne fekete az éjszakai égbolt. Bármerre is néznénk, valahol messze, pont arrafelé is kellene lenni csillagnak. Olbers paradoxona úgy oldható fel, ha feltételezzük, a világegyetem térben véges, ezért az égboltot csak részben "fedik" le a csillagok vagy hogy a csillagok sem élnek örökké, hanem keletkeznek és egy idő után kihúnynak. Csak azokat látjuk, amelyek fénye eljuthat hozzánk.

Ma már tudjuk, hogy a világegyetem csak egy véges térrészéből juthat el hozzánk a csillagok fénye, azaz a világegyetemnek is van egyfajta látóhatára. Továbbá a csillagok élete is véges, nem világíthatnak örökké. Ez utóbbi jó példa arra a nagyon általános elvre, hogy az örök világegyetem és a benne folyamatosan létező, megfordíthatatlan természeti folyamatok nem férnek össze. Egy örök világegyetemben a csillagok már végtelen idővel ezelőtt kialakultak és kiegészítettek volna. De világegyetemünk bővelkedik megfordíthatatlan folyamatokban, az egy egyszer felhúzott, lassan lejáráó órára hasonlít. Azaz volt kezdete.

Egészen a 20. század elejéig feltételezték, hogy a világegyetem a Tejútrendszerrel azonos és a Naprendszer a Tejútrendszer központja. De a nagyobb távcsövekkel végzett megfigyelések egyre pontosabb eredményekre vezettek. Kiderült, hogy a Nap nincs a Tejútrendszer közepén. Amíg az égi távolságok mérése nem volt elég pontos, nem tudták eldönteni, hogy az egyes csillagködök a Tejútrendszerhez tartoznak-e vagy sem.

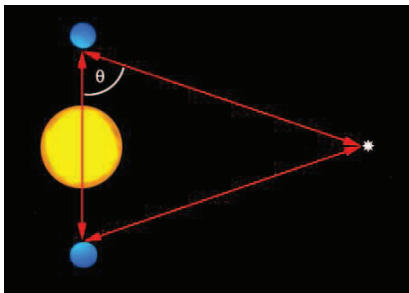
## 5.1. Égi távolságok mérése

Viszonyításokon alapul az égi távolságok mérése, ennek során az azonos fényességű csillagokat megfigyelve meg tudjuk mondani, hogy egymáshoz képest mennyire távol vannak. De a pontos távolságok megadásához néhány égitest távolságát igen pontosan ismernünk kell.

**Fényesség és távolság.** Az égi távolságok becslése a csillagok egymáshoz képesti fényességének meghatározásán alapul. Minél messzebb van tőlünk egy világító test, annál halványabbnak látjuk. Látszólagos fényessége távolságának négyzetével fordítottan arányos. Gondoljunk arra, hogy teljes sötétségben mint határoznánk meg az égő gyertya távolságát. Kellene egy vele azonos, ám ismert távolságra lévő égő gyertya. Ennek fényét hasonlítjuk össze az ismeretlen távolságra lévő gyertya fényességével. Ha a távolabbi gyertya fényessége a közelebbinek századrésze, akkor a távolabbi gyertya tízszer akkora távolságra van, mint a közelebbi. Ezért ha a test valódi fényességét valahonnan ismerjük, akkor a látszólagos és valódi fényesség arányából a test távolságát pontosan meg tudjuk mondani. Ha valamennyi csillag fényessége azonos lenne, az észlelt fényességükből pontosan meg tudnánk állapítani távolságukat. A viszonyításhoz, a távolságok pontos meghatározásához a közelebbi csillagok távolságát a lehető legnagyobb pontossággal kell megmérnünk

**Távolságmérés égi háromszögekkel.** A háromszögelés a földi térképészet jól ismert módszere. Ha az ismert hosszúságú szakasz két végén megmérjük, mekkora szög alatt látszik tőlük a távoli tárgy, akkor a háromszög három adatából - egy oldal és két szög - meghatározhatjuk az adott tárgy távolságát. Minél nagyobb az ismert távolság és minél kisebb a szögmérés hibája, a távolságmérés annál pontosabb. A Hold távolsága is megmérhető, ha egy adott időpontban két távoli, pár száz kilométerre lévő megfigyelő egyszerre méri meg, milyen szög alatt látja a Hold közepét. Ha bolygó távolságát akarjuk meghatározni, akkor, mivel a bolygók jóval messzebb vannak, mint a Hold, a két megfigyelőnek különböző földrészekről kell ugyanabban az időpontban a bolygó szögállását megmérni. A Mars távolságát 1671-ben határozták meg. Egy megbeszélte nap éjszakai időpontjában a két megfigyelési pont Párizsban és a dél-amerikai Francia-Guyana területén volt.

Már a közelebbi csillagok is nagyon messze vannak a háromszögeléses módszer számára. Most az ismert távolság a Föld Nap körüli pályájának átmérője. Adott csillag távolsága úgy határozható meg, hogy hathavonta megfigyeljük az égbolton való látszólagos elmozdulását. Máshol látjuk a Naphoz képest állandó helyzetű csillagot, mert a Föld keringése miatt máshonnan, a Föld pályájának átellenes pontjáról szemléljük. A földpályája átmérőjéből, ami durván 17 fénypercnyi, és a két észlelési szögből a csillag távolsága kiszámítható, lásd az 15. ábrát.



15. ábra. Égi távolságmérés háromszögelés segítségével. Más szög alatt látjuk a csillagot, ha a Föld pályájának átellenes pontjairól nézzük. A földpálya átmérőjéből és a két észlelési szögből a csillag távolsága kiszámítható.

A háromszögeléses módszerrel a 20. század végéig csupán néhány, nagyon közeli csillag távolságát sikerült pontosabban meghatározni. A 20. század végén, a HIPPARCOS műhold felbocsátásával nagyot

javult a helyzet, hiszen a világűrből végzett méréseket a légköri bizonytalanságok nem befolyásolják. Mintegy 100 ezer csillag távolságát mérték meg nagyon nagy pontossággal. Így már a Tejútrendszer csillagai milliomod részének ismerjük a pontos távolságát. Az így megmért csillagtávolságok átlaga kb. 1000 fényév.

**Változócsillagok.** A csillagrendszerek távolsága az ún. változó csillagok megfigyelésével határozható meg, amelyek ütemesen felfúvódó és összehúzódó rendszerek, a be- és kilégzés lüktetéséhez hasonlító csillagrezgéseket végeznek. A Nap is rezeg, csak ez nem feltűnő, mert a vele járó változás kicsinyke. Akkor a legfényesebb a változó csillag, amikor összehúzódott, a leghalványabb, amikor burka a legnagyobbra tágul. Fényességük változásának ütemideje 2 naptól 100 napig terjedhet. Valódi fényességük a Nap fényességének 300 és 26 ezerszerese körül mozog.

Minél fényesebb a változó csillag, annál lassabban változik. Ezt a 20. század elején a Kis Magellán felhőben található nagyszámú változócsillag megfigyelésekor vették észre. Ha a rezgésekre gondolunk, érthető miért. Minél nagyobb egy rezgő test, annál nagyobb a rezgésidő. Mint ahogyan a kutya ugatásából is meg tudjuk állapítani, kiskutya ugat-e vagy nagykutya. A kiskutya magas, nagy rezgésszámú hangon ugat, mert rövid a torka. Mély hangon, kis rezgésszámmal ugat a nagy, mert a torka hosszabb. Így értelmezhető a változó csillag fényessége és rezgésidője közötti összefüggés is. Végeredményben a változó csillag valódi fényessége a rezgésidő mérésével határozható meg. Ezután a csillag valódi és mért fényességének viszonyából a változó csillag és így az őt is tartalmazó csillagváros távolsága kiszámítható. Egészen addig alkalmas a módszer csillagváros távolságának mérésére, amíg a változó csillagai még felismerhetőek.

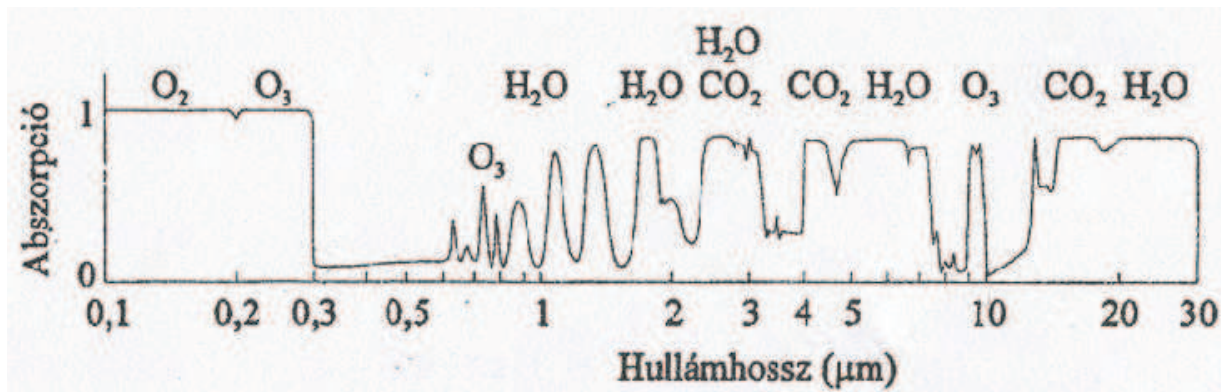
A változó csillag távolságának megadásához az is kell, hogy viszonyítási alapként legyen ismert távolságú, kb. ugyanolyan változó csillagunk. Ennek fényességéhez viszonyítva pontosabb távolságadathoz juthatunk. Ezért - gondoljunk a fenti példánkban a távolság kiszámításához szükséges ismert fényességű és távolságú gyertyára - legalább néhány változó csillag távolságát pontosan kell ismerni. Egészen az 1990-es évekig nagyon kevés ilyen, viszonyításként használható változó csillagot ismertünk. Mára az 1989-ben felbocsátott HIPPARCOS, majd a 2009-ben felbocsátott Kepler műhold számos, tőlünk 1000 fényév távolságon belül lévő változó csillagnak mérte meg a pontos távolságát. Ezeknek köszönhetően az égi távolságok meghatározása ma már szilárdabb alapon nyugszik. 2014-ben a Hubble-űrtávcső segítségével 7,5 ezer fényévre lévő változó csillagok pontos távolságát is sikerült meghatározni és a közeljövőben a 10 ezer fényéven belüli változók pontos távolságát is mérhetővé válik. Várható, hogy ezek segítségével tovább pontosíthatók a világegyetemet jellemző mennyiségek értékei.

**Távolságok becslésekkel.** Távolabbi, 30 millió fényévnél messzebb lévő csillagvárosok változó csillagai mai távcsöveinkkel már nem ismerhetőek fel. Ekkor a csillagváros méretéből és a csillagváros egészének fényességéből következtethetünk távolságukra. Minél kisebbnek látszik a csillagváros átmérője és mennél halványabb a fénye, annál messzebb van tőlünk. Ez a módszer kevésbé megbízható, ugyanis a csillagvárosok mérete és így fényessége is erősebben eltérhet az átlagostól és emiatt az átlagosnál fényesebb csillagváros távolságát kisebbnek, a halványabb távolságát nagyobbak mérjük.

**Távolságmérés Ia szupernóvakkal.** A kilencvenes évtizedben sikerült új, megbízható távolságmérési módszert kidolgozni, amely az ún. Ia (1a) típusú szupernóva megfigyelésén alapul. Később részletesen tárgyaljuk, a szupernóvák csillagrobbanásnak felelnek meg. Ennek során a csillag fényessége időlegesen annyira megnő, hogy az a csillagot tartalmazó csillagváros fényét is elnyomhatja. Csak rövid ideig, néhány hétig tart a felfényesedés. Az Ia szupernóva felfénylési idejének hosszával azonosítható, ez ugyanis a leghosszabb ideig fénylő szupernóva. Ismerve az Ia szupernóva valódi fényességét, a látszólagos és valódi fényesség viszonyából pontosan meg tudjuk mérni a távolságot. Ezzel a módszerrel a 30 millió fényévnél nagyobb távolságra, akár a tízmilliárd fényévre lévő csillagvárosok távolsága is pontosan mérhető.

## 5.2. Színképek

A világegyetemről tudottak forrása a hozzánk érkező sugárzások. Korábban a Mindenséget csak a látható fény tartományában vizsgálhattuk, mivel a Föld légköre a világűrből hozzánk érkező sugárzások igen nagy részét elnyeli.



16. ábra. Bolygónk légkörének sugárzás-elnyelése mint a hullámhossz függvénye. Fel van tüntetve, hogy az adott hullámhosszakat mely gázok molekulái nyelik el. A nagyobb energiájú ibolyántúli sugárzásokat az oxigén és ózon teljesen elnyeli. A látható fény sávja 300-700 nanométer közé esik. Efölött az infravörös tartományban a víz és a széndioxid elnyelő hatása tartja vissza a napsugárzást. Ezek a fő üvegházhatású gázok, lásd később a 7.3. szakaszban.

Bolygónk légköre a látható tartományon kívül alig ereszt át másfajta sugárzást, lásd a 16. ábrát. Emiatt a korábbi mérések csak a látható fény tartományára szorítkozhattak. Manapság a látható tartományt fürkésző Hubble űrtávcsőn kívül a műholdakra telepített műszereinkkel a teljes elektromágneses színképben, a rádióhullámok, mikrohullámok, infravörös, ibolyántúli, röntgen és gamma sugárzás tartományában is gyűjthetünk adatokat. A különböző hullámhossz tartományokban mért adathalmazokat egységes szempontok alapján rendszerezik. Így az azonos égi térségekre más-más hullámhosszakon mért adatok könnyen hozzáférhetővé válnak, nem kell őket különböző adatbázisban keresgélni.

**Csillagok színképe.** Nem pusztán a csillag fényességét, hanem a csillagból kibocsátott fény összetételét, a csillag színképét is tanulmányozhatjuk. Mint a 1.2. részben tárgyaltuk, minél magasabb a test hőmérséklete, annál nagyobb energiákon, azaz magasabb rezgésszámokon sugároz. A csillag színét az határozza meg, mely színtartományban sugároz a legerősebben. Sárga fényű Napunk felszíni hőmérséklete közel 5780 Kelvin, a hidegebben sugárzó csillagok vörösnek, a melegebb csillagok fehérnek vagy kéknek látszanak.

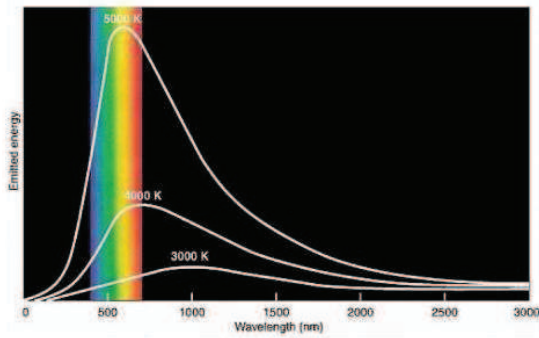
A csillag által másodpercenként kisugárzott összenergia arányos a csillag tömegével.

**Vonalkódszerű mintázat színképekben.** Ha behatóbban vizsgáljuk a csillag színképét, a hőmérsékleti sugárzásnak megfelelő folytonos eloszlásban fekete vonalak sokasága látszik. Mintázatuk jellege vonalkódéhoz hasonló.

A csillag plazma állapotú felszínéről kibocsátott fény folytonos színképű, de a csillag külső burkát alkotó gázok már atomos és molekuláris állapotúak és bizonyos hullámhosszakon elnyelik a csillag felszínéről érkező fény fotonjait, lásd a 2.3. pontban az atomszerkezettel foglalkozó szakaszt. Helyükön fekete vonalakat látunk.

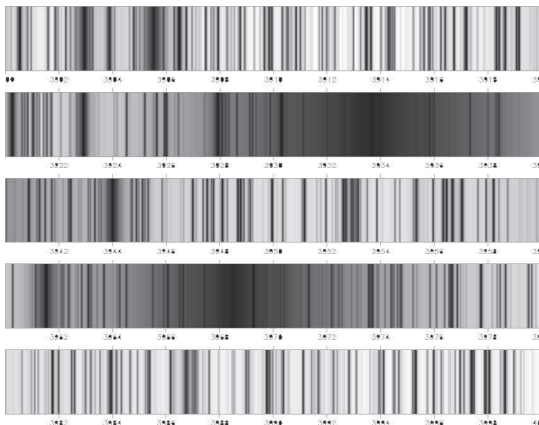
Minden egyes atomban és molekulában nagyszámú elektronpálya van és az elektronpályák energiái és a megfelelő színképvonalak energiái mindenhol mások. A színképvonal energiája az atomi vagy molekula állapotok közötti energiakülönbségnek felel meg, az atom vagy molekula csak az ennek megfelelő energiájú fotont nyelheti el. Egy-egy atom vagy molekula színképében nagyon sok fekete vonalat észlelünk. Mivel





17. ábra. A 3000 Kelvin, 4000 Kelvin és 5000 Kelvin hőmérsékletű testek sugárzásának színeképei. A vízszintes tengelyen a nanométerben mért hullámhosszak, a függőleges tengelyen az adott hullámhosszon kisugárzott energia van felmérve. 500 nanométer környékén a látható fény tartománya van feltüntetve. Ha színes az ábra, itt láthatjuk a szivárvány színeit.

a színeképet jellemző vonalas mintázat az atomra és molekulára jellemző, a csillag színeképekének vonalas mintázatát elemezve tanulmányozhatjuk a csillag összetételét.



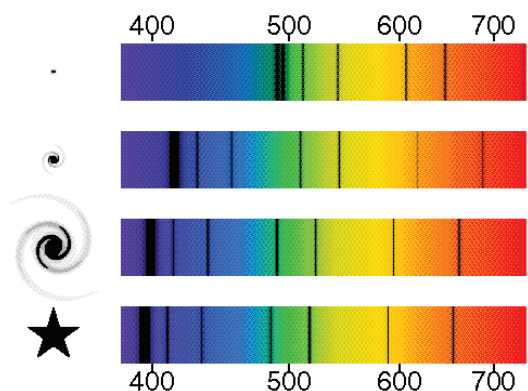
18. ábra. Napunk színeképe a 3900-4000 Angström közötti hullámhosszak tartományában.

Először a Nap színeképét tanulmányozták alaposabban, egy kis részletét lásd a 18. ábrán. Majd a Nap színeképét a csillagok színeképekével összehasonlítva megállapították, hogy a Napban és a csillagokban ugyanazok az elemek találhatóak. A csillagok anyaga túlnyomórészt hidrogén és hélium. Ráadásul az egyes elemekre és molekulákra vonatkozó színeképvonalak viszonylagos erősségéből azt is meg lehet állapítani, hogy a csillag felszínén található gázok milyen arányban vannak jelen.

**Színeképvonalak eltolódása.** Ha a hullámforrás mozog, a megfigyelőtől távolodik, vagy ahhoz közeledik, akkor az általa sugárzott fény hullámhossza a megfigyelő számára más lesz, azaz a színeképben máshol látja a színeképvonalakat. Ha a fényforrás távolodik, a hullámhossz megnyúlik, azaz a színeképvonalak hullámhossza növekszik, a sötét vonal a vörös szín felé tolódik el. Ha a fényforrás közeledik, akkor a színeképvonalak hullámhossza csökken, a kék felé csúsznak. Úgy mondjuk, hogy ha a csillag felénk tart, kékeltozódást, ha távolodik, vöröseltozódást észlelünk.

A színeképvonalak eltolódásának nagyságából kiszámolható, hogy a fényforrás mekkora sebességgel mozog, azaz meg tudjuk határozni a csillag távolodásának a sebességét. Ha a csillagváros forog, a forgás közben felénk mozgó részét kékebbnek, a tőlünk távolodó részét vörösebbnek látjuk. Ebből a csillagváros forgásának sebessége is meghatározható. Kettős csillagok esetén - ahol két csillag egymás körül kering - a két csillag színeképvonalainak eltolódásából a keringési sebességet határozhatjuk meg. Ez utóbbi adatból meg tudjuk állapítani a kettős csillagot alkotó két csillag tömegének arányát.

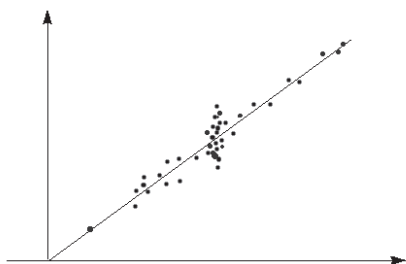




19. ábra. Nátrium színképvonalainak helyzete a 400-700 mikron közötti tartományban a Nap, lásd legalul, és különböző sebességű, egyre messzebb lévő, ezért kisebbnek látszó csillagvárosok színképében. Bár a Nap és a csillagvárosok anyaga túlnyomórészt hidrogénből és héliumból áll, van bennük kevés nátrium is. Annál kisebbnek látszik a csillagváros, minél messzebb van. Látható, minél messzebb van, annál jelentősebb a nagyobb hullámhosszak, azaz a vörös felé való eltolódás. A színképvonal eltolódásából a csillagvárosok távolodási sebessége kiszámítható.

### 5.3. Ősrobbanás

Edwin Hubble 1923-1924-es megfigyelései minden kétséget kizáróan megerősítették, hogy a korábban megfigyelt, a Tejútrendszer részeinek tartott csillagködök nagy többsége nem a Tejútrendszerben van, hanem különálló csillagvárost (galaxist) alkot. Anyagösszetételük, távolságuk, méretük és fényességük szerint osztályozta őket. 1929-re Hubble pontosabb mérései igazolták, hogy néhány közelebbi kivételével a csillagvárosok színképe vöröseltolódást mutatnak, azaz távolodnak tőlünk. Csillagvárosonként más és más lehet a vöröseltolódás mértéke. Minél halványabb a fényessége, azaz minél távolabb van a csillagváros, annál vörösebbnek látszik, azaz annál inkább a vörös felé tolódnak el a színképvonalai, lásd a 19. ábrát. Hubble törvénye szerint a csillagvárosok távolodásának  $v$  sebessége a tőlünk való  $r$  távolsággal egyenesen arányos,  $v = Hr$ , ahol  $H$  a Hubble-állandó, lásd az 20. ábrán. Ez azt jelenti, hogy a világegyetem tágul.



20. ábra. A Hubble-törvény: a csillagvárosok távolodási sebessége távolságukkal arányos. A függőleges tengelyre a sebesség, a vízszintes tengelyre a távolság van felmérve. Az egyes pontok a különböző csillagvárosokra mért értékek, az egyenest a mért pontokhoz illesztve kapták meg.

Nehéz elképzelnünk a Mindenség tágulását. Nincs kiindulópont, azaz nincs olyan rögzített háttér, amelyhez képest a tágulást leírhatnánk. Nem létezik a 'tovább' amibe a világegyetem tágulhatna. Ugyan világunk térfogatának tágulását nem tudjuk elképzelni, de a kétdimenziós eset, a felület hasonló viselkedése segíthet a megértésben. Képzeld magunkat a felfúvódó léggömb felszínére. Ennek felülete tágul, kétkiterjedésű világnak feleltethető meg. Gondoljuk el, a gömb felszínén pöttyök vannak. Minden egyes, a gömb felszínén lévő pötty távolodik tőlünk. Annál nagyobb a távolodási sebesség, minél messzebb van tőlünk a megfigyelt pötty. Bár a szomszédságunkban lévő pöttyök is mind messzebbre kerülnek, de legjobban, legnagyobb sebességgel a léggömb legtávolabbi, átellenes pontján lévő pötty távolodik tőlünk. Hasonlóan, a világegyetem tágulása esetén sem beszélhetünk központról, arról sem, mibe tágul a világegyetem, hol van

a széle. Tágulását a fentihez hasonlóan inkább úgy képzelhetjük el, mintha egy négykiterjedésű gömb háromkiterjedésű felületén lennénk. De a mindennapokhoz idomult elménk ennek elképzelésére nem képes.

Ha a világegyetem tágul, akkor régebben a csillagvárosok közelebb voltak egymáshoz. A *H* Hubble-állandó mért értéke annak felel meg, hogy jelenleg a világtér egymillió fényéves szakaszára kb. 20,8 kilométer/másodperc tágulást mérhetünk. Ebből adódik, hogy a világegyetem életkora  $13,82 \pm 0,037$  milliárd év. Az általános relativitás elméletéből a táguló világegyetemhez szükségszerűen egy kezdeti rendkívül kicsiny, csaknem pontszerűnek vehető állapot tartozik. Ennyiből lett a mai világegyetem, amely azóta is tágul. Ez a kép az ősrobbanás modelljének alapja.

**Maga a tér tágul.** Látható, a világegyetem tágulása összhangban van az általános relativitáselmélet jóslatával, miszerint a világegyetem csak kétféle módon létezhet, vagy tágul, vagy összehúzódik, lásd a 1.4. szakaszban. Világegyetemünk tágul. Nem történt robbanás kezdetben, nem ez az oka a csillagvárosok távolodásának, hanem maga a tér tágul, dagad. Emiatt a térben lévő tárgyak is távolabb kerülnek egymástól, a csillagvárosokat a táguló tér sodorja magával. Világegyetemünk a kelésben lévő mazsolás tésztához is hasonlítható. Miközben a tészta dagad, a mazsolaszemek is távolodnak egymástól. Annál gyorsabban, minél nagyobb közöttük a távolság.

Míg a speciális relativitás elmélete szerint a tömeggel rendelkező tárgyak csak fénysebességnél kisebb sebességgel mozoghatnak, az általános relativitáselmélet szerint a távoli, hozzánk képest fénysebességnél nagyobb sebességű térrészben található csillagvárosok hozzánk viszonyított sebessége nagyobb, mint fénysebesség. Őket már nem láthatjuk, túl vannak a látóhatárunkon, lásd később, ezért a világegyetem csak egy részét tanulmányozhatjuk.

Csak nagy méretekben vehetjük észre a tér tágulását. Ezt az általános relativitás elméletének segítségével a következőképpen érthetjük meg. Einstein egyenletei akkor adják a tágulást megoldásként, ha a világegyetemre egyenletes sűrűségeloszlást tételezünk fel. Ugyan ez nem igaz, de ha a világegyetemet kb. 300 millió fényévnyi élű kockákra osztjuk fel, ebben a léptékben a világegyetem anyageloszlása már valóban egyenletesnek, simának vehető. Kisebb léptékben viszont egyenetlenségek, csomósodások vannak. Nagyobb csomókon belül még kisebb csomósodások találhatóak, mint csillagrendszerek halmazai, csillagrendszerek, csillagok, naprendszerek, bolygók. A csomósodások okozta téridőgörbület, lásd a 1.4. szakaszt, tömegvonzás fellépésére vezet. Ennélfogva az Einstein-egyenletek általános megoldását vizsgálva nagy léptékben a világegyetem tágulása, kis léptéken belül viszont a helyi téridőgörbületnek megfelelő tömegvonzás hatására a csomósodás a meghatározó. Azaz a világegyetem téridőgörbülete nagy méretekben tágulásra, kisebb méretekben tömegvonzásra vezet. A fellépő tömegvonzás lassítja a tágulást.

Az ősrobbanás elmélete nem csupán a csillagvárosok mérhető távolodásán alapul. Ha a világegyetem valaha nagyon kicsiny volt, akkor erre másféle bizonyítékok is utalhatnak. Vannak ilyenek, az ősrobbanás megtörténtét a következő megfigyelések is igazolják.

**Kozmikus háttérsugárzás, életkor, méretek, hőmérséklet.** Ahogyan a 1.2. fejezetben tárgyaltuk, valamennyi test a *T* hőmérsékletének megfelelő színekű hőmérsékleti sugárzást bocsát ki. 1964-ben fedezték fel, hogy nemcsak az égbolt csillagai és más égitestek, hanem maga a világegyetem egésze is bocsát ki hőmérsékleti sugárzást. Ez a mikrohullámú sávban érkezik, színe és a hősugárzás erőssége minden irányból azonos. Kozmikus háttérsugárzásnak nevezik, a színe alapján a világmindenség egésze  $2.72548 \pm 0.00057$  Kelvin hőmérsékletű testként sugároz, a  $\pm 0.00057$  jelölés a meghatározás hibáját adja meg.

Ahogyan a világegyetem tágul, hőmérséklete folyamatosan csökken. A fotonok hullámhossza a tér dagadásával nőtt, ezzel a rezgésszáma és a vele arányos energiája pedig csökkent. Emiatt a sugárzási tér hőmérséklete is alacsonyabb. Ha a világegyetem tágulásával a két pontja közötti távolság kétszeresére nőtt, aközben a világegyetem hőmérséklete felére csökkent. Kezdetben, amikor a mindenség hőmérséklete nagyon magas volt, terét nagyenergiájú, ennek megfelelően igen kicsiny hullámhosszú fotonok töltötték

ki. Mára a világegyetem tágulásával a fotonok hullámhosszai annyira megnyúltak, hogy a háttérsugárzás a 2.72548 Kelvin fokos hőmérsékletre hűlt.

A mai méretekből, a tágulásának mértékét megadó Hubble törvényből és a világegyetem jelenlegi hőmérsékletéből ki tudjuk számolni, hogy korábban milyenek voltak a méretek és mekkora volt a hőmérséklet. A világegyetem mérete, hőmérséklete és életkora egymásból számítható mennyiségek. Mivel a hőmérséklet egyúttal megszabja a részecskék átlagos mozgási sebességét is, ezáltal meghatározható, a világegyetem története során mikor milyen rendszerek léteztek. Mivel a nagy vöröseltolódású csillagrendszerekről érkező fény az akkori, akár több milliárd évvel ezelőtti helyzetről tudósít, megfigyelésükkel a világegyetem múltbéli viszonyait ismerhetjük meg.

Kezdetben a Mindenség pozitív energiájának nagyobb részét a sugárzási tér tartalmazta. Mára, a tágulás mértékének megfelelően a sugárzási tér energiája elhanyagolható a tömegek jelentette  $mc^2$  pozitív energiákhoz képest.

**Anyagösszetétel.** A világűrben érkező sugárzások színképvonalai arról tanúskodnak, hogy a csillagközi anyag és csillagok anyagának fő összetevői a hidrogén és a hélium. Más, nehezebb elem kevés van, ezek, majd tárgyalni fogjuk, csak a csillagok belsejében alakulhatnak ki. Bármerre nézünk is a világmindenségben, a Nap, a csillagok, a csillagközi gázok és a csillagvárosok anyagát tanulmányozva azt kapjuk, hogy az anyag kb. 1/4 része hélium, 3/4 része hidrogén. Héliumot termelő atommagfolyamatok csak nagyon magas, millió fokos hőmérsékleteken indulhatnak be. Ezért ilyen magfolyamatok ma csak a csillagok belsejében játszódhatnak le. Emiatt a mindenfelé azonosnak mérhető tömegarány a legegyszerűbben úgy magyarázható, hogy valaha a teljes világegyetem a maga egészében igen magas hőmérsékletű volt és a forró, kis térfogatú világegyetemben a hélium kialakulás azonos feltételek mellett, egy időben zajlott.

Az égitestek életkora a bennük előforduló radioaktív elemek, elsősorban az  $U^{238}$  segítségével határozható meg. Innen tudjuk, hogy a legöregebb csillagok kora 13,4 milliárd év lehet, ami összhangban van azzal, hogy világegyetemünk kora 13,82 milliárd év.

Az ősrobbanás elmélete a mai asztrofizika, asztronómia alapmodellje. A kutatók túlnyomó többsége ebben az alaprendszerben fogalmazza meg kérdéseit, ezen belül értelmezi a kísérletek eredményeit. Manapság a Hubble űrtávcső és a többi, műholdra telepített mérőberendezés segítségével egyre pontosabb adatokhoz juthatunk. Ezek megerősítik az ősrobbanás elméletének hitelét, amely alapvető tudásunk részévé vált.

## 5.4. A világegyetem jövője

Felmerül az a kérdés, meddig folytatódik a tágulás. Ugyanis a tömegvonzás fékezi csökkenti annak sebességét. Ha a tágulás sebessége fékeződik, elképzelhető, hogy a lassító erő hatására a tágulás sebessége egy idő után nullára csökken. Ekkor viszont a folyamat megfordul és megindul az összehúzódás. Ennek során a Mindenség a tömegvonzás hatására összeroppan, annyira, hogy a gyorsuló zsugorodás végeredményeként egy pontba zuhan.

Attól függ a lassító erő, a tömegvonzás nagysága, hogy mennyi tömeg van a világegyetemben. Ismerve a tágulás sebességét, ki tudjuk számolni, milyen nagynak kellene lennie a világegyetemben lévő tömegeknek, hogy vonzó hatásuk még éppen ne állítsa le a tágulást. A világegyetem ilyen módon számolt össztömegét nevezzük a világegyetem kritikus tömegének, a megfelelő kritikus atomsűrűség most 6 hidrogénatom/köbméter. A világegyetem tényleges és kritikus sűrűségének hányadosára az  $\Omega$  jelölést használjuk. Ha a világegyetem tömege ennél a kritikus tömegnél kisebb, azaz  $\Omega < 1$ , akkor a szétrepülő tömegek kicsik ahhoz, hogy a közöttük működő, a kölcsönható tömegek szorzatával arányos erő meg tudja fékezni a tágulást. Ha az össztömeg a kritikus tömegnél nagyobb, azaz  $\Omega > 1$ , akkor a tömegvonzási erők egy idő után lefékezik a tágulást. Amint az megáll, a tömegvonzás hatására beindul az összehúzódás. Ha az össztömeg épp a kritikus tömeggel egyenlő, azaz  $\Omega = 1$ , akkor a tágulás a végtelenségig folytatódik, de sebessége nullához tart.

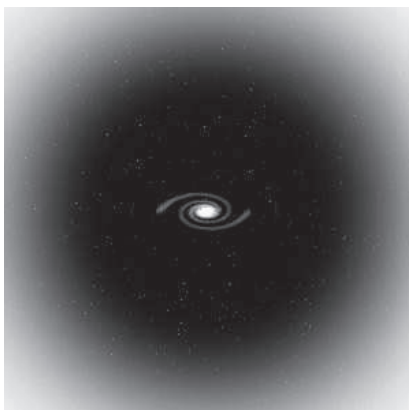
A háromféle lehetőséget két csillagváros átlagos távolságának változásával is szemléltethetjük. Ha  $\Omega < 1$ , a csillagvárosok egymástól való távolsága állandóan nő. Ekkor beszélünk nyílt világegyetemről. Ha  $\Omega > 1$ , akkor ez a távolság csúcstértékének elérése után csökkenni kezd és idővel eltűnik. Ekkor a világegyetemet zártnak nevezik. Ha  $\Omega = 1$ , a két csillagváros távolsága ugyan növekszik, de egy állandó értékhez tart, ez a sík világegyetem esete.

Nyílt világegyetem esetén a tér mértanát az ún. Bolyai-Lobacsevszkij féle mértan írja le, ebben a háromszögek szögeinek összege kisebb, mint 180 fok. A zárt világegyetem mértana az ún. gömbi mértan. Ekkor a háromszög szögeinek összege nagyobb, mint 180 fok. A sík világegyetem mértana a mindenki által ismert euklideszi mértan, ahol a háromszög szögeinek összege 180 fok.

**Sötét anyag.** Ahogy tárgyaltuk, a világegyetem jövőjét a világegyetem tömegének nagysága határozza meg. Kérdés miként mérhető meg a világegyetem tömege. Feltételezzük, - ez a megfigyelések szerint nagyon jól teljesül-, hogy a csillagvárosok nagyjából egyenletesen töltik ki az égboltot. Egy adott, nagyon kis térszögben megszámolhatjuk a benne látható csillagvárosokat. Ezután a térszög nagyságából meg tudjuk mondani, körülbelül hány csillagváros található a világegyetemben. Hasonlóképpen meg tudjuk határozni egy átlagos csillagváros csillagainak számát is. Ezután, ismerve egy átlagos csillag tömegét, meg tudjuk adni a világegyetem teljes tömegét. Napunk tömege Kepler törvényeiből meghatározható, ha ismerjük a Föld tömegét. Földünk tömege a  $g$  nehézségi gyorsulásból és a Föld sugarából számolható ki.

Méréseink szerint a világegyetem látható, a fenti módszerrel meghatározott tömege a kritikus tömegnek csupán töredékét, kb. 0,5%-át fedezik. Számításba véve a nem látható, mert kialudt és egyéb csillagokban lévő anyagot, amely elsősorban atomokból vagy plazmából áll, az atomos tömeg a kritikus tömeg 4,9%-át teszi ki. Ez azt jelenti, hogy a világegyetem anyagsűrűsége 0,25 hidrogénatom/köbméter.

Tejútrendszerünk, az Androméda-köd és más csillagvárosok csillagai az adott csillagrendszer központja körül keringenek, hasonló ahhoz, ahogyan a bolygók keringenek a Nap körül. De a csillagvárosok keringését nem írhatjuk le az ismert anyag tömegvonzásának segítségével. Csak úgy kaphatjuk meg a csillagrendszerben keringő csillagok sebességét, ha feltesszük, hogy a korong alakú csillagrendszer egy őt körülvevő hatalmas, ismeretlen állapotú anyagfelhőbe van beágyazva. Ezt az ismeretlen állapotú anyagot sötét anyagnak nevezzük. Feltételezések szerint ez a sötét anyag burokszerűen veszi körül a csillagvárosokat, lásd a 21. ábrát. Sűrűsége, akárcsak a látható anyag sűrűsége a csillagváros közepe felé kell, hogy növekedjen. Bár a sötét anyag az elektromágneses kölcsönhatásban nem vesz részt, a részecske-ellenrészecske pár szétsugárzásakor, lásd a 2.5. fejezetet, a sötét anyag esetén is fotonok vihetik el a felszabaduló energiát.



21. ábra. A kép közepén látható fénylő csillagváros ismeretlen állapotú anyagfelhőbe van ágyazva. Ezt az ismeretlen állapotú anyagot sötét anyagnak nevezzük. Feltehetően a sötét anyag burokszerűen veszi körül a csillagvárosokat.

Hogy ténylegesen mi a sötét anyag, napjaink kozmológiájának talán legizgalmasabb kérdése. Meghatározható, hogy a csillagvárosokban lévő sötét anyag, amely talán nagyon halvány csillagok sokaságából

és eddig még közvetlenül nem észlelt részecskékből állhat, a kritikus tömeg 26,8%-át adja ki, lásd később a 6.4. szakaszban. Összegezve az ismert és a sötét anyag mennyiségét, a világegyetemre az  $\Omega = 0,317$  értéket kapjuk. Ám a világegyetem mértana a mérések szerint nem az ennek az értéknek megfelelő Bolyai-Lobacsevszkij féle geometria, hanem az  $\Omega = 1$ -nek megfelelő euklideszi mértan.

**Sötét energia.** Újabb fejtörésre adnak okot az Ia szupernóvák megfigyelésével mért távolságok, mert az ezredfordulón közölt adatok alapján a távoli csillagvárosok messzebb vannak, mint ahogyan eddig vélték. Addig azt tételeztük fel, hogy a csillagvárosok tömegvonzása lassítja a tágulás sebességét. De a mérések szerint a tágulás nem lassul, hanem növekszik, azaz a világegyetem gyorsuló ütemben tágul.

Erre egyelőre nincs kielégítő magyarázat, nem tudjuk, miféle taszító hatás győzi le a tömegvonzás összehúzó hatását. Jobb híján az ún. sötét energia létének tulajdonítjuk, ami új jelenség, hozzá hasonlóval eddig nem találkozott a tudomány. Független a térben lévő anyagtól és sugárzástól és akkor is kifejti a taszító hatást, ha semmi sincs jelen, azaz a taszítás az üres tér tulajdonsága. Ugyan nem tudjuk, hogy miféle, de a sötét energiának megfeleltethető tömeg mégis a világegyetem össztömege fő összetevőjének tartható és ez a tömeg is befolyásolja a világegyetem téridejét és így az  $\Omega$  értékét. A sötét energia a feltevések szerint térfogategységre nézve állandó és az Einstein által annak idején az Einstein-egyenletekbe bevezetett  $\Lambda$ -val jelölt kozmológiai állandó írja le. A világegyetem sötét energiájának mennyisége a világegyetem térfogatával arányosan növekszik,

Jelenleg a következőképpen képzelhetjük el a világegyetem fejlődését. Közvetlenül az ősrobbanás után a világegyetem tágulni kezdett, de ennek sebességét a tömegvonzás egyre lassította. Ahogyan a világegyetem térfogata nőtt, vele arányosan növekedett a sötét energia mennyisége is. Pár milliárd éve a sötét energia felfúvó hatása meghaladta a tömegvonzás összehúzó hatását és a tágulás mértéke az addigi lassulás helyett növekedni kezdett. Azóta a világegyetem egyre gyorsabb ütemben tágul.

Világegyetemünk mértanát a világegyetem  $\Omega$  értéke és a sötét energia mértékét megadó kozmológiai állandó együttesen határozzák meg. A világegyetem mértana akkor euklideszi, ha  $\Omega + \Lambda = 1$ . Mivel a mérések szerint a világegyetem mértana euklideszi és  $\Omega = 0,317$ , valamint a kozmológiai állandó mértéke  $\Lambda = 0,683$ . A kozmológiai állandónak ez az értéke megfelel a világegyetem az Ia szupernóvák segítségével mért gyorsuló tágulása mértékének. Azaz a különböző területeken, egymástól függetlenül meghatározott értékek egybeesnek, ami alátámasztja világegyetemünk leírásának hitelességét.

**A világegyetem látóhatára.** A háttérsugárzás, mint később tárgyaljuk, az ősrobbanást követő 380 ezer évvel ezelőtt indult el felénk. Színképe és erőssége, lásd az előző, a 5.3. fejezetben, alig függ attól, melyik irányból érkezik. Ezt és a világegyetem tömegének közel egyenletesebb eloszlását a  $v = Hr$  Hubble törvény alapján nem tudjuk értelmezni. Az eszerint táguló világegyetem sokkal gyorsabban fejlődik annál, semhogy az egyensúlyhoz vezető folyamatokban elérhesse az egyenletesség megfigyelt szintjét. Csak akkor láthatjuk egyenletesnek a világegyetemet, ha a részecskéi kölcsönhathatnak vagy ha jelenleg már nem, de valamikor kölcsönhathattak egymással. Mivel a fény sebességénél gyorsabban semmi sem terjedhet, ezért kiegyenlítőds csak akkor lehetséges, ha a részecskék "látótávolságon belül" vagy amit úgy mondanak, látóhatáron belül vannak. Feltételezzük, lásd a következő rész legeljén, hogy a kezdet kezdetén a világegyetem valamennyi pontja még a látóhatáron belül volt. Ezért világegyetemünk látóhatáron belüli része a tőlünk fénysebességnél kisebb sebességgel távolodó térrészek összessége. Így az adott életkorú világegyetem látóhatárának sugara a világegyetem életkorának és a fénysebességnek szorzata, ez jelenleg 13,82 milliárd fényév.

A 380 ezer éves világegyetem sugara jóval nagyobb, mint korabeli látóhatár. Az égbolt ellentétes oldaláról érkező háttérsugárzás forrásai a sugárzás kibocsátásakor az akkori látóhatár több 90-szeresére voltak egymástól. Ennyire nagy távolságban lévő anyagfelhők sohasem hathattak kölcsön egymással, márpedig a háttérsugárzás egyenletessége ezt mutatja. Mindez arra utal, hogy a világegyetem valamikor 380 ezer évnél korábban nem a Hubble törvény szerint, hanem annál sokkal gyorsabban tágult, lásd később a 6.2. fejezetben.

## 6. A kezdetektől a csillagvárosokig

### 6.1. A természeti semmiből induló világegyetem

Amint az űsrobbanás modellje feltételezi, a világmindenség anyaga az idő kezdetén nagyon kicsiny térfogatú és roppant magas hőmérsékletű volt. Ahogyan a 3.4. szakaszban tárgyaltuk, ez a Planck hossz  $1.62 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$ , és a Planck idő,  $5.31 \cdot 10^{-44} \text{ sec}$  tartománya, a fény a Planck hossznyi utat Planck idő alatt futja be. Ennyiből fejlődött ki a ma megfigyelhető világegyetem, amely azóta is tágul és közben hőmérséklete csökken.

**Világegyetemünk összenergiája nulla.** Hogy miből indulhatott az űsrobbanás, arra a megmaradási tételek adhatnak útmutatást. Feltehető, hogy valamennyi megmaradási tétel, beleértve az energiamegmaradás és a töltések megmaradásainak törvényeit is, úgy teljesül, hogy a világegyetem összes töltése, összenergiája és egyéb megmaradó mennyisége nulla. Azaz, a + és - előjelű mennyiségek kiejtik egymást.

Például a világegyetem elektromos össztöltése nulla, azaz a benne lévő elektronok és protonok száma azonos. Ez abból következik, hogy a két proton között fellépő tömegvonzás a közöttük fellépő taszító Coulomb kölcsönhatásnál 36 nagyságrenddel gyengébb, lásd a 1.1. részben. Ha a világegyetem anyagának össztöltése nem lenne nulla, akkor az egymást taszító és emiatt egyenletesen eloszló töltések közötti Coulomb taszítás még akkor is ellensúlyozná a tömegvonzás hatását, ha minden  $10^{36} +$  töltésre ennél eggyel kevesebb – töltés jutna, vagy fordítva.

Az általános relativitáselmélet szerint a sík világegyetem pozitív előjelű energiáinak, például a mozgási energia, hőenergia és hasonlóak, valamint a tömegeknek megfelelő  $E = mc^2$  energiák összege kiegyenlíti a negatív tömegvonzási energiákat. Azaz a sík világegyetem összenergiája nulla. Megfigyeléseink szerint a világegyetem mértana valóban az euklideszi mértan, lásd a 5.4. szakasz végén, és nemcsak a töltése, hanem az összenergiája és a perdülete is nullának vehető.

### 6.2. Első másodperc

A kezdetek kezdetéről azzal a feltevéssel élhetünk, hogy a világegyetem a természeti semmiből pattant ki. Utóbbi a még nem ismert kvantumgravitációs elmélet írhatja le lásd a 3.4. rész végén. Akkor még sem tér, sem az idő, így távolságok és időtartamok sem léteztek. Tömegek sem voltak még, csupán bizonyos, a kvantumgravitáció által leírható jelenségek léteztek, melyek a világegyetem terének, idejének megjelenéséhez vezettek.

$10^{-43} - 10^{-35}$  **másodperc - egyetlen kölcsönhatás.** A Planck-idő után,  $10^{-43}$  másodperc tájt már létezik a tér és idő, fogalmaik egyértelműek. Ekkor még a világegyetem hőmérséklete a lehető legmagasabb, a Planck hőmérséklet, értéke kb.  $10^{31}$  Kelvin. A tömegvonzás már elvált a másik három alapvető kölcsönhatástól, a gravitációs kvantumhatások elhanyagolhatóakká váltak. Az általános relativitáselmélet egyenleteinek megfelelően tágul a világegyetem és tágulás közben hűl.

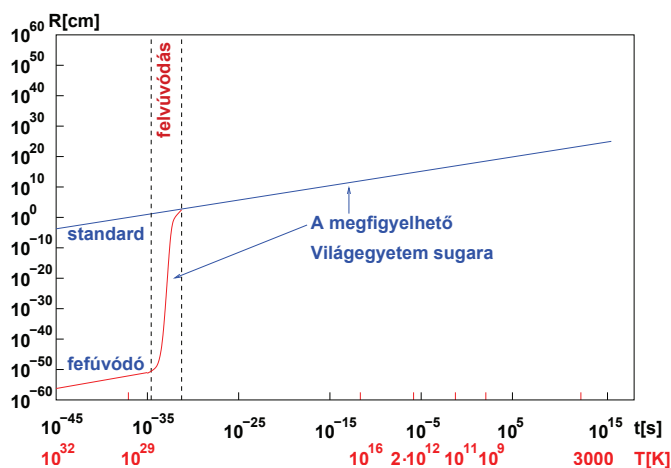
A  $10^{-43}$  másodperceken belül a  $\Delta E \cdot \tau \geq h$  határozatlansági összefüggésnek megfelelően nagyon nagy számú igen nagy energiájú lepton-ellenlepton, kvark-ellenkvark van-nincs részecskepár valamint a kölcsönhatásaikat közvetítő  $X$ -részecske, lásd a 3.4. részben pattanhatott ki. Ahogyan a 3.3. szakaszban említettük, ezek a Higgs-részecskével kölcsönhatva tömeget nyertek. A közöttük fellépő gravitációs vonzás annyira erős, hogy a keletkező részecske párok energiáját ugyanolyan nagyságrendű negatív gravitációs kölcsönhatási energia ellentételezheti. Így a világegyetem összenergiája nulla körül ingadozhatott, a kétszer annyi új, forró tömeg és sugárzási energia keletkezését kétszer annyi negatív kölcsönhatási energia ellentételezte. Ekkor a pozitív energia meghatározó része az igen nagy hőmérsékletnek megfelelő sugárzási és

a részecskék mozgásának megfelelő energia, ezekhez képest a nyugalmi tömegeknek megfelelő  $E = mc^2$  energia kicsi.

Az elfogadott leírás szerint a  $10^{-43}$  és  $10^{-35}$  másodperc közötti korai időszakot a nagy egyesített elmélet által leírt  $X$  részecskés folyamatok jellemezték, a kvarkokat leptonokba és viszont alakító kölcsönhatások a legfontosabbak. Ekkor még a három alapvető kölcsönhatás, az erős, gyenge és elektromágneses ugyanolyan erősséggel, gyakorisággal zajlott, egymástól nem különböztek. Mivel a kvarkok leptonokba és viszont alakulhattak, gyakorlatilag csak egyetlen részecske létezett. Egészen más, mint a mai, szerkezetekben oly gazdag világunk, melyre az  $X$  részecske már nem gyakorol befolyást.

$10^{-35} - 10^{-32}$  **másodperc - szimmetriasértés és felfúvódás.**  $10^{-35}$  másodperc elteltével a hőmérséklet csökkenése miatt a lepton-kvark átalakulások valószínűsége elenyészővé vált. Ekkortájt az  $X$  részecskék és ellenrészecskéik kvarkokra, leptonokra, ellenkvarkokra és ellenleptonokra bomlottak. Bomlásuk során a világegyetem anyag-ellenanyag szimmetriája megbomlott, tízmilliárd keletkezett kvarkra csak tízmilliárd ellenkvark jutott. Egyúttal az erős kölcsönhatás is elvált az elektroyenge kölcsönhatástól.

Az  $X$ -részecskék bomlásakor óriási mennyiségű energia szabadult fel. Ez a víz jéggé fagyása során zajló átmenethez hasonlítható, melynek során jelentős mennyiségű hő szabadul fel. A felszabaduló óriási energiák miatti nyomásnövekedés felfújta a világegyetemet. Rohamos tágulás kezdődött és világegyetemünk mérete minden  $2 \cdot 10^{-35}$  másodpercen belül megkétszereződött. A felfúvódás körülbelül a  $10^{-32}$  másodperc tájt állt le. Ezalatt a világegyetem sárgadinnye nagyságúra nőtt. Ezután a tágulás egyenletesen, a mainak megfelelő mértékben folytatódott, lásd a 22. ábrát.



22. ábra. A világegyetem méretének változása a felfúvódó világegyetemet feltételező leírás alapján. Az ábra a megfigyelhető világegyetem sugarát ábrázolja centiméterben a másodpercben megadott élettartam függvényében. Egyúttal feltüntettük az adott méretű világegyetem Kelvinben mért hőmérsékletét is. A  $10^{-35}$  másodpercnél kezdődő sáv a felfúvódás időszakának felel meg. Előtte és utána a világegyetem a Hubble-törvénynek megfelelően tágul.

A hatalmas mértékű felfúvódás magyarázza, miért ennyire egyenletes a világegyetem. Eszerint a megfigyelhető világegyetem egésze egy piciny tartományból fejlődött ki, amely az ősrobbanás hagyományos modellje által adott tartománynál sokkal kisebb. Ebben a viszonyok kiegyenlítették, a benne lévő anyag egyensúlyi állapotban, a látóhatáron belül van. Vagyis a kozmikus háttérsugárzás forrásai a felfúvódó szakasz előtt, érintkeztek egymással. Teljes anyaga ekkor még kölcsönhatásban állhatott egymással.

A felfúvódó világegyetem modellje és más hasonló modellek az ősrobbanás után  $10^{-32}$  másodperccel az ősrobbanás hagyományos modelljébe mennek át, ahogy ezt a 22. ábra is kifejezi. Míg az erős és elektroyenge kölcsönhatás már különvált, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás még megkülönböztetetlen. Ebben az időszakban a táguló és hűlő világegyetem hőmérséklete még elég magas volt ahhoz, hogy



a kvarkok, ellenkvarkok valamint az erős kölcsönhatást közvetítő részecskék, a gluonok plazma állapotban lehessenek jelen.

**$10^{-9}$  másodperc - az elektromágneses kölcsönhatás felhasadása.** Amíg a hőmérséklet elég magas, addig az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyetlen kölcsönhatásként viselkedik. Míg a foton nulla tömegű és hosszabb hatótávú kölcsönhatásokat is közvetíthet, addig a gyenge kölcsönhatást közvetítő nagy tömegű  $W^+$ ,  $W^-$  és  $Z^0$  bozonok csak nagyon rövid hatótávúakat. A  $10^{-9}$  másodperc tájt a világegyetem már alacsonyabb hőmérsékletű és ekkor a kvarkok és leptonok már nem kerülnek annyira közel egymáshoz. Hatótávjuk különbözősége miatt az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás megkülönböztethetővé válik, lásd a 3.3. szakaszt. A világ legnagyobb gyorsítóin fél évszázaddal ezelőtt kezdték tanulmányozni a világegyetemben ekkortájt zajló elemi részecskés folyamatokat.

Ekkortájt már az újabb részecske-ellenrészecske párok, különösen a kvark-ellenkvark párok keletkezéséhez sem elég magas a hőmérséklet. Valamennyi ellenrészecske, amelyből a  $10^{-35}$  másodpercben bekövetkező szimmetriasérülés miatt picivel kevesebb van, az ellenkvark a kvarkjával valamint a pozitron az elektronnal ütközve szétsugárzódik és fotonokká alakul. Ez magyarázza, hogy a világegyetemben egy elektronra kb. húszmilliárdnyi foton jut. Ez az arány csak nagyságrendben igazít el, a fotonok sűrűsége a világegyetemben 0,412 milliárd foton/köbméter.

A világegyetem anyagát ekkor a szabadon mozgó, gluonok által kölcsönható kvarkok ún. kvark-gluon plazma állapota jellemzi. Ma már ólom atommagokat is tudnak nagyon magas energiákra gyorsítani. Ha egy megfelelően nagy energiájú ólom atommag szemtől-szembe ütközik a céltárgy ólom atommaggal, az összeolvadt két atommag belsejében annyira nagyra nőhet a hőmérséklet, hogy a benti protonok és neutronok kvarkjaikra olvadhatnak. Ily módon elő lehetne állítani a kvark-gluon plazmát és tanulmányozni lehetne tulajdonságait. Mindaddig nincs meggyőző bizonyíték arra, hogy sikerült volna a kvark-gluon plazma előállítására.

**$10^{-6}$  másodperc - neutronok és protonok.** Nem sokkal ezután,  $10^{-6}$  másodperc tájt a táguló világegyetem hőmérséklete annyira lecsökkent, hogy a kvark-gluon plazma kvarkok hármába, protonokba és neutronokba dermedt. Ezután az első másodperc végéig a meghatározó folyamat a protonok és neutronok egymásba alakulása, melynek során elektronok, pozitronok, neutrínók és ellenneutrínók keletkeznek. Kb. az első másodperc végére a hőmérséklet annyira lecsökken, hogy a proton neutronná alakulásához már nincs elég energia. Ettől fogva a neutrínók és ellenneutrínók nem, vagy alig hatnak kölcsön más részecskékkel.

Látjuk, már a születés első másodpercében kialakult a világegyetem teljes anyagkészlete. Az első másodperc végére a Mindenség protonokból, neutronokból, elektronokból, neutrínókból, ellenneutrínókból és fotonokból állt. Már ez időn belül is megfigyelhető az egyre összetettebb rendszerek kialakulása. Míg kezdetben az elkülönültség még nem létezett, az első másodperc végére, a világegyetem lehűlése során a négy alapvető kölcsönhatás elkülönült egymástól és kialakult a proton és neutron. Mindkettő összetett részecske.

### 6.3. Első percek

Már az első másodpercen belül is képződhetnek összetettebb atommagok, de az akkor még hevesebb ütközések szétverték őket. Az összetettebb atommagok képződéséhez az első másodperc végétől néhány percig, durván az ötödik perc végéig kedveztek a feltételek. Az első másodperc végétől kezdve, amikor már csak néhány milliárd fok a hőmérséklet, az ennek megfelelő proton és neutron mozgási energiákon indul meg az összetett atommagok keletkezése. Ilyen folyamatok az Atomki gyorsítóin is tanulmányozhatók.

Ahogy az 3.2. részben már tárgyaltuk, a protonok, neutronok között ható vonzó magerők nagyon rövid hatótávúak. Ahhoz, hogy a protonok és neutronok atommagfolyamatba léphessenek egymással, egymás közvetlen közelébe kell jutniuk. Minél közelebb kerül egymáshoz két töltött atommag, az egyre erősebb Coulomb erő annál erősebben fékezi őket. Ha a közeledés sebessége nem elég nagy, az atommagok nem



juthatnak annyira közel egymáshoz, hogy a taszító Coulomb erőnél jóval erősebb vonzó magerők hatása is érződhesse.

**A hélium képződése.** Az első percek legfontosabb magfolyamatai a következők voltak. Először a neutron-proton ütközések során a nehéz hidrogénnek is nevezett, protonból és neutronból álló deuteronnak nevezett atommag képződik. Ha a vízmolekula valamelyik hidrogénatomja deutérium, nehézvíz molekulának nevezzük. Deuteronok egymással ütközve hélium atommagokká alakulhatnak. A hélium atommagja két protonból és két neutronból áll. Így és más magfolyamatokon keresztül is elsősorban  ${}^4\text{He}$  atommagok keletkeznek. A legtöbb hélium az első percekben alakul ki. Ahogyan múlnak a percek, a hőmérséklet csökkenése miatt egyre kisebb lesz a töltött atommagok ütközésének sebessége és a Coulomb taszítás mind jobban csökkenti összeolvadásuk valószínűségét. Emiatt a  ${}^4\text{He}$  atommagnál nagyobb tömegszámú atommagból csak nagyon kevés alakulhatott ki.  ${}^4\text{He}$  is csak az első néhány percben képződhetett nagyobb mennyiségben.

A világegyetem anyagának nagyobb része proton, azaz hidrogén atommag. 12 hidrogén atomra egy hélium atom jut. Ha a tömegeik arányát vesszük, a 3:1 értéket kapjuk. Az ősrobbanás modellje alapján számolt kb. 25%-os hélium arány nagyon jól egyezik ezzel az értékkel. Egyéb, ritkábban előforduló könnyebb atommag kozmikus előfordulási valószínűsége is jól megfelel az ősrobbanás elmélete alapján számoltaknak.

Mivel a szabad neutron bomlásának felezési ideje 10,2 perc, a szabad neutronok nagy többsége az első óra végére eltűnik a világegyetemből. Ezután a magfolyamatok valószínűsége elhanyagolhatóvá vált, csak jóval később, a felforrósodott csillagok belsejében indulhattak be újra.

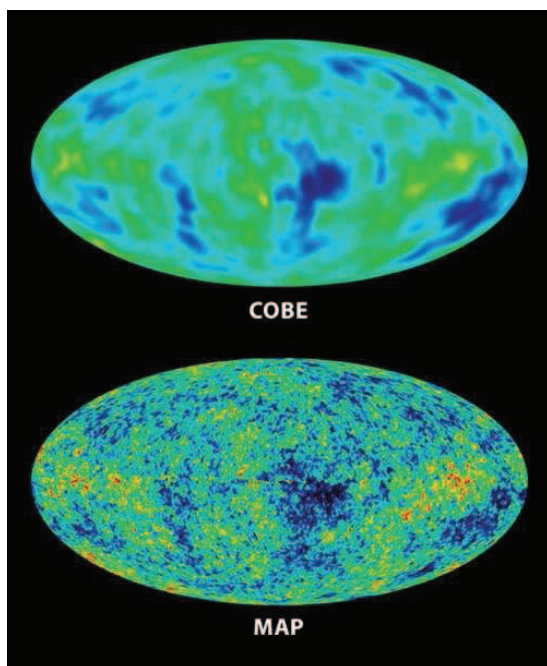
## 6.4. 380 ezer év

A táguló és hűlő világegyetemünk további fejlődését egy ideig az elektromágneses kölcsönhatások határozzák meg. Az első öt perc után körülbelül 380 ezer évig a világegyetem arculatát a fotonok és az anyag kölcsönhatása jellemezte. Ekkortájt a világegyetem plazma állapotban volt, a nagyon magas hőmérséklet miatt atomok még nem létezhetnek, mert a nagy nyomás, a töltött részecskékkel és a fotonokkal való ütközés hamar szétzilálja a kialakuló összetettebb alakzatokat.

380 ezer év tájt a hőmérséklet 3000 Kelvinre csökkent. Ezen a hőmérsékleten már elhanyagolható a nagyobb energiájú, a hidrogén vagy hélium atomot gerjeszteni képes fotonok jelenléte. A hidrogén atomok jó része hidrogén molekulákká állt össze, a hélium nemesgáz, ezért atomos állapotban található. Ezzel az elektromágneses kölcsönhatás irányította sugárzásos korszak lezárult, a sugárzás és az anyag kölcsönhatása jelentéktelenné vált. Minthogy a fotonok már nem nyelődhetnek el, ettől fogva mint a kozmikus háttérsugárzás fotonjai, szabadon terjednek a Világmindenségben. A kozmikus háttérsugárzás mai mintázatát a sugárzási térnek a 380 ezer év körüli állapota alakította ki, a most észlelhető fotonjai 13,82 milliárd - 380 ezer évvel ezelőtt indultak el felénk.

Ma a kozmikus háttérsugárzás fotonjainak sűrűsége közel  $450 \text{ foton}/\text{cm}^3$ , a világegyetem fotonsűrűségének 60%-át teszi ki, a fotonok további 40%-át a csillagvárosok és a csillagok sugározták ki.

**A háttérsugárzás egyenetlenségei.** A COBE műhold 1992-es mérései szerint a háttérsugárzás nem teljesen egyenletes, mivel a különböző irányokból érkező sugárzás nem teljesen azonos hőmérsékletű térségekből érkezik. Igen kicsiny, százezred foknyi ingadozások mutatkoznak. Ez arra utal, hogy 380 ezer év tájt a világegyetem gázfelhőjében sűrűség-ingadozások voltak. Ezeket a plazmában terjedő hanghullámok alakították ki, bizonyos helyeken sűrítették, máshol kissé ritkították a plazmát. Ahol magasabb a hőmérséklet, ott a gáz sűrűbb és erősebb a tömegvonzás, ennek indoklását lásd később a 6.7. részben. A COBE értékei nem voltak elég pontosak. 2001-ben bocsátották fel a WMAP műholdat, a COBE és a WMAP adatai közötti különbséget jól mutatja a 23. ábra.



23. ábra. A felső ábra a kozmikus háttérsugárzásnak a COBE műhold által mért egyenetlenségeit szemlélítetik, az alsó a WMAP műhold által jobb felbontással mért értékek. Az egyenetlenségeknek megfelelő különbségek a háttérsugárzás tízezred Kelvines ingadozásainak felelnek meg, csak az ábrázolás nagyította fel őket.

A különböző hőmérsékletű helyek színeképeit vizsgálatából azt is megtudhatjuk, hogy mekkora volt a 380 ezer éves világegyetem és hogy a mértana a sík mértan. A WMAP műhold öt éves működése során kapott eredmények összegzése szerint, a 380 ezer éves világegyetem anyagának 10%-át neutrínók, 12%-át atomok, 15%-át fotonok, 63%-át a sötét anyag adta, a sötét energia mennyisége akkor még elhanyagolhatóan kicsiny. A WMAP után 2009-ben felbocsátott Planck műhold által 2013 márciusában közölt adatok szerint, ahogy korábban már tárgyaltuk, ma a világegyetemben a megfelelő arányok az ismert állapotú anyagra 4,9%, a sötét anyagra 26.8%, és a sötét energia részesedése 68.3%.

## 6.5. A világegyetem sötét korszaka

Ahogy hűlt a hidrogén és héliumgázból álló világegyetem, úgy nőtt az ősrobbanás után 380 ezer évvel kibocsátott sugárzás hullámhossza. Amint a hullámhossz az infravörös sugárzás tartomány hullámhosszainál is nagyobbá vált, kialakult a látható fény és a világegyetem elsötétedett. Beköszöntött a világegyetem évmillióig tartó sötét korszaka. Számunkra sötét azért is, mert keveset tudunk mindarról, ami ezalatt történt. A felhőbe gyűlő hidrogén és hélium gáz a sötét anyagnak a felfúvódó szakasz során gömbbé és a felfúvódó szappanbuborékok felszínéhez hasonló felületű, vagy szállá formálódott alakzatai körül kezdett tömörülni, lásd lentebb. Így alakultak ki az első csillagrendszerek (galaxisok).

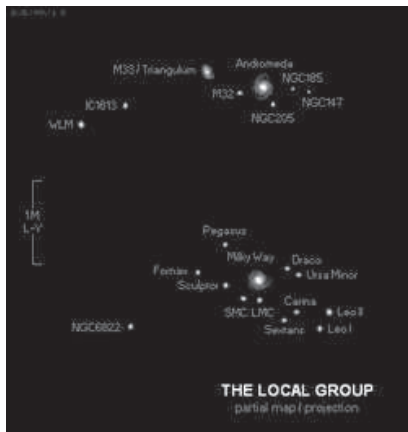
A világegyetem hűlése során a galaxisokban lévő gáz is hűlt és emiatt sűrűsödni kezdett, aminek következtében felmelegedett és sugározni kezdett. A melegedés, sűrűsödés, sugárzás és összehúzódás ismétlődő folyamat a csillagképződés megindulásáig tartott. Ezzel a világegyetem sötét korszaka lezárult. A Planck műhold mérései alapján a sötétség kora 560 millió évig tartott.

2018 elején közölték, hogy sikerült egy fiatal csillagváros 13,3 millárd évvel ezelőtti állapotát megfigyelni. A megfigyelt csillagváros fele akkora, mint Tejútrendszerünk egyik kísérő csillagvárosa, a Kis Magellán felhő.

## 6.6. Csillagvárosok

Ahogy a csillagvárosokban folytatódnak a csomósodási folyamatok, belsejükben egyre több csillag alakul ki. Világmindenségünkben körülbelül százmilliárd csillagváros van és az egyes csillagvárosokban átlagosan százmilliárd csillag található. Napunk csak egyike a Tejútrendszer 200 milliárd csillagának és a Tejútrendszer is csak egyike a Mindenség százmilliárd csillagvárosának. Tejútrendszerünk az átlagosnál nagyobb csillagváros, átmérője kb. 100 ezer fényév. Alakja lapos korong, melynek spirálkarjai vannak. A csillagvárosok alakja változatos. Ha gyorsabban forog, lapos koronggá alakul, ha lassabb a forgása, gömbszerű lesz.

**Csillagvárosok halmazai.** Egy csillagváros mérete durván százezer fényévnyi, a csillagvárosok közötti átlagos távolság néhány millió fényév. Maguk a csillagvárosok is vonzzák egymást, csoportokba tömörülnek. Tejútrendszerünk a körülbelül 30 csillagvárosból álló, körülbelül 5 millió fényév átmérőjű Lokális Csoporthoz tartozik, lásd a 24. ábrán. A kisebb csoportok még nagyobb csoportokat alkotnak. A Lokális Csoport a körülbelül 100 millió fényév átmérőjű Lokális Szuperhalmaz része.

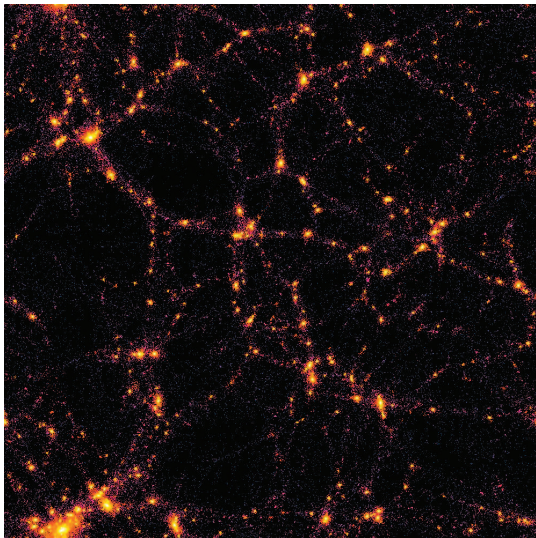


24. ábra. A Lokális Csoport csillagvárosai. A két legnagyobb csillagváros a Tejútrendszer és az Androméda-kód, a többiek többsége közelükben található.

Ahogy az előző szakaszban tárgyaltuk, felfúvódás miatt a világegyetem buborékos szerkezetű. Olyan, mintha felfúvódó buborék lenne, melynek belsejében kisebb, ezek belsejében annál is kisebb és így tovább buborékok volnának. Maguk a csillagvárosok a buborékok felszínén helyezkednének el, lásd a 25. ábrát. Egészen a 300 millió fényéves méretig - ettől fogva a világegyetem anyageloszlása már egyenletesnek vehető, lásd a 5.3. szakaszban - a csillagvárosok eloszlása önhasonló képet mutat, ami azt jelenti, hogy a kinagyított részlet olyan, mint az az egész. Ha az önhasonlóság bármekkora méretre igaz, az alakzatot fraktálnak nevezik.

A csillagvárosok eloszlása a kezdeti kis egyenlőtlen ségek szerkezetére vezethető vissza. A világegyetemben lévő sötét anyag mennyiségét abból is meg lehet becsülni, hogy a háttérsugárzásban mért egyenlőségekből kiindulva kiszámolják, hogy milyen világegyetem alakul ki belőlük. A számolás végeredménye erősen függ attól, mennyi sötét anyagot tételeznek fel. Ha a világegyetem sötét anyagának tömege a fent adott 26,8 %-nyi, akkor a számolás visszaadja a 25. ábrán látható, észlelt buborékszerkezetet.

A világegyetem össztömegét a háttérsugárzástól függetlenül, a látható fény tartományában végzett mérésekkel is meghatározták. Mostanára sikerült a csillagvárosok térbeli eloszlását pontosabban feltérképezni. Ahogy a Nap a mögötte lévő csillag hozzánk érkező fényét elgörbíti, lásd a 6. ábrát, úgy a távoli csillagvárosok hozzánk érkező fénysugarai is elgörbülnek, mivel csillagvárosok halmazai mentén haladva jutnak el idáig. A görbülés mért értékeiből és a csillagvárosok térbeli eloszlásából meghatározhatjuk a világegyetem össztömegét is. Az így kapott érték jól egyezik a háttérsugárzásból számolttal.



25. ábra. A buborékszerkezetet mutató világegyetem. Látható, hogy a csillagvárosok rendszerei mintha a nagy buborék belsejében lévő kisebb buborékok felszínén helyezkednének el.

**Tejútrendszer.** A szabad szemmel látható csillagok szinte valamennyien a Tejútrendszerhez tartoznak. Az augusztusi égen látható hatalmas, tejszerű csillagfelhő, a Tejút, a Tejútrendszer fő részét alkotja. Szabad szemmel is megfigyelhető, de csak a déli féltekéről látható a Tejútrendszeren kívüli két kis kísérő csillagváros, a Kis és Nagy Magellán felhő. Az északi féltekéről az egyetlen, szabad szemmel tiszta időben látható csillagváros az Androméda-köd, lásd a 26. ábrán.



26. ábra. Az Androméda-köd

Tejútrendszerünk az átlagosnál nagyobb csillagváros, több mint 200 milliárd csillagból áll. Alakja lapos, csigavonalszerűen kinyúló karok alkotta korong, amely közepén kidudorodik. Központja a Nyilas csillagképben van, a központi mag közepén egy 2,6 millió naptömegnyi fekete lyuk, ezt lásd később a 6.7. szakaszban, található. Körülötte fényévnnyi távolságon belül mintegy tízmilliónyi csillag kering.

A központi dudor körül egy kb. hatvanmilliárd fiatalabb csillagból álló lapos korong forog. Átmérője kb. 100000 fényév, vastagsága alig ezer fényév, csigavonalas szerkezete pontos alakját belülről nehéz feltérképezni. A lapos korongot egy gömb alakú ritkább övezet veszi körül, amely idős, 11,5-13,5 milliárd éves csillagokból, azoknak csoportjaiból és gázfelhőkből áll. Belül fiatalabb, 11,5 milliárd éves csillagok találhatóak, a kintebb lévők a legrégebbi, az ősrobbanás után kb. 250 millió évvel keletkezett csillagok közé sorolhatók. A gömböveszet tömege a korong tömegének kb. 20-30%-a. A központi dudorodás és a gömbszerű övezet lassan, a korong jóval gyorsabban forog. Napunk a középponttól 26000 fényévnnyire a korong egyik spirálkarjában található.

Tejútrendszerünk sötét anyagból álló részének térfogata kb. ezerszer akkora, mint a csillagokat magába foglaló térfogat, jellegére lásd a 21. ábrát.

Tejútrendszerünk több mint 12 milliárd éve a gázt és csillagokat tartalmazó kisebb és nagyobb csillagvárosok összeolvadása során formálódott. Máiig tart a más csillagvárosokkal való ütközési folyamat. Először

a Tejútrendszer két kisebb kísérő csillagvárosa, az egymáshoz közeli Kis és Nagy Magellán felhő olvad be a Tejútrendszerbe. A két kis galaxis egymással is ütközik és a nagyobb tömegű szomszéd erősebb tömegvonzása kiszívja a Kis Magellán felhőből a hidrogén gázt. 2018 őszén közölték, hogy sikerült megmérni a kb. 400 km/sec sebességű gázáramlás erősségét. Emiatt a Kis magellán Felhő gyorsan öregszik, egyre kevesebb új csillag képződik benne és idővel mind halványabbá válik. A legközelebbi nagy csillagváros szomszédunk, az Androméda-köd 100 km/s sebességgel tart felénk és a Tejútrendszer és az Androméda-köd korongjai kb. 5 milliárd év múlva fognak ütközni.

A csillagváros-csillagváros ütközések nem ritkák, a világűr távolabbi tartományaiban számos ütköző csillagvárost láthatunk. Az egyre bonyolultabbá váló ütközési folyamatok során csillagok a csillagvárosok közötti térbe vetődhetnek ki, és a csillagok közeli ütközései a csillagokat is szétvethetik. Végeredményben az új nagy csillagrendszer nagyjából egyenletes anyagsűrűségű felhővé válhat, melynek anyaga a hidrogén és hélium mellett jelentősebb mennyiségű nehezebb elemet is tartalmaz.

Két nagyobb anyagtömegű csillagváros ütközése alakíthatta ki a Tejútrendszer szerkezetét is, az egyik a korongot, a másik a központi dudort és a gömbszerű övezetet hozhatta magával. De az is lehetséges, hogy a csillagvárosok alakját inkább a forgásuk sebessége határozza meg. Minél gyorsabban forog a csillagváros, annál inkább korongszerű és belül mind laposabb. Hogy a belső gömbszerű övezetben öregebbek a csillagok azzal magyarázható, hogy a csillagfejlődés először a központi tartományban indult meg.

**Az öregedő világegyetem.** Minél távolabbi csillagvárosokat vizsgálunk, a fényük annál korábban indult el felénk, ily módon a világegyetem története korábbi állomásaira tekinthetünk vissza. A nagy vöröseltolódású csillagrendszerekről érkező fény az akkori, akár több milliárd évvel ezelőtti helyzetről tudósít. A mérések eredménye szerint a csillagvárosok csillagai által kibocsátott energia az utóbbi kétmilliárd év folyamán a felére csökkent. Leggyakrabban a 3 milliárd éves világegyetemben képződött csillag, a korabeli égbolt volt a legfényesebb. Az azóta eltelt 10 milliárd év során mind kevesebb csillag született.

## 6.7. Csillagok

Mint eddig is láttuk, idővel a világegyetem rendszerei összetettebbé, sokszínűbbé válnak. Ennek a folyamatnak a része a csillagok megjelenése is. Fejlődésének kezdeti szakaszában a csillag tömegvonzás hatására összehúzódó gáztömeg. Ha már eléggé összehúzódott, felfénylik. Később a csillagokban atommagfolyamatok indulnak be és a csillag által kisugárzott energia elsősorban ezekben termelődik. Aszerint, hogy milyen atommagfolyamatok zajlanak bennük, különböző csillagállapotokról beszélünk. Napunk is egy adott állapotban lévő csillag. Környezetünkben 3-4 fényév a csillagok átlagos távolsága, a hozzánk legközelebbi a 4,3 fényévre található Proxima Centauri.

A csillag anyagfelhőjének összetétele a csillagváros korosodásával fokozatosan átalakul. Kezdetben a csillag anyaga tisztán hidrogén és hélium. Később tárgyaljuk, hogy a nagyobb tömegű csillagokban magasabb rendszámú elemek is keletkeznek. A szupernóva robbanások alkalmával a teljes periódusos rendszer elemei szétszóródnak a csillagvárosban. Belekeverednek a gázfelhőkbe és az újabb csillagnemzedékek már porral szennyezett gázfelhőkből alakulnak ki. Amíg vannak a csillagvárosban olyan gáz- és porfelhők, melyek csillaggá sűrűsödhetnek, addig csillag is keletkezhet. Míg a legöregebb csillagok a csillagvárossal együtt jöhettek létre, a csillagok többsége jóval fiatalabb.

A csillagok születése és elmúlása nem körkörös folyamat. A csillagok belsejének sok millió fokos hőmérsékletén a csillagok alapvető fűtőanyaga, a hidrogén magasabb rendszámú elemekké alakul és ezek már nem válhatnak később születő csillagok fűtőanyagául. Ezért a csillagvárosoknak is van fejlődéstörténete.

**Csillagbölcsők.** Sokáig rejtélyes volt a csillagok keletkezésének mozgatója. Nem értették, hogy a csillagközi gázból és porból álló hatalmas méretű felhőknek miért kellene összehúzódniuk és csillagokat alkotniuk. Ugyanis a hideg gázfelhő belső nyomása képes ellenállni a tömegvonzás összehúzó hatásának.

Manapság, elsősorban a Hubble űrtávcső és az infravörös tartományban mérő, műholdakra telepített berendezések segítségével jóval többet tudunk a csillagok születéséről.

Egyedül keletkező csillagot még nem láttak, sohasem elszigetelten, hanem több ezer vagy akár millinyi, nagyjából együtt kialakuló csillagot számláló, csillagbölcsőnek nevezhető térségekben születnek. Naprendszerünk közelében, tőlünk 1500 fényévre, az Orion csillagképben is van egy ilyen, szabad szemmel is látható csillagbölcső, a 20 fényévnyi átmérőjű Orion-köd. A csillagbölcsők hatalmas gázfelhőkből alakulnak ki, a csillagvárosok legnagyobb méretű alakzatai közé tartoznak, átmérőjük néha a 300 fényévet is elérheti. Nemrég fedeztek fel a Skorpió csillagképhez közel, tőlünk 407 fényévnire egy éppen alakuló csillagcsoportot, amelyet egyelőre kb. 300 igen fiatal, átlagban 300 ezer éves csillag alkot.

Kezdetben a csillagvárosok legbelső tartományában kialakult óriáscsillag környezetében indulhatott meg a csillagbölcsők kialakulása és a folyamat onnan terjedhetett tovább. Mint tárgyalni fogjuk, a nagyobb tömegű, szupernóvává fejlődő csillag kérge robbanásszerűen leszakad és a szétrepülő anyagának lökéshulláma hatalmas, 1000-10000 km/sec sebességgel terjedő gömbövet alkot. A gömböv sugarának növekedésével a benne lévő anyag sűrűsége csökken. Ha a lökéshullám egy nem túl távoli, ám addig még nyugalomban lévő nagyobb gázfelhőn söpör át, megkavarja a gázt. Az kialakuló csomósodásokból nagyobb tömegű csillagok is kialakulhatnak. Ha a csillag nagyobb tömegű, gyorsabban fejlődik, ahogyan ezt hamarosan tárgyalni fogjuk. Egyesek közülük akár egymillió éven belül szupernóvává alakulhatnak és robbanásaiknak lökéshullámjai a hatalmas gázfelhő addig nyugalomban lévő tartományain is végigsöpörnek. Tömörítik a gázfelhő útjukba eső anyagát, ami újabb csillagok keletkezéséhez vezet. A láncfolyamat igen gyors, mert pár száz fényév alatta a kisebb sebességű lökéshullám is fényévnyi távolságokat fut be. Pár ezer éven belül a csillagkeletkezés a teljes csillagbölcsőre kiterjed. Alig két milliárd évvel az ősrobbanás után, az akkor fiatal csillagvárosokban igen nagy számban, nagyobb térségekben keletkezettek csillagok.

**Gázfelhő öngerjesztő összehúzódása.** Az összehúzódás öngerjesztő folyamat. Minél közelebb kerülnek egymáshoz a tömegek, a tömegvonzás annál erősebb, ennél fogva az összehúzó hatás még kifejezettebb. Minél nagyobb az összehúzódó gáz tömege, annál erősebb a gázfelhőt összehúzó erő. Ezért a csillag kialakulásának folyamata és fejlődése annál gyorsabb, minél nagyobb a tömege.

Kezdetben a csillag sötétén kavargó, tömörülő, a középpontja felé haladva sűrűsödő anyagfelhő, melyben a tömegvonzás egyre erősebb. Mivel a vonzó kölcsönhatásokra a kölcsönhatási energia előjele negatív, lásd a 6.1. szakaszban, az erősödő tömegvonzásnak megfelelő kölcsönhatási energia annál kisebb lesz, minél sűrűbb az anyag (a nagyobb abszolút értékű negatív szám a kisebb!). Emiatt a gravitációs összehúzódáskor energia szabadul fel, ami az ottani részecskék mozgási energiájává, azaz hővé alakul. Mivel a hőmérséklet ott magasabb, ahol nagyobb a gáz sűrűsége, azért bentebb magasabb és középen lesz a legmagasabb. Ahogy nő a hőmérséklet, a gáz atomjai és molekulái egyre hevesebb módon ütköznek egymással és a fotonok is mind nagyobb energiájúak. Egy idő után a hőmérséklet növekedésével beindul a molekulák majd az atomok gerjesztődése. Sugározni kezdenek és a kialakuló csillag ekkor válik láthatóvá.

Meg kell jegyezni, ha az összehúzódó gázfelhő forgott, akkor tömegének egy része a perdület megmaradása miatt a csillagon kívül marad. Azaz a csillaggal együtt bolygók, gyorsabb forgás esetén kettőscsillagok is keletkezhetnek.

**Csillag egyensúlyi állapota.** A kisugárzott fény és a szétrepülő elektronok és ionok által kifejtett nyomás nem tudja megakadályozni a gravitációs összehúzódást. Ez egészen addig tart, amíg a csillag belsejében el nem éri a 3 millió Kelvint. Ekkor indulnak be a magreakciók. Ahogyan már tárgyaltuk, a vonzó magerő csak akkor kezd hatni, ha a két proton egymás közvetlen közelébe kerül, lásd a 3.2. szakaszban. De az éppen egymással szembe repülő protonok a között fellépő Coulomb-taszítás egyre hevesebbé válik, és emiatt mind erősebben lassulnak. Csak akkor kerülhetnek egymás közvetlen közelébe, ha eléggé nagy sebességgel indultak el egymás felé. A 3 millió Kelvin hőmérsékletű plazmában a protonok egy része már annyira gyors, hogy beindulhatnak az atommagfolyamatok.



Az egymással magreakcióba lépő protonok végül is hélium atommaggá olvadnak össze. Úgy is mondható, hogy a csillagot alkotó protonok hélium atommagokká égnek el. A magátalakulások során négy protonból, - több közbenső folyamaton át - hélium atommag, két pozitron, neutrínók és fotonok keletkeznek. Mivel a hélium atommag és a két pozitron össztömege 0,7%-kal kisebb, mint a nyersanyagául szolgáló négy proton tömege, a tömegkülönbségnek megfelelő energia szabadul fel. Emiatt a csillag belső tartományában megnő a nyomás, amelynek felfúvó hatása megállítja a tömegvonzás által gerjesztett összehúzódást. Egy napnyi tömegű csillag 50 millió év alatt éri el ezt az állapotot.

**Barna törpe.** Csak olyan csillag magjában nőhet 3 millió Kelvinre a hőmérséklet, amelynek össztömege elég nagy, legalább akkora, mint a Jupiter tömegének 75-szöröse. Ez a naptömeg 8%-ának felel meg. Vannak ennél kisebb tömegű, barna törpének nevezett csillagok is. Ezek központi tartományában is zajlik energiatermelő atommag folyamat, de bennük a proton és a deuteron között. Ugyanis deuteron és proton összeolvadásához, - a deuteron egy protonból és egy neutronból áll, - már egymillió fokos hőmérséklet is elegendő. Egymillió fokra a 13 Jupiter tömegnél nagyobb tömegű csillagok belseje hevülhet fel. Ennek megfelelően a barna törpe csillag tömege 13-75 Jupiter tömeg közé esik. Felszíni hőmérséklete alig 2000 Kelvin, viszonylag gyorsan elégeti deuteronkészletét, és csak százmillió évig fénylik. A hozzánk legközelebbi barna törpe 6,5 fényévre van tőlünk.

**Csillagok tömege és élettartama.** Egy csillag élettartamát az határozza meg, hogy milyen gyorsan égeti el a belsejében lévő hidrogént. A kb. 75 Jupiter-tömegű csillagok fénye épp hogy csak pislákol, Nagyon hosszú idő, tíz- vagy akár száz milliárd évek kellenek ahhoz, hogy hidrogénkészletük elégjen. Egy naptömegű csillag mintegy 10 milliárd évig marad egyensúlyi állapotban. Vannak azonban olyan csillagok is, melyeknek tömege a Nap tömegének tízszerese, a legnagyobbaké a naptömeg sokszázszorosát is elérhetik. Mivel a nagyobb tömegű csillagok összehúzódása gyorsabb, ezért egyensúlyi állapotuk életideje rövidebb. Például a Napnál tízszer nagyobb tömegű csillag 2 millió éven belül égeti el hidrogénkészletét. Élettartama a Nap élettartamának ötezred része, fényereje a Nap fényességének ötvenezerszerese.

**Vörös óriás, vörös törpe.** Ahogyan a csillag magjában fogy a hidrogén, csökken a termelődött és kifelé áramló energia mennyisége és emiatt a belső nyomás is csökken. Ha a csillag tömege a naptömeg 40%-ánál nagyobb, a tömegvonzás hatására a csillagfelhő tovább sűrűsödik. Emiatt a korábbi sűrűség és így hőmérséklet érték most egy, a központtól távolabb fekvő gömbrétegnek lesz a sűrűsége és hőmérséklete. Így a hidrogént égető csillagbelső térfogata, valamint a központi rész hőmérséklete fokozatosan nő. Azaz ahogyan fogy a csillag belsejében a hidrogén, úgy tolódik kijebb a hidrogént égető övezet határa és a csillag térfogatának mind nagyobb részét foglalja magába. Ezzel a csillagban mind több energia keletkezik. Így a hidrogén fogyásával a csillag fokozatosan fényesedik és mind nagyobbra fúvódik.

Tömegétől függ a felfúvódó csillag további sorsa. Ha a csillag tömege a 0,4-8 naptömeg között van, akkor a keletkezett nagyobb mennyiségű energia felfújja a csillagot. Egyre nagyobb és ragyogóbb lesz és a vörös óriásnak nevezett állapotba kerül. Elvesztheti tömegének egy részét, mivel olyan nagyra fúvódik fel, hogy rezgései és rengései során az illékonyabb hidrogéngáz egy része leszakadhat róla. Amint a felfúvódó csillagban elfogy a hidrogén, energiatermelő folyamat hiányában a tömegvonzás összehúzza a csillagot.

Ha a csillag tömege kisebb, mint a naptömeg 40%-a, és a hidrogén fogyása miatt csökken a belső nyomás, a tömegvonzás már nem elég nagy ahhoz, hogy a csillagbelső sűrűségét tovább növelje. Ehelyett a külső rétegekből hidrogénben dúsabb gáztömegek áramlanak a csillag belsejébe és a hidrogén égetésének sebessége változatlan marad. A csillagfelszín hőmérséklete sem nő 3500 Kelvin fölé. A csillagot vörösnek látjuk, mivel az infravörös sávban sugároz. Az ilyen, vörös törpének nevezett csillag élettartama akár a billió évet is elérheti. Emiatt a világegyetemben még nem hunyt ki vörös törpe. A Tejútrendszer csillagainak 75%-a vörös törpe, de a színük miatt alig látszanak. Egyes feltételezések szerint a barna törpékből van több, de őket még nehezebb észrevenni. Vörös törpék a hozzánk legközelebbi csillagok, így, a Proxima Centauri is.



**Fehér törpe, a szén és egyéb nehezebb elemek képződése, az emberarcú világegyetem.** Miután a felfúvódó csillag hidrogénje elégett ill. megszökött, az összehúzódó, héliumból álló csillag mind kisebb térfogatú és eközben növekvő hőmérsékletű ragyogó fehér csillaggá, fehér törpévé sűrűsödik. Anyaguknak sűrűsége mintegy milliószorosa a víz sűrűségének. A hélium atommagok összeolvadásához jóval magasabb hőmérséklet kell, mivel a hélium atommag töltése két protonnyi és emiatt a két hélium atommag között fellépő taszító Coulomb taszítás  $2 \cdot 2 = 4$ -szer akkora, mint a két proton közötti taszítás. Úgy 100 millió fok körül indulhat be a hélium atommagok összeolvadása. Végeredményként három hélium atommagból egy szénatommag képződik. Ez a folyamat a hidrogén égésénél sokkal gyorsabb.

Először két hélium atommag összeolvadásából berillium atommag képződik. Azonban a keletkezett  ${}^8\text{Be}$  izotóp nem állékony, a természetben csak a  ${}^9\text{Be}$  atommag fordul elő. Nagyon gyorsan,  $10^{-16}$  másodpercen belül két hélium atommagra esik szét. Annak valószínűsége, hogy ezalatt a  ${}^8\text{Be}$  atommag újabb hélium atommaggal olvadjon össze, igen kicsi. Márpedig a  ${}^{12}\text{C}$ , a szén atommagja csak így keletkezhet. Viszont a  ${}^8\text{Be}$  - hélium ütközés valószínűsége éppen egy olyan energiánál mutat rezonanciaszerű növekedést, lásd a 3.2. szakaszban, amely a héliumot égető csillagmag hőmérsékletének megfelelően igen szűk energiatartományban van. Ennyire kis energiánál a rezonanciaszerű ütközés nagyon ritka. Kivételesen szerencsés véletlen, hogy a rezonanciaenergia és a csillagbelső hőmérsékletének lásd a 3.2. szakaszban, megfelelő ütközési energiák egybeesnek. Emiatt keletkezik a világegyetemben elég szén és csak így képződhetnek a magasabb rendszámú elemek. Ez a ritka egybeesés képezi a kozmológia antropikus elvének, magyarul az emberarcú világegyetem elvének alapját.

Szén addig képződik, amíg a csillag magjában fogyni nem kezd a hélium. Mivel emiatt a magfolyamatokban felszabaduló energia és ezzel a tömegvonzást ellensúlyozó belső nyomás is csökken, a csillagmag tovább zsugorodik, hőmérséklete egyre nő. Beindulhat az oxigén képződése, az oxigén atommag hélium és szén atommag összeolvadásából keletkezik. Mialatt csillagbelső összehúzódása miatt emelkedik a hőmérséklet, a csillag héjaiban különböző összeolvadásos folyamatok zajlanak, belül oxigén, kijebb szén képződik. Még jobban összehúzódó csillagbelsőben, nagyon magas, milliárd fokos hőmérsékleteken a szénatommagok magnéziummá olvadhatnak össze.

A fehér törpe sorsa tömegétől függ. Ha a tömege nem elég nagy, kisvilágtani hatások miatt a tömegvonzás nem képes teljesen összehúzni. Ugyanis a határozatlansági összefüggések miatt, lásd a 2.2. szakaszt, a dobozba zárt részecskék energiája nem lehet nulla. Minél kisebb a térfogat, ahová a részecskék beszorulnak, a lendületük és így az energiájuk annál nagyobb lesz. Ez a hatás a kis tömegű elektronok esetén válik fontossá. Az 1,4 naptömegnél kisebb tömegű fehér törpék térfogata annyira kicsiny, és emiatt az elektronjainak energiája és így nyomása annyira nagy, hogy ellensúlyozza a tömegvonzás összeroppantó hatását.

**I. és II. típusú szupernóva.** Ha a vörös óriás csillag 1,4 naptömegnél nehezebb fehér törpévé válik, akkor a fehér törpében zajló elemképződés során vas is keletkezik. Mivel a vas a legerősebben kötött atommag, a vas környéki atommagok lesznek az utolsók, melyek keletkezése során energia szabadul fel, lásd az 3.2. szakaszban. Ezért ha egy csillag belsejében vas is keletkezik, miután a csillagbelső vassá alakult, a csillag összeroppan, mivel ezután már nem indul be olyan energiatermelő folyamat, amely ellensúlyozhatná a tömegvonzás összehúzó hatását. Az összeomló csillagot szupernóvának nevezik. A tömegvonzásos összeomlás során annyira sok energia szabadul fel, hogy a szupernóva fényessége pár hétig akkora, vagy nagyobb lehet, mint az őt tartalmazó csillagváros fényessége. Emiatt nagyon feltűnő égi jelenség. A vasnál magasabb rendszámú elemek az összeroppánás során zajló, energiát fogyasztó magfolyamatokban keletkeznek, a felszabaduló energia egy része elemképződésre fordítódik.

Amikor a szupernóva végleg összeroppan, a belsejében felszabaduló óriási energiák az elemképződéses magfizikai folyamatok során keletkezett neutrínók és ellenneutrínók energiájaként tör a felszínre. A neutrínók lökéshulláma leveti a csillag kérgét. A szupernóva-robbanásnak nevezett folyamat során hatalmas, a periódusos rendszer valamennyi elemét tartalmazó anyagfelhő dobódik le szupernóva felszínéről.

A felszínről leszakadó, gömbhéj alakú, a világűrbe jutott anyagfelhő lökéshullámának terjedési sebessége 1000-10000 km/sec. Földünk és így a testünk anyaga is szupernóva-robbanások során keletkezett.

Egyedül a hidrogén hiányzik a fehér törpéből kialakuló szupernóvában, mivel az már a fehér törpét megelőző vörös óriás állapotban kiégett a csillagból. A hidrogént nem tartalmazó szupernóvát I. (egyres) típusú szupernóvának nevezik.

Ha a csillag tömege nagyobb, mint a Nap tömegének nyolcszorosa szupernóvává fejlődése meglehetősen gyors. Mialatt óriás csillaggá fúvódik fel és még égeti a hidrogént, aközben a magja annyira gyorsan húzódik össze, hogy hamar létrejönnek a fentebb tárgyalt atommag összeolvadásos övezetek, egészen a vasig. Az ilyen sokhéjú izzó csillagot szuper óriásnak nevezik. Mind erősebben fénylik és szupernóvává alakul. A hidrogént is tartalmazó szupernóvát II. típusú szupernóvának nevezik. Kivételes szerencse, hogy 1987-ben a tőlünk 160000 fényévnnyire lévő Nagy Magellán felhőben sikerült ilyen közeli, II. típusú szupernóva robbanását észlelni. Az évekkel a robbanás után készült felvételek szépen mutatják a szupernóvát és lökéshullámát.

Kb. a csillagok 10%-a jut el szupernóva állapotba. A világegyetemben durván másodpercenként, a Tejútrendszerben 30-50 évente történik szupernóva-robbanás, eddig kb. százmillió ilyen esemény zajlott le csillagvárosunkban.

**Ia típusú szupernóva.** Mint tárgyaltuk, az 1,4 naptömegnél kisebb tömegű fehér törpékben leáll az energiatermelő folyamat és az anyaga vasnál kisebb rendszámú elemiből állhat. Ha viszont egy, a tömeghatár közelében lévő fehér törpe kettőscsillag egyike, akkor csillagtársától gázfelhőket ragadhat el és újra beindul benne a magasabb rendszámú elemek képződése. Ha annyira sok anyagot sikerül magához vonzania, hogy a tömege átlépi az 1,4 naptömeges határt, akkor eljut a vas kialakulásáig és a csillag szupernóvává fejlődik. Az így kialakuló szupernóvát Ia típusú szupernóvának nevezik. Mivel ez a legkisebb tömegű szupernóva, a fejlődése lassabb és egyben ez a leghosszabb ideig fénylő szupernóva. Mivel tudjuk, mekkora az Ia típusú szupernóva valódi fényessége, mérve a látszólagos fényességét, a távolsága meghatározható, lásd a 5.1. szakaszt. Így sikerült távoli, akár nagyon távoli csillagvárosok távolságát is pontosabban mérni és ezzel a világegyetem gyorsuló tágulását felfedezni, lásd a 5.4. fejezetet. Tejútrendszerünkben kb. 300 évente keletkezik Ia típusú szupernóva.

**Neutroncsillag és fekete lyuk.** A szupernóvarobbanás után visszamaradt anyag mind jobban sűrűsödik és annyira sok energia szabadul fel az összehúzódás során, hogy az elektronok befogódhatnak az atommagokba és az atommagok protonjai neutronná alakulnak. A csillag teljes tömege atommagnyi sűrűségűre tömörödik, ezért az egész csillag egyetlen hatalmas, neutronokból álló atommag. 10-15 kilométer között lehet a neutroncsillag sugara. Köbcentiméterenként százmilliárd tonnányi anyagot tartalmaz, ami azt jelenti, hogy a neutroncsillag sűrűsége a fehér törpe sűrűségének százmilliószorosa.

Mivel a neutron kis mágnesűként viselkedik és ezek a neutroncsillagban párhuzamosan állnak be, a neutroncsillagnak hatalmas mágneses tere van. Ha ennek iránya nem esik egybe forgástengelyének irányával, forgó mágnesként sugároz, emiatt pulzárnak is nevezik. Az eddig talált lelassabban forgó pulzár forgási ideje 23,5 másodperc, a leggyorsabbé 1,4 ezredmásodperc. Eddig a Tejútrendszerben kb. ezer pulzárt fedeztek fel. A Rák-ködben történt szupernóvarobbanás maradványa is pulzár, forgási ideje 30 ezredmásodperc.

Észleltek már annyira különleges neutroncsillagokat is, hogy felmerült a kvarkcsillagok létezésének gondolata. Ezeknek belsejében a kvarkok kiszabadulhatnak neutronba való bezártságukból és a csillag anyagát, vagy annak egy részét kvarkanyag alkotja.

Ha a szupernóva-robbanás utáni maradvány 3 naptömegnél nagyobb, akkor a neutroncsillag állapot sem tartós számára. A tömegvonzás a benne lévő neutronokat is összeroppantja és a csillag sugara a csillag  $r_c = 2GM/c^2$  Schwarzschild sugárnál, lásd a 1.4. szakaszban, is kisebbé válva fekete lyukká alakul. A fekete lyukká összezuhant csillag gravitációs tere annyira erős, hogy még a fény sugar sem hagyhatja el, mert a kibocsátott fénysugarat a tér visszagömbíti. Ezért a csillag a szó szoros értelmében láthatatlanná

válí. Csak tömegvonzásának hatásait észlelhetjük. Ha a fekete lyuk kettős csillag egyik tagja, akkor társa, melynek fényét észleljük, pályamozgást végez a fekete lyuk körül. Ebből a pályamozgásból állapítható meg a láthatatlan társ csillag, a fekete lyuk tömege. Továbbá a dagály jelenségéhez hasonlóan a fekete lyuk izzó gázt ragadhat magához a társ csillag felszínéről. Miközben gáztömegek zuhannak a fekete lyukba, hatalmas energiájú protonok keletkeznek, ezeket nagyenergiájú kozmikus sugárzásként észleljük.

Fekete lyuk nem csupán csillag összeomlása végén alakulhat ki. Ahogyan a csillag kialakulásakor a tömegvonzás hatására az anyag a csillag közepén válí a legsűrűbbé, a sötét anyag is az anyageloszlások közepén lesz a legsűrűbb. Kezdetben, a csillagvárosok kialakulásakor hatalmas tömegű fekete lyukak keletkeztek a csillagvárosok közepén, ezek kialakulásában a csillagvárosok anyagát alkotó sötét anyag összeomlása lehetett meghatározó. Ezeket régebben kvazároknak nevezték. Mint említettük, a Tejútrendszer középpontjában is van egy többmillió naptömegű fekete lyuk. Az óriás fekete lyukak hatalmas mennyiségű anyagot szippantanak magukba környezetükből. Eközben roppant erős, igen nagy energiájú sugárzásokat bocsátanak ki. Tejútrendszerünk központja most éppen nyugodt, de alig kétszáz éve hatalmas kitörések színhelye volt.

Mivel fekete lyuk képződésére alkalmas nagyobb tömegű örvénylő gázfelhők elsősorban a Tejútrendszer közepén vannak, a fekete lyukak jó része itt keletkezett. A másutt képződők, akárcsak a többi csillag, a Tejútrendszer középpontja körül keringenek. Eközben gravitációs hullámokat sugározva energiát veszítenek, lásd a 1.4. szakaszban, és ezzel egyre kötöttebb, kisebb sugarú pályákra kerülnek. Minél nagyobb tömegűek, annál gyorsabban veszítik az energiájukat és emiatt a másutt kialakuló fekete lyukak nagy többsége ma már a hatalmas központi fekete lyukhoz igen közel lévő pályákon kering. Emiatt a Tejútrendszer legbelső, 6 fényév sugarú magján kívül a teljes, 100 ezer fényéves méretű Tejútrendszerben csupán körülbelül 60 fekete lyukat találtak, míg a 6 fényéves sugáron belül tízezernyi fekete lyuk figyelhető meg (2018 áprilisi közlés).

## 6.8. Bolygók

Naprendszerünk bolygói a Nap körül egy síkban, ellipszis pályákon keringenek. Maga a Naprendszer a Tejútrendszer középpontjától mintegy 26100 fényévre található és a középpont körül kering. Keringési sebessége mintegy 240 km/sec és a galaktikus évnak nevezett 200 millió év alatt kerüli meg a Tejútrendszer középpontját.

Arra, hogy miként alakul ki bolygórendszer, még nincs általánosan elfogadott leírás. Ha a csillag nyersanyagául szolgáló anyagfelhő forgásban volt, akkor a felhő perdülete, amely megmaradó mennyiség, nem engedi a teljes összehúzódást. Akárcsak amikor a pörgő jégtáncosnő behúzza a karjait és forgása felgyorsul, az összehúzódó felhő is egyre sebesebben pörög. Emiatt egy része kint reked a csillagból és bolygóvá vagy bolygóközi anyaggá válí. Minél sebesebben forgott, anyagának annál nagyobb része szorul kívülre és nagyobb lesz bolygóinak tömege is. Ha a kezdeti anyagfelhő perdülete elég nagy, a bolygókon kívül még egy vagy több csillag is keletkezhet. Hogy miként oszlanak meg a bolygók tömegei, attól is függ, hogy az összehúzódást beindító hatások mekkora egyenetlenségeket idéztek elő a gázfelhőn belül.

Ma már meg tudjuk állapítani, hogy a születő csillag körül vannak-e porfelhők. A por elnyeli a csillagfény ibolyántúli sugarait, eközben felmelegszik és infravörös sávban sugároz. Így a csillag színekéből megállapítható, hogy van-e porfelhő körülötte és az mekkora. A porfelhőkből kisebb-nagyobb kőzetdarabok, majd ezekből bolygók állnak össze.

1992-ben fedezték fel az első, Naprendszeren kívüli bolygót. Észlelésükre, tulajdonságaik vizsgálatára számos módszer van, például amikor a bolygó a Földről nézve a napja előtt halad át, azt megfigyelve nemcsak a bolygó nagyságát és pályadatait határozhatjuk meg, hanem a napja felszínéről érkező fény színeképeinek finom változásaiból a bolygó légkörének összetételére is kapunk adatokat. Eddig közel 4000 naprendszeren kívüli bolygót (exobolygót) fedeztek fel. Méretük és tömegük alapján két csoportba oszthatók. Egy részük sugara kb. 1,5 földszugárnyi, ezek szilárd halmazállapotúak, a többiek sugara kb. 2,5

földsugárnyi. 200-500 Celsius fok hőmérsékletű vízgőz réteg veszi körbe őket, amely alatt víz, mélyebben jég, majd a szilárd, kőből álló mag található. Valószínűleg a Naprendszer óriásbolygóihoz, a Jupiterhez, Szaturnuszhoz, Uranuszhoz és a Neptunuszhoz hasonlóan alakultak ki.

Ha a bolygó a csillaghoz elég közeli, a felszíne túl meleg és az ott lévő víz gőzként van jelen. Ha távolabb van a csillagtól, a felszíni hőmérséklete túl alacsony és a felszíni víz jéggé van fagyva. A csillag lakható övezetét a csillag körüli gömbhéj alkotja, a gömbhéjban található bolygók felszínén a víz cseppfolyós. A megfigyelések alapján feltételezhető, hogy minden ötödik Naphoz hasonló csillag lakható zónájában kering legalább egy Földhöz hasonló bolygó, a legközelebbi 12 fényévre lehet tőlünk. Becslések szerint a Tejútrendszerben 10 milliárd lakható Föld-méretű bolygó lehet. Ha a vörös törpék körül keringő hasonló tulajdonságú bolygókat is számba vesszük, a Tejútrendszer 40 milliárd lakható bolygót tartalmazhat.

## 7. Naprendszer és Föld

### 7.1. Naprendszerünk születése

Naprendszerünk jelen ismereteink szerint a következőképpen alakult ki. 4,568 milliárd évvel ezelőtt csillagbölcsőnkben szupernóva-robbanások történtek, lásd a 6.7. szakaszt. Lökéshullámai, a szétrepülő burkok gázt, port, kisebb kőzet és kavicsdarabkákat tartalmaztak. A 4,568 milliárd éves életidő a Naprendszer legősibb kődarabkáinak radioaktív módszerrel meghatározott kora, a mérés pontossága 1 millió év. Ma is érkeznek hozzánk, meteoriként csapódnak be Földünk felszínére. Amint az eredeti gázfelhő és a szupernóvákból kitörő gáz és por ütközött, porral és szemcsékkel szennyezett örvénylő gázfelhő terelődött össze, ebből alakult ki a Naprendszer és vele együtt csillagbölcsőnk sokmillió csillagai is. Az üstökösök naprendszerek közötti pályákon mozognak, találtak már olyan meteoritkövet is, amelyben az elemek összetétele és a benne lévő vegyületek is különböznek a Naprendszert jellemzőektől.

Mivel a Naprendszer nyersanyagául szolgáló gázfelhő forgott, bolygórendszer alakult ki körülötte. Naprendszerünk teljes tömegének kb. 99,85 százalékát a Nap tömege teszi ki, azaz a bolygók, a kisbolygók, a bolygóközi por tömege együttesen a Naprendszer tömegének alig másfél ezreléke.

A Nap 23,5 nap alatt fordul meg a saját tengelye körül. Valamennyi bolygó és a bolygók holdjai közül is majdnem mindegyik ugyanabba az irányba kering a Nap körül. Ennek megfelelő a Nap, a bolygók és holdjaik saját tengely körüli forgása is. Kivétel a Vénusz és az Uránusz tengely körüli forgása, eltérő irányú forgástengelyük valószínű hevesebb, a forgást befolyásoló ütközések hatásával magyarázható. Mindez meggyőzően bizonyítja, hogy a teljes Naprendszer egyetlen hatalmas pörgő anyagfelhőből keletkezett.

Az eredeti gázfelhőjébe belekerült, a különböző szupernóvarobbanásokból származó por egyenletesen terült szét benne. Napunk tömegének kb. 98%-a hidrogén és hélium, a nehezebb elemek a Nap tömegének kb. 2%-át teszik ki. Eltekintve az illékony gázoktól, a Nap, a Föld és a Hold és a meteoritok átlagos anyagösszetétele lényegében azonos, a Hold összetételét a Holdra szálláskor gyűjtött holdkőzetekből ismerjük. Ez is alátámasztja, hogy a Naprendszer egy időben, ugyanabból az anyagkészletből keletkezett.

**Meteorok hullása.** Naponta 100 tonnányi por és kőzet, meteorit érkezik a világűrből a Földre. Legkönnyebben a jéggel borított Antarktiszon gyűjthetők, mivel a fehér felszínen azonnal, messziről észre lehet venni a égből érkezett köveket. Hogy a Naprendszer mely térségeiből érkeznek, ma sem tudjuk pontosan. Amikor a lakásban törölgetünk vagy porszívózunk, részben a világűrből érkezett finom port távolítjuk el.

2013. február 15-én Oroszországban, a szibériai nagyváros, Cseljabinszk közelében egy kb. 10 ezer tonnás, 19 méter átmérőjű meteorit csapódott be. Erős fényjelenség és hangrobbanás kísérte a napfelkelte után történt, fél percen át észlelhető eseményt, amelyet számos videofelvétel is rögzített. Amint a 65 ezer km/h sebességű meteor belépett a légkörbe és lassulni kezdett, előtte összenyomódott, mögötte pedig megritkult a levegő és a hatalmas nyomáskülönbség darabjaira szaggatta. Az autóbusznyi meteor az észlelések

kiértékelése alapján 20 kilométer magasságban robbant fel. Ennek során harminc hirosimai bombának megfelelő energia szabadult fel. A hangrobbanás lökeshulláma nagyon sok ablakot kitört és az üvegszilánkok 1500 embert sebesítettek meg. Csillagászati becslések alapján hasonló becsapódás évszázadonként egyszer várható.

**A Nap.** Magjának hőmérséklete kb. 14 millió fok, hidrogénkészlete 10 milliárd év alatt alakul héliummá. Élete derekán tart, eddig hidrogénkészlete felét égette el. 100 millió évente 1%-kal lesz fényesebb, mai fényessége 30%-kal nagyobb, mint amekkora 4,5 milliárd évvel ezelőtt volt. 5 milliárd év múlva, elfogyasztva a belsejében lévő hidrogénkészletet, vörös óriássá alakul. Majd fehér törpecsillaggá válik, héliumot égetve kevéske szén is termelődik benne.

Sugara 700000 kilométer és a magfolyamatokban keletkezett energia, mivel a belsejében lévő sűrűbb plazma elnyeli a fotonokat, bonyolult áramlási folyamatok során jut a felszínre. Azaz a Nap által most kisugárzott energia egymillió évvel ezelőtti magfolyamatokban szabadult fel. A Nap felszínén robbanás-szerű kilövellések, napkitörések jellemzik a folyamatot. A Nap sugárzása a fotoszférának nevezett kb. 400 km vastag, átlagosan 5780 Kelvin hőmérsékletű tartományból indul. Itt a plazma már nem annyira sűrű, a belőle induló fotonok jórésze már nem nyelődik el, hanem kisugárzódik.

**Napszél és bolygók.** Miközben a Napot alkotó anyagfelhők a központ felé húzódtak, a bolygók övezetében lévő por és kőzetdarabkák is vonzották egymást. Összetömörödve egyre nagyobb darabok keletkeztek. Almányi kőzetdarab kialakulásához közel száz év szükséges, földnyi nagyságú bolygó százmillió év alatt képződhetett. Földünk 4,5 milliárd éve jött létre.

A Nap már jóval hamarabb működni kezdett. A napkitörések során kiáramló, nagyenergiájú töltött részecskékből, elsősorban protonokból álló napszél golyóként ütközött az útjába eső hidrogénnel és héliummal és a Naprendszer külső tartományaiba lökte, fújta ki őket. Nemrég sikerült megmérni a napszél részecskéinek sebességét. Legalább 200 km/sec sebességgel repülnek és kevesebb mint 10 nap alatt jutnak el a Földre. A földmágneses tér eltéríti őket és sarki fényként észlelhetők. Erősebb napkitörések, napviharok idején a részecskék már 2-4 nap alatt ideérnek és behatolnak a légkörbe, mivel a nagyobb sebességű részecskéket a földmágneses tér csak kevésbé téríti el.

1859. szeptember 1-én rendkívüli erős napvihar érte el a Földet, Észak-Amerika térségét bombázta. Utólagos számítások szerint a nagyenergiájú részecskék kevesebb mint 18 óra alatt értek ide. Olyan erős volt a sarki fény, hogy azon az éjszakán Észak-Amerikában egészen Közép-Amerikáig újságot lehetett olvasni. Annyira erős földmágneses viharokat keltett a kitörés, hogy valamennyi távíró és más villamos berendezés üzemképtelenné vált és a távíró hivatalokban kitört tüzek számos áldozatot követeltek. Ez akkor nem rendítette meg annyira a mindennapokat, de ma felmérhetetlen következményekkel sújtana bennünket. 2012 júliusában a Nap túloldalán történt hasonló energiájú kitörés. Szerencsére Földünkről csak egy hét elteltével vált láthatóvá a kitörés helye, de egy, a Nap körül a Földnél kisebb sugarú pályán keringő műhold észlelte a kitörést és mérte az erősségét és terjedési sebességét.

A napszél miatt a Naphoz közelebbi övezetből eltűntek a gázok. Kristályosodott fém-oxidokból és fém-szilikátokból épültek fel a belső égitestek: a Merkúr, Vénusz, Föld, Hold, Mars, míg a Naptól távoli bolygók, a Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz hatalmas gázfelhőkből, hidrogénből, héliumból és metánból képződtek. A belső tartományokból kifújt gáz elsősorban a Jupiter tömegét gyarapíthatta.

## 7.2. Föld fejlődése

**Föld belső szerkezete.** Amint a tömegvonzás a Földet alkotó köveket és porfelhőt összehúzta, az anyag sűrűsödése során felszabaduló gravitációs energia felhevítette, majd megolvasztotta a szilárd anyagot. A kialakuló bolygót a becsapódások során keletkezett hő, valamint az elemek radioaktív bomlása során felszabaduló energia is hevítette. 4,5 milliárd évvel ezelőtt a radioaktivitás szintje még sokkal magasabb volt. A

megolvadt földgolyóban megindult az elemek áramlása. Lefelé, a magba a nehezebb elemek süllyedtek, a könnyebb elemek felfelé törekedtek. Az átrendeződési folyamat nem fejeződhetett be, mert a lehűlés során a Föld kérge megszilárdult. Földünk kőzeteinek kora a kőzetekben található izotópok arányából határozható meg. Mérve valamelyik, még meglévő radioaktív elem és egy olyan izotóp arányát, amely a bomlása során csak belőle keletkezhetett, a kőzet megszilárdulásának időpontja egyszerűen megkapható.

Földünk sugara 6371 kilométernyi és belsejét a földrengések rezgéshullámaint észlelve tanulmányozhatjuk. Ezek hanghullámok, csak nem a levegőben, hanem a Föld felszíne mentén és a Föld belsejében terjednek. Terjedési sebességeik a közeg összetételétől és hőmérsékletétől is függenek. A közeghatárhoz érő földrengéshullámok visszaverődhetnek vagy törést szenvedve behatolhatnak a közegbe és bolygónk belsejét átjárva mintegy 'átvilágítják' a Földet, akárcsak az ultrahang az embert. Szerte a különböző földrészekben megfigyelőállomások működnek, ahol felfogják és rögzítik a keletkezett földrengéshullámokat. Ezeket együtt elemezve térképezték a Föld belsejének szerkezetét.

Földünk magjának sugara kb. 3400 km, a magot nehezebb fémek alkotják. Bár hőmérséklete valószínűleg az 5000 Celsius fokot is meghaladja, a nagy nyomás miatt a földmag belseje szilárd halmazállapotú. Kintebb a nyomás már kisebb, itt a fém folyékony. Vastag, főleg szilíciumot, magnéziumot, vasat és oxigént tartalmazó köpeny fedi a magot. A köpenyt az 5-100 kilométer vastagságú földkéreg takarja, amely az óceánfenéki részekben a 7-11 km, a szárazföldi kéreg 30-40 kilométer, a hegységek alatt 70-100 kilométer vastag.

**Hold kialakulása.** Holdunk a Naprendszer nagyobb bolygóinak egyike, nagyobb, mint a Merkúr. Más belső bolygótól eltérően nincs fémes magja, anyaga a Föld köpenyének anyagával megegyező. Valószínűleg úgy keletkezett, hogy a kezdeti állapotú Föld mintegy 4,4 milliárd éve egy Mars nagyságú bolygóval ütközött és az ütközés ereje a Föld köpenyéből vetette ki Föld körüli pályára a Holdat. Továbbá a becsapódás miatt forog a Föld ennyire gyorsan a tengelye körül, és szintén ennek tulajdonítható az évszakok változása okozó tulajdonság, a Föld tengelyének ferdesége is.

**Föld mint kivételes helyzetű bolygó.** Földünk a Naptól való távolságnak köszönhetően figyelemreméltó egyedi sajátosságokkal rendelkezik. Olyan távol van a Naptól, hogy meg tudta őrizni illó gázfelhőinek egy részét. Ennek köszönhetően víz halmozódhatott fel rajta. Tengely körüli forgásának ideje elég rövid ahhoz, hogy a Nap által kisugárzott energia egyenletesen oszoljon el a felszínén. Nagy tömegű kísérő bolygója, a Hold, az árapály jelenségekkel befolyásolta a földi élet kialakulását.

**Légkör és felszín kialakulása.** Bolygónk eredeti alkotórészei, az összetömörödött por és kőzetdarabkák bőven tartalmaztak rájuk fagyott vizet és egyebet, a napszél csak a szemcsékhez nem kötött illó gázokat tudta kisépíteni. Később a megolvadt kőzetek gáz és gőztartalma a tűzhányók működése során a felszínre tört. Földünk ősi légköre tehát másodlagos folyamatok eredménye, a szemcsék által megkötött gázokból és gőzökből származik. Bolygónk légkörének többi része a Naprendszer belsejét rendszeresen látogató üstökösök anyagából jutott ide, az üstökösök nagy mennyiségű jéggel, széndioxiddal és kisebb szerves molekulákkal terítették be a Földet.

Amint megszilárdult és lehűlt a földkéreg, lecsapódott a felszínre tört vízgőz és kialakult az őstenger. Földrészek még nem képződtek, csak a tűzhányók kialakította szigetek emelkedtek a vízszint fölé. Széndioxid, kevés nitrogén és vízgőz alkották az ősi légkört, nyomokban volt még benne ammónia, metán, kénsav és sósav is. A Földdel ütköző kisbolygók óriási tölcséreket ütöttek a földkérgen. Akár az őstenger vizét is felforraltatta az ütközések energiája. A nagyobb kisbolygók még a földkérget is átütötték, tekintélyes mennyiségű anyagot és energiát juttatva a Föld mélyébe. Egy ilyen erejű ütközést követően akár a földkéreg egésze is megolvadhatott és valamennyi korábban kialakult képződmény eltűnt.

A légkörben lévő széndioxid és vízgőz üvegház gázok, növelik a felszín hőmérsékletét, lásd lentebb. A savak hatására beindult a vegyi mállás, mert a savas víz oldja a kőzetek egyes elemeit. A kioldott elemek

közül legfontosabb a kalcium, amely azután megköti a légkör széndioxidját, miközben mészkő keletkezik. Ha a légkörben kevesebb a széndioxid, csökken az üvegházhatás és alacsonyabb lesz a hőmérséklet. Eközben vízpára csapódik ki a légkörből és az alacsonyabb hőmérséklet miatt még több széndioxidot kötnek meg a tengerek. Ezzel az öngerjesztő folyamattal a Föld felszíni hőmérséklete egyre csökken, miközben a tengerben lévő víztömeg nő.

Az úrból érkező nagyobb tömegű testek becsapódása négy milliárd évvel ezelőtt kezdett ritkulni, az utolsó nagyobb, a földkérget is megolvasztó becsapódás 3,8 milliárd éve történt. Ezután kezdődhetett meg a földrészek kialakulásának és növekedésének kora, a legidősebb kőzetek körülbelül ilyen idős lehetnek. Körülbelül három milliárd évvel ezelőtt kezdett kialakulni a földrészek mai arculata.

### 7.3. Körforgások a Földön

A hőtan főtételei értelmében olyan folyamatoknak kell a Föld felszínén lejátszódnuk, hogy egyrészt a Föld belseje minél gyorsabban kihűljön, másrészt a felszíni, a napfény elnyelődése miatt fellépő hőmérséklet különbségek minél gyorsabban kiegyenlítődjenek. A nagyobb különbségek körfolyamatokba szerveződve egyenlítődhetnek ki gyorsabban. Legfontosabbak a kőzetek, a levegő, a víz és a kémiai elemek körforgásai.

**Kőzetek körforgása.** Bolygónk felszínét részben a belső tartomány lehető minél gyorsabb kihűlését lehetővé tevő kéregmozgások alakítják, ami összetett felszíni képződmények sokaságának kialakulására vezet.

A Föld felszínének 71%-át óceán fedi, a szárazföldek aránya 29%. Ha a földkéreg, lásd a 7.2. fejezetben, merev lenne, a víz, a szelek pusztító hatása egyenesen koptatná a szilárd anyagot és mindent azonos mélységű vízréteg borítana. De a földkéreg állandó változásban van, mivel tucatnyi nagyobb és néhány kisebb, lassan mozgó kéreglemeze van felszabdalódva. Amerika és Európa évente pár centit távolodik egymástól.

Az izzó földmag hevíti köpenyt, amely néha megrottyanva mozgatja a földkéreg lemezeit. A kéreglemezek egymásra csúszásakor hegylancok keletkeznek, mindezt tűzhányók működése, földrengések kísérik. Határt szab a hegységek magasságának, hogy a kőzetek nem bírnak el bármekkora nyomást. Bizonyos hegymagasság fölött a ránehezedő nyomás hatására a hegységet tartó kőzetlemez lemez atomi és molekuláris kötése szakadozni kezdenek, emiatt a tartólemez szilárdsága, olvadáspontja csökken. Emiatt a hegység süppedőben van földkéregbe, hogy a rá ható nyomás csökkenjen és az alapon lévő kőzet megszilárdulhasson. A Himalája magassága a lehetséges magasság közelében van, a Mount Everestnél sokkal magasabb hegycsúcs nem létezhet.

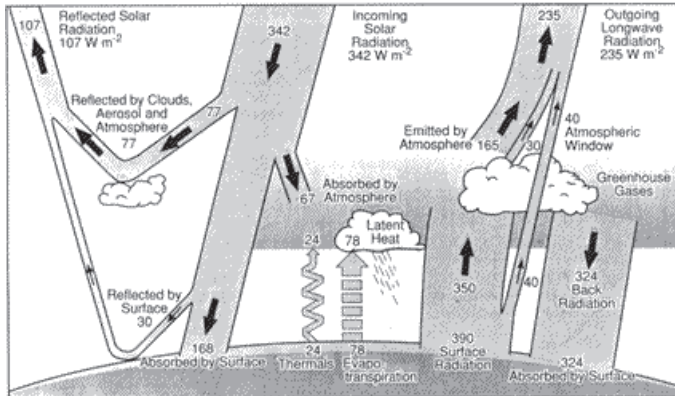
A felszínre került tűzhányói (vulkanikus) kőzeteket a víz, jég és szél munkája pusztítja, majd a felszínt az eső, a szél egyenletessé koptatja és a patakok, folyók a tengerekbe hordják a hegységek anyagát. A hordalék és a tengeri állatok maradványai által képzett üledékből később üledékes kőzetek képződnek. A földkéregbe süllyedt üledékes kőzetek a nagy nyomás és hőmérséklet hatására átalakult, metamorfnak nevezett kőzetté válnak. Átalakult kőzet a márvány is, mely korábban mészvázú tengeri állatokból képződött üledékes kőzetként, mészkőként létezett. A mélyebbre süllyedt mészkövet a kéregmozgások során fellépő nagy nyomások és magas hőmérsékletek márvánnyá alakították. Majd a márvány a feltorlódozó hegységek anyagaként kerül a felszínre.

Az átalakult kőzetek keverednek a köpeny anyagával, majd az így átdolgozott anyagot a tűzhányók a felszínre vetik. Tűzhányói, üledékes és átalakult kőzetek egymásba alakulva alkotják a kéregbeli, az ún. kőzet körforgást, amely már többször is lejátszódott bolygónkon.

**Felszín által elnyelt és kibocsájtott sugárzások.** A Nap sugárzásának fotonjai a 5780 Kelvin felszíni hőmérsékletű test sugárzásának fotonjai. A világűr fotonjainak nagyobb részét a 2,73 Kelvines háttérsugárzás fotonjai teszik ki, lásd a 6.4. szakaszban. Bolygónk felszínének átlagos hőmérséklete 13 Celsius fok,



átszámítva 286 Kelvin. Mivel a sugárzás fotonjainak energiája a sugárzó test felszínének hőmérsékletével arányos, a Föld felszíne által kisugárzott foton energiája közel huszada az elnyelt napsugár foton energiájának. Azaz a felszín huszadrészére darabolva szórja vissza a világűrbe az elnyelt napsugárzás energiáját. Minél több napsugarat nyel el és szór szét a Föld felszíne, annál jobban teljesül a hőtan főtételei, amely a napsugárzás és a háttérsugárzás fotonterei közötti hőmérsékleti különbség minél gyorsabb és teljesebb kiegyenlítését írja elő.



27. ábra. Földünk felszínére  $342 \text{ W/m}^2$  napsugárzás jut. Ebből  $77 \text{ W/m}^2$ -nyit a levegőburok, felhők és a légköri szemcsék,  $30 \text{ W/m}^2$ -nyit a talaj felszíne ver vissza. A felszín által elnyelt teljesítmény  $168 \text{ W/m}^2$ -nyi. A beérkező napsugárzásból  $67 \text{ W/m}^2$ -nyit a légkör nyel el. A felszínről  $24 \text{ W/m}^2$  a levegő felmelegedésével,  $78 \text{ W/m}^2$  párolgási hőként távozik. A felszín hőszugárzása  $390 \text{ W/m}^2$ , ebből  $40 \text{ W/m}^2$  jut ki közvetlenül a világűrbe, a többit a légköri üvegházhatás miatt nyelődik el. A légkör  $324 \text{ W/m}^2$ -nyit sugároz a felszínre. A légkör  $165 \text{ W/m}^2$ -nyi, a felhőzet  $30 \text{ W/m}^2$ -nyi hőt sugároz ki a világűrbe.

Nézzük meg, mi történik Földre érkező napsugárzással. Amint a 27. ábra mutatja, a Föld felszínére leérkező napsugárzás négyzetméterenkénti teljesítménye 342 watt. Ennek kb. felét a talajszint, ötödét a légkör nyeli el, a többit a levegőburok, a felhők, a légköri szemcsék és a talaj felszíne visszaveri. A felmelegedett talajról egyrészt a levegő felmelegítésével, párolgással valamint sugárzással távozik a hő, ugyanakkor a légkör sugárzása is melegíti a felszínt. A sugárzási mérleget a légkör és a talajszint kisugárzása egyenlíti ki.

**Üvegházhatás és világméretű felmelegedés.** A légkör gázainak elnyelőképességéről lásd a 16. ábrát. Eszerint a kisebb hullámhosszú, azaz nagyobb energiájú ibolyántúli (UV) foton hasítja az  $O_2$  oxigén molekulát és a keletkezett oxigén atom oxigén molekulával való egyesülésekor  $O_3$  ózon molekula képződik. Az ózon a nagyobb hullámhosszú, azaz kisebb energiájú UV fotonokat nyeli el.

Ahogy az ábra mutatja, a látható fény tartományában alig van elnyelés. A hosszabb hullámhosszak tartományában főleg a vízgőz és a széndioxid nyeli el a sugárzást. Elsősorban a Föld felszíne sugároz, ennek hatását mérsékli a légköri gázok üvegházhatása.

Az üveg a napfény fotonjait átterszti, az ablakon keresztül illetve üvegházból kisugárzott fotonokat viszont elnyeli majd egyik részét vissza, másik részét pedig kisugározza. A hő csapdázása miatt az üvegház hőmérséklete magasabb, mint a környezetéé. A legalább három atomból álló gázmolekulák, így a vízgőz és a széndioxid üvegház gázok, azaz a napsugárzást áttersztik, viszont a Föld által kibocsátott hőszugárzást nyelik és így hőcsapdaként szolgálnak. Ennek oka, hogy a három vagy többatomos molekulák forgási energiaszintjei közötti különbségek a Föld felszíne által kibocsátott hőmérsékleti sugárzások energia tartományába esnek.

Ha a széndioxid mennyisége csökken, vele csökken a felszíni hőmérséklet. Ha a légkörben a széndioxid felszaporodik, akkor a felszíni hőmérséklet megnő. Továbbá a lehűlés miatt a Föld felszínén lévő hó és jég felszaporodása a hőmérséklet további csökkenéséhez vezet, ugyanis a hó és jég visszaveri a felszínre jutó napfényt. Így a jegesedő területek növekedése öngerjesztő folyamat, jégkorszakok kialakulásához vezet.

A felmelegedés tényét sokan még mindig tagadják, pedig a tengerek szintjének növekedése egyértelműen arról tanúskodik, hogy a felmelegedés gyorsul. Egyrészt azért növekszik évről-évre a tengerszint, mert a melegebb víz sűrűsége kisebb és így a térfogata nagyobb. Továbbá a szárazföldekre kifagyott víz, elsősorban a grönlandi és antarktisi jég olvadása is a tengerszintet növeli. 1870-2004 között a tengerszint 19,5 centiméterrel nőtt. 1950-2009 között ennek mértéke 1.7 mm/év. 1993-2009 között ez az adat csaknem kétszer akkora, 3.3 mm/év.

A tengerszint megbízhatóbban tájékoztat a felmelegedés mértékéről, mint a légkör és a szárazföldek hőmérsékletei. Utóbbiak csak a felmelegedéskor kapott hő töredékét veszik fel és az óceánok felszíni vízhőmérsékletének értékével együtt változnak. Az utóbbi évtizedekben a mérések szerint elsősorban a óceánok mélyén lévő víztömeg hőmérséklete nő. A felszínen mérhető hőmérsékletek viszonylagos állandósága ne tévesszen meg bennünket, a felmelegedés egyre hevesebb.

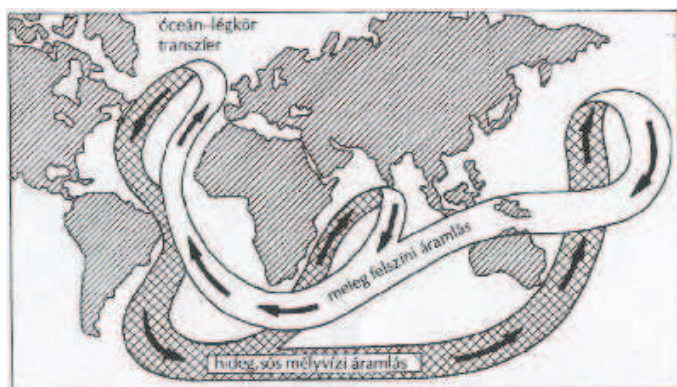
Korábban a légkör széndioxid tartalmát természetes visszacsatolási rendszer tartotta közel állandó értéken. 610 ezer évre visszamenően, az antarktisi jég rétegekbe szorult gázbuborékokat elemezve határozták meg a légkör  $CO_2$  tartalmát és ezzel párhuzamosan az adott időszak tengerfenéki üledékeinek jellegét. Ezzel követhették, mi lesz a tűzhányókból és a forró vizes feltörésekből a légkörbe és vízbe jutó széndioxid sorsa.

Amint egy tűzhányó kitörésekor megugrik a légkör  $CO_2$  tartalma, megnő az esővel a talajba mosódó szén-sav mennyisége, ami növeli a talaj ásványaiból kioldott ionok, közöttük a kalcium ion mennyiségét. Ezek a vízzel előbb a folyókba, majd a világtengerekbe jutnak. Ott a kalcium ionok és a tengervíz szén-sav molekulái beépülnek a puhatestű állatok mészpáncéljába és amint azok a tengerfenékre süllyednek, a kalcium és széndioxid az üledék anyagaként visszajutnak a földkéregbe. Mivel a folyamat, a talaj pusztulása és tengerekbe mosódása lassan zajlik, az ember által a légkörbe jutott hatalmas mennyiségű  $CO_2$  ezen az úton csak hosszabb idő múltával vonódhatna ki a légkörből.

Miközben 0,1 milliárd tonna széndioxid kerül évente a földkéregből, azaz a tűzhányókból és forróvizes feltörésekből a légkörbe, addig az ember az ősmaradványi tüzelőanyagok, a szén, olaj és gáz elégetésével valamint az erdők pusztításával ennek a százszorosát, évi 10 milliárd tonna széndioxidot juttat a levegőbe. Ez a mennyiség óriási nagy a jégbe szorult légbuborékok segítségével mért természetes ingadozásokhoz képest és befolyást gyakorol az éghajlatra, a világtengerek és általában a földi élővilág állapotára. Azaz mintha egy olyan földtörténeti korszakba lépnénk, amelyben kb. 1800 óta rohamosan nőni kezdett volna a tűzhányói tevékenység, és azóta évente százszor annyi tűzhányó törne ki, mint régebben.

**Szelek és tengeráramlatok.** Bolygónk felszíne nem egyenletesen nyeli a napfényt. Az egyenlítői és sarki övezetek közötti hőmérséklet különbségek minél gyorsabb kiegyenlítésére légköri és tengeri vízkörzések alakultak ki. Az egyenlítői térségekben felhevülő, ezért csökkenő sűrűségű levegő felemelkedik és a sarkok felé áramlik. Ott lesüllyed és az onnan induló hideg szelek az egyenlítő felé fújva zárják a légkörcsét. Ha a Föld nem forogna, akkor az északi féltekén a talaj szintjén állandó északi szél fújna. Ám a légkörcsések jellegét a Föld forgása is befolyásolja, ennek megfelelően a mérsékelt égövben az északi féltekén az uralkodó szél nyugatról keletre fúj.

Hatalmas, összefüggő rendszert alkotnak a tengeri, óceáni áramlatok, melyek rendszerét a 28. ábra szemlélteti. Ez a nagy óceáni szállítószalagnak nevezett áramlási rendszer, a Csendes-óceán, az Indiai-óceán és az Atlanti óceán egyenlítői térségeiből az Atlanti-óceán északi részébe szállítja a hőt. A Golf-áram csak egy része ennek a világtengereket összekötő áramlási rendszernek. Az áramlást a hőmérsékleti különbségek mellett az Atlanti-óceán vizének magasabb sótartalma hajtja. Ez azért sósabb, mert a másik két óceánénál kisebb a felszíne és így az elpárolgott vizének nagyobb része hullik esőként szárazföldre. Ugyan a víz 4 Celsius fokon a legsűrűbb, de minél sósabb, annál alacsonyabb hőmérsékleten lesz a legnagyobb a fajsúlya. Északra érve a Golf-áram melegebb vize lehül, és mivel ott a tengervíz eléggé sós, a mélybe süllyedhet és hideg mélyvízi áramlatként tér vissza az Indiai- és Csendes-óceán egyenlítői övezeteibe. Útközben a sótartalma hígul és az így kisebb sűrűségűvé váló víz emelkedni kezd. Nagyjából a Galapagos szigetek térségében tör a felszínre, zárva az áramlási kört.



28. ábra. A nagy óceáni szállítószalag. Nem az áramlások tényleges képét mutatja, ami ennél jóval összetettebb, hanem a világóceánok vízkörzésének általános képét szemlélteti. Végeredményben a szállítószalag a három óceán forró égövi térségeiből hatalmas mennyiségű hőt juttat az Atlanti-óceán északi térségébe.

Mivel az Északi-sark jégtakarója gyors olvadásnak indult, a térségben a víz sótartalma csökken és a nagy óceáni szállítószalag hamarosan leállhat. Újabb mérések szerint ez a folyamat gyorsul, a Golf áram gyöngül.

A sarkvidék az egyenlítői térségnél erősebben melegszik. Mivel az Egyenlítő és az Északi-Sark közötti hőmérséklet csökken, a hőmérsékleti különbségeiket kiegyenlítő széljárás természete is átalakulóban van. Emiatt változik az éghajlat. Egyre gyorsabban olvad az Északi-Sark jége, és akár pár évtized alatt eltűnhet. Ekkor gyorsul majd fel a kiegyenlítő légáramlatok átrendeződése, amely előreláthatólag pár évtizeden belül megtörténhet. A felfelé áramló, a sarki tengereket melegítő tengeri áramlatok és a meleg levegőt az eddigitől különböző módon felfelé szállító szelek hatására nemcsak Angliában, hanem akár Skandináviában is megjelenhetnek a pálmafák. De addig szélsőségesebb időjárási ingadozásokra kell felkészülnünk, elsősorban tavasszal és ősszel.

Grönland jégtakarójába mélyen lefúrva tízezer évekre visszamenően meghatározták, hogy milyenek voltak az adott években a átlaghőmérsékletek. Innen tudjuk, hogy az átlaghőmérséklet akár pár évtizeden belül fokokat emelkedhet vagy süllyedhet. Mivel a grönlandi átlaghőmérsékletet a Golf-áram viselkedése szabja meg, mindez a Golf-áram időnkénti újraindulására vagy leállítására utal. Amikor a Csendes-óceán vízmozgásai az El-Nino jelenség miatt egy időre megváltoznak, a nagy óceáni szállítószalag a Galapagos szigetek helyett valahol délebbre a chilei partok mentén tör a felszínre. Az El-Nino jelenség gyakran felerősödik és súlyos csapásokra vezető éghajlati változásokat okoz szerte a csendes-óceáni térségben. A szárazabb vidékeken ömölhet az eső, a nedvesebbekben szárazság pusztít.

Riasztó az a felfedezés, miszerint nemrég az Andok egy gleccserében meleg égövi növényeket találtak befagyva. Ez arra utal, hogy az éghajlatváltozás akár egyik napról a másikra is bekövetkezhet. Az akkor nyáron betörő jeges fergeteg nem egyszerű időjárási szélsőség, hanem éghajlatváltozás volt.

Földünk vízkészletének egy része jég állapotú. Időről-időre a Föld vízkészletének egy része eljegesedik, jégkorszak alakul ki. Ekkor az óceánok vízszintje lecsökken, mert a grönlandi vagy antarktisi szárazföldre víz fagy ki. Jégkorszakban, a tenger szintjének csökkenésével kialakult szárazföldi átjárón jutott át Ázsiából Alaszkába az Amerikába átvándorló ember. Körkörös viselkedést mutatnak a jégkorszakok, melyeknek kialakulása legegyszerűbben a Föld forgástengelyének változásaival magyarázhatók. Ez ugyanis befolyásolja, mennyi napfényt nyelhet el a Föld felszíne.

A víz körforgása során a tengerekből, óceánokból elpárolgó víz a fellegekbe kerül, onnan csapadékként jut vissza az óceánokba, tengerekbe vagy a szárazföldre. A szárazföldre jutó csapadék egy része a talajvízbe, a víztartó rétegekbe kerül. Ha ezt a vízkészletet megcsapoljuk, elhasználjuk, csak nagyon hosszú idő után töltődik fel újra.

Még a fenti körforgásokon kívül beszélhetünk a különböző kémiai elemek, a szén, a nitrogén körforgásáról is. Változhat a körforgások természete, erősen függhet a hőmérsékleti viszonyok változásaitól,

kaotikus viselkedést mutathat, gondoljuk az El-Nino rendszertelen megjelenéseire. A Golf-áram fentiekben tárgyalt leállása szintén kis változások függvénye lehet.

## 8. Élet és fejlődése

### 8.1. Az élet kialakulását és fejlődését mozgó elv

Nézzük meg, a hőtan főtételeinek értelmében milyen jellegű folyamatok játszódhatnak le bolygónk felszínén. Napunk durván 6000 Kelvin hőmérsékletű testként sugároz. Bolygónk felszínének átlagos hőmérséklete 13 Celsius fok, átszámítva 286 Kelvin, azaz a Föld csaknem 300 Kelvin hőmérsékletű testként sugároz. Mivel a sugárzás fényadagjának (fotonjának) energiája a sugárzó test felszínének hőmérsékletével arányos, a Föld által kisugárzott foton energiája huszada a napsugár foton energiájának. Azaz a Föld felszíne huszadára darabolva szórja vissza a világűrbe az elnyelt napsugárzás fotonjait. Azaz hozzájárul a Nap sugárzási tere és világűr környezetünkben néhányszor tíz Kelvines sugárzási tere közti energiakülönbség kiegyenlítéséhez. Minél több napsugarat nyel el és szór szét a Föld felszíne, annál jobban teljesülnek a hőtan főtételei.

A víz, a kőzetek és a levegő molekuláinak mozgási energiájaként veszi fel és tárolja az elnyelt napsugárzást. Továbbá a nap sugárzása vegyületekben is megköthető. Mivel a Föld felszínén nagyon sokféle molekula van, fénymegkötésen alapuló vegyi folyamatok zajlhatnak le és a még több fényt elnyelni képes összetettebb kémiai körfolyamatok is létrejöhetnek. Egy ilyen folyamat kiindulópontja lehetett a fény megkötő és később kisugárzó cinkszulfid is. Nemrég fedezték fel, hogy széndioxidban dús légkörben a cinkszulfid fényt nyel el és eközben megköti széndioxid szenét és oxigént szabadít fel. Hasonló folyamatokban, egyre több napfényt megkötve, mind összetettebb szénláncú szerves vegyületek jöhetnek létre. Amint az összetettebb vegyület felbomlik, a megkötött fényenergia hőként szabadul fel. Azok a szerves-kémiai folyamatok, melyek napfényt képesek megkötni, majd hőként szétoszlatni, kiválasztódtak és a még több fényt megkötők pedig gyakoribbakká váltak. Azért is érdekes a cinkszulfidra épülő folyamat, mert a legősibb fehérjékben sok a cink. Meglehet, ez volt az élet kialakulása felé vezető egyik első lépés.

Nem tárgyaljuk részletesebben, mint jöhettek létre és mint válhattak egyre összetettebbé a mind több napfényt megkötni, majd szétszórni képes szerves-kémiai folyamatok. Önmagukat megkettőzni, vagy kisebb változásokkal örökíteni, még több energiát megkötni és szétszórni képes rendszerek választódtak ki. Megjelentek olyan rendszerek is, amelyek nem pusztán a kialakulásukkal és felbomlásukkal vettek fel és szórtak szét még több energiát, hanem a környezettel folytatott anyagcsere folyamatok, vegyületek felvétele és kibocsátása útján is. Talán nem is lehet pontosan megállapítani, mely folyamatok sorozata után jelentek meg az első, már élőnek nevezhető rendszerek. De annyit mondhatunk, hogy a hőtan főtételeinek megfelelő viselkedés, az egyre több hasznosítható energia felvételének majd szétszórásának képessége választotta ki őket.

Nem csak az élet megjelenése, hanem az új fajok megjelenése, a törzsfajlás, a táplálékláncok kialakulása mögött is a hőtan főtételei állnak. Képzeld el, a szárazföldön már van növényzet, de még nincs növényevő. A növény szerves vegyületeiben tárolt energia az anyagcsere során és a növény pusztulásakor szabadul fel. Miután megjelent a növényevő, az állati anyagcsere során a lelegelt növény szerves vegyületeiben tárolt energia nagy része szinte azonnal felhasználódik és nagyrészt hőként szabadul fel. Mivel a lelegelt növényzet is ugyanúgy megköti a napfényt, a növényevő megjelenésével több napfényt nyel el az élővilág, még zöldebbé válik a Föld. Hasonlóan zöldebbé teszi a természetet a fennmaradni képes ragadozó. Általánosan, a törzsfajlás természetes folyamatában megjelent faj akkor maradhat fenn, ha általa a tápláléklánc több napenerőt alakíthat hővé. Azaz az új fajjal megnő a megkötött majd szétosztott napenergia. Láthatjuk, a törzsfajlás két alapvető tétele, a természetes kiválasztódás és a legalkalmasabb térnyerése a hőtan főtételeinek következménye.

A hőtan főtételei segítségével válik érthetővé, miért annyira elterjedt az élet és mi a törzsfajlás hajtóereje. De hőtan főtételei az élő szervezetek működéséről éppúgy nem mondanak közelebbit, mint ahogyan

az egyszerűbb molekulák, az összetettebb vegyi rendszerek kialakulásának törvényeit sem taglalják. De kijelenthetjük, az élet megjelenését és a törzsfajlás folyamatát leíró természeti törvények ugyanúgy léteznek, mint az atomok és a molekulák és más rendszerek keletkezését megadóak. Mivel a túlélést segítő értelem megjelent és elterjedt, az értelem keletkezése is a természeti törvények következménye.

## 8.2. DNS és gének

Mindenképp az élő sajátja a magas fokú szervezethez. Hatalmas mennyiségű adat szükséges az élő felépítéséhez, hordozójuk a DNS(dezoxiribonukleinsav). Valamennyi élő szervezet közös jellemzője, hogy szervezete a DNS-re épül. A DNS az élőlény minden egyes sejtmagjában teljes egészében jelen van. Egy adott sejtjében a DNS-nek csak az a része tevékeny, amelyik a sejt életműködéséhez szükséges.

Nyelvi szabályokhoz hasonlíthatjuk a DNS adattartalmának tárolását. Rendszeres, kristályokat jellemző ismétlődés a DNS-ben nem található. Ahogyan a verssor sem tartalmaz egyszerű ismétlődő sorozatokat, hasonlóan a DNS-láncon lévő bázisok sorozata sem jellemezhető valamiféle szabállyal. A bázisok sorrendjét nem az egyszerű fizikai vagy kémiai törvények, hanem az adott faj jellemzői határozzák meg.

**Fehérje, aminosav, gén, genetikai kód.** A sejt munkavégző vegyületei fehérjemolekulák, valamennyi enzim és a hormonok nagy része is fehérje. A DNS-lánc egyrészt az életfolyamatok vezérléséhez szükséges fehérjék készítéséhez adja meg a leírást. Továbbá a DNS szervezi a sejtben belüli műveletek összehangolását is, megszabva, hogy éppen milyen fehérjék készüljenek és melyeknek a termelése szűnjön meg.

20 alapvető aminosav építi fel a fehérjét, általában ötven-tíz ezerig terjedő számú aminosavból állhatnak. A fehérjék alakja, vegyi, villamos és egyéb tulajdonsága a fehérjeláncot alkotó aminosavak fajtájától és sorrendjétől függ. Mivel az egyes aminosavak meghatározott módon kötődhetnek egymáshoz, akár egyetlen aminosav egy másikra való cseréje is komoly változást idézhet elő, ugyanis ekkor máshogyan csavarodhat a fehérjelánc. Így más lesz a fehérje egészének alakja és megváltoznak tulajdonságai. Az egyetlen fehérjét leíró DNS-szakaszt génnek nevezzük. Fehérjegyártás közben a DNS a sejtmagban marad. A sejt többi részével való kapcsolat tartása egy másik nukleinsav, az RNS (ribonukleinsav) feladata.

Míg a számítógép kettes számrendszerű, a DNS négyes számrendszerben dolgozik, a négy bázis jelölése T, C, A, G, ezek 4 szerves vegyületet jelölnek. A DNS 3 egymás melletti bázisa, bázishármasa címzi meg a 20 alapvető aminosavat, a címező táblázat a genetikai kód. A genetikai kódban a T betű helyett az U betű szerepel, mivel a DNS-ről leolvasott adatokat közvetítő RNS molekulában a T jelű bázisnak az U jelű bázis felel meg.

Összesen  $4^3 = 64$  bázishármas van, azaz ennyi aminosavat lehetne velük megcímezni. 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 jelölik. A 64 bázishármas közül csak 61 címez aminosavat, három bázishármas a gén kezdetét illetve végét jelzi. Egyetemes, minden élőre azonos a genetikai kód, ami az élővilág közös eredetét bizonyítja.

**Genom, kromoszóma, mutáció, ivarsejt.** A teljes emberi DNS-lánc, az emberi genom, 3,2 milliárd bázispárból áll és kb. 2 méter hosszú. Hasonlóan beszélünk egy élőskész (baktérium), a rizs vagy az egér genomjáról. A DNS-lánc felcsavarodott alakzatokba, kromoszómákba rendeződik. Az emberi sejtekben, az ivarsejteket kivéve, 23 pár kromoszóma található, a párban az egyik az apai, a másik az anyai. Emiatt a gének többségéből kétféle változat állhat rendelkezésre. Az ivarsejtekben csak egyetlen szál DNS van. A petesejt és a hím ivarsejt DNS szála az apai és anyai DNS-lánc génállományaiából vagdosódik össze. Végtermékben a kromoszómaállományunk a nagyszülők DNS állományából ered, ez magyarázza a rokonok közötti genetikai különbségeket. A másolás nem tökéletes, a DNS láncunkban nemzedékenként 130 mutáció lép fel.

Kérdés, mennyire határozza meg az egyén életét a DNS lánc, azaz a kromoszómáiban tárolt adatok összessége. Mint tervraktárt foghatjuk fel. Hogy mi valósulhat meg belőle, hogy egy gén két változata közül éppen melyik léphet működésbe, az már a környezettől is függ.

**Hemoglobin fehérjéje.** Példaként a hemoglobin béta láncát alkotó emberi és nyúl fehérje génjének szerkezetét láthatjuk. A fehérje 146 aminosavból áll. Az aminosavakat az irodalomban szokásos módon nagybetűvel jelöljük, például V a valint, H a hisztidint, L a leucint, E a glutaminsavat kódolja.

VHLTPEEKSAVTALWGKVNVDVEVGGGALGRLLVVPWTQRFEFSGDLSTPDAVMGNPKVKAHGKKVLGAFSD emberben; 1-78

VHLSSEEKSAVTALWGKVNVEEVGGGALGRLLVVPWTQRFEFSGDLSSANAVMNNPKVKAHGKKVLAAFSE nyúlban; 1-78

GLAHLNLIKGTAFATLSELHCDKLVHVDPENFRLLGNVLCVLAHFFGKEFTPPVQAAYQKVVAGVANALAHKYH emberben; 79-146

GLSHLDNLIKGTFAKLSELHCDKLVHVDPENFRLLGNVLIIVLSHHFGKEFTPPVQAAYQKVVAGVANALAHKYH nyúlban; 79-146

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

Nézzük meg, mi történhet, ha az ember megfelelő génszakasza, amely a hemoglobin béta lánc esetén  $3 \cdot 146 = 438$  bázisból áll, csupán egyetlen bázisban is eltér a fenti aminosavsorrendet meghatározó génszakasztól. Jól ismert példa erre a sarlós vérszegénység kórképe, amely az afrikai fekete népességben meglehetősen gyakori. Ekkor a fenti 146 aminosav közül hatodik helyen nem E, azaz glutaminsav, hanem V, valin áll. A két aminosavat kódoló bázishármas E-re GAG, V-re GUG, azaz a két aminosavat kódoló rész a bázishármas második tagjában tér el egymástól. Ez 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, de egy kis farkinca is kinyúlik belőle. Emiatt vörös vértestek alakja is megváltozik. Ez mikroszkópon jól látható, gömb helyett sarló alak mutatkozik, ami vérkeringési zavarokat okoz.

Egy sejtélődsdi (vírus) DNS állománya néhány ezer bázisból áll, az élőcskék (baktériumok) DNS lánc néhány millió, a magasabb rendű élőlényeké több milliárd bázist tartalmaz. A legkisebb DNS állománnyal rendelkező élőcske DNS-láncának hossza 159662 bázist és az az élettevékenységeihez 182 fehérje működése szükséges.

**Bioinformatika.** Az emberi genom génjeinek feltérképezését 2003-ban nyilvánították befejezettnek. Egy genom meghatározásának legegyszerűbb módja az lehetne, ha az egyes kromoszómákban lévő DNS bázisainak a sorrendjét egyszerűen leolvassuk. De a jelenlegi módszerekkel egyszerre legfeljebb egy 500 bázispárból álló DNS szakasz gépi leolvasása lehetséges. Mivel egy átlagos gén ezer aminosavból, azaz háromezer bázispárból áll, egyetlen mintavétellel általában egyetlen gényi bázissorozatot sem tudnánk kiolvasni. Egy genom feltérképezésének fő nehézségét éppen a megfelelő viszonyítási pontok, a határkövek kijelölése jelentette. Egy 2 millió bázisból álló baktérium DNS lánc feltérképezéséhez legkevesebb 4000 darabra kellene hasítani a láncot ( $2 \text{ millió} / 500 = 4000$ ). Hogy az egyes gének bázissorrendjét és a kromoszóma teljes génállományát fel tudjuk térképezni, a leolvasott szakaszokat össze kell illeszteni,

A genom feltérképezését az ezzel foglalkozó két csoport versengése gyorsította fel, ugyanis az eredeti csoportból kivált egy kutató, aki a bázissorrend megállapításának gyorsabb módját fedezte fel. Módszerének lényege az, hogy a tanulmányozott hosszabb szakasz DNS állományát véletlenszerűen tördeli, és valamennyi darabra meghatározza a bázissorrendet. Ahelyett azonban, hogy a térképpontok kijelölésével foglalkoztak volna, a tördelést véletlenszerű módon megismétlik, és most is meghatározzák az egyes darabokon belül a bázissorrendet. Valószínű, hogy az első tördelés töréspontjainak többsége az második tördelés darabjainak belsejében van. Kellően sokszor, mintegy 20-szor ismételve a véletlenszerű tördelést, valószínűtlen, hogy egy adott töréspont mind a húsz tördelésben előforduljon. A darabokat számítógépes összefűző programokkal értékelve határozzák meg a hosszabb szakasz DNS állományát. A bioinformatika ezzel foglalkozik, rövidebb szakaszok esetén gyorsan célhoz ér, hosszabb szakaszokra a feladat egyre nehezebb.



### 8.3. Génkifejeződés, epigenetika, törzsfajlódás

Bár már voltak korábban is elbizonytalanító ismeretek, de a teljes DNS-lánc, így az emberi genom feltárásáig nagyjából azt lehetett gondolni, hogy egy gén egy fehérjét határoz meg és egy fehérjéhez egyetlen művelet rendelhető. Ezért úgy vélték, hogy a DNS-láncban csak a géneket tartalmazó szakaszok lényegesek. Felesleges, hulladéknak minősülő tartomány a többi, amely az embernél a DNS-lánc csaknem 98,7%-a, és ez valahogyan megmaradt az öröklődés során. Ez állt a híres mondás, a 'génjeink túlélőgépei vagyunk' mögött.

Feltételezték, hogy mivel az összetettebb szervezetek működtetéséhez többféle művelet szükséges, a törzsfajlódás során kialakult magasabb rendű élőlényeknek több génje kell, hogy legyen, mint az egyszerűbb lényeknek. Ez alapján becsülték meg, hogy az embernek 140 ezer génje lehet. De a genomok feltárása során kiderült, hogy az embernek a várt 140 ezernél sokkal kevesebb, kb. 20 ezer génje van. Ez nem sokkal több, mint egy alaposan tanulmányozott, ám száz sejtben kevesebből álló fonálféreg 19 ezer génje. Ráadásul ez a két génekészlet jelentősen át is fed. Így ébredtünk rá, mennyire keveset tudunk arról, mint működik a DNS. Ráadásul az egy gén - egy fehérje alapfeltételezés sem tartható. Ugyanaz a gén egy másfajta sejtben egy másféle műveletben játszik szerepet. Akár úgy is, hogy a belőle készülő fehérje gyártásához csak a gén egy szakasza van felhasználva.

Az ember és a fent említett fonálféreg génekészletének nagyfokú hasonlósága csak úgy értelmezhető, hogy egy adott művelet elvégzéséhez gének sokasága működik együtt. Csak a legegyszerűbb műveletek vezethetők vissza egyetlen génre vagy egy-két gén együtműködésére. Bizonyos gén vagy gének kezdik a műveletet, amelynek végzése során egyes gének kilépnek a folyamatból, mások pedig belépnek. Kiderült, hogy az egyes gének kifejeződésében, ki- és bekapcsolásában szerephez jutó rövid RNS-molekulák tevékenységét a "hulladék" DNS vezérli.

Már a korábbi eredmények is utaltak arra, hogy a hulladéknak minősített DNS-szakaszoknak is kell, hogy legyen szerepük. A sejtek nem másolgatták volna feleslegesen igen nagy anyag- és energiaráfordítással százmillió évek óta. Miután kiderült, hogy vannak bennük olyan szakaszok, amelyek egymástól távol lévő fajokban is igen hasonlóak maradtak, megkezdődött a géneken kívüli DNS szakaszok alaposabb vizsgálata.

Minél fejlettebbnek nevezhető az élőlény, annál nagyobb benne a "hulladék" DNS súlya. Míg az élőske DNS állománya nem sokkal több, mint a génjeinek az összege, addig az emberi genom túlnyomó része csak "hulladék". Összevetve az ember és a csimpánz génjeit, a különbség csak 0,1%. Viszont a "hulladék" DNS-re ez a különbség negyvenszeres, kb. 4%. Feltételezhető, hogy a csimpánz és az ember közötti különbség sokkal inkább a gének ki- és bekapcsolását, kifejeződését szabályzó rendszerben van jelen.

**Génkifejeződés.** Meghatározó, hogy mikor lép működésbe a DNS egy génje, azaz mikor épül fel, készül el az általa leírt fehérje. Ha nem a megfelelő időpontban, az a sejtek működési zavaraihoz, a szervezet megbetegedéséhez vezethet. Az DNS és a sejtben akkor működő fehérjék kölcsönhatása szabja meg, hogy éppen milyen géneknek kell működésbe lépni ahhoz, hogy a szüksége fehérjék termelődjenek. Van olyan gén, amelyik 50 másikat szabályoz. Általában úgy történik a szabályzás, hogy egy gén termelni kezd egy fehérjét, az pedig beindít vagy leállít egy másik gént. Nagyon bonyolultnak tűnik a gének hálózata, hogy melyik gén milyen más génekkel és fehérjékkel és hogyan áll kapcsolatban. Mivel a sejtbe kívülről is bejutnak molekulák, a szervezet egésze is befolyásolja a sejt működését. Szervezetünk pedig mint egész alkalmazkodik környezetünkhöz és a betegség a szervezet egészének a zavara.

Az élő nem merev gépezet, szerveinek működésében hatalmas tartalékok vannak. Ha betegség tüneteit észleljük, például megduzzad a máj, olyasmint jelent, hogy a májhoz kötődő, egymáshoz is kapcsolódó szabályzó rendszerek már nem képesek a máj egészséges működését beállítani. Ha ilyen esetben gyógyszert kezdünk szedni, annak hatóanyaga általában valamelyik érintett szabályzó rendszert módosítja. Ennek hatására a vele kölcsönhatásban álló szabályzó körök is másként kezdenek működni és végeredményben a máj működése javul, a duzzanat megszűnik. Egyre több megbetegedésről mutatják ki, hogy számos gén



egyidejű hibás működése okozza a kórt. Ha mondjuk a féltucatnyi rosszul működő génből csak egy is megfelelően tenné a dolgát, az adott rákbetegség nem fejlődhetne ki.

**Epigenetika.** A táplálkozás, a mozgás vagy a hirtelen változáshoz való igazodás (stressz), azaz számos környezeti hatás befolyásolja a génekben tárolt, öröklött adottságok érvényesülését. Az élő szervezet sejtjeinek génkifejeződési folyamataival tartja fenn és örökíti át magát, továbbá ezekkel alkalmazkodik a környezetében zajló változásokhoz. Az epigenetika úgy viszonyul a genetikához, mint a vezérlet (szoftver) a géplethez (hardverhez).

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

Ha rendszeresen idegen molekulák jutnak a testünkbe, a sejt falon átjutva beleszólhatnak a génszabályozási folyamatokba. Ehhez szervezetünk a génkifejeződések módosításával alkalmazkodik. A DNS epigenetikai rendszerének változása során zajló mutációk gyakorisága százezerszerese a DNS bázis mutációs valószínűségének. Az epigenetikai rendszer igazodása hónapokat, akár évnyi időt igényelhet. Ha megszűnik az idegen behatás, a génkifejeződést szabályzó rendszer hasonló időtartam eltelte után visszatér korábbi működéséhez. Általában a táplálkozásunk, a gyógyszerek, a környezetben előforduló vegyszerek valamennyien módosíthatják epigenetikai szabályzó rendszerünket.

Ha viszont a változást nem maga az egyed életvitele idézi elő, hanem az még magzatkorban, vagy a csecsemőkornak megfelelő időszakban történik, az epigenetikai rendszer maradandóan, élethossziglan tartóan megváltozik. Az 1944-45-ös holland éhínség utóhatásainak kutatása ezt bizonyítja.

A második világháború során a partraszálló szövetségesek támadása 1944 szeptemberében Hollandiában elakadt. A németek sikeres ellentámadást indítottak és ezután nemcsak a háborús csapások sújtották a polgári lakosságot, hanem a németek büntető intézkedései is. Ráadásul nagyon kemény tél sújtotta a térséget. Az élelmiszerkészletek apadni kezdtek és bevezették az élelmiszer adagolását. 1944 novemberére Hollandia egy nagyobb térségében, amely 4,5 millió embert sújtó hatalmas éhínség amely egészen 1945 májusáig tartott.

Nemcsak akkor szenvedett a lakosság. Az éhínség során fogantak életére máig kiható, ennek érrendszeri és anyagcsere betegségeket okozó hatására a hetvenes években figyeltek fel. Túl sok fiatalnál figyeltek meg ilyenfajta kórképet. Valamennyiükben közös, hogy édesanyjuk a fogantatás feltételezett napját követő első tíz hétben az éhínség sújtotta térségben élt. Akik az éhínséget később éltek át, nem mutatnak változást.

Ma még nem tudhatjuk, hogy az anyatesten kívül zajló megtermékenyítés, azaz a lombikbéli eljárás alkalmazásával születtek, mennyire lesznek egészségesek. A megtermékenyült petesejt DNS-ének epigenetikai szabályzó rendszere a beültetésig eltelt néhány nap során nem a természetes, hanem a művi környezettel hat kölcsön. Hogy ez milyen hatást gyakorolt rá, arra csak az így született milliók egészségi állapotának évtizedeken át történő vizsgálata adhat választ.

**Epigenetika és törzsfjlődés.** Az ivaros szaporodás, a két állomány nemzedékenként keverése új változatot hoz létre, és ha az a nemzedékek során sikeresnek bizonyul, rögzülni fog. Mindez párhuzamba állítható az idegi hálózatok tanulásával, esetükben a tanulnivaló az ismétlődő ingerek hatására rögzül. Ennélfogva a törzsfjlődés egésze is tanulási folyamatnak fogható fel. Amely változatok nem eléggé életképesek, kihullanak az idő rostáján, az alkalmazkodni képesek pedig megmaradnak. Mivel a tanulási folyamatot az értelemhez tartozónak tartjuk, megérthetjük, miért érzik sokan azt, hogy értelmes tervezés áll az élet kialakulása mögött.

Mint már említettük, minél összetettebbé fejlődött egy lény, mennél fentebb van a törzsfjlődés fáján, annál nagyobb lehet benne a génkifejeződést szabályzó "hulladék" DNS súlya. Kézenfekvőnek látszik a

feltevés, hogy a "hulladék" DNS a törzsfajlás során sikeresnek bizonyult, éppen ezért fennmaradt génszabályozási szakasz szerkezetét is tárolja. Amint újra ilyen környezeti változás lép fel, a korábban sikeresnek bizonyult és ezért tárolódott változat lép működésbe. Növényeken és nemrég egereken is megfigyelték, hogy az efféle epigenetikai változások öröklődnek, viszont néhány nemzedék után visszaállhat az eredeti állapot.

Az alig pár napos egereket napi 3 órára elválasztották anyjuktól. Ezek éberebben és óvatosabban viselkednek, ugyanakkor kevésbé félnek, néha szinte keresik a veszélyt. Az ilyen hímek utódai, bár sohasem voltak elválasztva a tünetektől mentes anyjuktól, ugyanilyenek, azaz a hím ivarsejtek epigenetikai állománya örökíti a viselkedést. Mivel fő tanulási módszerünk az utánzás, feltehető, az anya ilyen jellegű viselkedését is átvehetjük.

## 8.4. Az élet keletkezése és terjedése

A fehérjék előállításához DNS vagy RNS-féle vegyületek szükségesek. Viszont a DNS vagy RNS előállításához fehérjék kellenének. Ráadásul mindkettőhöz zsírvagyületekre is szükség van, mivel a sejteket határoló membránok ezekből állnak. Miközben a fehérjék a zsírok előállításához is szükségesek. Ez a többszörös tyúk-tojás rejtély nagyon megnehezítette az élet kialakulásának megértését.

Nemrég vetették fel, hogy az élet fenti alapvegyületeinek képződéséhez két egyszerű, a korai Földön bőségesen előforduló molekula, a kénhidrogén  $H_2S$  és a hidrogéncianid  $HCN$  is elegendő, mert belőlük kiindulva, egyszerű kémiai folyamatok lezajlása után mindhárom alapvegyület kialakulhat. A Földet látogató üstökösök csóvjája sok  $HCN$ -t tartalmazott, továbbá a becsapódások során elég sok energia szabadult fel ahhoz, hogy szénből, hidrogénből és nitrogénből hidrogéncianid képződjön. Hasonlóan, korábban a  $H_2S$  kénhidrogén is volt bőséggel. Bár a háromféle alapvegyület képződéséhez különböző katalizáló folyamatok szükségesek, melyek különböző adottságú helyeken játszódhatnak le, a csapadékvizek együvé moshatták őket. Hogy azután az ott lévő építőkövekből miként alakulhatnak ki a mind összetettebb, végül pedig élőnek tekinthető rendszerek, lásd a 4. szakaszban.

2016 tavaszán közölt eredmények szerint az üstökösökben a DNS-láncot alkotó valamennyi alapvegyület kialakulhat.

**Geomikrobiológia.** A geomikrobiológia, a mélyen a felszín alatt élő szervezeteket kutató tudományág gyakorlatilag az utóbbi hét évtizedben született meg. Korábban azt hittük, hogy 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. Úgy tűnik, az élet egyetlen igazi korlátja a lefelé növekvő hőmérséklet. Eddigi csúcstot a kb. 5 km mélyen, 113  $C^0$ -on élő szervezetek adják, van viszont bizonyíték 169  $C^0$  hőmérsékleten élő paránylényekre (mikroorganizmusokra) is.

A mélyben létező, más élőktől évmilliók óta elzárt szervezetek életmódját az anyagcsere különleges változatai és a nagyon lassú szaporodás jellemzi. Anyagcseréjük során az egyik ásványt egy másikra alakítják, azaz a szerves vegyi folyamatok energiáját használják fel. Különböző helyeken és hőmérsékleteken más-más vegyület szolgálhat a különféle paránylények táplálékául. Van olyan, amely fémionok másféle vegyi állapotba vitelével jut energiához. Átalakíthatják a belső vulkánosság során felszabaduló vegyületeket és így geokémiai változásokat okoznak. Mivel bőven van számukra élőhely és igen sokan vannak, úgy tartják, hogy a mélyen a felszín alatt élők tömege a Földön élők tömegének több mint a felét teszik ki.

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

Nemrég Dél-Afrikában, közel 3,6 kilométeres mélységben, aranybányák fúrólukáiból vett talaj- és vízmintákban többsejtű élőlényeket, fél milliméternyi fonálférgeket fedeztek fel. Nemi jelleg nélküliek, élőcskékkel (baktériumokkal) táplálkoznak, bírják a mélységben lévő magas, 41 fokos hőmérsékletet és a lenti kevés oxigénnel is beérik. Annyira különböznek a felszínen élő, hozzájuk hasonló fonálférgektől, hogy külön fajnak tekinthetők. Feltételezhető, hogy őseik valaha a felszínen éltek, és a lefelé szivárgó vízben élő élőcskéket követve élőhelyük mind mélyebbre, kilométeres mélységekbe süllyedt. Életmódjuk alkalmazkodott a lent lévő élőcskék fogyasztásához. Kérdés, hogy a bányászat mennyire bolygatta meg a környezetet, azaz nem-e a bányászásnak köszönhetően telepedhettek meg odalent. Ez ellen szól, hogy a vízminták százezer éves korúak, de további behatóbb vizsgálatokat végeznek annak eldöntésére, hogy a bányászat nélkül is élhetnének-e odalent.

**Élet terjedése a világűrben.** A kőzetekben élők bármelyik forró maggal rendelkező bolygón megélhetnek. Mivel ezek szerte a Mindenségben igen nagy számban ott lehetnek, lásd a Naprendszeren kívüli bolygókról szóló 6.8. részt, a Mindenség hemzseghet az ilyen szintű élettől. De a felszínen kialakuló, fénymegkötésre (fotoszintézisre) épülő élet már jóval ritkább, 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 fennmaradjanak.

A kőzetekben élő parányi lények eljuthatnak egyik bolygóról a másikra. A felszínre becsapódó nagyobb kisbolygó kőzetdarabokat robbanthat ki és az eléggé nagy sebességgel mozgó bolygó vonzásából kiszabadulva más bolygók felszínére kerülhetnek át. Így a bolygók folyamatos kölcsönhatásban állnak egymással és a viszonylag védett környezetben, nagyobb meteoritkővek belsejében betokozódott parányi lények a teljes Naprendszerben elterjedhettek. Egy marsi kődarab nagyon kedvező pályaadatokat mellett akár száz éven belül átkerülhet a Földre. Így a belső bolygók kőzeteiben lévő parányi lények a Naprendszer külső tartományaiban lévő égitestek, például a Jupiter holdjainak felszínére is eljuthatnak.

Üstökösök közvetítésével akár naprendszerek között is közlekedhetnek életet hordozó kőzetdarabok. 3,8 milliárd éve, amikor a Föld és a Mars felszíni viszonyai hasonlóak voltak, a parányi lények átkerülhettek egyik bolygóról a másikra és ott is elterjedhettek. Így ha a Marson a földihez hasonló élet maradványait fedezték fel, egyesek szerint nem okozna különösebb meglepetést, mivel ilyen élet a Marson valaha létezhetett. Ezért csak az ismerttől eltérőnek mondható élet utalhatna biztonsággal a földtől független élet létezésére.

Létezik-e, vagy létezhet-e egyáltalán a földi élettől 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 fejlődést előíró eddig ismeretlen törvényszerűségek létére találunk bizonyítékot.

## 8.5. Élet a Földön

Földünk létezésének első ötszáz millió évét a Föld kérgét is átszakító kozmikus csapások jellemezték. Megolvasztották a földkérgét és ezzel minden korábbi fejlődés eredményét semmissé tették. Nem sokkal a 3,8 milliárd évvel bekövetkezett utolsó nagy becsapódás után a földrészek és az óceán érintkezési pontjain, a partvidékeken megjelent az élet. Van olyan feltételezés, hogy a korábban a Földből kiszakadt és később visszatérő kődarabokban betokosodott parányi lények (mikroorganizmusok) honosították meg újra az életet.

Grönlandról származnak az első életre utaló jelek, koruk 3,8 milliárd év. Nyugat-Ausztráliában 3,5 milliárd éves kőzetekben már tucatnyi élőcske (baktérium) kövületét találták meg. Ezek a világon ma is mindenütt fellelhető kék-zöld algákkal közeli rokonságban lévő lények maradványainak feleltethetők meg.

A főleg kénnel táplálkozó és máig fennmaradt bíbor baktériumok kezdetben még oxigén nélküli légkörben éltek. Amint az ilyenféle élőcskék a táplálékforrások közelében felszaporodtak, a táplálék megfogyatkozott. Ez behatárolta a vegyületek energiáit felhasználó élőcskék életlehetőségeit.

Azok az élőcskék válhattak inkább sikeressé, amelyek a naperőt felhasználva maguk készítettek táplálékot. Ennek során az erősen kötött víz és széndioxid molekulákból lazán kötött szerves vegyületet, cukrot állítanak elő, majd a cukrot mint alapanyagot felhasználva készülnek el az egyéb vegyületek. Az ezekhez még szükséges kémiai elemekhez, mint a nitrogén és a többiek az ezeket tartalmazó egyszerű szervesetlen sók felvételével jut a szervezet. A fentebb említett kék-zöld algák, más néven kékmoszatok, mindenütt megjelentek, ahol volt víz. Ezek voltak akkoriban a legfejlettebb élőlények, uralták a Földet. Egy ideig a kőzetképződési folyamatok azonnal megkötötték a termelt oxigént. Mintegy kétmilliárd éve már annyira felszaporodott az oxigén, hogy elérte a jelenlegi érték egy százalékát. Ezt a kékmoszatok már nem tudták elviselni, oxigénmérgezést szenvedtek. Elvesztették életterüket, kénytelenek voltak oxigénmentes helyekre, a tavak, mocsarak, tengerek iszapjába húzódni, ahol máig élnek.

A légköri oxigén felszaporodásának további következménye a felsőbb légkörben kialakult ózonréteg megjelenése volt. Az ózonréteg kiszűri a Nap ibolyántúli sugárzását, lásd a 16. ábrát, kialakul az ózonpajzs. Ez lehetővé tette a korábbiaktól különböző, összetettebb szerveződésű lények képződését. Az élővilág további fejlődését a fénymegkötés egy újabb fajtájának a megjelenése tette lehetővé. Az első egysejtű, sejtmaggal rendelkező lények 1,8 milliárd éve jelentek meg. Ezeket már a sejten belüli sokkal magasabb fokú munkamegosztás jellemzi. Jóval nagyobbak, térfogatuk az élőcskék térfogatának átlagosan tízezeresere.

Egyre összetettebbé szerveződtek az egysejtűek, lassan elérték a maiakhoz hasonló fejlettségi szintet. Nem volt túl gyors a folyamat, mivel csak a felszíni vízrétegekben volt elég az oxigén, mélyebben még nem. Végül az oxigén nagyobb mérvű felszaporodásával az egysejtű lények együttélése, munkamegosztása odáig fejlődött, hogy 900 millió évvel ezelőtt megjelentek a soksejtűek, például a szivacsok egyszerűbb fajtái.

Ezután az élet fejlődése lelassulni látszik. Üledékes kőzetek tulajdonságait vizsgálva megállapították, hogy a 750-580 millió évvel ezelőtti időszakban három komoly eljegesedés történt. Annyira erős volt az eljegesedés, hogy a szárazföldek és a világtengerek jó részét jég borította. Mint tárgyaltuk, a jégkorszakok kialakulása öngerjesztő folyamat, lásd a 7.3. részt. Ha az átlaghőmérséklet lecsökken, mert mondjuk a földtani átalakulások során a légkör széndioxid tartalma lecsökken, ezzel csökken az üvegházhatás és beindul az eljegesedés.

Az eljegesedések-felhevülések váltakozása után az élővilág az 580-525 millió évvel ezelőtti időszakban robbanásszerű fejlődésnek indult. Kb. 540 millió éve, a kambriumnak nevezett földtörténeti korban nagyon sokféle állat jelent meg egyszerre, mert az akkor megjelenő mészpáncél, a csontok nagyszerű lehetőségeket adtak a fejlődésre. A megkövesedett maradványok segítségével az 540 millió évvel ezelőtti állapottól kezdve máig millió éves pontossággal tudjuk követni az élővilág fejlődését. Az 540 millió évtől 245 millió ezelőtti korban, a paleotikumban jelentek meg a halak, kételtűek, a szárazföldi növények és rovarok, valamint a hullók kezdetleges változatai. 225 millió éve alakultak ki a dinoszauruszok, 160 millió éven át uralták a Földet és 64 millió éve pusztultak ki. Eltűnésük lehetőséget adott arra, hogy a már korábban is megjelent, a náluk jóval magasabb szervezettségi fok elérésére képes emlősök élettérhez jussanak.

## 8.6. Tömeges kihalások

Az őslénytani leletek hatalmas összeomlásokról árulkodnak. Természetes jelenség a fajok kihalása, mert ha a faj képtelen az élettér változásához alkalmazkodni, kipusztul. Általában a fajok 10-20%-a 5-6 millió éven belül kihal. Vannak azonban korszakok, amikor rövid időn belül nagyon sok faj tűnik el. Ha a fajok 30-90%-a pusztul ki egyszerre, tömeges kihalásról beszélünk. Hogy ez mennyire gyors, 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 egyaránt vonatkoznak, jelezve, hogy a Föld egészére kiterjedő csapás sújtotta az élővilágot.

Legjobban ismert tömeges kihalás a dinoszauruszok eltűnése 64 millió évvel ezelőtt, a kréta kor végén. Ekkor a fajok 47%-a pusztult ki. A 64 millió évvel ezelőtt történt tömeges kihalás nem az egyedüli, még csak nem is a legnagyobb. 439, 357, 250 és 198 millió évvel ezelőtt ennél több fajt eltüntető pusztulás következett be.

Legnagyobb a kb. 250 millió évvel ezelőtti, a perm-triász határán történt tömeges kipusztulás volt, ekkor a tengerekben élő fajok közel 96%-a és a szárazföldiek 70%-a tűnt el. 252,28 millió évvel ezelőtt volt a leghevesebb a pusztulás, ekkortájt, 20 ezer éven belül tűnt el a legtöbb faj. Maga a kipusztulás közel 200 ezer éven át tartott. Gyors felmelegedés, a levegő és a tengervíz széndioxid tartalmának megugrása, hatalmas szárazság és erdőtüzek sokasága gerjesztette a tengerekben és szárazföldön egy időben zajló kihalást. Akkortájt egymillió éven belül több szibériai bazaltvulkán tört ki és ezek az átlagos tűzhányói kibocsátásnál jóval több, mintegy 13-43 ezer milliárd tonna széndioxidot bocsátottak ki a légkörbe, amely onnan az esővízzel elsősorban tengerekbe került, lásd a 7.3. szakaszt. Ha az ember az összes hozzáférhető szenet, olajat és gázt elégetné, 5 ezer milliárd tonna széndioxid kerülne a levegőbe. Ez a mennyiség már összemérhető a fenti adattal, ráadásul a kibocsátás a fenti millió éves időszakhoz képest igen rövid időn belül történne. Ezzel az ember nemcsak saját magát, hanem a földi élővilág nagy részét is kipusztítaná.

Újabb felvételek szerint a szibériai tűzhányók kitöréseit egy akkoriban történt nagyméretű kisbolygó becsapódása okozhatta. Bár a becsapódás Brazíliában történt, de a számítások szerint nemcsak fokozott tűzhányói kitörésekkel járt együtt szerte a Földön, hanem hatalmas, közel 9,9-es erejű földrengések ezreinek sorozatát is kelthette.

Ma már bizonyosnak vehető, hogy a 64 millió évvel ezelőtti tömeges kihalást egy kisbolygó Földdel való ütközése okozta, 250 km átmérőjű tölcserű ütött a becsapódás, a mélyedést a Mexikói-öbölben, a Yucatán-félszigetnél találták meg. További bizonyíték az ütközésre az, hogy a korabeli rétegben nagyszámú irídiumszemcse található, amely határozottan kisbolygó becsapódásának jele. A becsapódásakor hatalmas kőzetdarabok repültek mindenfelé és ezek mint kilőtt rakéták, nagyon magasra emelkedhettek és az ütközés helyétől nagy távolságra pusztítottak. Így 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 nagytestű állatok nem tudták elviselni és kipusztultak.

A Hold felszínén látható krátereket becsapódások hozták létre. Nyilvánvaló, hogy a Földre is hasonló sűrűségben csapódtak be kisbolygók, de a felszín átalakulása eltüntette nyomaikat. Megfigyelések szerint 1000 olyan, legalább 1 km átmérőjű kisbolygó létezik, melynek jelenlegi pályája lehetővé teszi a Földdel való ütközést. Megkezdtek ezek rendszeres figyelését, nyilvántartását, ugyanis a műszaki fejlődés idővel lehetőséget adhat arra, hogy időben közbeavatkozva, a közeledő kisbolygó pályáját kissé módosítva elkerülhető legyen a Földdel való ütközés.

56 millió évvel ezelőtt az Atlanti óceán keletkezőekor Grönland levált Európáról. Több ezer évig tartó heves tűzhányói tevékenység kísérte a folyamatot. Ennek során a légkör széndioxid tartalma több mint a kétszeresére és ezzel együtt a Föld átlaghőmérséklete 5 Celsius fokkal nőtt. Mindez jelentős környezeti változásokkal járt együtt, de a legtöbb faj elkerülte a kihalást, mert volt elég idő a vándorlással vagy igazodással való alkalmazkodáshoz. Manapság a felmelegedés sebessége tízszerese az akkorinak, mint ahogyan a 7.3. fejezet végén tárgyaltuk, a kibányászott ősmaradványi erőforrások eltűnése miatt az utóbbi kétszáz évben évente százszor annyi  $CO_2$  jut a levegőbe, mint amennyi természetes úton a földkéregből a légkörbe kerül.

Úgy tűnik, a tömeges kipusztulást okozó csapások a törzsfelődés természetes velejárói, a változások hajtóerői. Az élőlények egymásra utaltsága, lásd később, előbb-utóbb az élővilág egyensúlyi viselkedésére vezet. Kisebb helyi változás fajok eltűnését okozhatja és az életterüket más fajok töltik be. A tömeges kihalás másulatok (mutációk) óriási számát hozza létre.

## 8.7. Az ember megjelenése

Az emberhez vezető fajok közül 9, maradványaiból ismert fajról tudunk és a becslések szerint még 6 további ilyen faj létezhetett. Kivéve az embert, valamennyi eltűnt.

195 ezer éve jelent meg Afrikában a mai ember, a szavannai térségben élt jó ideig. Százezer évvel ezelőtt part mentén hajózva juthatott el Dél-Afrikába, ahol kidolgozottságukban magas szintű, elvont gondolkodásra utaló 90 ezer éves barlangrajzokat találtak. Például elődeink mértani idomokat is rajzoltak. Dél-Afrikában él egy olyan törzs is, amely 90 ezer - 150 ezer évvel ezelőtt vált el a többi embertől, ezt az anyai ágon öröklődő mitochondriális DNS vizsgálatából tudjuk. A 135 ezer évtől 90 ezer évvel ezelőttig terjedő időszakban a szavannát hatalmas szárazságok sora sújtotta. A genetikai vizsgálatok szerint ekkortájt az emberiség különálló kis csoportokra szakadt, melyek egymástól függetlenül fejlődtek. 70 ezer éve annyira szélsőséges volt az éghajlat, hogy az emberiség csaknem kipusztult, létszáma 2000 körülire csökkent. Miután az éghajlat jobbra fordult, a szétszóródott csoportok növekedni és érintkezni kezdtek egymással.

Afrikából 55-60 ezer évvel ezelőtt indulhatott el a széttelepülés. Part menti hajózással Arábián, Ázsián, a Maláj-félszigetet érintve az ember 45 ezer évvel ezelőtt jutott el Ausztráliába, évenként kb. 1 kilométert haladva. Afrikából szárazföldi úton kb. 40 ezer éve érkezett meg a mai ember Európába. Az újabb, 2015 novemberében közzétett leletek alapján a mai ember Afrikából elindulva, szárazföldi útvonalat követve már 100 ezer évvel ezelőtt eljutott Kínába.

Hogy mióta visel az ember öltözetet, mostanában adhatunk becslést. Az emberi tetvek, a fejtetű és a ruhatetű igen közeli rokonok. Mivel a kínálózó életteret az újonnan megjelenő fajok igyekeznek minél gyorsabban kihasználni, a tetűös fej- és ruhatetűvé szétválása arra az időre tehető, amikor az ember ruhát kezdett hordani. Az újabb genetikai kormeghatározás szerint ez már 170 ezer évvel ezelőtt megtörténhetett. A ruházatot viselő ember már hidegebb éghajlaton is megélhetett.

**Rokon emberfajták.** A neandervölgyi ember, melynek agymérete a mi agyméreteinket is meghaladta, Euráziában élt és 29000 éve tűnt el. Az Afrikából Euráziába átkerült mai ember kereszteződött a neandervölgyivel. Valószínű őseink eleve jóval többen, tízszer annyian voltak és számbeli fölényükkel szorították ki a neandervölgyi embert.

2010-ben közzétették, hogy újabb, a neandervölgyi embertől különböző ember maradványaira leltek. Emberi ujjpercet találtak az Altaj hegység egy barlangjában. Mivel a nagy hidegben a DNS jól megőrződött, sikerült kiértékelni. 30 ezer évvel ezelőtt élő embertől származik, ám ez a DNS vizsgálat szerint nem azonos sem a mai, sem a neandervölgyi emberrel. Ez a gyenyiszovainak nevezett ember Szibéria délebbi területein és Délkelet-Ázsiában élt. 2015 novemberében közzétették, hogy az ugyanott folytatott ásások újabb leleteinek elemzése azt mutatja, hogy a gyenyiszovi ember már 100 ezer évvel ezelőtt megtelepedett a barlangban. A neandervölgyi és a gyenyiszovi ember nagyon közeli rokonok, közös őstől 400 ezer éve váltak szét. A neandervölgyi Európa, a gyenyiszovai Ázsia felé vándorolt.

A neandervölgyi és a gyenyiszovai emberek közös őstől a mai ember 600 ezer éve válhatott el. A neandervölgyiek Eurázsia nyugati, a gyenyiszovaiak a keleti részén éltek. Közeli rokonok voltak és keveredtek. Nemrég egy olyan, valaha Szibériában élt ősi ember genetikai állományát tárták fel, akinek az apja gyenyiszovi, az anyja neandervölgyi volt. Továbbá az is kiderült, hogy a gyenyiszovi apa családfájában legalább egy neandervölgyi ős is található.

Jelenlegi adataink szerint a mai, Afrikán kívül élő ember DNS-állományának 1,5-4%-a ered a neandervölgyi embertől, a dél-kelet ázsiai népességre ez a szám 1,8%. A délkelet-ázsiai szigetvilágban élők DNS-állományának a 6%-a a gyenyiszovi embertől származik. A kínai és az ázsiai szárazföldön élők valamint az amerikai indiánok genetikai állományának 0,2%-a ered a gyenyiszovi embertől. Ők még egy, az őseinktől egy millió évvel ezelőtt elvált embercsoporttal is kereszteződtek, ezek Európában és Ázsiában éltek.

## 9. Élőrendszerek (ökörendszerek)

Csak az utóbbi pár évtizedben honosodott meg az a közelítés, hogy a dolgokat a környezetükkel összefüggésben, rendszerben vizsgáljuk. Élőrendszer a bokor, a rajta élő valamennyi élőlényrel együtt, vagy a tó a benne lévő növényekkel és állatokkal. Élőrendszert képez a Hortobágy, vagy a Kárpát-medence élővilága, és maga az élő természet egésze is környezetével együtt.

**A nem kívánt következmények elve.** 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 mint befolyásolja környezetét és más élőket. De az élőrendszer esetén lehetetlenség, hogy a kísérlet során csak egy-két dolgot engedjünk változni, miközben az összes többit állandónak tartjuk, ahogy ezt a természettani (fizikai) kísérletek során megtehetjük. Az élőrendszerekben is érvényesül az ún. nem kívánt következmények elve. Ez azt mondja ki, ha beavatkozunk egy szerveződő rendszerbe, előre nem látható dolgok is történhetnek. Ezt mondja ki a pillangó-hatás is, lásd a 4. fejezetben. Példák erre az Aral-tó és a Viktória-tó élőrendszerébe való emberi beavatkozás nemvárt következményei.

A Közép-Ázsiában található Aral-tó tenger maradványa, sós vizű. Az őt tápláló két nagy folyó, a Szirdarja és Amu-darja vizével öntözni kezdtek. A sivatagos Közép-Ázsia mezőgazdaságát gyapottermesztésre szakosította a szovjet rendszer és ehhez sok víz kellett. Mivel nem számoltak a következményekkel, túl sok vizet használtak fel és mind kevesebb jutott az Aral-tóba. Csökkenni kezdett a tó területe, megindult a kiszáradása. Mára már csak a tó felületének kis töredékét borítja víz, a szabaddá vált tófenekéről egyre több só kerül szárazra. Télen fagyok tördelik a sót, vad sivatagi szelek kavarrják és hordják szerteszét. A só hatalmas területeket tett és tesz terméketlenné, lakhatatlanná. Ezzel a virágzó, gyapottermelésre szakosított mezőgazdaság álma szertefoszlott, a területeket világszerte példátlan méretű összeomlás sújtja.

Afrikában terül el Viktória-tó. Vízfelülete 70 ezer négyzetkilométernyi, ezzel a világ második legnagyobb kiterjedésű tava. Mellékén emberek milliói élnek, életüket a halászat, a tó határozza meg. Ám a valaha halban gazdag tó halállománya tönkrement, mert 1950-es években új fajt telepítettek be, a nílusi sügért. Azt remélték, hogy a nagyméretű nemes halra való horgászat - a nílusi sügér hossza elérheti a két métert, tömege a 2 mázsát - több vendéget vonz majd a tópartra.

Hamar megtizedelte a falánk ragadozó a tavat benépesítő apróbb halak állományát, azóta kb. 350 őshonos fajt pusztított ki. Ezek kisméretű algákkal és élősködőket is hordozó csigákkal táplálkoztak. Korábban a környék lakói ezeket a halakat fogyasztották. Számuk csökkenése miatt az algák elszaporodtak és az elpusztult algák a tó fenekére süllyednek. Tetemeik bomlástermékei csökkentik a tó oxigéntartalmát, elpusztítva ezzel a tó mélyvízi halállományát. Elszaporodtak a csigák is és súlyos betegségeket terjesztenek.

Helyi halászok most a nílusi sügért fogják ki és ezeket a hatalmas halakat tűzön főzik meg. Korábban a kisebb halakat szárítva fogyasztották. Főzésükhöz fa kell, ezért a környék erdei véstesen pusztulnak. Ennek következtében gyorsan pusztul a talaj, tovább rombolva a tó egyedülálló élőrendszerét. A gazdaság szempontjából akkor józan cselekedet teljes, csaknem Kárpát-medencényi térség élőrendszerét tette tönkre.

**Élőrendszerek energia háztartása.** Az élőrendszerek energia háztartásának alapja a naperő, amely rövidebb-hosszabb ideig az élőrendszerben marad, de a rendszeren belül alakja változik. A növény az általa megkötött naperő legfeljebb 10%-át képes felhasználni, a többi hőként távozik. Ez az arány a hőtan főtételeinek a következménye, lásd a 4. fejezetben, mivel munkavégzés közben a munkavégzésre használhatatlan energia részaránya nő. Emiatt egy erőforrás hasznosíthatóságának hatásfoka mindig alacsonyabb száz százaléknál.

Ha az élőrendszerben az energiahasznosítás módját nézzük, és az egyes csoportokba az energiát azonos forrásból szerző szervezeteket rakjuk, akkor az első csoportba a fényt megkötő szervezeteket, a növényeket sorolhatjuk. Következő csoportba a növényevő állatok tartoznak. A növényekkel táplálkozó állatok az elfogyasztott energiát szintén hasonló hatásfokkal használják fel. A megevett vegyületek energiájának



kb. 10%-a hasznosul a nyúl, tehén és más állatok szervezetében. Ahogy egyik csoportról a következőre átmegegyünk, a hasznosított energia aránya kb. ekkora marad.

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

**A Gaia-modell.** Az élő szervezet testrészeit bonyolult, egymásba kapcsolódó körfolyamatok, visszacsatolások tartják életképesen, ezek biztosítják az élethez szükséges feltételek viszonylagos állandóságát. Ilyen közel állandó jellemző a testnedv összetétele, vagy az emlősök testének a hőmérséklete.

A legegyszerűbbeket kivéve, élőlény önmagában, a többi élő nélkül nem létezhetne és természetesen nem létezhetne élettelen környezetében sem. A földi élővilág is körfolyamatokra épül, ilyenek a víz, szén, nitrogén, foszfor, kálium stb. körforgása a természetben. Az élőrendszer energia- és anyagforgalmát egymásba is kapcsolódó körfolyamatok sokasága alkotja. Valamennyi tápláléklánc nagyobb körfolyamatok része. Egyes körfolyamatok rövidebb-hosszabb időtartamúak lehetnek, egymásba is kapcsolódhatnak, kapcsolódnak, ezek teszik az élő természet 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.

A Gaia modell - Gaia a görög hitregékben a Föld istennője -, szerint a teljes földi élővilágot egyetlen élő szervezetként értelmezhetjük, amely az életfeltételeit igyekszik állandónak tartani. A légkör összetételét is a földi élővilág alakította ki és tartja fent. Vagy 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, lásd a 7.1. szakaszt. Ha emelkedik a bolygó hőmérséklete, elszaporodnak a növények és széndioxidot vonnak ki a légkörből. Ezzel az üvegházhatás, lásd a 7.3. szakaszban, 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.

## 9.1. Talajélettan

A felszíni szárazföldi élővilág körfolyamatait fenntartó erőforrást, a naperőt, a növények kötik meg. A naperőt felhasználva növény néhány széndioxid és víz molekulából energiában gazdag szerves vegyületet, cukrot készít, majd a DNS a cukrok energiáját használva építi fel a fehérjéket, a zsírokat és a sejt egyéb molekuláit, köztük magát a DNS-t is. Elkészítésükhöz számos kémiai elem szükséges. Közülük csak a szén származik a légkör  $CO_2$  gáz molekuláiból, az összes többi szükséges elemet a talajból veszi fel egyszerű, vízben oldott szerves sók alkotórészeként. Közülük a nitrogénsók, a kálisó és a foszfát a legfontosabbak. Miután a növény a vizet elpárologtatja és az elemeket beépíti a testébe, ezeknek a talajban pótlódniuk kell. A víz esővízként és hóként jut vissza. A felvett elemeket a lehullott levelek, korhadó növényi részek, állati anyagcseretermékek és tetemek energiában gazdag szerves vegyületei tartalmazzák, amelyek ezután a talaj élővilágát, a talajon és a talajban élő, táplálékláncokba szerveződő gombák, állatok és élőcskék (baktériumok) sokaságát táplálják. A talajélők anyagcseréjének végtermékeiként nitrogénsók, kálisó, foszfát és egyéb egyszerű szerves vegyületek keletkeznek. Míg a talaj élővilágát az elhalt növények és állatok éltetik, a talaj élővilágának anyagcsere végtermékei a növényeket táplálják. Azaz a szárazföldi növény- és állatvilág és a talaj élővilága egymásra vannak utalva, nem létezhetnek egymás nélkül. Átlagosan 200 év alatt képződik 1 centiméter vastag termőtalaj.

A talaj élővilágának otthont adó termőréteget televényföldnek, humusznak nevezik. A termőtalaj valamennyi fontos tulajdonságát, így a termékenységét, vízháztartását, levegősségét és lazaságát élővilága,

végző soron a széntartalma határozza meg. A talaj szénttartalmának csökkenése egyben a talaj élővilágának pusztulását is jelenti. Ha a talajból kipusztul az élet, szén hiányában a vizet és a műtrágyát sem tudja megkötni, így a talaj terméketlenné válik.

**Lemming a tundrán.** Az élőrendszer és a talaj kapcsolata a kopár, évenként hónapokig sötét, fagyos északi tundrák élővilágában egyszerűbbnek mondható. Messze északon, az örök fagy birodalmában nagyon gyér a növényzet és így a táplálékláncok is egyszerűek. Az egybeolvadó két-három hónapos tavaszi-nyári-őszi időszakra a fagy csak a talaj felső rétegében enged ki. Ezért itt csupán pár növény, sások, füvek és egy-két törpe cserje élhet meg. Egyedüli növényevő emlős a prémes bundájú sarki egér, a lemming. Négyévenként nagyon elszaporodik, annyira, hogy a közhit szerint elindulnak a partra és a sziklákról a tengerbe vetik magukat.

A négyévenkénti körforgás oka a következő. Amikor a lemmingek nagyon elszaporodnak, mindent lelegetnének. Emiatt az agyonlegelt növényzet elsatnyul, nem tudja magát helyrehozni, mert a sovány, már kisebb mélységben is fagyott talajban kevés a nitrogén, kálium és foszfor. Élelmet keresve bolyonganak, tömegesen pusztulnak éhen, kevesebb mint egy százalékuk éli túl a növényzet tönkremenetelét.

A hosszan tartó sarki fagyok miatt a tetemeikben tárolt szerves anyag csak lassan alakulhat át a növények számára is felvehető szervetlen sókká. Ahogyan a lemmingek test bomlani kezd és újra megjelennek a talajban a nitrogén, kálium és foszfor, úgy kezd a növényzet magához térni. Négy év elteltével a növényzet megújul, új hajtásokat, leveleket hoz és a tundra csodálatosan szépen kivirul. Ekkor a lemmingek ismét elszaporodhatnak és lelegetnek mindent. Újra bekövetkezik az összeomlás.

Befolyásolja a lemmingek négyéves körfolyamata a belőlük élő ragadozók, így a sarki róka táplálkozását is. Ahogyan a lemmingek száma változik, annak megfelelően ingadozik a sarki rókák népessége és ez hat a vidéken élő madarak életére is. Ha a kevés a lemming, a rókák több madára madár tojást esznek és a fiatal madarakra vadásznak. Emiatt a madarak népessége is négyéves ingadozásokat mutat.

## 10. Az ember

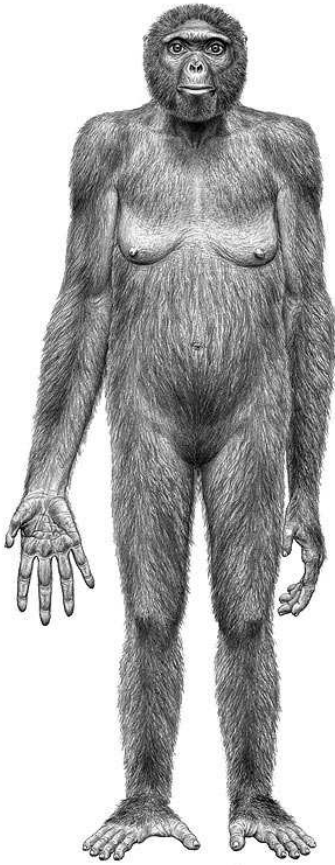
Korábban a fejlődés jelei a termet, a csontozat és az izomzat méreteiben, a táplálkozás, a mozgás a szaporodás folyamatainak hatékonyságában jelentkeztek. Emberré válásunk folyamatának legfontosabb élettani jellemzője az agy térfogatának és szerveződöttségének igen gyors növekedése. 3-4 millió évvel ezelőtt élt elődeink agymérete kb.  $400\text{ cm}^3$  volt. A 20-30 ezer évvel ezelőtt élt ember agytérfogata még  $1500\text{ cm}^3$  volt, mára ez az érték  $1350\text{ cm}^3$ -re csökkent.

### 10.1. Az ember kialakulása

Még nem teljesen ismert a főemlősök törzsfája. Genetikai távolságaik vizsgálatából az adódott, hogy az emberhez vezető ágtól a gorilla kb. 7-9, a legközelebbi élő állati rokonunk a csimpánz kb. 6 millió éve vált el. 2009-ben közölték az Etiópiában 4,4 millió évvel ezelőtt élt, Ardi névre keresztelt emberelődünk eléggé részletes leletanyagának feldolgozását. A leletek feldolgozása alapján készült rajz a 29. ábrán látható.

Ardi nem az ember és a csimpánz közös őse, hanem egy kb. 2 millió évvel a szétválás után élt előember. Részben a közös őst, másrészt a később megjelenő emberelődeink jegyeit mutatja. Számos jellemzője nem ember felé mutató, és a mai afrikai majmokból is hiányzik, azaz a csimpánzzal közös őstől jellemző. Ezért helytelen a feltételezés, hogy az ember a majmtól származik, hiszen a közös őstől nem volt majom. Az sem mondható, hogy a csimpánz közelebb áll közös őstől, mint a mai ember.

Ardi erdős szavannán élt és a fán lakott. Nemcsak gyümölcscsel táplálkozott, a fák alatt is gyűjtögetett. A talajon felegyenesedve, két lábon járt. Együttesen, csoportban élve kellett gyűjtögetniük, csak így védekezhetek a lapulva, lopakodva falkában vadászó nagymacskák ellen. Hasonlóan, mint ma a 40-50 fős



29. ábra. Ardi, az Etiópiában 4,4 millió évvel ezelőtt élt 50 kg tömegű, 120 cm magas nő

csoportban élő csimpánz. Ha a fákon figyelő őrszemeik lapuló oroszlánt vesznek észre, a riasztást követően a csoport a fákra menekült. Míg a csimpánz elmajmosodott, Ardi fokozatosan az erdő világosabb, több fényhez jutó része felé húzódott, mivel ott az aljnövényzet dúsabb, nő és így több és változatosabb táplálékhoz juthatott. Eközben egyre nagyobb veszélybe került, hiszen ott kevesebb a fa és emiatt a fákra való menekülés egyre nehezebb. Úgy védekeztek, hogy nagyobb területen eloszolva több őrszem figyelte a területet és a riasztás művelete is összetettebbé vált.

**Az emberré fejlődés hajtóereje a fokozódó veszélyben való élés.** Gyors és megbízható döntést kellett hozniuk, mivel akkoriban az emberélet roppant nagy kincs volt. Ha az oroszlánok évente egy-két embernél többet el tudtak volna ragadni, a csoport aligha maradhatott volna fent. A fokozódó veszély egyre figyelmesebbé és éberebbé tette őket és magával vonta az emberi agy térfogatának növekedését és felépítésének összetettebbé válását. A magzat agykérge az anyától kapott ingerek hatására hálózódik be. Emiatt az éberebb kismama magzatának agykérge több ingert kap, mint az átlagos magzat agykérge. Ez elsősorban az ingereket fogadó, feldolgozó tartomány fejlődését serkenti. Egyébként éppen a gyors feladatmegoldásra, munkára fogható tartományának, a munkamemóriának a többi agyterülethez való arányától függ, hogy milyen eséllyel lehet valaki sikeres értelmiségiként. Agykérgeink egy szeletkéje, a macska vagy majom agykérgehez nagyon hasonló, ugyanazokat a hírvivő molekulákat használó, oszlopocskákba rendeződő kéregsejtekből áll, csak hogy agykérgeink felülete jóval nagyobb, háromszázszorosa a macskáénak. Feltételezhető, hogy az emberi agykéreg igen gyors növekedését az egyre gazdagabb táplálékforrást nyújtó és egyben egyre veszélyesebb térségek felé húzódás hajtotta. A növekvő agykéreg nemcsak a védekezést tette sikeresebbé, hanem képessé tett a természeti környezet alaposabb megfigyelésére. Hasznosítható felfedezések születhettek.

Ardi életmódjának változását a tűz alkalmazása gyorsította fel. Elődünk egymillió évvel ezelőtt bizonyosan, de valószínű, hogy már jóval korábban is használta a tüzet. Ezzel igen értékes táplálékokhoz jutott.

A hús és a burgonyához hasonló, magas keményítőtartalmú gumók nyersen ehetetlenek, de a hús nyáron, a gumó pedig sárral körbetapasztva egyszerűen megsüthető. Könnyen emészthetőek, laktatók, így az anyagcsererendszernek kevesebb munkát kell végeznie és elődeink testének erőforrásai másféle feladatok megoldására fordíthatóak. Egyúttal a csoport életmódja is jelentősen változott. Kevesebb időt kellett az élelem keresésére fordítaniuk, megnőtt a közösségi tevékenységekre fordítható idő és a tűz alkalmazása, a róla való gondoskodás is átalakította a csoport életét. Jobban kellett egymásra figyelniük, meg kellett osztaniuk a feladatokat, kapcsolattartási módszereiknek is gazdagodniuk kellett. Egy másik nagy felfedezés is született, őseink rájöttek arra, hogy nemcsak egyszerű hangjelzésekkel közölhetnek egymással valamit, hanem különböző magasságú hangokat egymás mellé helyezve szavakat képezhetnek, majd a szavakból mondatokat állíthatnak össze. A sült ételek fogyasztása a rágást is nagyban megkönnyítette, és ezzel fogazatunk, arc- és szájszerveink hangképzéshez valamint beszédhez való idomulását is serkentette.

Ha már használták a tüzet, nagyobb vadakra is vadászni kezdtek. Ardi lába és lábfeje a hosszú, akár órákig tartó futásra, keze szerszám használatához idomult. Kezdetleges hajítófegyverével éppen csak meg tudta vérezni a vadat, amely ugyan menekülhetett, ám a mérgezett hegyű dárdával megsebzett állat lassan kábulni kezdett és így a hosszú, órákig tartó futásra is képes ember egy idő után el tudta ejteni. Valószínű erre vezethető vissza az, hogy a hosszútávfutó hosszabb, közel órányi futás után könnyűnek, légiesnek érezve magát folytathatja a futást. Ezt az örömezéshez hasonló serkentést az agykéregben termelődő jutalmazó vegyület kelti.

A füves szavannán 300 ezer évvel ezelőtt megjelenő mai ember csak a többiekkel magas szinten együttműködve szervezhette meg a csoportosan vadászó oroszlánok elriasztását. A 150-200 fős csoportból a felnőtt férfiak viaskodtak az első vonalban, égő botjaikkal vívtak a vadállatokkal. A gyermekek a legvédebb helyen, középen voltak és a nők vigyáztak rájuk. Ebben nem merült ki a nők szerepe, mert mivel nem forogtak közvetlen veszélyben, könnyebben át tudták tekinteni, mi a helyzet, és ennek megfelelően irányították a férfiakat. A férfi egyrészt hallotta, mit kiabálnak, továbbá az ott támadó oroszlánra, valamint a közvetlen szomszédaira kellett figyelnie. Gyors és megbízható döntést kellett hoznia, mivel akkoriban az emberélet roppant nagy kincs volt. Ha az oroszlánok évente egy-két embernél többet el tudtak volna ragadni, a csoport aligha maradhatott volna fent.

Csak úgy lehet sikeres a védekezés, ha a csoporton belüli vetélkedés nem zavarja. Viszont a törzsfelődés megköveteli, hogy a legalkalmasabb párok kerüljenek össze és ez nem képzelhető el versengés nélkül. Főemlős őseinknél a valamennyi nőtényt birtoklására törekvő alfa hím a gorillánál és a csimpánzoknál, a hímek között szabadon válogató nőtény majom a bonobóknál, a törpecsimpánzoknál jelenik meg. A hímeknek az alfa hímmel való küzdelme állandó feszültség forrása. Még az annyira békésnek hitt bonobók élete sem felhőtlen. Ha a fiatal nőtény által elutasított hím erőszakoskodni kezd, az idősebb nőtény bonobók csapatosan esnek neki és alaposan ellátják a baját.

**Család.** Vadászó-gyűjtögető őseink családban éltek és vetélkedés csak a párválasztás idején volt. A fajfenntartási ösztön arra irányul, hogy a legjobb adottságú párok kerüljenek össze. Csak a legények versengenek egymással, legénykednek, és a leány a kialakuló rangsor alapján választ, majd igyekszik magához vonzani választottját. Elsősorban azt mérlegeli, hogy mennyire sikeres a legény, de az ösztönei is vezérlik. A vadászó-gyűjtögető csoportban a legjobb vadász számít a legsikeresebbnek, mivel az egyenlően elosztott zsákmányból ő vehetett legelőször. Egyben ő a legkiválóbb is, hiszen nemcsak a testi adottságai elsőrendűek, hanem a lelkiek is. Órák hosszat kell futnia a megsebzett vad után, és amíg el nem éri a fáradságot nem érző, légiesnek nevezhető állapotot, addig kitartónak, állhatatosnak, céltudatosnak is kell lennie. Bátornak és hidegvérűnek, kiváló harcosnak is kellett lennie, az oroszlánokkal való küzdelemben is helyt kellett állnia.

A legényt csak az ösztönei vezetik és csak akkor választhat, ha már kiválasztották, válogatni csak akkor válogathat, ha többen is vonzanák. Mivel a legkapósabb legénnyel számos leány szeretné magát észrevéttetni, ő a legvonzóbb leányra figyel fel, hozzá kezd közeledni. Hasonlóképpen jönnek össze a rangsorban

utánuk következők, így végül is a leginkább egymáshoz illők kerülnek össze. Bár a leányok között is alakul ki rangsor, nincs különösebb versengés, nem pazarolják erre az erőforrásaikat. Rájuk sokkal nagyobb feladat, a szülések, a gyermekek felnevelése és a családról való gondoskodás vár. Ezért a leány el tudja fogadni, hogy ő úgy néz ki, mint az átlag, mert hogy ki mit ér, azt később a családja mutatja meg.

Láthatjuk, hogy a családban élés nemcsak a csoporton belüli versengést szünteti meg, hanem a természetes kiválasztódás határfokát is növeli, mivel mind a férfiak, mind a nők részéről a jobbak a jobbakkal kerülnek össze.

Nem az erőnk, a gyorsaságunk, vagy érzékszervi adottságaink tartottak meg bennünket. Megmaradásunkat kezünk ügyességének és elménk képességeinek köszönhetjük.

**Agykéreg.** Az agykéreg a nagyagy féltékéit borítva helyezkedik el. Szürkeállomány néven is ismerjük, vastagsága kb. 2 mm, sejtsűrűsége nagyjából egyenletes. Különböző helyen lévő részei nagyjából mind ugyanúgy néznek ki, függetlenül attól, hogy érzékelések feldolgozásával vagy beszéddel vagy mással foglalkoznak. Egy kéregsejtnek több ezer vagy tízezer kapcsolódása lehet más kéregsejtekhez. A fehérállomány anyaga a kéregsejtek közötti összeköttetést adó huzalozásnak felel meg. Kiterítve az agykéreg felületét, 2200  $cm^2$ -i, mintegy négy A4-es lapot tehetne ki.

Az agykéreg sejtjei vízszintesen rétegekbe rendeződnek, általában hat réteget különböztetnek 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 érkező huzalokat fogadják, a felszíni rétegek neuronjai a szomszédos és más kéregterületekkel tartják a kapcsolatot. A függőleges szerveződésének alapegységei az oszlopocskák. Ezek kb. 100 agysejtet tartalmazó 0,03 mm átmérőjű hengerek, amelyek a kéreg felszínétől lefelé a fehérállományig húzódnak. Az oszlopocskák sejtjei azonos feladattal foglalkoznak. A látókéreg egy oszlopocskája pl. bizonyos szögben álló tárgyak körvonalaira érzékeny. Az oszlopocskák nagyobb egységekbe szerveződnek, azok azután még nagyobbakba. Az agykéreg szerveződése rangsor szerint felépülő rendszert képez.

Kéregsejtjeink a magzati kor nyolcadik hetétől a tizennyolcadik hétig alakulnak ki. Összekapcsolódásaik lehetőségét a genetikai állomány szabályozza, viszont, hogy ténylegesen miként kapcsolódnak hálózatokba, a külső, ismétlődő ingerek vezérlik. Huzalozódásuk már a magzati lét harmadik hónapjában elkezdődik. Ugyanis a magzat nagyon szoros kapcsolatban áll az anya szervezetével, érzékeli az anya érzelmeit, életének folyását. A születéskor még létező százmilliárd kéregsejtből egyéves korra már csak harmincmilliárd marad, mivel azok az kéregsejtek, amelyek nem kaptak elég sok ingert, természetes módon felszívódnak.

Ember és állat közötti különbség egyik meghatározó eleme az emberi agy fejlődésének folyamata. A legtöbb állat idegrendszerének kialakulása a születéssel lezárul. Ugyan az állatok is képesek tanulni, de csak annyira, amennyire agyuk születéskor rögzült állapota megengedi. Az emberi agy, bár alapvető sejtjeinek, az agysejtek száma a születés után már nem növekszik, mégis képes a fejlődésre, élettani értelemben is. Azon agyterületek körzetében, amelyeket erősebben dolgoztatunk, a hajszálok 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 kéregsejtek közötti huzalozási rendszer azonban átlagosan 48 éves korig finomodhat, fejlődhet. Ez arra utal, hogy a szellemi képességeink eddig a korig még bizonyosan fokozhatók. Az agy gyors feladatmegoldásra, munkára fogható tartományának, a munkamemóriának a többi agyterülethez való arányától függ, hogy mennyire lehet valaki sikeres a fokozott agyteljesítményt kívánó tevékenységekben.

## 10.2. Az emberi elme

Minél összetettebb feladat a környezethez való alkalmazkodás, az elmére annál bonyolultabb feladatok megoldása vár. Így a nagyobb csoportban élő, őrszemeket állító csimpánz elméje többre képes, mint az

őserdőt magányosan járó gorilláé.

Az elme a környezet érzékszervek által közvetített képének mintázatát összeveti a benne tárolt helyzetek mintázataival. Felméri, hogy a legjobban hasonlító közl melyikre mennyiben hasonlít és mennyiben térnek el az ismert helyzetekhez hozzárendelt döntések. Ezután nagyon gyorsan dönt. Ha a hozzárendelés alapja az évmilliók, évszázadok alatt felhalmozódott tapasztalat, ösztönről beszélünk. Míg az állat tanult mintázatai főleg élete elején íródhatnak be, az embernél a tanulás a felnőtté válás korának eléréséig, 25 éves koráig tart, de akár élete végéig is képes tanulni.

Ösztöneink az érzéseinkkel kormányoznak bennünket. Az érzések, az érzelmeink meghatározó szerepet játszanak abban, mint alkalmazkodunk környezetünkhöz, miként viselkedünk. Ha az ösztöneinknek megfelelően cselekszünk, jól érezzük magunkat, örülünk annak, hogy élünk és az életerőnk növekszik. Ha viszont ösztöneink ellenében cselekszünk, rossz vagy kellemetlen érzés jelzi vagy boldogtalanná válunk. Mindaz büntetés, ami a boldogtalansággal jár, rossz lesz a hangulatunk, kedvetlenné válunk és apad az életerőnk. Elménk az öröm és fájdalom, a siker és a kudarc, valamint a boldogság és a boldogtalanság érzéseivel jelzi, hogy a helyzet mit jelent számunkra.

**Öröm, siker, boldogság.** A lét- és fajfenntartási ösztön kézivezérlésűnek mondható, az őket szolgáló tetteink örömet okoznak, az ellenük hatókat rossz, kellemetlen érzések, fájdalmak kísérik. Mindez ösztönös, az évmilliók során felhalmozódó tapasztalat alakította bennünket ilyené. Így az éhesnek öröm az evés. A párkapcsolat az ismerkedéstől kezdve a beteljesülésig hosszú és soklépcsős folyamat. Ha az egyes állomásai nőnek és férfinak egyaránt, így vagy úgy, nem okoznának örömet, nem tennék és ezért nem lennének. Ráadásul ahogyan a beteljesülés felé tartunk, az örömezés egyre hevesebb, hogy ne tudjuk abbahagyni. Az örömezésnek igen nehéz ellenállni, de csupán percekig tart. Mindez évmilliók, évszázadok során rögzült bennünk.

Ösztöneink a közösséghez, a többi emberhez való viszonyunkat is szabályozzák, előírják, hogy egyrészt sikeresnek, másrészt pedig, hogy a csoportunkon, a közösségünkön belül önzetlennek, testvériesnek kell lennünk, meg kellett egymásban bízunk. Ha ugyanis vadászó-gyűjtögető ősünk azt mérlegelte volna, hogy inkább a mellette küzdők űzzék el a rájuk támadó oroszlánt, képtelenek lettek volna a sikeres védekezésre.

Sikeresnek a közösségen belül kell lennem, hogy legyen majd mit ennem, innom, találjak majd párt és legyen családom. A siker vágya a lehetőségek felkutatására, küzdésre, tanulásra ösztönöz. A siker, mint például a kívánt egyetemre kerülést lehetővé tévő érettségi vizsga letétele akár napokig tartó felszabadult érzéssel, sikerélménnyel jár együtt. De bármekkora legyen is a siker, hamar megszokjuk és jön a másnap, a következő hét. Meg kell tanulnunk, hogy mi vezet sikerhez vagy kudarchoz. Siker a kezdő hentesnek, ha eladja az állott húst, viszont hamar megtanulhatja, hogy egy ilyen siker tönkremenéshez, kudarchoz vezethet. Az öröm és a siker nem csupán az Ént erősíti, hanem a csoportot is, mivel csak az erős egyénekre épülő csoport lehet életképes. Manapság az elme csoporton belülinek a gyakran látott, ismert embertársainkat tartja.

A boldogság érzése az egyén másokat, a közösséget szolgáló tevékenységét serkenti és jutalmazza. Egyrészt akkor boldog az ember, ha azzal töltheti az időt, ami neki való, amit szeret csinálni. Ez nemcsak neki, hanem a csoportnak is jobb. Hogy mi a nekem való, mit szeretek csinálni, a génjeimtől függ. Lehet olyan adottságom is, amelyhez hasonlóval csak minden ötszázadik ember dicsekedhet, és olyanok is, amelyek csak minden tizedikben van meg. Sok mindenben pedig átlagos vagy átlag alatti vagyok. A közösségnek az a jó, ha lehetőleg mindenki csak olyasmivel foglalkozik, amiben a legjobb, vagy legalább is sokkal jobb, mint az átlag. Gondoljunk csak el, mit jelent valamennyiünk számára a munkáját kényszerből végző tanító, eladó vagy bárki más. A nemszeretem tevékenységekre kényszerülő boldogtalanná válik.

Környezetünkben sokféle tennivaló van, közöttük olyanok is, amikkel szinte senki sem szeret foglalkozni, de mégis el kell őket végezni. Ilyen lehet például a mosogatás. Tegyük fel ketten lakunk együtt, közösen étkezünk. Ha el vagyok fáradva, de láthatom, hogy a társam sincs jobb állapotban, a legjobb, ha én mosogatok. Ami az emberi kapcsolatokat illeti, akkor érez valaki boldogságot, ha a vele kapcsolatba kerülők az ő hatására jobbak lesznek vagy jobb állapotba kerülnek, növekszik az életerejük. Az emberbe bele

van íródva, hogy a tőle telhető legjobbat kell adnia magából a többieknek. A szegény és kevésbé sikeres egyén is lehet boldog. Ha valakinak bőven jut az örömeiből sikeres a pályáján és mégis boldogtalan, magában keresse az okát. Nem úgy bánik a környezetében lévőkkel, a családjával, ismerőseivel, beosztottjaival, ahogyan tehetné.

Mivel csak a többiekkel együtt boldogulhatunk, emberközpontú az értelmünk, mivel elménk elsősorban az emberi viszonyokkal való foglalkozásra összpontosít. A természetes környezetünk élő és élettelen elemeit is hajlamosak vagyunk emberszerű tulajdonságokkal, viselkedéssel jellemezni.

**A tudatos kialakulása.** Az állati elme a környezet érzékszervek által közvetített képének mintázatát a benne tárolt helyzetek mintázataival összevetve dönt. Felméri, hogy a legjobban hasonlító közlő melyikre mennyiben hasonlít és mennyiben térnek el az ismert helyzetekhez hozzárendelt döntések. Ezekből nagyon gyorsan dönt. Az állati elmében tárolt mintázatok többsége ösztönös lehet. Tanult mintázatai elsősorban élete elején íródnak be.

Elmének a még át nem élt helyzetekben hozandó igen gyors és megbízható döntések kimunkálására alakult ki. Az emberi elme első, ösztönös mérlegelési szempontja az alapvető szükségletek kielégítése. Tegyek azt, ami örömet okoz, hacsak nem tesz sikertelenné. Ha többet ennél a kívánatosnál, még örömet okozna, de hosszabb távon kudarcos, mert elhízhatok. Vagy rendetlenkedik a fogam, el kell mennem a fogorvoshoz, de a fájdalomtól félve nem akarok menni. Viszont így elveszíthetem a fogam, és foghíjasan kisebb esélyeim lesznek később, kudarcot vallhatok. De a sikeresség megítélésekor az elmének a csoportra is tekintettel kell lennie.

Tudatos gondolkodásunk, tudatunk kialakulása végső soron annak tulajdonítható, hogy az emberelő-dünk és a csoportja közötti viszony a füves szavannára való húzódás közben mind összetettebbé vált. Egyedül nem létezhetnék, csak a csoport tagjaként. Mulandó vagyok, valaha nem voltam, egy idő után már nem leszek, megmaradni a csoportnak kell. Az ősi vadászó-gyűjtögető csoport számára az a legfontosabb, hogy az egyén döntése a csoportot erősítse, úgy munkálkodjam és viselkedjem, ahogy az a csoportnak megfelel. Ugyan a siker érdekében az egyén szinte bármire képes lenne, de a csoportnak az a jó, ha azzal foglalkozik, ami neki testhezilló vagy legalább is valóban el tudja végezni. A csoport szempontjából ez a legfontosabb, utána következik az, hogy valamennyi csoporton belüli emberi kapcsolatban önzetlenül adódnak kell lenni.

Ha az észlelt helyzet ismert, az emberi elme az állati elméhez hasonlóan elemel, ilyenkor csak az elme tudatszint alatti tartománya, a tudatalatti működik. Ha nincs meg benne az észlelt helyzetnek pontosan megfeleltethető kép vagy mintázat, és ez elsősorban a csoporton belüliekkel érintkezve helyzetekben fordul elő, felméri, hogy a részben hasonló közlő közül melyikre mint hasonlít és az érintett területeket "szavaztatva" dönt. Ám ezt nem hajthatja azonnal végre elménk tudatos részének jóváhagyása nélkül. Hogy miként zajlik a felülvizsgálat, a következőképpen képzelhetjük el. A tudatos azt elemzi, hogy a tudatalatti által javasolt döntés és indoklása elfogadható-e, hogy mi lesz velem akkor, ha ezt csinálnám és milyen hatást gyakorlok ezzel a többiekre. Feltételezhető, hogy egy adott, létező vagy képzelni való helyzetet a benne tárolt tanult és öröklött boldogság-boldogtalanság, siker-kudarc és öröm-fájdalom mintázatokat tartalmazó állományokkal veti össze. Ezt nagyon gyorsan megteheti és eldöntheti, hogy a tudatalatti által ajánlott cselekvés végrehajtható-e. Ha nem, valószínű bekerül a meghozott döntést felülvizsgáló mintázatok közé.

Míg a csoporton belül nagyon jóknak, testvérieseknek kell lennünk egymással, az idegennel máshogyan bánunk. Mivel a másik csoport, az oda tartozó ember versenytárs, be lehet őket csapni, félre lehet őket vezetni, meg lehet őket rövidíteni. Ez sikernek számít, hiszen így többet szerezhetünk magunknak.

Ha a döntéshozatalra vonatkozó, most leírt elképzelés igazolható, akkor a tudatos és a tudatalatti között nincs valódi határ. Míg a tudatalattiba nem láthatunk bele, a tudatos szint működése már követhető lehet, mivel az egyszerű igen-nem, és-vagy, akkor-ha összefüggésekkel dolgozik. Mivel ezek állandóan ott forognak a fejünkben és az egymáshoz tartozó, egymás mellé rendelhető viszonyok vizsgálata matematikai alapfogalmakhoz társítható, nem csoda, hogy van érzékünk a matematikához. Ez nem azt jelenti, hogy a tudatos tevékenységünket ténylegesen végig is követjük. Annál tudatosabb és egyben szabadabb valaki,



minél mélyebbre lát magába, mennél inkább képes a tudatszint alatt hozott döntések felülvizsgálatára, a magasabb szint felsőbbségének tartására. Lelki életünk, hangulataink, érzelmeink, gondolataink, hogy éppen milyen a kedvem, elégedett vagyok-e vagy nem, végső soron az Én és a Mi viszonyának pillanatnyi állapotára vezethető vissza.

A letelepedett ember már nem viselkedhet csupán az ösztöneit követve. Hajtóerejük ellenében nem élhetünk, viszont máshogyan, hasonló jellegű cselekvési mintázatokat végezve kiélhetjük őket, azaz ösztöntörekvéseink nemesíthetőek. Gyermekkorban, amikor könnyebb nevelni, az ösztönökhöz hasonlóan működő viselkedési mintázatok, erkölcs ültethető be az emberbe. Egy adott ösztönadottságot az egyén neveltetése, tanultsága, erkölcsössége szintjének megfelelően különbözőképpen élheti ki. Ha viszont egy adott ösztöntörekvést nem élünk ki, elnyomunk, megbetegszünk.

A letelepedés után kialakult erkölcs elfojtja bennünk mindazt, ami boldoggá tehetne bennünket. Mai értékrendünkben a vagyon az elsődleges, így ma szinte mindenki mindenkivel versenyez. Emiatt önzőnek kell lennem, és mindenféle nemszeretem munkát el kell vállalnom, különben megrövidülök, és így lemaradok. Emiatt a boldogságra való ösztönös törekvés el van nyomva bennünk. Nem csoda, hogy a mai ember számos, a boldogtalansággal összefüggő lelki-testi betegségben szenved.

**Értelmesség és művi értelmesség.** Az agy rangsorolt felépítettségű, az ismeretek feldolgozásában, kezelésében különböző szintű szerveződések működnek közre. Hálózatainak működése során nem csupán az kéregsejtek közötti kapcsolatok, hanem maguk a kéregsejtek is fokozatosan és állandóan változnak. A kapcsolatok és a kéregsejtek számos, úgymond feleslegesnek nevezhető változáson is átesnek, és elő nem írható működési, viselkedési módokat tesznek lehetővé. Agyunk kísérleteken, tévedésen és sikeren alapuló tanulásra is képes.

Számos kísérlet történt a művi, gépi értelmesség kifejlesztésére, azonban az agyéhoz hasonló jellegű értelmességű számítógépet nem sikerült kifejleszteni. Ennek az oka végül is az, hogy az idegrendszer valójában nem, illetve nem közvetlenül programozott rendszer. A számítógépnél előírjuk, műveleti utasításokkal rögzítjük, hogy mit várunk el tőle, és ennek megfelelő szerkezettel készítjük el. Mivel az agyunkban a szerkezet és működés között nincs jól meghatározott viszony, agyunk és az utasításokkal vezérelt számítógép működése között elvi ellentét áll fenn. Emiatt nehezen képzelhető el emberi módon viselkedő számítógép előállítás.

Egy 2016 februárjában megjelent közlemény szerint az emberi agy annyi adat tárolására képes, mint amennyit az Internet egésze tartalmaz. Míg a hagyományos számítógép a 0 és 1 értéket felvevő bitekben tárol, az agy kéregsejtjének adategysége 26 féle értéket vehet fel. Így az emberi agy harmincmilliárd kéregsejtje  $10^{15}$  bit adat tárolására lehetne képes. Mindezt agyunk 20 watt körüli teljesítménnyel üzemelteti. Hasonló teljesítményű számítógép működtetéséhez 1 Gigawatt, azaz 1 milliárd watt volna szükséges.

**Emberi természet és nevelhetőség.** Ősréginek mondható kérdés, az öröklött adottságok vagy a nevelés-e a meghatározó. Angol szójáték szerint: 'nature or nurture'? Nem egyszerű a válasz. Legfőbb tanulási módszerünk a másik utánzása. Kutatások igazolják, hogy a szülők és gyermekek viselkedése között szoros kapcsolat van. Kedvesen, szeretettel nevelő szülők gyermekei öntudatosak, bíznak magukban, a határozottan viselkedő szülők gyermekei jó magaviseletűek és ha a szülők sokat beszélnek 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. De a szülők nemcsak nevelik a gyermekét, hanem génjeit is átadják. A gyermek és a szülő viselkedését elemezve azt is mondhatjuk, hogy a szülőtől örökölt gének tehetik a gyermeket valamire rátermettebbé. Továbbá nem csak a család neveli a gyermeket, hanem amint az nő, kevesebbet tölt otthon, inkább a többiek viselkedése alakítja.

Két végletes vélemény küzd egymással. Egyik, a beletörődő, fásult felfogás szerint az emberi természetet úgy kell elfogadni, amilyen, nem lehet az embert bölcsebbé, kedvesebbé, jobbá tenni és a társadalmat

ennek tudatában kell berendezni. Másik, a délibábosnak mondható felfogás szerint az ember a társadalom miatt annyira korlátolt. Ha egy jobb társadalmat hozunk létre, az emberek is jobbak lesznek. Jobb- és baloldaliságnak ezek a gyökerei. A jobboldali ragaszkodik a hagyományokhoz, mivel az emberi természet olyan, amilyen, a gyengébb állam hívei, mert a kormányzók nem elég bölcsek ahhoz, hogy jól irányítsanak, erős rendőrséget és katonaságot akarnak, mivel a bűn és a hódítás vágya állandóan kísérti az embert és a szabad piac hívei, mivel szerintük a piac az egyéni önzőséget is a közösség boldogításának eszközévé teszi. A baloldali a fenti álláspontokat kishitűeknek és érzéketleneknek minősíti. Hisz abban, hogy ha a nevelési, művelődési, oktatási, sajtó és tájékoztatási rendszerünkön valamint célkitűzéseinken megfelelően változtatunk akkor az emberek értelmesebbek, kedvesebbek, békésebbek és jobb lelkűek lesznek.

**Ember és élőrendszere.** Az ember mint természeti lény csak táplálékként vesz fel energiát. Ez átlagosan napi 2500 kcal, átszámítva 120, vagyis egy állandóan égő 120 wattos izzó napi fogyasztása. Vagy csaknem napi 3 deci étolajjal üzemelünk, merthogy 2500 kcal kevesebb mint 3 deci étolaj és így gázolaj energia-tartalma. Ám az ember, a tűz felfedezése óta külső erőforrást is használ. Hogy egy, a társadalomban élő ember a 120 watt hányszorosát használja fel, az erőforrás rabszolgák számának szokás nevezni. Az állatok háziiasításával, szél és vízerő alkalmazásával az ipari forradalom előtti európai társadalmak erőforrás rabszolgáinak száma 4 körül lehetett. Valamennyi így felhasznált energiaforrás megújuló. Ősmaradványi eredetű erőforrások, a szén, kőolaj és földgáz felhasználásával ma világátlagban 15 erőforrás rabszolgánk van és 7,5 millárdan vagyunk. Mindez a természetes körfolyamatok rendjének megzavarásához vezetett. Az élőrendszer működésének főbb zavarai a következők:

- Az ősmaradványi erőforrások tüzelése miatt jelentősen megnőtt a légkör  $CO_2$  tartalma, mivel ahogyan a 7.3. fejezet végén tárgyaltuk, eltüzelésük miatt az utóbbi kétszáz évben évente százszor annyi  $CO_2$  jut a légkörbe, mint amennyi természetes úton a mélyből a levegőbe kerül. Az üvegházhatás növekedése mellett a légköri széndioxid egy részét az óceánok vizébe jutva annyira elsavasítja azt, hogy pár évtizeden belül az óceánok mélyvizei állatai életképtelenné válnak és ezzel a tengerek és óceánok élővilága felmérhetetlenül károsul.

- A freon légkörbe juttatása miatt megsérült az élővilágot védő ózonpajzs.
- 1975-2015 között a műtrágyázás és a nagyüzemi mezőgazdálkodás egyéb más eljárásai elpusztították bolygónk termőtalajainak egyharmadát.

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

- Rohamosan csökken az erőltetett öntözés miatt a talajvizek szintje.
- Az ember a szárazföldi fényenergia kb. 40%-át a maga javára használja. Ezzel a többi élőlényt fosztja meg a táplálékától. Az ember és háziállatainak együttes testtömege adja valamennyi földi gerinces testtömegének 98%-át, az összes többi gerincesnek csak 2%-nyi jut (a víztartalommal csökkentett ún. száraz testtömegben számoltak). Emiatt rohamosan csökken az élővilág változatossága. Zajlik a földtörténet hatodik és ha így folytatjuk, legnagyobb méretű kihalása.

- 1953 és 2003 között kifogta az ember a világtengerek halászható halainak 90%-át. Ez az ember gazdasági kárán kívül az élőrendszereket is beláthatatlan módon változtatja.

**Idegen lények létezéséről.** Vajon léteznek-e rajtunk kívül értelmes lények? Mivel legjobb tudásunk szerint a természet törvényei a világmindenségben mindenütt érvényesek, mondhatjuk, miért ne.

Itt a bolygónkon látjuk, az élet, legyen az akármilyen fajta, terjeszkedik, kihasználja a rendelkezésre álló életteret. Igazolja ezt az emberiség történelme is. Alig kétszázézer éve jelent meg a mai ember. Hamar uralma alá hajtotta a Földet és alig negyven évvel az első űrhajó felbocsájtása után a világűr bolygónk körüli szakaszát is felderítette és használatba vette. Józan becslések szerint, hacsak hamarosan össze nem omlik

műveltségünk, néhány száz éven belül sor kerülhet arra, hogy nagyobb űrállomásokat újakra 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 követnek, mivel a terjeszkedés az élet egyik legáltalánosabb tulajdonsága.

Ha ez így van, jogos a kérdés, hol vannak a Tejútrendszerben létrejött értelmes műveltségek. Ahogyan a 6.8. részben tárgyaltuk, a Tejútrendszer akár 40 milliárd bolygóján alakulhatna ki értelmes élet. Mindegyik akár külön-külön is képes lenne benépesíteni a csillagrendszert. Azaz Naprendszerünkben is hemzsegniük kellene a műszaki műveltséget kialakító értelmes lényeknek.

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

Zavaró a fenti eredmény, mert nem mondhatjuk azt, hogy az értelmes műveltségek közül az elsők egyike lehetünk, hiszen a Tejútrendszerben naprendszerünk nem tartozik az elsők közé. Hozzánk hasonló naprendszerekben már milliárd évekkel ezelőtt megjelenhettek volna értelmes lények. Ha egy hatalmas réten csak egyetlen pipacs virít, igen kicsiny annak a valószínűsége, hogy a sok ezernyi közül ő lenne a legelső. Jóval nagyobb annak esélye, hogy ő az egyetlen. Ezért abból, hogy nem észleljük más műveltségek létezését, joggal gondolhatunk arra, hogy az értelmes élet rendkívül ritka, kivételes jelenség.

De lehetséges az is, hogy a hozzánk hasonló szintre eljutott értelmes lények kimerítették ősmaradványi erőforrásaikat és nem találtak mást helyettük. Így a világűrbe is csak 100-200 évre léphettek ki, jeleiket sem sugározhatták hosszabb ideig. Közel száz éve sugároz az ember értelmes, zajszinttől megkülönböztethető jeleket az űrbe. Fénysebességgel haladnak, jelenleg a Naprendszerünket övező 100 fényéves sugarán belül vehetnék adásainkat. Ám az ősmaradványi erőforrásaink észrevehetően fogynak, és ha továbbra sem sikerül korlátlan energiaforrást felfedezni, amellyel időtlen ideig sugározhatnánk, 50 év múlva befejeződhetnek az adásaink. Ez esetben a kisugárzott jeleink egy tőlünk fénysebességgel távolodó 150 fényévnnyi vastagságú gömbhéjon belül terjednek tova a Mindenségben. Mivel az idő múlásával a gömbhéj vastagsága ugyan marad, de a térfogata egyre nő, a jeleink beleolvadnak a zajszintbe és lassan észlelhetlenné válnak. Az értelmes lények jelzéseinek észlelése továbbfejlődésünk lehetőségével biztatna bennünket.