

TERMÉSZETTÖRTÉNET

Debreceni Egyetem, 2006/2007. tanév II. félév, leadta és lejegyezte Végh László

2007. május 9.

0.1. Tudnivalók a vizsgázásról

Előreláthatólag bármelyik munkanapon lehet vizsgázni. Aki a vizsgaidőszak előtti héten vagy a vizsgaidőszakban jönne, annak a vizsgára az ETR rendszeren keresztül kell jelentkeznie. Aki május 11-e előtt vizsgázna, az a vizsgaidőpontot személyesen, vagy az 11359-es egyetemi hívószámon, (városból 509259) egyeztetheti vagy ír a vl@atomki.hu címre.

Helyszín: Atomki, VIII. épület, - ez egy háromemeletes betonépítmény - II em. 210-es szoba. Bejárat a Poroszlay úti portán, utána jobbra kell térni. Szóbeli a vizsga, írásban készülhetnek fel, tollat hozzanak. Jegyzet a teremben csak zárt táskában tartható.

Sajnos a jegyzetben lévő ábrák, különösen ha kisebbek a betűk, nehezebben láthatók. Ezért javaslom, hogy a jegyzet pdf változatában aki csak teheti, nézze meg az ábrákat. Több közülük színesben látható. Jegyzet feltalálási helyei: www.atomki.hu/kornyezet valamint ntp.science.unideb.hu/hun/jegyzetek.php.

Tartalomjegyzék

0.1. Tudnivalók a vizsgázásról	1
1. Alapismeretek	1
1.1. Tér és idő	1
1.2. Kisvilágtan	4
1.3. Elemi részecskék	5
1.4. Alapvető kölcsönhatások	6
1.5. Nagy egyesített elméletek	7
2. Kezdetek	8
2.1. Égi távolságok mérése	10
2.2. Színképek	12
2.3. Ósrobbanás	14
3. Világegyetemünk fejlődése a csillagvárosokig	20
3.1. A természeti semmiből induló világegyetem	20
3.2. Első másodperc	21
3.3. Első három perc	23
3.4. 380000 év	24

4. A világegyetem mai arculatának kialakulása	25
4.1. Csillagvárosok	26
4.2. Csillagok	28
5. Naprendszer és Föld	33
5.1. Naprendszerünk születése	34
5.2. Föld fejlődése	35
5.3. Körforgások a Földön	37
6. Élet és fejlődése	39
6.1. DNS és gének	40
6.2. Élet keletkezéséről	43
6.3. Törzsfajlás nagy lépései	44
6.4. Élet megjelenése és fejlődése a Földön	46
6.5. Az ember megjelenése	47

1. Alapismeretek

Áttekintjük a világegyetem születésétől az ember megjelenéséig terjedő időszakot. Ehhez, különösen a legkezdetekkel való ismerkedéshez, foglalkoznunk kell a tér és idő tulajdonságaival, a nagyon kis méretetek világának törvényeivel valamint az elemi részekkel és az alapvető kölcsönhatásokkal.

1.1. Tér és idő

Mindentől független tér és idő. Tér a mindennapi tapasztalat és a Newton által elfogadott feltételezés szerint csak egy van. Ez a világban mindenütt ugyanaz és mentől független. Három kiterjedése van és minden, ami ebben a világban létezik, ebben a térben helyezkedik el. Bármit is csinálunk, akárhogy mozognak a térben, a tárgyak hosszát, magasságát, szélességét mindig is ugyanakkorának mérjük. Ehhez hasonlóan, az idő is mentől független létező. Feltételezve a mentől független időt, egy adott esemény időtartamát, mondjuk egy atomi állapot életidejét mindenki, mindenhol, mozgásoktól és bármi mástól függetlenül ugyanakkorának észleli.

Tehetetlenségi rendszer és a relativitási elv. Térbeli mozgások leírásához vonatkoztatási rendszerre van szükség. Máshogy írjuk le a villamosban mozgó utas mozgását a villamoshoz vagy a járdaszigethez rögzített vonatkoztatási rendszerekből. Legkönnyebben használható vonatkoztatási rendszer a tehetetlenségi (inercia) rendszer, mert benne a természet törvényei a lehető legegyszerűbb alakban fogalmazhatók meg. Vegyünk egy olyan testet, amelyik magára van hagyva, azaz amelyre semmilyen más test nem hat. Tehetetlenségi rendszerben ez a magára hagyott test vagy nyugszik, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Ha tehetetlenségi rendszerben egy test nem így viselkedik, akkor valamelyik más test biztosan hatással van rá. Ha egy tehetetlenségi rendszerben egy test szabad, akkor valamennyi más tehetetlenségi rendszerből is szabadnak látjuk.

Tapasztalataink szerint a tehetetlenségi rendszerek nemcsak a szabad, hanem bármilyen más mozgást végző test leírására is egyenértékűek. Például ha zárt helyiségben a fonálinga lengését vizsgálom, az inga

mozgástörvényét, a fonálhossz és a lengéside kapcsolataát ugyanannak találom, ha a helység egy ház szobája, egy sima vízű tavon egyenesen síkló hajó vagy egy egyenesen mozgó vonat fülkéje. Nincs kitüntetett tehetetlenségi rendszer, a tehetetlenségi rendszerek a természettörvények alakja szempontjából egyenértékűek. Azaz valamennyi természettörvény minden egyes tehetetlenségi rendszerben ugyanolyan alakú. Ez a Galilei-féle viszonyítási (relativitási) elv.

Kölcsönhatási sebesség. Galilei és Newton idejében és utánuk még évszázadokig feltételezték, hogy a tömegvonzási és más lehetséges kölcsönhatások végtelen nagy sebességgel terjednek. Azaz ha egy test helyzete megváltozik, akkor azt a vele kölcsönhatásban álló másik testre való erőhatásban pillanatszerűen, késedelem nélkül megmutatkozik. De a tapasztalat szerint a természetben nem létezik pillanatszerű kölcsönhatás. Ezért a newtoni erőtan pontatlan. Ha a kölcsönható testek egyikével valami történik, a másik testen a valóságban ennek hatása csak bizonyos idő elteltével érződik. Csak véges idő elteltével figyelhetők meg a másik testen azok a folyamatok, amelyeket az adott változás idézett elő. Ha a két test távolságát elosztjuk a szóban forgó időtartammal, megkapjuk a kölcsönhatás terjedési sebességét. Azonos a természet alapvető kölcsönhatásainak terjedési sebessége és ez éppen a fénysebességgel egyezik meg.

Speciális relativitás elve. Relativitási elv és véges kölcsönhatási sebesség együttes figyelembe vételét a speciális relativitás elmélete fogalmazza meg. Eszerint a fénysebesség, mint természettörvényekben szereplő mennyiség, valamennyi tehetetlenségi rendszerben azonos kell, hogy legyen. Itt a speciális szó itt arra utal, hogy tömegvonzási hatásoktól eltekintünk.

Valamennyi elvégzett mérés összhangban van a speciális relativitási elvvel. Eszerint a légüres térben mért fénysebesség ugyanakkora, bármelyik tehetetlenségi rendszerben mérjük is. Ez a kijelentés meglehetősen különös dolgot állít, ha a mindennapi tapasztalatainkra gondolunk. Ha valaki egy 7 m/s sebességgel repülő labdával megdob bennünket és mi 4 m/s sebességgel menekülünk a labda elől, akkor a labda 3 m/s sebességgel közelít felénk. Ha a labdával szembe futunk, akkor a labda 11 m/s sebességgel közeledik hozzánk. Ha viszont a lézerágyú fénysugara elől egy óriási sebességű űrhajóval akarnék menekülni, az űrhajóból azt észlelnénk, - bármekkora is űrhajónk sebessége, - hogy a fénysugár mindig 300000 km/s fénysebességgel közelít felénk. Továbbá mindegy, mekkora sebességgel repülnénk az űrhajóval a fényjel után, vagy repülnénk felé, a fényjel mindig fénysebességgel mozogna űrhajónkhoz képest. Azaz a fénysebesség mindig ugyanakkora, függetlenül attól, hogy a fényforrás és megfigyelő mint mozog egymáshoz képest. Ez Einstein szerint csak úgy értelmezhető, ha egy esemény időtartama vagy a méterrúd hossza a különböző sebességgel mozgó tehetetlenségi rendszerekben különbözőek. Azaz a méterrúd hossza és az időtartam nem mindentől független. Függnek attól, milyen sebességgel mozgó tehetetlenségi rendszerből mérjük meg őket.

Mozgó rendszerben az óra lassabban jár. Hasonlítsuk össze az óra járását a mi tehetetlenségi rendszerünkben és a hozzánk képest mozgó tehetetlenségi rendszerben. A speciális relativitáselmélet szerint a mozgó rendszerben lévő óra lassabban jár. Ezt a hatást a repülőgépen nagyon pontos órát használó utazó ki is tudja mutatni. Repülőgép fedélzetén lassabban telik az idő. Körülrepülve a Földet, a repülőgép fedélzetén lévő óra a földön maradt társához képest 59 nanomásodpercet késett, pont annyit, mint az adott sebességgel repülő gépre Einstein elmélete jóslott. Ez ugyan nem sok, de minél gyorsabban mozog valami, annál lassabban telik számára az idő. Erre példa a Föld felszínén megfigyelt, ám kb. 20 km magasan keletkezett müonok észlelése. Bomlékony részecskék a müonok, átlagosan $2,2 \cdot 10^{-6}$, azaz 2,2 milliomod másodpercig létezhetnek. Ha fentről fénysebességhez közeli sebességgel jönnek is lefelé, (sebességük a fénysebességet nem érheti el), akkor a fenti élettartam alatt legfeljebb 660 métert tehetnének meg. Ennek ellenére, befutva a 20 km körüli távolságot, lejutnak hozzánk a talaj szintjére. Ugyanis mialatt a mi óránkon kb. 60 milliomod másodperc telt el, a müon "saját" óráján, ami a vele együtt mozgó órát jelenti, eltelt idő ennek csupán 1/30-ad része, 2 milliomod másodperc. Ha csaknem fénysebességgel haladó űrhajóval

közlekednénk, akár a millió fényévekre lévő csillagvárosba is csupán pár évet öregedve utazhatnánk el. Természetesen, közben a Földön évmilliók telnének el.

Négykiterjedésű téridő. Tér és az idő viszonylagosságát a speciális relativitáselmélet matematikailag a négykiterjedésű téridő segítségével írja le. Három kiterjedésű a tér, egy pontja három adattal, az x, y, z értékeivel jellemezhető. Ahhoz, hogy a téridő egy pontját megadjuk, négy értéket kell ismernünk, az x, y, z helyadatok mellett tudnunk kell a t időt is. Mivel a négykiterjedésű téridő összetevői azonos mértékegységgel kell, hogy rendelkezzenek, negyedikként a t idő helyett a fénysebességszer idő, azaz ct összetevőt használják.

Következésképpen, valamennyi fizikai mennyiségre el kell végezni a négydimenziós tárgyalást. A lendület vektorához rendelhető negyedik mennyiség az energia. Ebből a négydimenziós kapcsolatból kapta meg Einstein a híres $E = mc^2$ képletet, amely azt fejezi ki, hogy az m tömeggel rendelkező testnek emiatt $E = mc^2$ nagyságú energiája is van. Ha például egy elektron befogódik egy proton köré és hidrogénatom keletkezik, akkor annak tömege kisebb, mint a szabadon létező proton és elektron tömegeinek összege. Úgy kapható meg a hidrogénatom kialakulásakor felszabaduló energia, hogy a proton és elektron tömegének összegéből kivonjuk a hidrogénatom tömegét és ezt a tömegkülönbséget megszorozzuk c^2 -tel. Ez az energia a hidrogénatom kötési energiája, a hidrogénatom kialakulásakor egy ilyen energiájú foton viszi el.

Általános relativitáselmélet. Az az általános relativitáselmélet kiindulópontja, hogy szabadeséssel zuhanó liftben a magára hagyott tárgy lebeg vagy egyenesvonalú egyenletes mozgást végez. Azaz a zuhanó rendszerben lévő magára hagyott test ugyanúgy viselkedik, mintha tehetetlenségi rendszerben volna, vagy nyugszik, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Ennélfogva belülről nem tudható, vajon tehetetlenségi rendszerben, vagy egy szabadon eső rendszerben vagyunk-e. Einstein ezért kimondta: Kisméretű, szabadon eső rendszerben a természet törvényei ugyanazok, mint tehetetlenségi rendszerben. A szabadon eső rendszer lehet valahol a Földön, akár a Tejútrendszer középpontjában, vagy fekete lyuk közelében, bárhol a Világmindenségben. Ez az elv az ekvivalencia elv, amelyből kiindulva az általános relativitáselmélet levezeti, hogy a téridő a térben lévő tömegek hatására elgörbül. A téridő tömegektől való függését az általános relativitáselmélet alapegyenletei, az Einstein egyenletek írják le. Ismerve a tömegek eloszlását, energiáit az Einstein egyenletek megoldása a téridő görbület milyenségét adja eredményül.

Tömör gömb által létrehozott téridőgörbület jellemzője, hogy tőle nagy távolságra a tér és idő a megsokszorozott szerkezetű, de a tömegekhez közelebb az idő lassabban telik. Ahogy a magasságot növelve távolodunk a Földtől, fentebb az órák gyorsabban járnak. Egy igen érzékeny magfizikai jelenséget kihasználva sikerült megmérni, hogy a 10 méterrel magasabban lévő helyen az Einstein féle elmélet által megjósolt módon telik gyorsabban az idő. De a különböző magasságban mérhető idők telése közötti különbség a mindennapi életben elhanyagolhatóan kicsiny. Egyedül csak a műholdas helymeghatározásnál (GPS) kell a kiértékelésnél figyelembe venni.

Ha a tömegek a térben egyenletesen oszlanak el - ez egy jó közelítés a világegyetem tömegeloszlására - akkor Einstein egyenletei vagy az időben táguló vagy az időben összefelé húzódó világegyetemet írnak le, időben állandó állapotú világegyetem nem létezik.

1.2. Kisvilágtan

A kisvilágtan (kvantummechanika) az atom szerkezetének magyarázatára született meg. Rutherford kísérletei meggyőzően bizonyították, hogy az atom tömegének túlnyomó része az atommagban összpontosul. De az atom szerkezetének értelmezése nagyon súlyos kérdéseket vetett fel. Ezeket a newtoni természettan és a villamosságban nem tudta megválaszolni. Csak a hagyományos szemlélettől elszakadó, merőben más alapokra építkező kisvilágtan képes leírni az atom szerkezetét.

El kell fogadni, hogy a világ kicsiben más, mint nagyban. Igen kis méretekben Newton törvényei érvényüket veszítik. A molekuláris és atomi méretekben a megszokott, emberléptékű fogalmaink használhatatlanná válnak. Elektronok, atomok és általában az eléggé kicsiny tömegű testek a térben nem pályákon mozognak, hanem hullámszerűen viselkednek.

Hullámcsomag. Egy hullám helyéről nem egyszerű beszélni, például egy szinuszhullám végtelen kiterjedésű. Egy hullámcsomag különböző rezgésszámú hullámokból összetevődött olyan hullámvonulat, amely egy adott időpontban csak egy bizonyos térrészben van jelen, és ez a hullámvonulat a térben mozog. A foton is egy hullámcsomag. De hullámcsomag rendelhető tömeggel bíró részecskékhez is. Ha a test annyira kis tömegű, mint az elektron, vagy akár az atom, akkor hullámcsomagjának kiterjedése a test méreténél nagyobb és a hullámtermészet jelei felismerhetővé válnak. Ekkor az egyébként pontszerűnek vehető részecske pontos helyéről nem beszélhetünk, mert a hullámcsomagon belül bárhol ott lehet.

Szabadon mozgó elektron mint hullámcsomag terjed a térben. Olyan lemezhez érve, amin két lyuk van, az elektron nem mint golyó, hanem mint hullám jut át. Terjedési képe a lemez mögött pont olyan, mintha hullámként mindkét résen átment volna. Ha a testet jellemző hullámcsomag mérete jóval kisebb, mint a test térbeli kiterjedése, akkor a test hullámszerű viselkedése észrevehetetlen. Nagyobb tömegű testre a hullámcsomag mérete annyira kicsiny, hogy a mozgás már egyszerű pálya menti mozgás, amire érvényes Newton három törvénye.

Atomhoz vagy máshová kötött elektron viselkedése állóhullámmal írható le. Így a kvantummechanika alapegyenlete, a Schrödinger-egyenlet hullámra van felírva, ezt a rendszer hullámfüggvényének nevezzük. Egy hullámfüggvényes leírás sok olyan jelenséget megenged, ami a szokásos méretek világában elképzelhetetlen. A hullámszerű viselkedés miatt a kisvilág jelenségei sokkalta gazdagabbak, összetettebbek, mint amilyeneket a hétköznapi észjárással fel tudunk fogni.

Határozatlansági összefüggések. Minél kisebb a hullámcsomag kiterjedése, annál szélesebb a hullámcsomagot összetevő hullámok rezgésszámtartománya. Egy elektron hullámcsomagjának hullámhossza az elektron lendületével fordítottan arányos. Ebből könnyen megkaphatók a nevezetes határozatlansági összefüggések. Hullámcsomagot mint olyat nem tudunk mérni, csak az elektronok helye vagy lendülete mérhető. Hely és lendület egyidőben pontos értékeiről viszont nem beszélhetünk. Egy elektron helyének és lendületének mért értékeit az ugyanolyan állapotú, azaz ugyanazzal a hullámcsomaggal jellemzett elektron esetén is másnak és másnak kapjuk.

Az elektron helyének bizonytalansága éppen az elektront jellemző hullámcsomag mérete, az elektron lendületének bizonytalansága a hullámcsomagot összerakó hullámok rezgésszámtartományának szélességével arányos. A Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés a hullámcsomagra vonatkozó általános matematikai tétel átfogalmazásának tekinthető. Eszerint az elektron helybizonytalanságának és lendületbizonytalanságának szorzata nem lehet kisebb, mint a Planck-állandó.

Egy állapot élettartamára és energiájának bizonytalanságára is érvényes határozatlansági összefüggés. Minél rövidebb az állapot élettartama, annál nagyobb lehet az energiájának bizonytalansága. Ez az összefüggés szokatlan jelenségeket is megenged. Még az energiamegmaradás is megsérülhet, igaz, csak nagyon kis időre. Minél nagyobb mértékű a sérülés, annál rövidebb ideig tart.

Hipp-hopp részecskék. Egészen megdöbbentő az, hogy az energiamegmaradás sérülése úgy is megtörténhet, hogy a teljesen üresnek vélt térből részecskék is előbukkanhatnak. Ez egyrészt azzal sérti az energiamegmaradás tételét, hogy a részecskéknek tömege is lehet, és az $E = mc^2$ összefüggés értelmében az energiatétel legalább ekkora mértékben sérül. Továbbá a kipattanó részecskének még lehet mozgási energiája is, ennek mértéke is növeli az energiamegmaradási tétel sérülését. Minél nagyobb a kipattanó részecske tömege, annál rövidebb ideig létezhet.

Ezeket a térből magától kipattanó és eltűnő részecskéket hipp-hopp (virtuális) részecskének nevezhetjük. Ilyen részecskék mindenütt, mindenhol állandóan keletkeznek és aztán eltűnnek. Létezésük, állandó keletkezésük és eltűnésük miatt az üres teret többé nem tekinthetjük igazán üres térnek.

1.3. Elemi részecskék

Néhány alapvető részecske különbözőképpen való összekapcsolódásával magyarázható a természetben előforduló sokféle alakzat. Anyagi tulajdonságokat az anyagot alkotó atomok illetve molekulák szerkezetének segítségével értelmezhetünk. Egy molekula szerkezetét a molekulát alkotó atomok, egy atom tulajdonságait az atomot alkotó atommag és az elektronhéj szabja meg. Amikor a kvantummechanika megszületett, az atom szerkezete már jól ismert volt, de az atommagról még mit sem tudtak. Ugyan a kvantummechanika nagyon jól leírta a molekulákat létrehozó kötések, az atomok felépítését és energiaszintjeit, de mit sem mondott az atommagokról.

Kulcskérdés, miket is tekinthetünk az anyag elemi összetevőinek. Elemi részen az anyag tovább már nem osztható építőkövét értjük. Feltételezzük, az elemi részeknek nincs belső szerkezetük és bármilyen kísérletben pontszerűen viselkednek. Kiderült, hogy az atom egyik alkotórésze, az elektron valóban elemi részecske, szerkezet nélküli, pontszerűnek vehető. Az atommag pozitív töltésű protonokból és a körülbelül ugyanolyan tömegű, semleges neutronokból áll. Bomlékony a neutron, átlagos élettartama kb. ezer másodperc. Korábban a protont és neutront elemi résznek tartották. Hozzájuk hasonló, igen számos más részecskét is eleminek vettek. Ezeket a a világűrben érkező, csaknem fénysebességű protonok által a felső légkörben keltett és itt a felszínen észlelhető sugárzásban - ez a kozmikus sugárzás - fedezték fel. Később a nagyon nagyenergiájú protonokat és elektronokat gyorsítóknál állíthatták elő és azokat atommagokkal ütköztették. Ilyen ütközések termékeit megfigyelve fedeztek fel még újabb elemi részeket.

Végül, egyre nagyobb energiájú gyorsítókkal vizsgálódva, kiderült, hogy ténylegesen elemi részecskéből csak néhány van. Összetettek a protonok és a neutronok is, kvarkokból állnak. Ezek már valóban elemi részek, legalább is ma így tudjuk. Töltött részecskék a kvarkok. Az u kvark töltése a proton töltésének $2/3$ része, a d kvark töltése $-1/3$ proton töltés. Egy protont két u és egy d , neutront két d és egy u kvark alkot. Meg kell jegyeznünk, hogy kvarkok csak a proton vagy a neutron vagy más, ezekhez hasonló összetett részecske belsejében létezhetnek, szabadon nem fordulhatnak elő.

Körülbelül a hetvenes évek végére vált elfogadottá az a nézet, hogy valójában csak kétféle alapvető elemi részecske létezik, lepton és kvark. Legismertebb leptonok az elektron és a neutrínó. A neutrínót az atommag béta bomlásában fedezték fel. Töltés nélküli, csaknem nulla tömegű, a fénysebességhez nagyon közeli sebességgel mozgó részecske. Tömeg nélküli részecskék is észlelhetőek, mert van energiájuk, sebességük, perdületük és más egyéb tulajdonságuk is mérhető. Igen nehéz a neutrínókat észrevenni, mert az anyaggal csak nagyon ritkán hatnak kölcsön.

A világegyetem anyagának túlnyomó része elektronból, az ún. elektron-neutrínókból, u és d kvarkokból, illetve a belőlük felépülő protonok és neutronok alkotta atommagokból áll. A fenti négy részecske egy részecskecsaládhoz sorolható és ehhez hasonló két további részecskecsalád is létezik, lásd a 1. táblázatot. Hogy miért nem csak egy, hanem három ilyen család létezik, nem ismert. A második családhoz a teljesen elektronszerűen viselkedő, de annál több mint kétszázszor nehezebb és bomlékony müon, a müon-neutrínó, az s és c kvark tartoznak. A harmadik család tagjai az elektronhoz és müonhoz hasonló de azoknál jóval nehezebb és bomlékony tauon, a tau-neutrínó valamint a b és t kvarkok. A neutrínó mindegyik változatából köbcentiméterenként 113 van jelen, de túlnyomó többségük észrevétlenül megy át az anyagon. Elemi részként tartják számon még a foton és más, később tárgyalandó részecskét is.

Legtöbb részecskének van, illetve létezhet ellenrészecskéje (antirészecskéje). Az ellenrészecske tömege megegyezik a megfelelő részecske tömegével, más tulajdonságai is ugyanolyanok, mint a részecskének, csak éppen a villamos töltése és egyéb hasonló jellemzője ellentétes előjelű. Az elektron ellenrészecskéje a pozitron, ahogyan a neve is utal rá, pozitív töltésű, egyébként mindenben az elektronnal azonos tulajdonságú. A kvark ellenrészecskéje az ellenkvark. A proton ellenrészecskéje az ellenproton, melynek villamos

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

1. táblázat. Az elemi részek táblázata. Első oszlopban a leptonok, harmadik oszlopban a kvarkok találhatók. A második és negyedik oszlop a részecskék villamos töltését tartalmazza. Ennek a felosztásnak megfelelően három részecskecsaládról beszélünk. A müion és tauon bomlékonyak és a proton kivételével valamennyi kvarkból felépülő részecske is bomlékony.

töltése negatív. A neutron ellenrészecskéje az ellenkvarkokból álló ellenneutron. Vannak olyan részecskék is, amelyeknek nincs olyan tulajdonságuk, aminek az ellenkező előjelű párja létezhetne. Ilyen részecske a foton is, amelynek így nincs ellenrészecskéje. Nemrég sikerült előállítani az ellenhidrogén atomot, mely ellenprotonból és a hozzá kötődő pozitronból áll. Még nem kezdődött el az ellenhidrogén tulajdonságainak részletes vizsgálata, de feltételezzük, ugyanolyan jellemzők írják le, mint a hidrogént.

Részecske és az ellenrészecskéje, ha találkoznak, megsemmisülnek. Sugárzasként távozik a tömegüknek megfelelő energia. Ha elektron és pozitron találkoznak, mindketten megsemmisülnek és az energiájukat, amely túlnyomórészt a tömegüknek megfelelő energia, két ellentétes irányba repülő, egyenlő energiájú foton viszi el. Nemcsak tömeg alakulhat energiává, energia is alakulhat tömeggé. Erre példa az, amikor nagyenergiájú foton atommaggal ütközik és az energiájából veszítve elektron-pozitron párt kelt. Tehát a tömeg \rightarrow energia, energia \rightarrow tömeg átalakulások egyaránt léteznek.

Világegyetemünk születésekor anyag és ellenanyag egyenlő mennyiségben keletkezett, de az anyag és ellenanyag közötti egyenlőség egy apró szimmetriasértés miatt megbomlott. Emiatt a világegyetem ma már csak anyagból áll, és ellenanyag csak kivételes körülmények között keletkezik.

1.4. Alapvető kölcsönhatások

Az elemi részek tulajdonságait csak kölcsönhatásaik ismeretében tárgyalhatjuk. Kifinomult kölcsönhatási módokra utalhatnának a természetben előforduló bonyolult, sokszínű folyamatok. Kiderült azonban, hogy a világ jelenségeinek gazdagsága csak néhány, valóban alapvetőnek tekinthető erő működésének köszönhető. Négyféle alapvető kölcsönhatást ismerünk, ezek a tömegvonzási, az elektromágneses, a gyenge és az erős kölcsönhatás. A tömegvonzást mindenki állandóan tapasztalhatja. Az elektromágneses kölcsönhatás legismertebb megnyilvánulásai a két villamosan töltött test között fellépő Coulomb erő valamint a mágnesek vonzásai és taszításai. Mind a tömegvonzás, mind az elektromágneses erők nagyobb távolságokon hatnak. Ez a tömegvonzás esetén nyilvánvaló, minden tömeg vonz minden más tömeget.

Tömegvonzásnak és Coulomb-erőnek a kölcsönható részecskék r távolságától való függése azonos, az $1/r^2$ függvény írja le. Nézve a két proton között fellépő Coulomb taszítás és tömegvonzás arányát, azt kapjuk, a Coulomb erő 36 nagyságrenddel erősebb. De a természetben az anyagok általában villamosan semlegesek, mert azonos számú pozitív és negatív töltést tartalmaznak. Gyakorlatilag a Coulomb-erő az atomok és molekulák belsejébe van zárva mert az atommagok pozitív és az elektronok negatív töltése leárnyékolja egymást. Ezért nagyobb távolságoknál csak a tömegvonzás játszik szerepet.

Erős kölcsönhatás. Az erős kölcsönhatás a kvarkok között ható erőnek felel meg. De a protonok és a neutronok között ható vonzóerők is az erős kölcsönhatás megnyilvánulásai, ezek az erők tartják össze az atommagot. Nagyon kicsiny az atommagban uralkodó vonzóerők hatósugara. Két proton, két neutron, vagy proton és neutron között az erős magerő szinte csak akkor fejt ki hatását, ha a részecskék már csaknem

érintkeznek egymással. Enélfgyva a protonok és neutronok közötti magerők csak a közvetlen szomszédok között lépnek fel.

Gyenge kölcsönhatás. A gyenge kölcsönhatás hatósugara roppant rövid. Létére szintén az atommagban zajló folyamatok, mint az atommag béta bomlása utalnak. Béta bomláskor az atommag egy neutronja protonná bomlik, miközben egy elektron és ellenneutrínó keletkezik. Hasonlóképpen, az atommag belsejében a proton neutronná alakulhat át, miközben pozitron és neutrínó keletkezik. Béta bomlás a proton vagy neutron egy kvarkja másik kvarkká történő átalakulásának felel meg, azaz a proton belsejében $u \rightarrow d$ és a neutron belsejében $d \rightarrow u$ átalakulások zajlanak. A $d \rightarrow u$ átalakulás során először egy W^- -nek nevezett, igen nagy, kb. 85 proton tömegű hipp-hopp részecske keletkezik és az bomlik el elektronná és ellenneutrínóvá. A W^- részecske és még két további társa a W^+ és a Z^0 a gyenge kölcsönhatást közvetítő részecskéknek tekinthető. Közvetítő részecskéi az elektromágneses, erős és gyenge kölcsönhatásnak is vannak. Az elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéje a hipp-hopp foton.

Elektrogyenge kölcsönhatás. Alaposabb tanulmányozás után kiderült, hogy elektromágneses és gyenge folyamatok igencsak hasonlóak is lehetnek. Így a Z^0 minden tulajdonságában megfelel az elektromágneses kölcsönhatást közvetítő fotonnak. Egyedüli különbség a foton és a Z^0 közt az, hogy a fotonnak nincs tömege. Van-e a közvetítő részecskének tömege, vagy nincs, akkor fontos, ha a kölcsönható részecskék távol vannak egymástól. Nagy tömegű hipp-hopp részecske csak nagyon rövid ideig élhet, mert a nagy tömege miatt eleve nagy az energiája is és ezért igen gyorsan el is tűnik. Igen rövid élettartama miatt nem repülhet messzebbre. Ezért a nagy tömegű hipp-hopp részecske által közvetített kölcsönhatás csak rövid távolságra éreztetheti hatását. Nulla tömegű hipp-hopp foton már alkalmas hosszú hatósugarú elektromágneses kölcsönhatás közvetítésére.

Ha a két kölcsönható részecske elég közel van egymáshoz, a kölcsönhatási folyamat milyenségét a közvetítő részecske tömege nem befolyásolja lényegesen. Ezért ha két kölcsönható részecske kb. 10^{-16} centiméternél kisebb távolságra van egymástól, az elektromágneses és gyenge kölcsönhatási folyamatok ugyanolyanok lesznek, mivel a fotonok valamint a W és Z^0 részecskék azonos módon keletkeznek és cserélődnek. Ezért nem érdemes két különböző erőről beszélni, mind a kettő ugyanolyan módon írja le a folyamatokat. Elektromágneses és gyenge kölcsönhatás helyett elég egyetlen kölcsönhatást, az ún. elektrogyenge kölcsönhatást tárgyalni. Ez volt akkor a helyzet, amikor a Mindenség mérete még nem haladta meg a fent említett igen kicsiny, 10^{-16} centimétert.

1.5. Nagy egyesített elméletek

Az a nagy egyesített elméletek kiindulópontja, hogy az elektrogyenge valamint az erős kölcsönhatást leíró elméletek szerkezete nagyon hasonló. Lehetséges olyan modellt készíteni, amelyben elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatási folyamatok egyetlen alapvető kölcsönhatásként tárgyalhatók. Ilyen elmélet a kvarkokat és a leptonokat is egyetlen részecske különböző változataként fogja fel és egy új jelenséget, a kvark-lepton átmenetek létezését is megjósolja. Két kvark kölcsönhatásának eredményeképpen belőlük egy lepton és egy ellenkvark keletkezhet. A kölcsönhatás közvetítője az ún. X -részecske, amelynek tömege a proton tömegének kb 10^{16} -szorososa. Ez az X -részecske a fotonhoz, a W^+ , W^- és Z^0 részecskékhez hasonló. Ha ez a fajta kölcsönhatás létezik, akkor a proton is elbomolhat.

Ilyen leírás csak rendkívül kicsiny, körülbelül 10^{-29} centiméteres méreteken belül érvényes. Akkor szükséges, ha a kölcsönható részecskék ilyen vagy ennél kisebb távolságra vannak egymástól. Egy proton bomlása akkor következhet be, ha a protonon belül két kvark ennyire közel kerül egymáshoz. Ez igen valószínűtlen, úgyhogy a proton elbomlásának lehetősége csaknem kizárható. Ilyen eseményt eddig nem sikerült megfigyelni, habár hatalmas berendezéseket építettek és működtetnek protonok bomlásának kimutatására.

Az, hogy a proton bomlását mindeddig nem sikerült megfigyelni, nem jelenti azt, hogy a nagy egyesített elmélet alapfeltevése hibás. Lehetséges az is, hogy a proton ugyan elbomolhat, de a nagyon kicsiny bomlási valószínűség miatt a jelenlegi mérőberendezések nem elég érzékenyek a proton bomlásának a kimutatására. Proton bomlásán kívül más, az egyesített elmélet által jóslt eredmény a jelen eszközökkel nem ellenőrizhető. Ilyen ennyire kis méretek leírására készített leírásokat inkább a világegyetem egészének tulajdonságaival lehet ellenőrizni. Ugyanis az űsrobbanást követő $10^{-40} - 10^{-35}$ másodpercben a világegyetem viselkedését ilyen elméletek írják le és az akkor történtek hatása megjelenhet a világegyetem mai szerkezetében is.

2. Kezdetek

Roppant méretével és méltóságával a csillagos ég mindig is lenyűgözte a felfelé tekintő embert. Évezredek óta adta és ad ma is munkát a az égitestek, a csillagok és bolygók mozgásának vizsgálata, értelmezése. Kopernikusz óta tudhatjuk, a Föld nem tekinthető a Mindenség középpontjának. Sokkal jobban leírhatjuk és megérthetjük a bolygók mozgását, ha feltételezzük, hogy azokat a Nap tartja maga körül pályájukon. Newton felismerte, hogy az égi mozgások a tömegvonzási erővel értelmezhetők. Ezzel az erővel tudjuk leírni és megérteni a bolygók pályáinak milyenségét, ez az erő hat az égbolt csillagai között is.

Newton végtelen világegyeteme. Tudjuk, a tömegvonzás egyetemes, minden tömeg között fellépő, ható erő, minden tömeg vonz minden más tömeget. Newton felismerte, hogy ebből a csillagos égre általános következtetéseket kell levonnunk. Newton elgondolkodott azon, milyen módon írható le a világegyetem egésze, ha a rendszert alakító, vezérlő erő a tömegvonzás. Miképpen érthető meg az, hogy az égbolt csillagai egymáshoz képest mozdulatlanak látszanak, tehát a Mindenség állandó állapotú, idegen szóval sztatikus. Ugyanis a csillagászok az ókori megfigyelésektől fogva ilyennek látták az csillagos eget. (Most csak zárójelben jegyezzük meg, a pontosabb mérések eredményeképpen ma már tudjuk, hogy a világegyetem nem állandó állapotú.)

Mivel a tömegvonzás valamennyi csillag között fellép, az égbolton álló csillagok mozdulatlansága Newton számára érthetetlen volt. Ha most állnának is, akkor a kölcsönös vonzás hatására meg kell kezdeniük az egymás felé való mozgást. Idővel egyre közelebb kerülnek egymáshoz, végül pedig egymásba, a csillagok összessége által alkotott rendszer tömegközéppontjába kellene zuhanniuk. Ezért a Mindenség állandónak látszó állapotára Newton a következő magyarázatot adta.

Azért nem mozognak egymás felé a csillagok, mert valamennyi csillagot minden egyes irányból egyenlő erő vonz. Egyetlen csillag sem mozdulhat el, mert mindenfelé vannak szomszédos csillagok, amelyek ugyanakkora erővel húzzák minden egyes irányba. Arra utal a csillagok mozdulatlansága, hogy az egyes csillagokra ható összesítő nagyjából nulla. Ez csak akkor lehetséges, ha az eget mindenhol, minden irányban egyenletesen töltik ki a csillagok.

Newton magyarázatának van egy meglehetősen súlyos következménye. Ha a fenti érvelés igaz, a csillagokkal egyenletesen betöltött égboltnak térben minden irányban végtelennek kell lennie. Sehol sem lehet széle, mert akkor a peremen lévő csillagokra csak befelé húzó erők hatnának és elkezdenének befelé mozogni. Ezért előbb vagy utóbb a tömegvonzás valamennyi csillagot mozgásba hozná 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. Bár a térben és időben végtelen világmindenség gondolatát általánosan elfogadták, voltak arra utaló jelek, hogy az állandó, örök és végtelen Mindenség képzelet ellentmondásokra vezethet. Hogyan is lehetne sötét az éjszakai égbolt, ha a végtelen sok csillag egyenletesen tölti ki a végtelen teret? Földi hasonlatként képzeljük el, egy rengeteg erdőben vagyunk. Bárhová

nézünk, csak fát látunk. Ha kisebb erdőben nézünk körbe, akkor a fák között átlátva meglátnánk az erdő szélét.

Olbers paradoxona erről szól. Ha a Mindenség térben és időben végtelen, és a világmindenségben a csillagok eloszlása egyenletes, a végtelen sok csillag fénye be kell hogy töltsen a teljes látóteret. Ekkor az éjszakai égbolt bármely része úgy ragyogna, mint a Nap. Nem lehetne az égen fekete folt a rengeteg sok csillag miatt. Bárhová is néznénk, valahol messze pont arrafelé is kellene lennie csillagnak.

Olbers paradoxona akkor oldható fel, ha feltételezzük, a világegyetem térben véges, ezért az égboltot csak részben "fedik" le a csillagok. Továbbá a csillagok sem élnek örökké, keletkeznek és elmúlnak. Csak azokat látjuk, amelyek éppen olyan életszakaszukban vannak, hogy fényük eljuthat hozzánk.

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

Általános relativitáselmélet és állandó állapotú világegyetem. Einstein általános relativitáselméletének alapegyenletei természetüknek megfelelően alkalmasak arra, hogy a világegyetem egészének viselkedését is leírják. Mint már említettük, az egyenletek megoldása szerint állandó állapotú Mindenség, melyben a csillagok egymáshoz képest állnak, nem létezhet. Vagy tágul, vagy összefelé húzódik a Mindenség, köztes, állandó állapot nem lehetséges.

Einsteint mélyen megdöbbenetette, hogy elmélete szerint lehetetlenség a newtoni állandó állapotú Mindenség. Annyira hitt az állandó állapotú világegyetemben, hogy elrontva egyenleteinek szépségét, összhangját, az egyenletekbe bevezette az ún. kozmológiai állandót, amely tömegek közötti taszító hatásnak felel meg. De hamarosan kiderült, hogy a kozmológiai állandóval kibővített általános relativitáselmélet sem képes igazából állandó állapotú világegyetem leírására. Már a legkisebb ingadozás is megszüntetheti a finoman kiegyensúlyozott Mindenség állandóságát, az elkezd tágulni, vagy összefelé húzódni.

Amikor később nagyobb felbontású távcsöveket használva felfedezték, hogy a világegyetem nem állandó állapotú, hanem tágul, Einstein azt nyilatkozta, hogy a kozmológiai állandó bevezetése élete legnagyobb tévedése volt. De 1998 óta a kozmológiai állandó újra izgalmas kérdés, ezzel később foglalkozunk.

Egészen a 20. század elejéig azt hitték, hogy a Naprendszer a Tejútrendszer központja. De a nagyobb távcsöveket felhasználó megfigyelések egyre pontosabb eredményekre vezettek. Kb. 1920-ra derült ki, 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. Miután a távolságok mérése az 1920-as években megbízhatóbb lett, kiderült, az ég csillagai halmazokba, csomókba tömörülnek. Ezeket a csillaghalmazokat csillagvárosoknak, idegen eredetű szóval galaxisoknak nevezik. Tejútrendszerünk is egy ilyen csillagváros.

2.1. Égi távolságok mérése

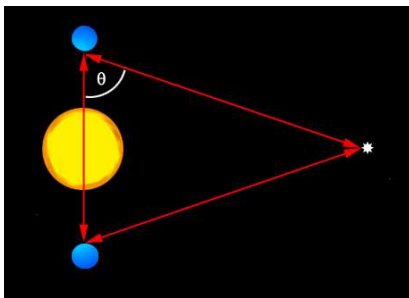
Égi távolságok mérése viszonyításokon alapul, melynek során azonos valódi fényességű csillagokat megfigyelve meg tudjuk mondani, hogy egymáshoz képest milyen távolságra vannak. Ahhoz, hogy pontos távolságokat tudjunk mondani, legalább néhány égitest távolságát pontosan meg is kell mérnünk. Először a viszonyításon alapuló módszert ismertetjük, majd foglalkozunk az azonosnak mondható csillagok fajtáival.

Fényesség és távolság. Az égi távolságok becslése a csillagok egymáshoz képesti fényességének meghatározásán alapul. Ha a csillagok mind azonos fényességűek lennének, akkor a fényességükből pontosan

meg tudnánk állapítani távolságukat. Minél messzebb van egy világító test, annál halványabbnak látjuk. Egy világító test látszó fényessége a test távolságának négyzetével fordítottan arányos. Gondoljunk példaként arra, hogy teljes sötétségben mint határozhatnánk meg egy égő gyertya távolságát. Ehhez kell egy vele azonos, ám ismert távolságra fekvő 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 állapítani.

Távolságmérés égi háromszögekkel. A háromszögelés a földi térképészet jól ismert módszere. Ha az ismert hosszúságú szakasz két végéről megmérjük, hogy onnan a távoli tárgy milyen szög alatt látszik, akkor a háromszög három adatának a segítségével - egy oldal és két szög - meghatározhatjuk az adott tárgy távolságát. Minél hosszabb az ismert távolság és mennél pontosabbak a szögmérések, a mért távolság annál pontosabb. Ilyen módon a Hold távolsága egyszerűen meghatározható. Egy adott időpontban két megfigyelő egyszerre mérje meg, mekkora szög alatt látja a Hold közepét. Ha a Hold éppen az egyik megfigyelő feje fölött van, a másik, nagyobb távolságra lévő megfigyelőnek csak azt kell megmérni, számára mennyire tér el a Hold szöge a függőlegestől. Ebből a szögből és a két megfigyelő közti távolságból a Hold távolsága pontosan megadható. Ha a bolygók távolságát akarjuk megmérni, akkor, mivel azok jóval messzebb vannak, mint a Hold, a két megfigyelőnek különböző földrészekről kell egyidőben a bolygó szögállását megmérni. Ezzel a módszerrel a Mars távolságát 1671-ben határozták meg. Egy megbeszélte éjszaka adott időpontjában a két megfigyelési pont Párizsban és a dél-amerikai Francia-Guyana területén volt.

Még a közelebbi csillagok is nagyon messze vannak a háromszögeléses módszer számára. Ilyenkor a felhasznált ismert távolság a Föld Nap körüli pályájának átmérője lehet. Adott csillag távolsága úgy határozható meg, hogy hathavonta megfigyeljük az égbolton való látszólagos elmozdulását. Azért láthatjuk máshol a csillagot, mert a Föld keringési mozgása miatt máshonnan, a Föld pályájának átellenes pontjáról nézzük őket. Ismerve a Föld pályájának átmérőjét, ami durván 17 fénypercenyi, a két észlelési szög különbségéből a háromszög összefüggéseit alkalmazva a csillag távolsága kiszámítható, lásd az 1. ábrát.



1. ábra. Égi távolságmérés háromszögelés segítségével. Más szög alatt látjuk a csillagot, ha a Föld pályájának átellenes pontjáról nézzük. A Föld pályájának átmérőjéből és a két észlelési szög különbségéből a csillag távolsága kiszámítható.

Ezzel a háromszögeléses módszerrel a 20. század végéig csupán néhány, nagyon közeli csillag távolságát sikerült megállapítani. Ugyanis a légköri zavarok a szögmérés pontosságát komolyan rontják. Ám a 20. század végén, a HIPPARCOS műhold felbocsátásával nagyot javult a helyzet, hiszen a világűrben végzett mérésekben a légköri bizonytalanságok nem zavarhatnak. Ezzel a műhoddal kb. 100 ezer csillag távolságát mérték meg nagyon nagy pontossággal. Így is csak a Tejútrendszer csillagainak egy milliomod részére tudjuk a pontos távolságot megadni. Az így megmért csillagtávolságok átlaga kb. 1000 fényév.

Változó csillagok. Pontosabb távolságméréshez hatalmas segítség az ún. változó csillagok megfigyelése. Ütemesen felfúvódó és összehúzódó test a változó csillag, be- és kilégzés lüktetésére hasonlító csillagrezgést figyelhetünk meg. Ilyen rezgő mozgást a Nap is végez, csak ez nem feltűnő, mert a vele járó változás

kicsinyke. Akkor a legfényesebb a változó csillag, amikor összehúzódott. Leghalványabb, amikor burka a legnagyobbra tágul. Változó csillag fényességváltozásának ütemideje egy naptól ötven napig terjedhet. Valódi fényességük a Nap fényességének 300 és 26 ezerszerese körül mozog.

Minél fényesebb egy változó csillag, annál lassabban változik. Ezt az összefüggést a 20. század elején a Kis-Magellán felhőben található nagyszámú változócsillag megfigyelésekor vették észre. Ha a csillag rezgésére gondolunk, ez érthető is. Minél nagyobb egy rezgő test, annál hosszabb ideig tart, amíg egyet rezeg. Gondoljunk arra, a kutyaugatásból meg tudjuk állapítani, kiskutya ugat-e vagy nagykutya. Egy kiskutya éles, magas hangon, azaz nagy rezgésszámmal, kis rezgésidővel ugat, mert rövid a torka. Nagykutya mély hangon ugat, kis rezgésszámmal, nagy rezgésidővel, mert hosszú a torka. Így értelmezhető a változó csillag fényessége és rezgésideje közötti összefüggés is. Végeredményben a változó csillag abszolút fényessége a rezgésidő mérésével meghatározható. Azután a csillag abszolút és mért fényességének viszonyából a csillag távolsága kiszámítható. Egy csillagváros távolságát a benne látható változó csillagokat megfigyelve határozhatjuk meg. Egészen addig alkalmas a módszer csillagvárosok távolságának mérésére, amíg a távolabbi csillagváros változó csillagai még felismerhetőek.

Változó csillag távolságának megadásához az is kell, hogy viszonyítási alapként legyen ismert távolságban kb. ugyanolyan változó csillagunk. Ennek a fényességét használva az összehasonlításhoz pontosabb távolságadathoz juthatunk. Ezért - gondoljunk a fenti példánkban a távolság kiszámításához szükséges ismert fényességű és távolságú gyertyára - legalább néhány változó csillag távolságát pontosan ismerni kell. Egészen az 1980-as évekig nagyon kevés ilyen, viszonyításként használható változó csillagot ismertünk. Pár éve a HIPPARCOS műhold adatainak segítségével már több változó csillagra is van pontos távolságértékünk. Ennek köszönhetően a változó csillagok távolságainak meghatározása ma már sokkal szilárdabb alapokon nyugszik.

Távolságok becslésekkel. Messzebb lévő csillagvárosoknál, ez a 30 millió fényévnél távolabbi csillagvárosokra vonatkozik, a változó csillagok már nem ismerhetők fel. Ilyen esetekben a csillagváros méretéből és a csillagváros egészének fényességéből következtethetünk távolságukra. Minél kisebbnek látszik a csillagváros átmérője és minél halványabb a fénye, annál messzebb van hozzánk. Ez a módszer már kevésbé megbízható, ugyanis a csillagvárosok mérete és így fényessége is erősebben eltérhet egymástól. Ezért ezzel az eljárással a fényesebb csillagvárosok távolságát kisebbeknek, a halványabb csillagvárosok távolságát nagyobbaknak mérjük.

Távolságmérés Ia szupernovákkal. Nemrég, a kilencvenes évtizedben sikerült új, megbízható távolságmérési módszert kidolgozni, amely az ún. Ia típusú szupernova megfigyelésén alapul. Később részletesen tárgyaljuk, a szupernovák csillagok robbanásának felelnek meg, aminek 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 szupernova a felfénylési idejének hosszával azonosítható, ez ugyanis a leghosszabb ideig fénylő szupernova. Ismert az Ia szupernova abszolút fényessége, a látszólagos és abszolút fényesség viszonyával pedig pontosan meg tudjuk mérni a távolságot. Ezzel a módszerrel nagyon távoli, akár tízmilliárd fényévre lévő csillagvárosok távolságát is pontosan meg lehet határozni.

2.2. Színképek

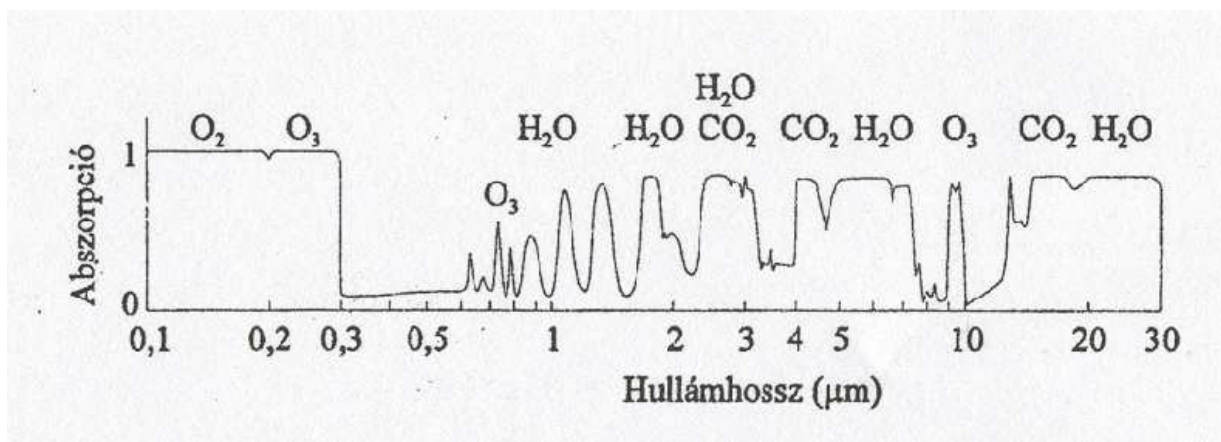
A világegyetemről tudottak forrása a hozzánk érkező sugárzások. Korábban a Mindenséget csak a látható fény tartományában vizsgálhattuk. Ennek oka nemcsak az eszközök hiánya, hanem az is, hogy a Föld légköre a világuéből hozzánk érkező sugárzások igen nagy részét elnyeli. Most először röviden felelevenítjük azt, amit a sugárzásokról tudnunk kell.

Elektromágneses színekép. Elektromágneses sugárzás a fény is, azok közül a legismertebb, mert hogy a szemünkkel látható hullámhossztartományból érkezik. Valamennyi elektromágneses sugárzás, akár csak a fény, azonos sebességgel, a fény sebességével terjed. Minél nagyobb a sugárzás hullámhossza, annál kisebb a rezgésszáma. A sugárzás energiája rezgésszámával arányos. A látható fény hullámhosszai a 400-700 nanométeres tartománynak helyezkednek el. Ennek a tartománynak a szivárvány színei felelnek meg. Napfényt üvegből készült háromszöggel tudunk színeire bontani. Az alacsonyabb hullámhosszú, nagyobb energiájú határon az ibolyaszín látható, a nagyobb hullámhosszú, kisebb energiájú határt vörösnek látjuk.

Haladjunk most az alacsonyabb energiájú sugárzások, azaz a növekvő hullámhosszak felé. Először az infravörös tartomány következik, ami a 700 nanométertől a milliméteres hullámhosszakig terjed. Ez a molekularezgések energiájának tartománya. Milliméteres hullámhossztól 10 centiméterig terjed a mikrohullámok tartománya. Mikrohullámú sütőink a 12 centiméteres tartomány körül működnek. 10 centimétertől ezer méterig tart a rádióhullámok tartománya. Egy FM adás átlagos hullámhossza 3 méter, a TV sugárzás hullámhossza 2 méter, a középhullámú átlagos hullámhossz 300 méter. A kilométernél hosszabb hullámhosszú elektromágneses hullámok a nagyon alacsony rezgésszámok tartományába esnek.

Ha a látható fényenél alacsonyabb hullámhosszak felé haladunk, először az ibolyántúli tartományba jutunk, ami nanométertől a 400 nanométerig terjed. Ibolyántúli sugárzás az atomok külső héjaiban történő átalakulások során keletkezik. Majd jön a röntgensugarak tartománya, ami az ezred nanométertől (pikométer) a nanométerig tart. Röntgensugarak atomok belső héjaiban történő átalakulások során keletkeznek. A pikométernél kisebb hullámhosszú sugárzásokat gamma sugárzásnak nevezzük. Gamma sugárzások atommagok átalakulásai során keletkeznek.

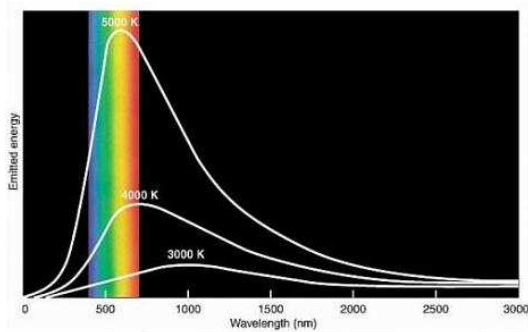
Érdekes még megemlítenünk, ezt később részletesebben is tárgyaljuk, hogy a különböző hőmérsékletű tárgyak más-más hullámhosszakon sugároznak. Testünk hősugárzása főleg a 10 mikrométeres tartományba esik, ez infravörös sugárzás.



2. ábra. Bolygók légkörének sugárzás-elnyelése mint a hullámhossz függvénye. Fel van tüntetve, adott hullámhosszat mely gázok molekulái nyelik el. A nagyobb energiájú ibolyántúli sugárzásokat az oxigén és ózon teljesen elnyeli. Jól látható a kb. 300-700 nanométeres sáv, ahol alig van elnyelés. Nem csoda, hogy ide esik a látható fény sávja. Efölött az infravörös tartományban a víz és a széndioxid elnyelő hatása tartja vissza a napsugárzást. Ezek a fő üvegházhatású gázok, lásd a 5.3. szakaszt

Bolygók légköre a látható tartományon kívül alig ereszt át másfajta sugárzást, lásd a 2. ábrát. Korábban, a műholdakra telepített műszeres vizsgálatok előtt a mérések emiatt csak egy nagyon szűk hullámhossz tartományra szorítkozhattak. Viszont a Mindenségben történekről szinte minden hullámhossztartományból kaphatunk fontos adatokat. A műholdakra telepített műszerek az utóbbi két évtizedben nagyon sok új adatot szolgáltatottak és egyre több új adatot kapunk. Csaknem a teljes elektromágneses tartományon, a rádióhullámok, mikrohullámok, infravörös, ibolyántúli, röntgen és gamma sugárzás tartományában folynak már műholdas vizsgálatok. Maga a Hubble űrtávcső pedig a látható tartományban ad nagyon pontos adatokat hiszen az űrbeli megfigyeléseknél légköri zavarok nem jelentkeznek. Manapság kezdik a különböző

módon mért adathalmazok egységes szempontok alapján rendszerezni, így az azonos égi tartományokra mért különböző jellegű adatok könnyen hozzáférhetővé válnak, nem kell őket különböző adatbázisokban keresni.



3. ábra. Adott hőmérsékletű test sugárzásának hullámhosszeloszlása. Itt a 3000 Kelvin, 4000 Kelvin és 5000 Kelvin hőmérsékletű testek sugárzásának színeképei láthatók. A vízszintes tengelyen a nanométerben mért hullámhosszak, a függőleges tengelyen az adott hullámhosszon kisugárzott energia mennyisége van feltüntetve. 500 nanométer környékén a látható fény tartományá van feltüntetve, ha színes az ábra, itt láthatjuk a szivárvány színeit.

Csillagok színeképe. Nem pusztán a csillag fényességét, hanem a csillagból kibocsátott fény összetételét, a csillag színeképet, a szivárvány színeinek megfelelő színes sávokból álló folytonos színeképet alkot. Ez a színekép a sugárzást kibocsátó test hőmérsékletének függvénye, lásd a 3. ábrát. Ezt az eloszlást hőmérsékleti sugárzásnak nevezzük. Mind a tartomány helyzete, mind alakja függ a sugárzó test hőmérsékletétől.

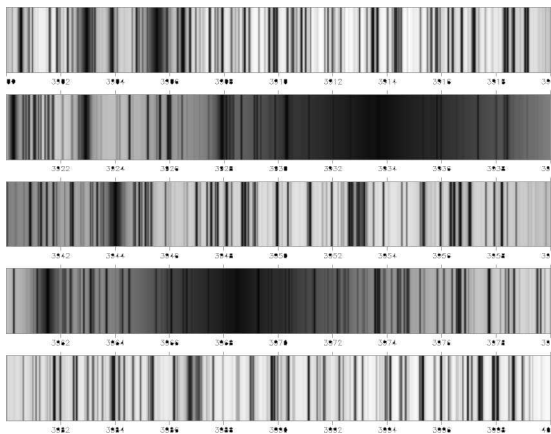
Olyan színű a csillag, amilyen színtartományban a legerősebb a sugárzása. Minél magasabb a csillag hőmérséklete, a csillag annál rövidebb hullámhosszakon sugároz. Sárga fényű Napunk hőmérséklete kisebb, mint 6000 Kelvin, a hidegebben sugárzó csillagok vörösek, a forróbb csillagok fehérnek vagy kéknek látszanak.

Vonalkódszerű mintázat színeképekben. Ha alaposabban megvizsgáljuk egy csillag színeképet, a hőmérsékleti sugárzásnak megfelelő folytonos eloszlásban fekete vonalak sokaságát vehetjük észre. Ezek a vonalak nagyon hasonló kinézetűek, mint a manapság a kereskedelemben használt vonalkódok, egyfajta mintázatot képeznek.

Azért mutatkoznak vonalak a csillagok színeképeiben, mert a csillag külső burkát alkotó gázok bizonyos hullámhosszakon elnyelik a csillagfelszínről kisugárzott fényt. Azaz a színeképben bizonyos hullámhosszak hiányoznak, ezeknek helyén látjuk a fekete vonalakat. Foton elnyelésekor egy atomi elektron alacsonyabb energiájú atomi pályáról magasabb energiájú atom pályára gerjesztődhet fel. Mivel az atomi pályák energiái csak meghatározott, diszkrét értékeket vehetnek fel, gerjesztéskor az atom csak meghatározott energiájú fotonok elnyelésére képes. Ezért csak olyan fotont nyelhet el az atom, amelynek energiája éppen két atomi pálya közötti energiakülönbséggel egyenlő.

Minden egyes atomban igen sok elektronpálya található és az elektronpályák energiái minden atomban mások. Ezért egy atom színeképeiben nagyon sok fekete vonalat észlelhetünk. Az atomi átmenetek energiái, így a az egyes atomok színeképvonalainak helyzete minden atomra más és más. Azaz a színeképet jellemző vonalas mintázat elemre jellemző. Ezért a csillag színeképeinek vonalas mintázatát tanulmányozva azonosíthatjuk a csillagban lévő elemeket.

Először a Nap színeképet tudták alaposabban tanulmányozni, a Nap színeképeinek egy kis részletét lásd a 4. ábrán. Majd a Nap színeképet a csillagok színeképeivel összehasonlítva megállapították, hogy a Napban és a csillagokban ugyanazok az elemek találhatóak. Anyaguk túlnyomórészt hidrogénből és héliumból áll.



4. ábra. Nap színeke a 3900-4000 Angström közötti hullámhosszak tartományában.

Ráadásul az egyes elemekre vonatkozó színekepvonalak viszonylagos erősségéből azt is meg lehet mondani, hogy a csillag felszínén található gázok milyen arányban vannak ott jelen.

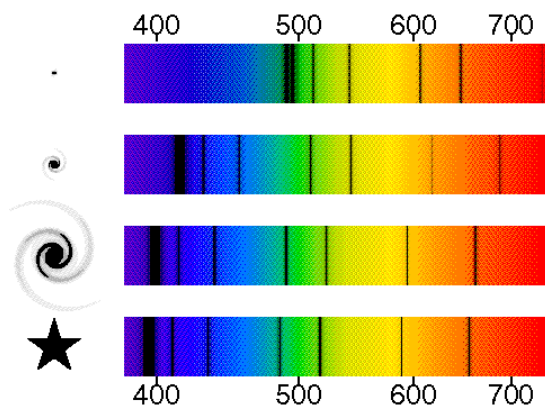
Színekepvonalak eltolódása. Ha a sugárzó atom mozog, a megfigyelőtől távolodik, vagy ahhoz közeledik, akkor az általa sugárzott fény hullámhossza a megfigyelő számára más lesz és másutt észleli a színekepvonalakat is. Ha az atom távolodik, a színekepvonalak hullámhossza növekszik, ami azt jelenti, a fény színe a vörös szín felé tolódik el. Ha a sugárzó atom közeledik, akkor a színekepvonalak hullámhossza csökken, a fény színe a kék felé tolódik el. Nézve a színekepvonalak eltolódásának mértékét, pontosan ki tudjuk számolni, hogy a fényforrás mekkora sebességgel távolodik tőlünk.

Ha a csillag felénk mozog, akkor színekepvonalai a csökkenő, azaz a kék hullámhosszak felé tolódik. Ha a csillag távolodik, vöröseltolódást észlelünk. A vonaleltolódás mértékéből meg tudjuk határozni a csillag távolodásának a sebességét. Ha egy csillagváros forog, akkor a forgás közben felénk mozgó részét kékebbnek, a tőlünk távolodó részét vörösebbnek látjuk. Ebből meghatározhatjuk a csillagváros forgássebességét. Kettős csillagok esetén - ahol két csillag egymás körül kering - meghatározhatjuk az egyes csillagok keringési sebességét. Ez utóbbi adatból meg tudjuk állapítani a kettős csillagot alkotó két csillag tömegének arányát.

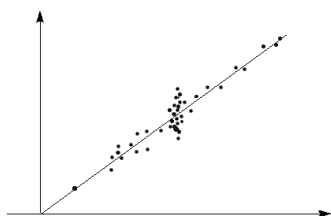
2.3. Ósrobbanás

Edwin Hubble [habl] 1929-ben fedezte fel, hogy a csillagvárosok színekepe vöröseltolódást mutat. Ez azt jelenti, hogy csillagvárosok távolodnak tőlünk. Csillagvárosoként más és más lehet a vöröseltolódás mértéke. Minél halványabb egy csillagváros fényessége, azaz minél távolabb van a csillagváros, a színekepe vonalai annál inkább a vörös felé tolódnak, lásd a 5. 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 6. ábrán. Hubble felfedezése azzal magyarázható, hogy a Mindenség tágul.

Nehéz elképzelnünk a Mindenség tágulását. Nincs kiindulópontja, azaz nincs olyan rögzített háttér, amihez képest a tágulást leírhatnánk. Nem létezik a 'tovább' amibe a világegyetem tágulhatna. Ugyan világnak tágulását nem tudjuk elképzelni, de a kétdimenziós eset, a felület hasonló viselkedése segíthet a megértésben. Ekkor a következő képpel írhatjuk le a csillagvárosok megfigyelt viselkedésének és a tágulásnak a kapcsolatát. Képzeld magunkat felfúvódó léggömb felszínére. Ennek felülete táguló, kétkiterjedésű világnak feleltethető meg. Gondoljuk el, a gömb felszínén pettyek vannak. Észleljük, hogy minden egyes petty, ami a gömb felszínén van, távolodik tőlünk. Annál nagyobb a távolodás sebessége, minél messzebb van tőlünk a megfigyelt petty. Bár a szomszédságunkban lévő pettyek is egyre messzebb kerülnek, de legjobban, legnagyobb sebességgel a léggömb legtávolabbi, az átellenes pontján lévő petty távolodik tőlünk.



5. 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 túlnyomórészt hidrogénből és héliumból állnak, van bennük kevés nátrium is. Annál kisebbnek látszik a csillagváros, minél messzebb van. Látható, minél messzebb van egy csillagváros, annál nagyobb a hosszabb hullámhosszak, azaz a vörös felé való vonaleltolódás. A színképvonalak eltolódásából a csillagvárosok távolodási sebessége kiszámítható.



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

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.

Ha a világegyetem tágul, akkor régebben a csillagvárosok nyilván közelebb voltak egymáshoz. Azt adja a H Hubble-állandó mért értéke, hogy jelenleg a világtér egymillió fényéves szakaszára kb. 10 kilométer/másodperc tágulást mérhetünk. Ebből adódik, hogy a világegyetem életkora körülbelül 13,73 milliárd év. Megmutatták az általános relativitás elméletéből, az ilyen táguló világegyetemhez szükségszerűen egy kezdeti rendkívül kicsiny, csaknem pontszerűnek vehető állapot tartozik. Ennyiből lett a mai világegyetem, amely azóta is tágul. Ez a kép a nagy ősrobbanás modelljének alapja.

Maga a tér tágul. Látható, a világegyetem tágulása összhangban van Einstein általános relativitáselméletének jóslatával, miszerint a világegyetem csak kétféle módon létezhet, vagy tágul, vagy összefelé húzódik. Világegyetemünk tágul. Nem azt kell gondolnunk, kezdetben robbanás történt, és ez az oka annak, hogy a csillagvárosok távolodnak egymástól. Inkább azt kell mondanunk, hogy maga a tér tágul, dagad. Ennek következményeképpen a térben lévő tárgyak is távolabb kerülnek egymástól. Mondhatjuk, hogy a csillagvárosokat a táguló tér sodorja magával. Ezért világegyetemünk inkább a kelésben lévő tésztahoz hasonlítható, amelybe mazsolát is szórtak. Miközben a tészta dagad, a mazsolaszemek is távolodnak egymástól. Annál nagyobb a távolodásuk sebessége, minél messzebb vannak egymástól.

Csak nagy méretekben vehetjük észre a tér tágulását. Ezt az általános relativitás elméletének segítségével a következőképpen érthetjük meg. Einstein egyenletei akkor adják meg a táguló világegyetem megold-

dást, ha a világegyetemre egyenletes sűrűségeloszlást tételezünk fel. Tágul a világegyetem, de közben az egyenletesen eloszló anyagban hat a tömegvonzás és ez lassítja a tágulást. De a világegyetem nem teljesen egyenletes anyageloszlású. De ha kiátlagoljuk az egyenetlenségeket, kb. 200 millió fényévnyi élű kokkákra osztva fel, akkor ilyen léptékben a világegyetem anyageloszlása már valóban egyenletesnek vehető. Kisebb léptékben viszont egyenetlenségek, csomósodások vannak. Nagyobb csomókon belül még kisebb csomósodások találhatóak, mint csillagrendszerek halmazai, csillagrendszerek, csillagok, naprendszerek, bolygók. Ennélfogva az Einstein-egyenletek általános megoldását vizsgálva nagyléptékben a világegyetem tágulása, a csomósodó tartományokon belül viszont a helyi téridőgörbületnek megfelelő tömegvonzás hatása a meghatározó. Azaz a világegyetem téridőgörbülete nagy méretekben a tágulásra, kisebb méretekben tömegvonzásra vezet.

Táguló világegyetem jövőjéről. Felmerül az a kérdés, meddig folytatódik a tágulás. Ugyanis a fellépő tömegvonzás fékezi a tágulást, csökkenti annak sebességét. Mivel a tágulás sebessége fékeződik, elképzelhető, hogy a lassító erő hatására a tágulás sebessége egy idő után nullára csökken. Majd a folyamat megfordul és megindul az összehúzódás. Ennek folyamán a Mindenség a tömegvonzás hatására összeroppan, majd a gyorsuló zsugorodás végeredményeképpen egy pontba zuhan.

Attól függ a lassító erő, a tömegvonzás nagysága, hogy mekkora tömegek között lép fel. Eszerint a világegyetem jövőjét végül is az határozza meg, mekkora a Mindenség tömege. Ismerve a tágulás sebességét, ki tudjuk számolni, mekkoráknak kellene lennie a világegyetemben lévő tömegeknek, hogy ezek vonzó hatása a tágulást még éppen ne állítsa meg. A világegyetem ilyen módon számolt össztömegét nevezzük a világegyetem kritikus tömegének. E kritikus tömegnek megfelelő kritikus atomsűrűség most 5 hidrogénatom/köbméter. A világegyetem tényleges és kritikus tömegének hányadosára az Ω 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 már elég nagy tömegvonzási erők egy idő után lefékezik a tágulást. Amint a tágulás 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.

Ezt 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 egy adott legnagyobb érték elérése után csökkeni kezd és idővel eltűnik. Ekkor a világegyetemet zártnak nevezik. Ha $\Omega = 1$, a növekvő távolság egy állandó értékhez tart, ez a sík világegyetem esete. Nyílt világegyetem esetén a tér mértanát az ún. Bolyai-Lobacsevszkij féle mértan írja le. Ilyen térben a háromszögek szögeinek összege kisebb, mint 180 fok. Zárt világegyetem mértana az ún. gömbi mértan. Ekkor a háromszög szögeinek összege nagyobb, mint 180 fok. Sík világegyetem mértana a mindenki által ismert euklideszi mértan, amelyben a háromszög szögeinek összege 180 fok.

Az Ia szupernovák megfigyelésével mért távolságok újabb fejtérésre adnak okot, mert az adatok szerint a távoli csillagvárosok jóval messzebb vannak, mint ahogy eddig vélték. Eddig azt tételeztük fel, hogy a csillagvárosok tömegvonzása lassítja a tágulás sebességét. De az újabb mérések szerint nem a tágulás lassulásáról, hanem annak növekedéséről kell beszélnünk, azaz a világegyetem gyorsuló ütemben tágul.

Egyelőre nincs kielégítő magyarázat a forradalmian új eredményekre. Nem tudjuk, milyen erőhatás lehet nagyobb a tömegvonzás összehúzó hatásánál. Ez az ismeretlen hatás taszításával egyenesen gyorsítja a szétszóródást. Jobb híján ezt a felfúvó hatást az ún. sötét energia létének tulajdonítjuk. Azt, hogy mi lehet a sötét energia, nem tudjuk. Ami a matematikai tárgyalást illeti, az Einstein által annak idején az Einstein-egyenletekbe bevezetett kozmológiai állandó le tudja írni a gyorsulva tágulást. Einstein kozmológiai állandója független volt a térben lévő anyagtól és sugárzástól, akkor is kifejti a taszító hatást, ha semmi sincs jelen, azaz az üres tér tulajdonsága.

Az ősrobbanás modelljének egyéb bizonyítékaival, a világegyetem kezdeti történéseire vonatkozó megfontolásokkal, a kezdeti események leírásával a következő részben foglalkozunk. Most csak azt említenénk

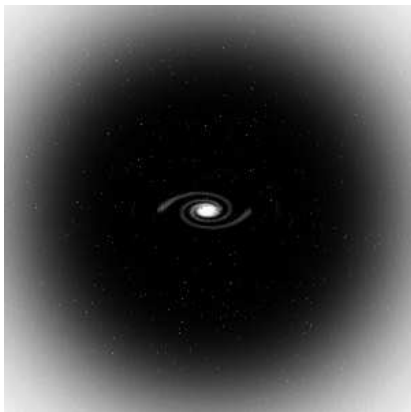
meg, hogy az ősrobbanás modelljének még sok vizsgálandó, megoldandó feladattal kell szembenéznie. Egyik legizgalmasabb, leginkább kutatott kérdés az, hogy mekkora a világegyetem teljes tömege.

Sötét anyag. Ahogy korábban tárgyaltuk, a világegyetem jövőjét az határozza meg, mekkora a világegyetem tömege. Ez a tömeg az adatok szerint nem térhet el túlságosan a kritikus tömegtől. Világegyetemünk szerkezetének, mértanának tanulmányozása arra utal, hogy ez a mértan a sík világegyetem mértanának, az euklidészi mértannak felel meg. Ekkor viszont tömege a kritikus tömeggel kell, hogy egyenlő legyen, azaz a Mindenségünkre $\Omega = 1$.

Kérdés hogyan 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 térszöget alaposabban megfigyelve le tudjuk számolni az ott 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 gyorsulás és a Föld sugarának ismeretéből kiszámíthatjuk.

Méréseink szerint a világegyetem látható, a fenti módszerrel meghatározott tömege a kritikus tömegnek csupán töredékét, kb. 0,5%-át fedezik. A nem látható, mert kialudt stb. csillagokban lévő anyag, amely elsősorban atomokból vagy plazmából áll, a kritikus tömeg 4%-át teszi ki. Ez azt jelenti, hogy a világegyetem anyagsűrűsége 0,2 hidrogénatom/köbméter.

Tejútrendszerünk, az Androméda-köd és más csillagvárosok csillagai a galaxis központja körül keringenek. Ez a keringés hasonló ahhoz, ahogyan a bolygók keringenek a Nap körül. De a csillagvárosok keringését nem írhatjuk le egyszerűen az ismert anyag tömegvonzásának a segítségével. Csak úgy tudjuk a keringést leírni, ha a korong alakú galaxis összes ismert anyaga a galaxist 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 7. ábrát.



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

Hogy ténylegesen mi a sötét anyag, napjaink kozmológiájának talán legizgalmasabb kérdése, mivel a megfigyelések arra utalnak, hogy a világegyetem tömegének nagyobb része valamilyen más, általunk még nem ismert alakban létezik. Meghatározható, hogy a csillagvárosokban lévő sötét anyag, amely esetleg tömeggel rendelkező neutrínókból, nagyon halvány csillagok sokaságából és eddig még közvetlenül nem észlelt részecskékből állhat, a kritikus tömeg 22%-át teszi ki. Összegezve az ismert és a sötét anyagmennyiséget, a világegyetemre az $\Omega = 0,04 + 0,22 = 0,26$ értéket kapjuk.

Világegyetemünk mértanát a világegyetem Ω értéke és a sötét energia hatását leíró Λ kozmológiai állandó együttesen határozzák meg. A világegyetem mértana akkor euklidészi, ha $\Omega + \Lambda = 1$. Mivel a mérések szerint a világegyetem mértana euklideszi és $\Omega = 0,26$, a kozmológiai állandó értéke $\Lambda = 0,74$. Ám a kozmológiai állandó 0,74-es értéke a világegyetem éppen akkora gyorsuló tágulásának felel meg, amit az Ia szupernovák segítségével mértek meg. Azaz a különböző területeken, egymástól függetlenül meghatározott adatok egybeesnek, ami alátámasztja a világegyetemünk leírásának hitelességét.

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

Kozmikus háttérsugárzás. Amint a 3. ábrán bemutattuk, a testek, mivel van hőmérsékletük, sugárzást bocsátanak ki. Annál nagyobb hullámhosszú a hőmérsékleti sugárzás, minél kisebb a sugárzó test hőmérséklete. Ha mérjük a csillagok színekében a különböző hullámhosszú sugárzások erősségének eloszlását, ez is a hőmérsékleti sugárzás törvényeit követi. Mint említettük, ebből határozhatjuk meg a Nap és csillagok felszínének hőmérsékletét.

Penzias és Wilson 1964-ben felfedezte, hogy Földünkre a világegyetemből a mikrohullámú sávban hőmérsékleti sugárzás érkezik. Ez a hősugárzás időben nem változik és az égboltról mindenfelől jön. Színeképe, amely a kibocsátó forrás hőmérsékletétől függ, és a hősugárzás erőssége minden irányból ugyanaz. Ezért kozmikus háttérsugárzásnak nevezik. Hullámhosszai olyanok, mintha azokat egy 2.726 ± 0.001 Kelvin hőmérsékletű test bocsátaná ki, a ± 0.001 jelölés a meghatározás hibáját adja meg. Ez azt jelenti, hogy maga a teljes világegyetem az, ami 2.726 Kelvinben sugárzó testként viselkedik.

Következik a fizika alapvető törvényeiből, hogy a világegyetemnek a tágulásával folyamatosan csökken a hőmérséklete. Kétszer akkora távolságokkal jellemzett világegyetemben a hőmérséklet fele akkora. Azaz korábban, a kisebb világegyetemben a hőmérséklet magasabb volt. Visszafelé menve az időben eljuthatunk addig a korszakig, amikor a Mindenség még egészen forró volt. Az ősrobbanás óta, az idő teltevel világegyetemünk úgy viselkedik, mint egy kihűlőben lévő kályha.

Világegyetemünk hűlését a tágulás a következőképpen magyarázza. Kezdetben még a mindenség tere nagyenergiájú, ennek megfelelően kicsiny hullámhosszú fotonok töltötték ki. Ilyen fotonok a magas hőmérsékletű sugárzási teret jellemzik, azaz ekkor a világegyetem hőmérséklete magas volt. Ahogy a világegyetem tere tágult, ezzel a hullámhegyek és völgyek közötti hosszak is növekedtek, azaz a fotonok hullámhossza a tér dagadásával nőtt. Hosszabb hullámhosszú fotonok energiája kisebb és a így a sugárzási tér hőmérséklete is alacsonyabb. Mostanára a hullámhosszak annyira megnöttek, hogy a hősugárzás a mai 2.726 Kelvin fokos hőmérsékletnek felel meg.

Életkor, méretek, hőmérséklet. Ismeretes a mérésekből, mekkora most a Mindenség tágulásának sebessége, a csillagvárosok átlagos távolsága és a világegyetem hőmérséklete. Véve a tágulás és hűlés viszonyát, ki tudjuk számolni, korábban milyen nagy volt az világegyetem és mekkora volt akkor a hőmérséklet. Így a Mindenség mérete, hőmérséklete, életkora egymásból számítható mennyiségek. Mivel a hőmérséklet egyúttal megszabja a részecskék átlagos mozgási sebességét is, ezáltal meghatározható, melyik időszakban milyen rendszerek léteztek.

Kezdetben az Mindenség pozitív energiájának nagyobb részét a sugárzási tér tartalmazta. Mára, a tágulás mértékének megfelelően a sugárzási tér energiája elhanyagolható a tömegek jelentette pozitív energiához képest.

Anyagösszetétel. Tudjuk a világegyetemből érkező sugárzások színeképvonalainak tanulmányozásából, hogy a csillagközi anyag és a kialakuló csillagok anyagának fő összetevői a hidrogén és a hélium. Más, nehezebb atomok elvéve vannak csak jelen, ilyenek, ahogy 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 észleljük, hogy az anyag kb. 1/4 része hélium, 3/4 része hidrogén. Héliumot termelő atommagfolyamatok csak nagyon magas hőmérsékleten indulhatnak be. Ez a hőmérséklet annyira magas, hogy ezek a magfolyamatok ma csak a csillagok belsejében mehetnek végbe. 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 világegyetemen belül a hélium kialakulás azonos feltételek mellett, egyidőben zajlott le.

Az égitestek életkora jó pontossággal meghatározható a bennük előforduló radioaktív elemek segítségével. Így tudjuk, hogy a legöregebb csillagok kora 10-12 milliárd esztendő, ami összhangban van azzal, hogy világegyetemünk kora 13,73 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 a folyamatosan érkező eredmények megerősítik az ősrobbanás elméletének hitelét. Másféle magyarázatok jelenleg nem jelentenek versenytársat az ősrobbanás elmélete számára, az egyre inkább alapvető tudásunk részévé válik.

Világegyetem látóhatára. Jól ismerjük a látóhatár (horizont) kifejezést az égbolttal kapcsolatban. Csak a látóhatárig láthatunk, ami azon túl van, láthatatlan számunkra. Van látóhatára a táguló világegyetemen is. Azon túl nem láthatunk semmit.

Hubble törvényét értelmezve oda jutottunk, hogy a világmindenség tere tágul. Minél messzebbre nézünk, a vizsgált térrész annál gyorsabban távolodik tőlünk. Elég távoli részek távolodási sebessége már csaknem fénysebességnyi, még nagyobb távolságokban a távolodás sebessége meghaladja a fény sebességét. Fénysebességnél gyorsabban ugyan semmilyen tárgy, sugárzás sem mozoghat, nem mehet el más mellett. De a relativitáselmélet azt nem tiltja, hogy a térnek az elég távoli tartományai ne távolodhassanak fénysebességnél nagyobb sebességgel. Azaz a tér tágulása miatt térbeli tartományok távolodási sebességei akár mekkorák lehetnek. Mi csak odáig láthatunk, ahonnan a fény még eljuthat hozzánk. Látóhatárunkat most az a távolság jelenti, amely pont fénysebességgel távolodik tőlünk. Közeledve a látóhatárhoz, a vöröseltolódás jelensége miatt az onnan idetartó fény hullámhossza egyre nő, azaz a rezgésszáma egyre jobban csökken. A látóhatárról érkező fény már nulla rezgésszámú, azaz a fény már nem észlelhető. A látóhatáron túli csillagvárosok, ha vannak ilyenek, tőlünk fénysebességnél gyorsabban távolodnak és emiatt a fényük sohasem juthat el hozzánk.

A látóhatár létezése behatárolja, mit tudhatunk a világegyetemünkről. Mérésekkel csak a látóhatáron belüli, az ún. megfigyelhető világegyetemet tanulmányozhatjuk, a látóhatáron túli részekről megfigyeléssel eleve nem tudhatunk semmit, csak közvetett úton szerezhethetünk róluk ismereteket.

Ha a világegyetem történetét az ősrobbanás fenti hagyományos leírása szerint értelmezzük, súlyos nehézségekkel kerülünk szembe. Egyik legnagyobb nehézség a kozmikus háttérsugárzás csaknem teljes egyenletes volta. Mint ahogy hamarosan tárgyalni fogjuk, a háttérsugárzás arról a korszakról ad látéleletet, amikor a világegyetem hűlésével a plazmaállapot megszűnt, kialakultak a hidrogén molekulák és a hélium atomok. Ez nagyjából az ősrobbanást követő 380000 év tájt történt. Világegyetemünk akkori állapotát mutatja a kozmikus háttérsugárzás. Az, hogy a sugárzás minden irányból csaknem teljesen egyenletes, azt jelenti, hogy a megfigyelhető világegyetem egészének anyaga még a plazmaállapotban kölcsönhatott egymással. Ám az ősrobbanás adta leírás szerint a világegyetem annyira gyorsan tágul, hogy a háttérsugárzás egyenletességét nem lehet a szokásos, kiegyenlítődést beállító természeti folyamatokkal megmagyarázni. Nézzük az égbolt két ellentétes irányából érkező háttérsugárzást. Amikor az ősrobbanást követő 380000 év tájt a sugárzásokat forrásaik kibocsátották, egymástól 90-szer akkora távolságra voltak, mint az akkori látóhatár nagysága. Ennyire nagy távolságban lévő anyagfelhők sohasem lehettek oksági kapcsolatban egymással. Mégis olyan állapotban voltak, mintha valamikor egymással egyensúlyra vezető kölcsönhatásban álltak volna.

3. Világegyetemünk fejlődése a csillagvárosokig

3.1. A természeti semmiből induló világegyetem

Amint az ősrobbanás modellje felteszi, a világmindenség mai viselkedése arra utal, hogy ma megfigyelhető anyaga valaha egy igen kicsiny térfogatban létezett és ennek az anyagnak a hőmérséklete roppant magas volt. Említettük, ehhez az állapothoz az általános relativitás elmélete szerint szükségszerűen egy kezdeti rendkívül kicsiny, csaknem pontszerűnek vehető állapot tartozik. Ennyiből lett a világ, amely azóta is tágul és közben hőmérséklete is fokozatosan csökken.

Planck-idő és Planck-hossz. Kérdés az, milyen méretű a kezdeti, fentebb csaknem pontszerűnek nevezett állapot. A világegyetem fejlődését leíró elmélet a tér és idő tulajdonságait a benne lévő tömegekkel magyarázó általános relativitáselmélet. Ennek az elméletnek is vannak azonban korlátai. Ezek a korlátok, amelyek a nagyon kis tér és időtartamok világára vonatkoznak, nem engedik, hogy az elméletet a kezdetek legkorábbi szakaszára is alkalmazzuk.

Amint a 1.2. részben tárgyaltuk, a térből nagyon kis időtartamra részecske-ellenrészecske párok pattanhatnak ki, amelyek nagyon gyorsan el is nyelődnek. Ezeknek a hipp-hopp részecskepároknak létezését a kvantummechanika törvényei szabályozzák. Ha létezésük időtartama nagyon kicsiny, a kipattanó részecskék tömege igen nagy lehet. Ezek a nagyon nagy tömegek viszont erősen változtathatják maguk körül a tér és az idő szerkezetét. Annyira, hogy a nagyon kicsiny távolságok és időtartamok tartományában mind a kvantummechanika, mind az általános relativitáselmélet fogalmai, törvényei érvénytelenné válnak. Azt az időtartamot és távolságot, amelyeknél a fentiek miatt kisebbek már nem értelmezhetők, Planck-időnek és Planck-hossznak nevezik. Ez a Planck-hossz $1.62 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$, a Planck-idő $5.31 \cdot 10^{-44}$ másodperc. Ezek összefüggnek, fény Planck-hossznyi utat Planck idő alatt fut be. Planck-idő tájt a világegyetem mérete a Planck-hossz 10^{-33} centiméteres nagyságrendjébe esett. Ekkora térfogattól indult meg világegyetemünk fejlődése.

A Planck-idő és hossz tartományában új fogalmak, törvényszerűségek alkotására van szükség, amelyekkel egyesíteni lehet a kvantummechanika és az általános relativitáselmélet nyújtotta leírásokat. Ezt az elméletet, amit kvantumgravitációnak neveznek, eddig még nem dolgozták ki. Kvantumgravitációs elmélet hiányában csak a másodperc egy igen kicsiny töredékétől kezdve, a Planck-idő eltelte után van szilárdabb alapokon nyugvó elméleti leírásunk arra, mi történt kezdetben.

Világegyetem összenergiája nulla. Arról, hogy miből indulhatott ki az ősrobbanás, a megmaradási tételek adhatnak útmutatást. Valamennyi megmaradási tétel, beleértve az energiamegmaradás, a töltések megmaradásainak stb. törvényeit is, úgy teljesül, hogy a világegyetem összeltöltése, összenergiája stb. nulla. Olyan módon, hogy a mérlegben szereplő + és - előjelű mennyiségek kiejtik egymást. Például a világegyetem villamos összeltöltése nulla. A világmindenségben lévő protonok száma, ezek a pozitív elektromos töltés hordozói, megegyezik a negatív töltést hordozó elektronok számával.

Energia is lehet negatív. Negatív a vonzó kölcsönhatásoknak megfelelő helyzeti energia, mint például a tömegvonzás helyzeti energiája. Vonzásnak megfelelő energia negatív voltát könnyű megérteni. Természetes módon akkor nulla a kölcsönhatási energia, ha nincs a testek között kölcsönhatás. Ha már nagyon messze vannak egymástól, ez lehet a helyzet. Most vizsgáljuk meg, milyen előjelű a kölcsönhatási energia, ha a testek vonzzák egymást. Ezt az energiát úgy kaphatjuk meg, ha a két testet eltávolítjuk egymástól. Akkorára növeljük a közöttük lévő távolságot, hogy kölcsönhatásuk már elhanyagolható legyen. Ahhoz, hogy két egymást vonzó testet eltávolítsunk egymástól, erőt kell kifejtenünk. Távolítás közben energiát közlünk a rendszerrel. Az eredeti kölcsönhatási energiához ezt az energiát hozzáadva kapjuk a nulla kölcsönhatási energiát. Azaz, amikor a két test vonzza egymást, a kölcsönhatási energia negatív.

Ha az energiamérleget nézzük, megmutatható, hogy világegyetemünk pozitív előjelű energiái, például a mozgási energiák, hőenergia és hasonló és a tömegeknek megfelelő $E = mc^2$ energiák összege kiegyenlíti a negatív tömegvonzási energiákat.

"Semmiből" kipattanó világmindenség. Az eredet, hogy a világmindenség miért, pontosan hogyan jött létre, a tudomány számára talán a legnagyobb kihívást jelentheti. Ha a miértre talán soha nem is kaphatunk választ, de a hogyanról, a folyamat leírásáról egyre pontosabb képet alkothatunk.

Nem az üres térben, valamikor pattant ki a Mindenség. Világegyetemünk születése, a Planck-idő előtt nem lehet távolságokról és időtartamokról beszélni. Amikor az világegyetem még nem létezett, tér és idő sem volt. Nem léteztek tömegek sem, az előbbiek szerint az összenergia értéke nulla. Mivel nem ismerjük az általános relativitás elvét és a kvantumelméletet egyesítő elméletet, nem tudjuk leírni, hogyan indult az ősrobbanás.

Ha a kezdetek kezdetét nem is tudjuk leírni, az alapvető leírások azt tételezik fel, és ezzel a feltevással a kapott, a mai megfigyelések szolgáltatja eredmények összhangban vannak, hogy a világegyetem a természeti semmiből pattant ki. A természeti semmi egy állapot, melyet a még nem ismert kvantumgravitációs elmélet írhat le. Akkor még nem volt sem tér, sem idő, így nem léteztek távolságok, időtartamok sem. Tömegek sem voltak még, csak bizonyos, a kvantumgravitáció által leírható jelenségek léteztek, melyek a világegyetem terének, idejének kialakulásához vezettek.

3.2. Első másodperc

A Planck-időn belül történekről semmi megbízhatót nem mondhatunk. Utána, 10^{-43} másodperc elteltével már lehetnek elképzeléseink arról, mi történt. Létrejött a tér és idő, fogalmaink már egyértelműek. Elválik a tömegvonzás a természet egyéb erőitől, a korábban említett gravitációs kvantumhatások most már elhanyagolhatóak. Alkalmazhatókká válnak az általános relativitáselmélet egyenletei. Folyamatosan tárgul a világegyetem, tárgulás közben hűl. Ekkor még hőmérséklete, amelyet a benne mozgó részecskék energiájának nagysága határoz meg, elképzelhetetlenül magas, a legmagasabb lehetséges hőmérséklet, a Planck-hőmérséklet, értéke kb. 10^{31} Kelvin.

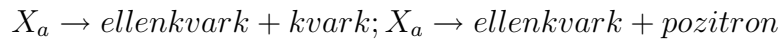
Ekkor még annyira hatalmas a gravitáció, hogy energiájának rovására a magától keletkező hipp-hopp részecske-ellenrészecske párok valóságossá válnak. Így is változatlanul nulla marad a világegyetem összenergiája, kétszer annyi új, forró tömeg és sugárzási energia keletkezését kétszer annyi negatív kölcsönhatási energia ellentételezi. Ekkor a pozitív energiák meghatározó része az igen nagy hőmérsékleteknek megfelelő sugárzási és a részecskék mozgásának megfelelő energia, ezekhez képest az $E = mc^2$ képletnek megfelelő energiák kicsik.

Az elfogadott leírás szerint a 10^{-43} másodperc és 10^{-35} közötti korai időszakot a nagy egyesített elmélet által leírt részecskefizikai folyamatok jellemezték, ezekről lásd a 1.5 szakaszt. Az e korszakot meghatározó részecske az ott már ismeretett X részecske. A nagyon nagy tömegű X részecske és ellenrészecskéje a kvarkokat leptonokba és viszont alakító kölcsönhatás közvetítő részecskéje. Ekkor még, ahogy a 1.5 szakaszban írtuk, valamennyi kölcsönhatás, az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatások ugyanolyan erősséggel, gyakorisággal zajlottak, egymástól nem különböztek. Mivel a kvarkok leptonokba és viszont alakulhattak, gyakorlatilag csak egyetlen részecske létezett. Ez az egyszerű állapot szemlátomást különbözik a mai szerkezetekben gazdag világunktól, melyre az X részecske már nem gyakorol befolyást.

10^{-35} **másodperc - szimmetrisértés.** Az X részecskék és ellenrészecskéik a korszak végén kvarkokra, leptonokra, ellenkvarkokra és ellenleptonokra bomlottak el. Kétféle bomlás lehetséges az X részecske számára:

$$X \rightarrow \text{kvark} + \text{ellenkvark}; X \rightarrow \text{kvark} + \text{elektron}$$

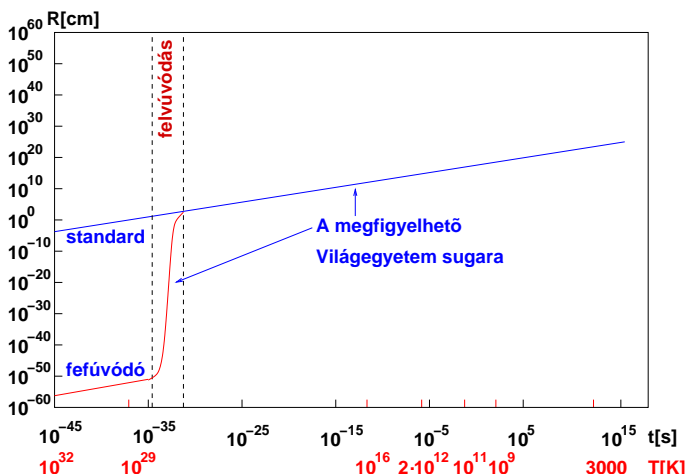
Az X ellenrészecskéjére, melynek jelölése X_a a kétféle bomlás a megfelelő ellenrészecskékre való bomlást jelenti:



De az anyagra és ellenanyagra való bomlások arányai nem teljesen azonosak, ez a szimmetria ugyan nagyon kis mértékben, de megsérül. Az X részecske bomlásakor a kvarkra és elektronra való bomlás egy nagyon picit gyakoribb, mint az X_a ellenkvarkra és pozitronra való bomlása. Végeredményben az X részecske és ellenrészecskéinek elbomlása után tízmilliárdegy keletkezett kvarkra csak tízmilliárd ellenkvark jutott. Ezzel az világegyetem anyag-ellenanyag szimmetriája megbomlott. Ez az időszak egyben a felfúvódás szakasza is.

Felfúvódó világegyetem. Amikor a 10^{-35} másodperc tájt lezajlott a most tárgyalt szimmetrisértő folyamat, akkor egyúttal az erős kölcsönhatás is elvált az elektroyenge kölcsönhatástól. Erős és elektroyenge kölcsönhatás szétválása hasonlatos ahhoz az átmenethez, ami a víz jéggé fagyása során zajlik. Ilyen átmenetekben hatalmas energiák szabadulnak fel. Hasonlóan, óriási hőmennyiség szabadult fel a 10^{-35} másodperc környékén lezajlott szimmetriasértő folyamatban. Ennek a hatalmas energiának a felszabadulása a világegyetem felfúvódásához vezetett. Olyan jellegű volt a felfúvódás, mintha bizonyos elemi részek között a tömegvonzási hatás taszítóvá vált volna. Rohamos mértékben tágulni kezdett a világegyetem.

Világegyetemünk felfúvódása az X -részecskék bomlásakor, 10^{-35} másodperccel az ősrobbanás után kezdődött és körülbelül 10^{-32} másodperccel az ősrobbanás után állt le. Hatalmas ütemben tágult, a mérete minden $2 \cdot 10^{-35}$ másodpercen belül megkétszereződött. Mire a felfúvódás befejeződött, a világegyetem sárgadinnye nagyságúra nőtt. Ezután a tágulás egyenletesen, a mainak megfelelő mértékben folytatódott, lásd a 8. ábrát.



8. 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 felfúvódási időszakot mutatja. Előtte és utána a világegyetem a Hubble-törvénynek megfelelően tágul.

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

A felfúvódó világegyetem modellje és más hasonló modellek az ősrobbanás után 10^{-32} másodperccel az ősrobbanás hagyományos modelljébe mennek át, ahogy ezt a 8. ábra is kifejezi. A felfúvódási időszak

eltelte után az erős és elektroyenge kölcsönhatás már megkülönböztethetővé vált. De az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás még kb. a 10^{-9} másodpercig megkülönböztethetlen. Ebben az időszakban a táguló és hűlő világegyetem hőmérséklete még elég magas volt ahhoz, hogy a kvarkok, ellenkvarkok valamint az erős kölcsönhatást közvetítő részecskék még plazma állapotban lehessenek jelen.

10^{-9} másodperc - az elektroyenge kölcsönhatás felhasadása. 10^{-9} másodperc tájt az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás megkülönböztethetővé vált. A mai legnagyobb gyorsítókon már tanulmányozhatók azok a folyamatok, amelyek a világegyetemben ekkor zajlottak le. Valamennyi ellenanyag, amelyből az X részecskék 10^{-35} másodpercben bekövetkező bomlásainak következtében picivel kevesebb van, az anyaggal ütközve szétsugárzódik, fotonok keletkeznek. Ez magyarázza, hogy az világegyetemben egy protonra kb. tízmilliárdnyi foton jut. Ez az arány csak nagyságrendben igazít el, a fotonok sűrűsége a világegyetemben 0,412 milliárd foton/köbméter.

10^{-6} másodperc - neutronok és protonok. Nem sokkal ezután, 10^{-6} másodperc tájt a táguló világegyetem hőmérséklete annyira lecsökkent, hogy a kvarkok protonokká és neutronokká álltak össze. Továbbiakban, az első másodpercig a táguló világegyetem hőmérséklete tovább csökken. Addig a meghatározó folyamat a protonok és neutronok egymásba alakulása. E folyamatot a gyenge kölcsönhatás jellemzi, elektronok, pozitronok, neutrínók és ellenneutrínók keletkeznek. Első másodperc tájt az átalakulási folyamatok megszűnnek, a neutrínók ettől fogva nem, vagy alig hatnak kölcsön más részecskékkel.

Végeredményben a születés első másodpercében már kialakult az világegyetem teljes anyagkészlete. Az első másodperc végére a Mindenség protonokból, neutronokból, elektronokból, neutrínókból és ellenneutrínókból állt. Jegyezzük meg, hogy már ez időn belül is megfigyelhető az egyre összetettebb rendszerek kialakulása. Míg a legkezdetben semmiféle elkülönültség sem létezett, az első másodperc végére, a világegyetem tágulásának és hűlésének eredményeképpen a négy alapvető kölcsönhatás már elkülönült egymástól és megjelentek az olyan összetett részecskék mint a proton és a neutron.

3.3. Első három perc

Világegyetemünk létének első három perce során, az első másodperc végétől alakultak ki a legkönnyebb elemek atommagjai. Ekkor már csak néhány milliárd fok a hőmérséklet. Ez az állapot igencsak kedvez a bonyolultabb atommagok képződéséhez. Ami folyamatok a világegyetemben ekkor zajlottak, ezek már az Atomki gyorsítóin is tanulmányozhatóak.

Mint a 1.4 részben tárgyaltuk, a protonok, neutronok között ható vonzó magerők nagyon rövid hatótávúak. Ahhoz, hogy a protonok és neutronok magreakcióba léphessenek egymással, egymás közvetlen közelébe kell jutniuk. Ám a protonok között hat a taszító Coulomb erő is. Csak a nagyon magas hőmérsékleteken mozgó atommagok lehetnek elég gyorsak ahhoz, hogy az elektromosan töltött atommagok közötti taszítást legyőzzék, mivel a taszító Coulomb erő lassítja a töltött atommagok egymáshoz való közeledését. Ha a közeledés sebessége nem elég nagy, az atommagok nem juthatnak egymáshoz annyira közel, hogy már a taszító Coulomb erőnél jóval erősebb vonzó magerők hatása is érződhessen.

Túl magas hőmérsékleten ugyan végbemehetnek az atommagfolyamatok, de ott a keletkezett atommagok igen könnyen és hevesen ütközhetnek újabb atommaggal. Ezért az ütközés eredményeképpen szét is eshetnek. Világegyetemünkben az első másodperctől a harmadik perc végéig voltak a feltételek olyanok, hogy nagy tömegű összetettebb atommagok képződhettek. Ezután a magfolyamatok valószínűsége elhanyagolhatóvá vált, csak később, a felforrósodott csillagok belsejében indulhattak be újra.

Hélium képződése. Legfontosabb magfolyamatok a következők voltak. Először a neutronok protonokkal való ütközésében deutronok keletkeznek. A deutron atommag egy protonból és neutronból áll, nehéz hidrogénnek is nevezik. Deutronok egymással ütközve hélium atommagokká alakulnak. A hélium atommagja

két protonból és két neutronból áll. Ezen az úton a világegyetem neutronjainak túlnyomó része a ${}^4\text{He}$ atommagok alkotórészévé vált. A világegyetem anyagának maradéka csaknem teljesen protonok, azaz hidrogén atommagok alakjában maradt vissza. Az ősrobbanás modellje alapján számolt kb. 25%-os hélium arány jól egyezik a héliumnak a világmindenségben mért gyakoriságával. Egyéb, kevésbé gyakori könnyebb atommag kozmikus előfordulási valószínűsége is jól megfelel az ősrobbanás szerint számoltaknak.

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

3.4. 380000 év

Az első három perc után körülbelül 380000 évig a világegyetem arculatát a fotonok alkotta sugárzási tér és az anyag kölcsönhatása határozta meg. Világegyetemünk anyagát a csupasz atommagok, a protonok és a hélium atomok magjai, valamint az elektronok alkotják. Természetesen a neutrínók és ellenneutrínók is jelen vannak, de kölcsönhatásaik elhanyagolhatóak. Az erősen ionizált állapotban lévő anyagot, amely elektronokat, pozitív ionokat és esetleg semleges részecskéket is tartalmaz, plazmának nevezzük. Ebben az állapotban a nagyon magas hőmérséklet miatt atomok vagy molekulák még nem létezhetnek.

A magas hőmérsékletű plazmát jellemző alapvető folyamatok a töltött részecskék és a fotonok ütközéseivel kapcsolatosak. Elektron, proton és hélium atommag szóródhatnak egymáson. Közben az ütköző részecskék energiát cserélnek és fotonokat sugározhatnak ki, illetve nyelhetnek el. Lehetséges azonban az a folyamat is, amikor a protonnal vagy hélium atommaggal ütköző elektron befogódik a proton vagy a hélium atommag köré. Ezzel egy hidrogénatom, vagy egyszerűen ionizált hélium atom keletkezik. Ezt a folyamatot elektronbefogásnak nevezik. Az így keletkezett hidrogénatom vagy hélium ion általában gerjesztett, magasabb energiájú állapotban van, az elektron ugyanis nem feltétlen a legalsó atomi pályára fogódik be. Ilyen gerjesztett állapot foton leadásával bomlik le az alapállapotba, azaz az elektronbefogási folyamatot általában fény kibocsátása követi.

Ebben a korszakban a hőmérséklet még túl magas ahhoz, hogy a protonból és elektronból álló hidrogén vagy a hélium atommagból és két elektronból összetevődő hélium atomok meg is maradhassanak. Bár ezek létrejöhetnek, de magas hőmérsékleten a részecskék még nagyon sebesen mozognak. Annyira, hogy ütközéseik erősen rugalmatlanok. Ha keletkeznek is atomok, a hamar bekövetkező ütközések során gyorsan szét is esnek. Az ütközési és az azt kísérő szétesési, bomlási folyamatok során az átalakuló atomok vagy ionok sugároznak, újabb fotonokat bocsájthatnak ki.

Fotoionizáció. Az elektronbefogással képződött atomokat vagy ionokat nem csupán a más töltött részecskékkel való rugalmatlan ütközések, hanem a térben jelen lévő fotonokkal való ütközések is szétvetethetik. Magas hőmérsékleten a tér hősugárzását nagyobb energiájú fotonok jelenléte jellemzi. Ha az ion vagy atom nagy energiájú fotonnal ütközik, az ütközés általában rugalmatlan. Ekkor az atom vagy ion a fotont el is nyelheti. Ilyenkor a foton energiája az atomban vagy ionban lévő elektronok valamelyikének adódik át. Ez az elektron így akkora energiára tehet szert, hogy elszakadhat az atommagtól, azaz az atom vagy ion ionizálódik. Fotoionizációnak nevezzük ezt a jelenséget.

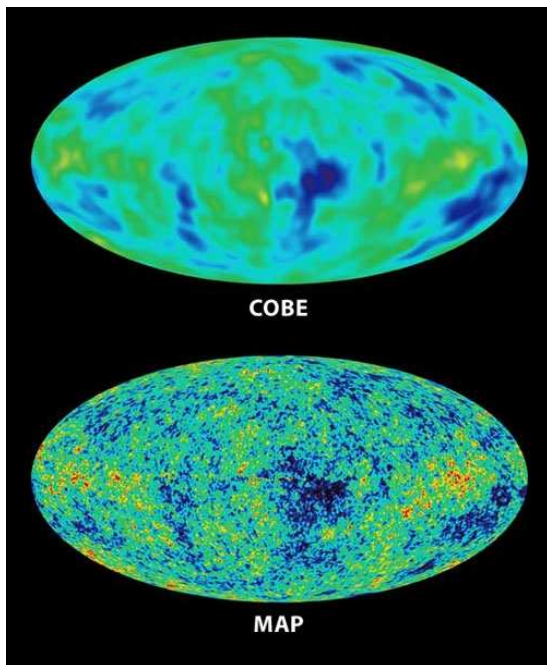
Töltött részecskék ütközése és a fotoionizációs folyamatok és általában az elektromágneses kölcsönhatások elég erősek ahhoz, hogy megakadályozhassák nemcsak atomok, hanem bármilyen egyéb képződmény kialakulását is. Például a plazmában a tömegvonzás nem alakíthat ki csillagokhoz vagy csillagvárosokhoz hasonló rendszereket. A plazmában uralkodó nagy nyomás, a töltött részecskék közötti, Coulomb erők által vezérelt ütközések, a fotoionizáció hamar szétzilálják az ilyen alakzatokat.

Amikor a hőmérséklet 380000 év tájt lecsökken 3000 Kelvinre, a világegyetem hosszmeretei a mainak ezredrészei. Ezen a hőmérsékleten a kialakuló atomok állékonyságát az ütközések már nem veszélyeztették tovább. A keletkezett hidrogén atomok jó része hidrogén molekulákká állt össze, a hélium nemesgáz, ezért

atomos állapotban található. Világegyetem anyaga ekkortól villamosan semleges részecskékből áll. Ütközésekben nem képződnek és nyelődnek el újabb fotonok, mert a sugárzási teret alkotó fotonok energiája nem elég ahhoz, hogy az elektronokat eltávolítsák az atomból, vagy magasabb pályára gerjesszék az atomi elektronokat. Sugárzási tér és az anyag ettől fogva nem hat kölcsön. Ezennel az elektromágneses kölcsönhatás irányította sugárzásos korszak 380000 év elmúltával lezárult. Sugárzás és az anyag kölcsönhatása ezután már jelentéktelenné vált. A kozmikus háttérsugárzás mai állapotát így a 380000 év tájti helyzete határozza meg.

A háttérsugárzás egyenetlenségei. De a háttérsugárzás nem teljesen egyenletes, ezt a COBE műhold 1992-es méréseiből tudjuk. 380000 év tájti a világegyetemben sűrűség-ingadozások mutatkoztak. Ezek a sűrűség-ingadozások felelősek a csillagvárosokból, csillagvároshalmazokból stb. álló világegyetem nagyléptékű szerkezetéért. Ezek az egyébként igen kicsiny sűrűség-ingadozások még a felfúvódás korszakára utalhatnak. Amikor a felfúvódás elkezdődött, a világegyetem annyira kicsiny volt, hogy a határozatlansági összefüggések által leírt kvantummos ingadozások jellemezték. Ha ez így van, ezeknek a mintázatát a 380000 év tájti kialakult háttérsugárzás is mutatja. A kozmikus háttérsugárzás apró egyenetlenségeit kimutató COBE műhold adatai összhangban vannak a felfúvódó világegyetem modellje által jósolt ingadozások mértékével.

De a COBE értékei nem elég pontosak. A felfúvódó világegyetem leírásának jóslatait még további pontosabb megfigyelésekkel kell igazolni. Újabb két műholdat bocsátanak fel, illetve az egyiket már fel is bocsátották. Ezek jóval részletesebb, célzottabb méréseket végeznek, fognak majd végezni. A MAP műhold nemrég került, a Planck- Surveyor pár éven belül kerül Föld körüli pályára, tehát néhány éven belül tudni fogjuk, ténylegesen elfogadható-e a felfúvódó világegyetem modellje, vagy inkább más kvantumkozmológiainak nevezett leírások felé kell fordulnunk. A COBE és a MAP első adatai közötti különbséget jól mutatja a 9. ábra.



9. ábra. A felső ábra a kozmikus háttérsugárzásnak a COBE műhold által mért egyenetlenségeit szemlélteti, az alsó a MAP műhold által mért jóval jobb felbontással mért értékek. A szemléltetett különbségek a háttérsugárzásban mutatkozó ezrednyi-tízezrednyi ingadozásoknak felelnek meg, csak az ábrázolás nagyította fel őket.

4. A világegyetem mai arculatának kialakulása

Világegyetemünk fejlődésének meghatározó tényezőjévé 380000 év után a tömegvonzás válik. Amint látuk, a gyenge, erős és elektromágneses kölcsönhatások jellemezte korszakoknak vége, a fenti három erő már nem kezdeményez jelentősebb változásokat. Hatásaik csak kisebb távolságokon érvényesültek. De a tömegvonzási erő egyetemes, valamennyi tömeggel rendelkező test között hat és hatása nagyobb távolságokra sem hanyagolható el. Minden tömeg vonz minden tömeget, ez a mindenhol ható erő alakította ki a Mindenség rendszereit.

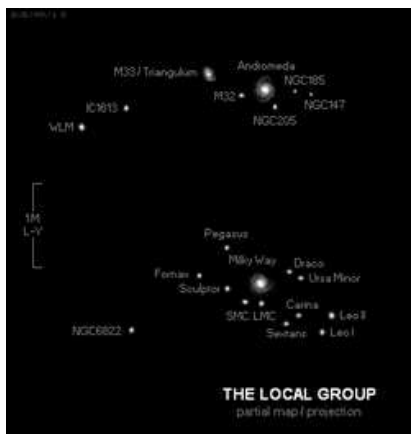
Csomósodások. Világegyetemünk mai arculatának fő szervezője, rendjének forrása tehát a tömegvonzás. Következő a szervezés alapja. Ha az ősi gáztömegben valahol kisebb egyenetlenség lépett fel, valahol egy kicsit sűrűbbé vált a gáz, ez a sűrűbb tartomány tömegvonzási központtá csomósodik. Környezetéből kezdi magához vonzani az anyagot. Így az eredetileg csaknem jelentéktelen különbségek az önmagát erősítő folyamat eredményeképpen egyre kifejezettebbekké válnak. Ezzel a tömegvonzás szervező erejének hatására az eredetileg csaknem egyenletesen eloszló anyag csomókba tömörült.

4.1. Csillagvárosok

Az önerősítő csomósodási folyamat felelős a csillagvárosok és az első csillagok kialakulásáért. Az első csillagvárosok és óriáscsillagok kb. az ősrobbanást követő kilencszázmillió év tájt alakultak ki.

Azután a csillagvárosokban folytatódnak a csomósodási folyamatok, belsejükben egyre több csillag alakul ki. Világmindenségünkben körülbelül százmilliárd csillagváros van. Az egyes csillagvárosokban körülbelül százmilliárd csillag található. Napunk csak egyike a Tejútrendszer sokmilliárd csillagának és a Tejútrendszer is csak egyike a mindenség százmilliárd csillagvárosának. Tejútrendszerünk egy az átlagosnál nagyobb csillagváros, több mint 200 milliárd csillagot foglal magában. Átmérője kb. 100 000 fényév, alakja lapos korong, melynek spirálkarjai vannak.

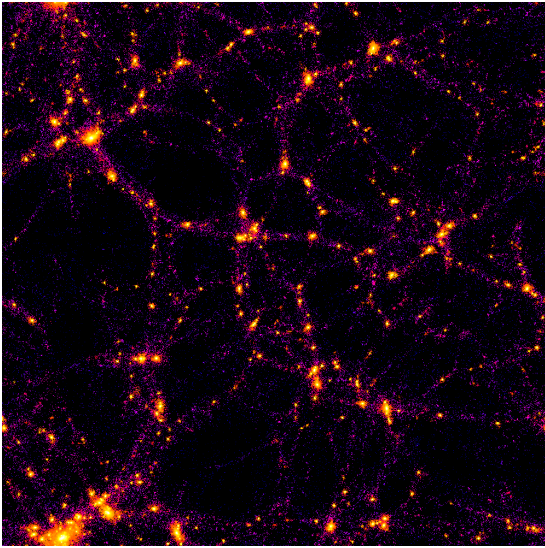
Csillagvárosok halmazai. Egy csillagváros mérete durván százezer fényévnyi, a csillagvárosok közötti átlagos távolság néhány millió fényév. Maguk a csillagvárosok is vonzzák egymást, csoportokba tömörülnek. Tejútrendszerünk a körülbelül 30 csillagvárosból álló, körülbelül 5 millió fényév átmérőjű Lokális Csoporthoz tartozik, ezt lásd a 10. ábrán. Kiseb csoportok még nagyobb csoportokat alkotnak. A Lokális Csoport a körülbelül 100 millió fényév átmérőjű Lokális Szuperhalmazhoz tartozik.



10. ábra. A Lokális Csoport csillagvárosai. Láthatjuk, hogy a két legnagyobb csillagváros a Tejútrendszer és az Androméda-köd, a többi kisebb csillagvárosok főleg körük csoportosulnak.

Újabb megfigyelések szerint a csillagvároshalmazok eloszlása meghatározott mintát követ. Térben a világegyetem mintha felfúvódó buborék lenne, melynek belsejében kisebb, annak a belsejében még kisebb és így tovább, buborékok volnának. Maguk a csillagvárosok a buborékok felszínén helyezkednének el, lásd a 11. ábrát. Egészen a 200 millió fényéves méretig - ahonnan kezdve a világegyetem anyageloszlása már egyenletesnek vehető, lásd a 2.3 szakaszban - a csillagvárosok eloszlása ilyen önhasonló képet mutat. Önhasonlóság azt jelenti, hogy a részlet kinagyítva az egészhez hasonlóak. Ha az önhasonlóság minden méretre igaz lenne, akkor beszélnénk fraktálról. A világegyetem csillagvárosainak eloszlása 200 millió fényéves méretig mutatnak a fraktálszerű viselkedést.

A csillagvárosok eloszlása a kezdeti kis egyenlőtlenlégek szerkezetére vezethető vissza. A világegyetemben lévő sötét anyag mennyiségét abból is meg lehet becsülni, hogy a háttérsugárzásban mért egyenlőtlenlégekből kiindulva - lásd a 9. ábrán a MAP műhold által a hőszugárzás eloszlásában mért egyenlőtlenlégeket, amelyek egyúttal a sűrűség egyenlőtlenlégeit is tükrözik, - kiszámolják, hogy ebből milyen világegyetem alakul ki. Ennek a számolásnak a végeredménye erősen függ attól, mennyi sötét anyagot tételeznek fel. Ha a világegyetem sötét tömege éppen a kritikus tömeg 22 százaléka, akkor a számolás visszaadja a 11. ábrán látható, észlelt buborékszerkezetet.



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

Tejútrendszer. Amit szabad szemmel az égen láthatunk, azok szinte valamennyien a Tejútrendszer csillagai. Az augusztusi égen látható hatalmas, tejszerű csillagfelhő, a Tejút, a Tejútrendszer fő részét alkotja. Szabad szemmel megfigyelhető, nem a Tejútrendszerhez tartozó csillagvárosok a Tejútrendszer két kis kísértő csillagvárosa, a Kis és Nagy Magellán felhő, de ezek csak a déli féltekéről láthatók. Innen az északi féltekéről az egyetlen szabad szemmel tiszta időben még éppen látható nagyobb méretű csillagváros az Androméda-köd, lásd a 12. ábrán.

Tejútrendszerünk az átlagosnál nagyobb, központi magból és a belőle csigavonalszerűen kinyúló karokból álló csillagváros. Több mint 200 milliárd csillagot foglal magába. Főbb alkotórészei a következők. Legbelül, az égbolton a Nyilas csillagképben van a központi gömbalakú kidudorodás, amely az igen összetett szerkezetű középpontból és az azt övező, nagysűrűségű csillagfelhőből áll. E középponttól egy fényévnyi távolságon belül kb. tízmilliónyi csillag található. Ezek a csillagok hatalmas sebességekkel keringenek a nagyon nagy tömegű középpont körül, amely valószínűleg egy 2,6 milliós naptömegű fekete lyuk.

A központi dudor körül forog egy kb. hatvanmilliárd fiatalabb csillagból álló lapos korong. Átmérője kb. 100000 fényév, vastagsága alig ezer fényév. Spirálkarokba rendeződik a korong, melynek pontos kinézetét belülről nem tudjuk megállapítani. Ezt a lapos korongot egy gömbalakú ritkább övezet veszi körül, amely



12. ábra. Az Androméda-köd

idősebb, 10-12 milliárd éves csillagokból, azoknak csoportjaiból és gázfelhőkből áll. Ennek az övezetnek a tömege a korong tömegének kb. 20-30%-a. A központi dudorodás és a gömbszerű övezet lassan, a korong jóval gyorsabban forog. Napunk a középponttól 28000 fényévnnyire a korong egyik spirálkarjában található.

Tejútrendszerünk további összetevője a sötét anyagból álló, ezért láthatatlan része, amely nagyságrenddel nagyobb tömegű, mint a a dudor, a korong és a gömbszerű övezet együttvéve. Térfogata kb. ezerszer akkora lehet, mint a csillagokat magábafoglaló térfogat, ennek jellegére lásd a 7. ábrát.

Tejútrendszerünk kb. 12 milliárd éve alakult ki gázt és csillagokat tartalmazó kisebb csillagvárosok összeolvadásából. Máig tart a más csillagvárosokkal való ütközési folyamat. Egyrészt a Tejútrendszer két kisebb kísérő csillagvárosa, a Kis és Nagy Magellán felhő közelednek hozzánk és belé fognak olvadni a Tejútrendszerbe. Másrészt legközelebbi nagy csillagváros szomszédunk, az Androméda-köd 100 km/s sebességgel közeledik felénk és kb. 5 milliárd év múlva a Tejútrendszer és az Androméda-köd korongjai össze fognak ütközni. Nem ritkák az ilyen ütközések, a világuír távolabbi tartományaiban számos ilyen módon ütköző csillagvárost láthatunk. Valószínű maga a Tejútrendszer is 12 milliárd éve két nagyobb anyagtömeg összeolvadásából keletkezett, a korong az egyik, a központi dudor és a gömbszerű övezet alkotta a másik összetevőt.

4.2. Csillagok

Csillagbölcsők. Mint eddig is láttuk, idővel a világegyetem egyre összetettebbé, sokszínűbbé válik. Erre újabb lehetőséget a csillagokban zajló folyamatok nyújtanak. Számos állomása van a csillagfejlődésnek. Fejlődésének kezdeti szakaszában a csillag tömegvonzás hatására összehúzódó gáztömeg. Ha már eléggé összehúzódott a gáztömeg, felfénylik. Később a csillagokban atommagfolyamatok indulnak be és a kisugárzott energia ezekben a magfolyamatokban termelődik. Aszerint, milyen atommagfolyamatok zajlanak bennük, különböző csillagállapotokról beszélünk. Napunk is adott állapotban lévő csillag. Napunkhoz a legközelebb eső csillag a Proxima Centauri, ami 4,3 fényévre van tőlünk. Környezetünkben 3-4 fényév a csillagok átlagos távolsága.

Csillagok a csillagváros életének során mindig is keletkeznek. Kezdetben a csillag anyaga tisztán hidrogén és hélium. Ahogyan tárgyalni fogjuk, nagyobb tömegű csillagokban magasabb rendszámú elemek keletkeznek, amelyek azután szétszóródnak a csillagvárosban. Belekeverednek a gázfelhőkbe és emiatt a következő csillagnemzedékek már porral szennyezett gázfelhőkből keletkeznek. Amíg vannak a csillagvárosban gáz- és porfelhők, melyek csillaggá sűrűsödhetnek, addig csillag is születhet. Ugyan a legöregebb csillagok a csillagvárossal együtt jöhettek létre, de a csillagok többsége sokkal fiatalabb. Csillagok születése és elmúlása nem körkörös folyamat. Bent a csillagokban sok millió fokon olyan folyamatok játszódnak le, amelyeknek végtermékei nem szolgálhatnak később születő csillagok alapanyagául. Ezért a csillagvárosoknak is van fejlődéstörténete. Ahogy csillagai kihunynak, úgy öregszik a csillagváros is.

A csillagok keletkezésének oka sokáig rejtélyes volt. Nem értették, hogy a csillagközi gázokból és porokból álló felhőknek miért kell összehúzódniuk és csillagokat alkotniuk. Ugyanis a hideg gázfelhőknek van akkora belső nyomása, amely képes ellenállni a tömegvonzás összehúzó hatásának. Manapság, elsősorban

a Hubble űrtávcső és az infravörös tartományban mérő, műholdakra telepített berendezések segítségével egyre többet tudunk a csillagok születésének körülményeiről.

Csillagászok még nem láttak egyedül álló, s éppen keletkező csillagot. A csillagok sohasem elszigetelten, hanem több ezer vagy akár milliányi, nagyjából együtt kialakuló csillagot számláló, csillagbölcsőnek nevezhető térségekben születnek. Naprendszerünk közelében, tőlünk 1500 fényévre, az Orion csillagképben is van egy ilyen csillagbölcső, amely szabad szemmel is látható. Orion-ködnek nevezik, az átmérője 20 fényévnyi. A csillagbölcsők hatalmas gázfelhőkből alakulnak ki, melyek a csillagvárosok legnagyobb méretű alakzatai közé tartoznak, átmérőjük néha a 300 fényévet is elérheti.

Kezdetben a csillagvárosok legbelső tartományban kialakult óriáscsillag környezetében indulhatott meg a csillagbölcsők kialakulása és a folyamat onnan terjedhetett tovább. Mint tárgyalni fogjuk, a nagyobb tömegű, szupernovává fejlődő csillagok az életük végén felrobbannak és a szétrepülő anyag lökéshullámai hatalmas sebességgel terjednek. Ha a szupernovához van egy közeli, ám addig még nyugalomban lévő nagyobb gázfelhő, akkor annak a felhőnek a szélén a szupernova lökéshulláma egyes tartományokat összehúzódára készíthet. Az összehúzó tartományokban akár nagyobb tömegű csillagok is kialakulhatnak. Nagyobb tömegű csillagok, mint a következő bekezdésben tárgyalni fogjuk, gyorsabban fejlődnek. Egyesek közülük akár egymillió éven belül szupernovává alakulhatnak és felrobbannak. Ezután az újabb robbanások lökéshullámai a hatalmas gázfelhő addig nyugalomban lévő tartományain söpörnek végig. Kupacokba terelve a gázfelhő anyagát különböző tömegű új csillagok kialakulását indíthatják el. E láncfolyamatnak köszönhetően 10-20 millió év alatt a csillagfejlődési hullám a teljes gázfelhőre kiterjedhet.

Gázfelhő öngerjesztő összehúzóda. Önmagát gerjeszti a tömegvonzás okozta összehúzóda. Minél közelebb kerülnek egymáshoz a tömegek, a tömegvonzás annál erősebb, és ennélfogva az összehúzó hatás annál kifejezettebb. Minél nagyobb az összehúzóda gáz tömege, annál nagyobbak lesznek az összehúzó erők. Ezért csillag kialakulásának folyamata annál gyorsabb, minél nagyobb a tömege. Azaz nagyobb tömegű csillagok gyorsabban fejlődnek.

Eleinte a csillag felhője még csak sötéten kavargó, összefelé tömörülő anyagfelhő, melyben a tömegvonzás egyre erősebb. Mivel a vonzó kölcsönhatásokra a kölcsönhatási energia előjele negatív, lásd a 3.1. szakaszban, a tömegvonzásnak megfelelő kölcsönhatási energia annál kisebb lesz, minél sűrűbb az anyag. Emiatt a gravitációs összehúzóda közben energia szabadul fel. Ez az energia helyben ott marad, a részecskék mozgási energiájává, azaz hővé alakul. Így a helyi hőmérséklet ott magasabb, ahol nagyobb a gáz sűrűsége. Ezért a gáz hőmérséklete legbelül a legmagasabb, mert ott a legnagyobb a sűrűség. De tudjuk, a hőmérséklet emelkedése azt jelenti, hogy a gáz atomjai és molekulái egyre hevesebb módon ütköznek egymással és a jelenlévő fotonok is egyre nagyobb energiájúak. Egy idő után a hőmérséklet növekedésével beindul az atomok és molekulák szerkezetének felbomlása. Sugározni kezdenek az atomok, a kialakuló csillag ekkor válik láthatóvá.

Meg kell jegyezni, ha az összehúzóda gázfelhő egy kicsit is forgott, akkor a gáztömeg egyrésze a perület megmaradása miatt kívül kell hogy maradjon a csillagon. Azaz a csillaggal együtt általában bolygók is keletkeznek, vagy erősebb forgás esetén kettőscsillagok is kialakulhatnak.

Csillag egyensúlyi állapota. A kifelé sugárzott fény által gyakorolt és a szétrepülő elektronok és atommagok kifejtette nyomás nem tudja megakadályozni a gravitációs összehúzóda folyamatát. Az folytatódik, egészen addig, amíg a hőmérséklet emelkedése során a csillag legmelegebb részében, a belső magjában a protonok annyira fel nem gyorsulnak, hogy beindulhatnak az atommagfolyamatok. Tudjuk, a protonok között a vonzó magerők csak akkor kezdenek hatni, ha a két proton egymás közvetlen közelébe kerül. De a két proton azonos töltése miatt taszítja egymást. Ezért csak akkor kerülhetnek egymás közvetlen közelébe, ha annyira nagy sebességgel repülnek egymás felé, hogy ugyan a közeledés során a taszítás lelassítja őket, de azért mégis elérhetik egymást.

Az egymással magreakcióba lépő protonok több lépés után végül is hélium atommagokká olvadnak össze. Úgy is mondható, hogy a csillagot alkotó protonok végül is hélium atommagokká égnek el. Az átalakulások során négy protonból, - több közbenső folyamaton át - hélium atommag, két pozitron, neutrínók és fotonok keletkeznek. Protonok héliummá való összeolvadása során energia szabadul fel, mivel a hélium atommag és a két pozitron össztömege 0,7%-kal kisebb, mint a nyersanyagául szolgáló négy proton tömege. Ez a tömegkülönbség az $E = mc^2$ képletnek megfelelő mértékben szabadul fel energiaként. Így a magfolyamatokban keletkező, szétrepülő részecskék nagy energiával rendelkezve repülhetnek kifelé. Emiatt a belső tartományban megnő a nyomás. Ez a felfúvó hatás megállítja a tömegvonzás okozta összehúzódást. Hosszabb időtartamra egyensúlyi állapotba kerül a csillag. A napnyi tömeggel rendelkező csillagnak 50 millió évre van ahhoz szüksége, hogy elérje ezt az egyensúlyi állapotot. Mindaddig ebben az állapotban marad a csillag, amíg a belsejében lévő hidrogéngáz héliummá át nem alakul. Csillagtömegtől függően ez a folyamat akár többmilliárd évig is eltarthat.

Csak akkor indulhat be atommagfolyamat a protonok a közti Coulomb-taszítás miatt, ha a hőmérséklet eléri a 2,7 millió fokot. Ennek a hőmérsékletnek megfelelő sebességek lesznek akkorák, amelyeknél a két egymást taszító proton már eléggé meg tudja közelíteni egymást. Ilyen magas hőmérsékletet létrehozó gázösszesűrűsödés csak olyan csillag magjában jöhet létre, amelynek össztömege legalább akkora, mint a Jupiter tömegének 75-szöröse. Vannak ennél kisebb tömegű csillagok is, ezeket barna törpéknek nevezik. Ezek központi tartományában is zajlanak energiatermelő magösszeolvadási folyamat, de nem protonok, hanem protonok és deutronok között. Ugyanis deutron és proton összeolvadásához, - a deutron a hidrogén izotópja, az atommagja egy protonból és egy neutronból áll, - már egymillió fokos hőmérséklet is elegendő. Ilyen magas hőmérsékletre olyan csillagok belseje hevülhet fel, amelynek tömege 13 Jupiter tömegénél nagyobb. Azokat a csillagokat, amelyeknek tömege a 13-75 Jupiter tömeg közé esik, barna törpéknek nevezzük. A barna törpecsillagok felszíni hőmérséklete alig 2000 Kelvin, ezek a csillagok viszonylag gyorsan elégetik deutronkészletüket, és kb. csak százmillió évig fénylenek.

Csillag tömege és élettartama. Egy csillag élettartamát az határozza meg, hogy milyen gyorsan égeti el a belsejében lévő hidrogént. Azokban a csillagokban, amelyek tömege nagyobb, mint a Jupiter tömegének 75-szöröse, mihelyt a belső hőmérséklet eléri a 2,7 millió fokot, beindulnak a protonokat héliummá alakító atommagfolyamatok. Minél magasabb a belső hőmérséklet, a protonok héliummá égése annál sebesebben megy végbe. A kb. 75 Jupiter-tömegű csillagok fénye épp hogy csak pislákol. Ezeknek belsejében nagyon hosszú idők, évtíz- vagy akár évszázmilliárdok kellenek ahhoz, hogy elégjen a hidrogénkészlet.

Egy naptömegű csillag belső hőmérséklete kb. 18 millió fok és mintegy 10 milliárd évig marad egyensúlyi állapotban. Napunk belső hidrogénkészletének eddig a felét égette el. Vannak azonban olyan csillagok is, melyeknek tömege a Nap tömegének tízszerese, vagy legnagyobbaké a naptömeg többszázszorosát is elérhetik. Mivel a Napnál nagyobb tömegű csillagok tömegvonzásos összehúzódása jóval gyorsabb, ezért az egyensúlyi szakaszuk jóval rövidebb. Például egy Napnál tízszer nagyobb tömegű csillag 2 millió éven belül elégeti hidrogénkészletét. Élettartama a Nap élettartamának ötezredrésze, fényereje a Nap fényességének ötvenezerszerese.

Csillag felfúvódása, vörös óriás. Amint a csillag magjában fogy a hidrogén, kevesebb lesz a termelődött és kifelé áramló energia. Emiatt csökken a belső nyomás. Ezért a csillag magja elkezd összehúzódni. Ezzel megnő az anyagsűrűség és a nagyobb sűrűségű helyek hőmérséklete is emelkedni fog. Ahogyan a csillag sűrűsödik, a csillag magjában mérhető korábbi sűrűség és hőmérsékletérték most egy a központtól távolabb fekvő gömbréteget jellemez. Így a hidrogént égető csillagbelső térfogata fokozatosan nő. Ennélfogva ahogy fogy a csillag belsejében a hidrogén, a hidrogén égésének övezete egyre kintebb tolódik és így a hidrogén égetése a csillag térfogatának egyre nagyobb részére terjed ki. Emiatt a csillagban egyre több energia keletkezik. Így a hidrogén fogyásával a csillag fokozatosan fényesedik és mind nagyobbra fúvódik fel.

A felfúvódó csillag további sorsa tömegétől függ. Ha a tömege a Nap tömegének 40%-ánál kisebb, akkor a felfúvódó csillagról nem szakadnak le gázfelhők. Ha a csillag tömege a 0,4-8 naptömeg között van,

akkor a keletkezett nagyobb mennyiségű energia hatalmas mértékben felfújja a csillagot. Egyre nagyobb és ragyogóbb lesz a csillag és végül a vörös óriásnak nevezett állapotba kerül. Ez a csillag elvesztheti tömegének egy részét, mivel olyan nagyra fúvódik fel, hogy rezgései és rengései során gázfelhőinek egy része leszakadhat róla. Majd a felfúvódó csillag teljes tömege héliummá alakul át. Ha a hidrogén kifogyott, energiatermelő folyamat hiányában a csillag anyagát a tömegvonzás összehúzza.

Fehér törpe. Miután a hidrogénje elégett, az összehúzódó, héliumból álló csillag egyre kisebb térfogatú, magas hőmérsékletű ragyogó fehér csillaggá, fehér törpévé sűrűsödik. Egy fehér törpét a tömegvonzás kisvilágtani hatások miatt nem tud teljesen összehúzni. Ugyanis a határozatlansági összefüggések miatt, lásd a 1.2. 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. Mivel az elektronok energiája és így a nyomása a csillag összehúzódásakor egyre jobban nő, ez nem engedi összeroppanni a csillagot. A fehér törpék anyagának sűrűsége kb. milliószorosa a víz sűrűségének. Napunk durván földnyi méretű fehéren izzó törpecsillaggá sűrűsödik majd.

Egy fehér törpe sorsa további sorsa tömegétől függ. Ha tömege kisebb, mint 1,4 naptömeg, akkor a mérete nem változik és lassan hűl. Ha elég kicsiny a fehér törpe tömege, akkor újabb magösszeolvadási folyamat már nem indul be és héliumból álló fekete törpévé válik. Mivel a fehér törpék a kis felületük miatt nagyon lassan hűlnek ki, igen számos figyelhető meg közülük.

Attól függően, hogy egy határ felett mekkora a fehér törpe tömege, a csillag magjában újabb energiatermelő magösszeolvadási folyamatok indulhatnak be. Ha a fehér törpe tömege nagyobb mint 1,4 naptömeg, akkor a magja annyira besűrűsödik, hogy a periódusos rendszer összes eleme kialakul majd benne. De ez már egy másik csillagállapot jellemzője. Továbbiakban először az összehúzódó belső magban lezajló folyamatokat vizsgáljuk.

Szén és egyéb nehezebb elemek képződése. Amint elfogy a csillag magjából a hidrogén, a csillag magja egyre nagyobb sűrűségű lesz. Ezért a hőmérséklete emelkedik, egészen addig, amíg be nem indul újabb energiatermelő magfolyamat. Nyilván az ott lévő hélium atommagok csak magasabb hőmérsékleteken kerülhetnek egymás közvetlen közelébe, mint a protonok. Ugyanis a hélium atommag töltése két protonnyi. Ezért a két hélium atommag között fellépő taszító Coulomb erő erőssége $2 \cdot 2 = 4$ -szer nagyobb, mint a két proton közötti taszítás. Úgy 100 millió fok körül indulhat be a hélium atommagok összeolvadása. Ennek során három hélium atommagból egy szénatommag képződik. Ez a folyamat a hidrogén égésénél sokkal gyorsabb.

Először két hélium atommag összeolvadásából berilium atommag képződik. Azonban a keletkezett ${}^8\text{Be}$ izotóp nem állékony, a természetben csak a ${}^9\text{Be}$ atommag fordul elő. ${}^8\text{Be}$ atommag csak nagyon rövid ideig, kb. 10^{-16} másodpercig létezhet, azután két hélium atommagra esik szét. Annak valószínűsége, hogy a fenti igen rövid időszak alatt a ${}^8\text{Be}$ atommag egy újabb hélium atommaggal olvadjon össze, igen kicsi. Márpedig a ${}^{12}\text{C}$, a szén atommagja csak ilyen módon keletkezhet.

Annál valószínűbbek az atommagok között lezajló folyamatok, minél nagyobb felületet mutat egymásnak a két ütköző mag. Ez a felület nem pusztán az atommagok által mutatott mértani felület, mert itt megnyilvánul az atommagok hullámtermészete is, lásd a 1.2. szakaszt. Bizonyos kitüntetett bombázó energiáknál a magfolyamatok valószínűsége ugrásszerűen megnövekszik. Kiderült, hogy a ${}^8\text{Be}$ - hélium magösszeolvadás éppen annál az energiánál mutat rezonanciaszerű növekedést, amely a héliumot égető csillag belső hőmérsékletének feleltethető meg. Ilyen rezonanciák ennyire kis energiáknál nagyon ritkák. Kivételesen szerencsés véletlen, hogy a rezonanciaenergia helyzete és a csillagbelső hőmérsékletének megfelelő energia így egybeesik. Ennek tulajdonítható, hogy a világegyetemben van elég szén és végeredményben ennek köszönhető a nehezebb elemek létezése is.

Addig folyik a szénképződés, amíg a csillag magjában feldúsul a szén és a hélium fogyása miatt a magfolyamatokban felszabaduló energia és ezzel a tömegvonzást ellensúlyozó belső nyomás is csökken. Emiatt

a csillagmag tovább zsugorodik, hőmérséklete nő. Beindulhat az oxigén képződése, amely hélium és szén atommagok összeolvadásából keletkezik. Mivel a csillagbelső összehúzódása miatt megemelkedik a hőmérséklet, a csillag héjaiban különböző összeolvadási folyamatok zajlanak. Legbelül az oxigén, kintebb a szén, még kintebb a hélium képződése zajlik. Még jobban összehúzódó csillagbelsőben, nagyon magas, milliárd fokok hőmérsékleteken a szénatommagok magnéziummá olvadhatnak össze. Ilyen módon az elemképződés folytatódhat, egészen a vas képződéséig. Ha a fehér törpe tömege nem éri el az 1,4 naptömeget, akkor az elemképződés folyamata valahol leáll és a csillagfejlődés eredménye szénből, vagy magnéziumból vagy szilíciumból stb. álló fehér törpe lesz.

I. és II. típusú szupernóva. Ha a vörös óriás csillagból 1,4 naptömegnél nehezebb fehér törpe fejlődik ki, akkor abban az elemképződés során vas is keletkezik. Mivel a vas a legerősebben kötött atommag, a vas környéki atommagok lesznek az utolsók, melyeknek magösszeolvadási keletkezése során energia szabadulhat fel. Ezért ha egy csillag belsejében vas is keletkezik majd a csillagbelső már vassá alakult, akkor a csillag összeroppan, mivel már nincs olyan folyamat, amely az összehúzódást legalább egy időre lassítani tudná. Nagyon nagy energiák szabadulnak fel a tömegvonzásos összeomlás során és olyan magfolyamatok is végbemehetnek, melyek nem energiatermelők, hanem energiát fogyasztanak. Ilyen magfolyamatokban keletkeznek a vasnál magasabb rendszámú elemek. Az összeroppanó csillag kérgében valamennyi ismert elem atommagja kialakul. Egy szupernóva fényessége pár napig, hétig olyan nagy, vagy nagyobb lehet, mint az őt tartalmazó csillagváros fényessége. Ezért nagyon feltűnő égi jelenség.

Amikor a csillag végleg összeroppan, a belsejében felszabaduló óriási energiák a felszínre törnek. Levetik a csillag kérgét, amely egy hatalmas robbanás során repül le. Ezeket a robbanásokat szupernóva-robbanásnak nevezik. Ennek során a csillagban keletkezett, a periódusos rendszer valamennyi elemét tartalmazó hatalmas anyagtömegek szétszóródnak a világűrben. Roppant erejű lökéshullámok terjednek szerteszét, a szétrepülő anyagfelhők sebessége 1000-10000 km/s körül van. Az így szétszóródott csillagtörmelékek alkotják majd a bolygók, köztük Földünk anyagát is.

Nem tartalmaz hidrogént a fehér törpéből kialakuló szupernóva, mivel az már a fehér törpét megelőző vörös óriás állapotban kiégett a csillagból. Hidrogént nem tartalmazó szupernóvát I. típusú szupernóvának nevezik. Ha a csillag tömege nagyobb, mint a Nap tömegének nyolcszorosa, akkor a csillag szupernóvává fejlődése meglehetősen gyors. Közben felfúvódva óriás csillaggá alakul, aközben a belseje annyira gyorsan összehúzódik, hogy ott egymás után jönnek létre a fentebb tárgyalt magösszeolvadási övezetek, egészen a vasig. Az ilyen sokhjú izzó csillagot szuper óriásnak nevezik. Ey kialakuló szuper óriás csillag mind erősebben fénylik és szupernóvává alakul. Az ilyen, a hidrogént is tartalmazó szupernóva csillagot II. típusú szupernóvának nevezik. Kivételes szerencse, hogy 1987-ben a tőlünk 16000 fényévnnyire lévő Nagy Magellán-felhőben sikerült ilyen közeli, II. típusú szupernóva robbanását észlelni.

Kb. a csillagok kb. 10%-a jut el szupernóva állapotba. Világegyetemünkben durván másodpercenként, a Tejútrendszerben 30-50 évente történik szupernóva-robbanás, eddig kb. százmillió ilyen esemény zajlott le csillagvárosunkban. Történelmi források is megemlékeznek a közelebbi, ezért szabad szemmel is jól megfigyelhető eseményekről. 1054-ben a Rák-ködben történt szupernóva-robbanás, ezt a kínai csillagászok is feljegyezték. Ezek szerint ez az éjszakai égbolton olyan fényességű volt, mint az Esthajnalcsillag, a Vénusz. Tycho de Brahe 1572-ben figyelt meg szupernóva felfényesedést.

Ia típusú szupernóva. Mint tárgyaltuk, az 1,4 naptömegnél kisebb tömegű fehér törpékben már nem zajlik energiatermelő folyamat. Egy ilyen fehér törpe anyaga vasnál kisebb tömegű elemből állhat. Ha viszont egy, a tömeghatár közelében lévő fehér törpe kettőscsillag egyik tagja, akkor csillagtársától gázfelhőket ragadhat el. Ezért újra beindul benne a magasabb rendszámú elemek képződése. Ha olyan sok anyagot sikerül magához vonzania, hogy a tömege átlépi az 1,4 naptömeges határt, akkor, eljutva a vas kialakulásáig, a csillag szupernóvává fejlődik. Az így kialakuló szupernóvát Ia típusú szupernóvának nevezik. Mivel az Ia típusú szupernóva a legkisebb tömegű szupernóva, a fejlődése lassabb, mint a többi szupernóváké. Az Ia

szupernova a leghosszabb ideig fénylő szupernova, ezért megjelenése az égbolton jól felismerhető és követhető. Mivel tudjuk, mekkora az Ia típusú szupernóva abszolút fényessége, mérve a látszólagos fényességét, a távolsága meghatározható, lásd a 2.1. szakaszt. Így sikerült a megfigyelhető világegyetem határához közeli csillagvárosok távolságát pontosan meghatározni és ezzel a világegyetem gyorsuló tágulását felfedezni. Itt a Tejútrendszerben kb. 300 évente fejlődik ki Ia típusú szupernóva.

Neutroncsillag és fekete lyuk. Szupernóvarobbanás után a csillag maradványai neutroncsillaggá alakulnak. Ennek keletkezése során az anyag egyre jobban sűrűsödik. Energetikai okokból az a kedvező, ha az elektronok befogódnak az atommagokba és így a csillag protonjai neutronokká alakulnak. Közben a csillag teljes tömege atommagsűrűségűre tömörödik, ezért az egész csillag egyetlen hatalmas, neutronból álló atommagnak tekinthető. 10-15 kilométer között lehet a neutroncsillag sugara. Minden köbcentimétere százmilliárd tonnányi anyagot tartalmaz, ami azt jelenti, hogy a neutroncsillag sűrűsége a fehér törpe sűrűségének százmilliószorosa.

A neutroncsillagok nagyon gyorsan forognak valamely középpontjukon átmenő tengely körül. Mivel a neutron mint kis mágnestű viselkedik és ezek a neutroncsillagban párhuzamosan állnak be, a neutroncsillagnak hatalmas mágneses tere van. Emiatt a forgó neutroncsillagok emiatt igen erős elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Sugárzásuk ütemes jellege miatt a neutroncsillagokat pulzároknak nevezik. Eddig a Tejútrendszerben kb. ezer pulzárt fedeztek fel. A Rák-ködben történt szupernóvarobbanás maradványa is egy pulzár, melynek forgási ideje 30 milliszekundum.

Észleltek már annyira különleges neutroncsillagokat is, hogy felmerült a kvarkcsillagok létezésének gondolata. Egy kvarkcsillag belsejében a kvarkok kiszabadulnak a neutronba való bezártságuktól, lásd a 1.3. szakaszt, és a csillag anyagát a kvarkokból és gluonokból álló plazma alkotja.

Ha a szupernóva-robbanás utáni maradvány 3 naptömegnél nagyobb, akkor számára a neutroncsillag állapot sem tartós. Még a benne lévő neutronokat is összeroppantja a tömegvonzás és a csillag fekete lyukká alakul át. Fekete lyukká összezuhant csillag gravitációs tere annyira erős, hogy azt még a fény sugar sem hagyhatja el. Ezért a csillag a szó szoros értelmében láthatatlanná válik. Csak tömegvonzásának hatásait észlelhetjük. Ha a fekete lyuk egy kettős csillag egyik tagja, akkor a másik, amit mi a fényét látva észlelünk, pályamozgást végez a fekete lyuk körül. Ebből a pályamozgásból megállapítható 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 gáztömegnek zuhannak a fekete lyukba, hatalmas energiák szabadulnak fel, amelyeket nagyenergiájú kozmikus sugárzásként észlelhetünk.

Fekete lyuk nem csupán egy csillag összeomlása végén alakulhat ki. Kezdetben, a csillagvárosok kialakulásakor hatalmas tömegű fekete lyukak keletkeztek a csillagvárosok közepén. Mint említettük, a Tejútrendszer középpontjában is van egy többmillió naptömegű fekete lyuk. Ilyen fekete lyukak hatalmas kitörések és nagyon erős sugárzások forrásai. Valószínűleg a kvazároknak nevezett égitestek is óriási fekete lyukak, amelyek csillagvárosok közepén helyezkednek el.

5. Naprendszer és Föld

Naprendszerünk bolygói a Nap körül egy síkban keringenek, ellipszis pályákon. Naprendszerünk abban az értelemben kivételes, hogy a Föld nevű bolygójának felszínén évmillárdok óta létezik fénymegkötésre (fotoszintézisre) épülő élet. Azoknak a csillagoknak a száma, amelyeknek naprendszerében élet jöhet létre és maradhat fenn, az összes csillagok 1-2%-ára becsülhető. Ha a csillag tömege nagy, akkor a csillag viszonylag rövid ideig sugároz. Ezért a felszíni életet hordozó bolygókon nincs elég idő az élet és főleg nem az összetettebb élő kialakulásához. Ha a csillag kisebb, akkor nem tud elegendő mennyiségű energiát sugározni.

Naprendszerünk egésze a Tejútrendszer középpontja körül kering. Keringési sebessége mintegy 250 km/sec, 225 millió év alatt kerüli meg a Tejútrendszer középpontját, ez az időtartam a galaktikus év.

Miként alakul ki egy csillag körül bolygórendszer, erre még nincs általánosan elfogadott leírás. Ha az az anyagfelhő, amelyből a csillag kialakult, forgott, akkor a felhőnek a perdülete, amely megmaradó mennyiség, nem engedi meg, hogy az összehúzódás teljes legyen. Ugyanis, akárcsak amikor a pörgő jégtáncosnő behúzza a karjait és forgása felgyorsul, az összehúzódó felhő is egyre sebesebben pörög. Emiatt a felhő egy része kintmarad és bolygók, bolygóközi anyag lesz belőle. Minél sebesebben forgott a felhő, annál nagyobb lesz a központi csillagon kívül rekedt anyag, annál nagyobb lehet a bolygók tömege. Miként oszlanak meg a bolygók tömegei, az attól is függ, mennyire egyenletes volt az eredeti gázfelhő forgása és az összehúzódást beindító hatások mekkora egyenetlenségeket idéztek elő a gázfelhőn belül.

Mostanában, már ebben az évezredben sikerült először naprendszeren kívül lévő bolygót felfedezni. Idén április végén jelentették be az első, a Földhöz hasonló olyan bolygó létezését, amelynek felszínén víz lehet és akár a földihez hasonló felszíni életet is hordozhat, mivel a csillag is megfelelő ehhez. Ez a csillag a Naphoz legközelebb lévő 100 csillag egyike, a Mérleg csillagkép egy csillaga, csak 20,5 fényévre van tőlünk.

5.1. Naprendszerünk születése

Naprendszerünk kialakulásának forgatókönyve jelen ismereteink szerint a következőképpen történhetett. 4,567 milliárd évvel ezelőtt a csillagbölcsőnkben, a leendő naprendszerhez közeli térségben szupernóvarobbanások történtek, lásd a 4.1. szakaszt. Ezeknek a felrobbanó szupernóváknak a lökéshullámai elérték a naprendszer gázfelhőjét, a szétrepülő burkok gázt, port, kisebb kőzet és kavicsdarabkákat tartalmaztak. Amint az eredeti gáz- és porfelhő és a szupernóvából kitörő gázok és por ütközött, összetereledött egy porral és szemcsékkel szennyezett örvénylő gázfelhő, amelyből aztán a Naprendszer keletkezett. Beindult a Naprendszert létrehozó összehúzódási folyamat.

Forgó gázfelhő és a Naprendszer szerkezete. Úgy jött létre a Nap, hogy vele együtt bolygók is születtek. Azért nem zuhant bele a bolygók anyaga a Napba annak keletkezése során, mert a Naprendszer nyersanyagául szolgáló gázfelhő forgott. A Naprendszer tömegének javarésze csak azáltal tömörülhetett egyetlen központi csillaggá, hogy perdületét forgó gáz- és porgyűrűként kinnhagyta. Ha a most kívül lévő anyag a Napba kerülhetne, akkor a Nap forgása felgyorsulna, és anyagfelhőket vetne ki. Naprendszerünk teljes tömegének kb. 99,85 százalékát a Nap tömege teszi ki, azaz a bolygók, a kisbolygók, a bolygóközi por tömeg együttesen a Naprendszer tömegének alig másfél ezreléke.

Naprendszerünk bolygói és a Nap őrzik az eredeti perdületet. Maga a Nap 23,5 nap alatt fordul meg a saját tengelye körül. Minden bolygó ugyanolyan irányba kering a Nap körül és a bolygók holdjai közül is majdnem mindegyik ugyanabba az irányba kering. Ennek megfelelőek a Nap, a bolygók és holdjaik saját tengely körüli forgásai is. Kivétel a Vénusz és az Uranusz tengely körüli forgása. Ennek a két bolygónak a többitől eltérő irányú forgástengelye valószínű nagyerejű, a forgást befolyásoló ütközésekkel magyarázható. Mindez meggyőzően bizonyítja, hogy a teljes Naprendszer egyetlen hatalmas forgó anyagfelhőből keletkezett.

Nemcsak a szabályos szerkezet utal arra, hogy a Naprendszer egy időben keletkezett. Az eredeti gázfelhőjébe belekerült, a különböző szupernóvarobbanásokból származó por egyenletesen szétterült benne. Emiatt, eltekintve az illékony gázoktól, a Nap, a Föld és a Hold és a meteoritok átlagos anyagösszetétele lényegében azonos. Ez is arra mutat, hogy a Naprendszer egyidőben, ugyanabból az anyagkészletből keletkezett. Napunk tömegének kb. 98%-a hidrogén és hélium, a nehezebb elemek a Nap tömegének kb. 2%-át teszik ki.

A Nap. Magjának hőmérséklete kb. 15-20 millió fok, a magfolyamatok ebben a központi részben mennek végbe. A belső tartományban lévő hidrogénkészlet kb. 10 milliárd év alatt alakul át héliummá. Napunk most élete derekán tart. 80 millió évenként mintegy 1%-kal lesz fényesebb, az utóbbi 3,5 milliárd év alatt

fényessége 40%-kal nőtt. Ötmilliárd év múlva, elfogyasztva a belsejében lévő hidrogénkészletet, vörös óriássá alakul. Héliumot is éget, kevéske szén is termelődik benne. Ezek után a Nap fehér törpecsillaggá válik, majd végleg kihűl.

Durván 700000 kilométer a Nap sugara. A magfolyamatokban keletkezett energia ezen a vastag rétegen keresztül körülbelül egymillió éven keresztül vezetődik ki a felszínre. Tehát az az energia, amelyet a Nap most sugároz ki, egymillió évvel ezelőtti magfolyamatokban szabadult fel.

Napszél és bolygók. Miközben a Napot alkotó anyagfelhők a központ felé húzódtak, a bolygók övezetében lévő por és kőzetdarabkák is vonzották egymást. Összetömörödtek az ütközések hatására, egyre nagyobb darabok keletkeztek. Egy almányi kőzetdarab összetömörüléséhez kb. száz év szükséges, egy földnyi nagyságú bolygó százmillió év alatt képződhetett. Földünk kezdeti állapota 4,5 milliárd éve jött létre, teljes kialakulásához kb. összesen százötven millió év kellett.

Maga a Nap maga már jóval hamarabb működni kezdett. Sugárzása felhevítette az alakuló bolygók darabkáit és az illékonyabb gázfelhőket. Továbbá a Napból a napkitörések során kiáramló, nagyenergiájú töltött részecskékből, elsősorban protonokból álló napszél a gázokat kifújta a Naprendszer külső tartományába. Ugyanis a nagyenergiájú protonok és hélium ionok mint a billiárdgolyók ütnek ki az útjukba kerülő gázok atomjait, molekuláit. Így a meleg Naphoz közel eltűntek a gázok. Kristályosodott fém-oxidokból és fém-szilikátokból épültek fel a belső égitestek: Merkúr, Vénusz, Föld, Hold, Mars. Naptól távoli bolygók, a Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz hatalmas gázfelhőkből, hidrogénből, héliumból és metánból képződtek. Ami gázt a napszél a belső tartományokból kifúj, az elsősorban a Jupiter tömegét gyarapíthatta.

Hold kialakulása. Holdunk egyike a Naprendszer nagyobb bolygóinak, nagyobb, mint a Merkúr. Más belső bolygótól eltérően nincs fémes magja, anyaga olyan, mint a Föld köpenyének anyaga. Valószínűleg úgy keletkezett, hogy a kezdeti állapotú Föld kb. 4,4 milliárd éve egy Mars nagyságú bolygóval ütközött és az ütközés ereje a Föld köpenyéből vetette ki a Föld körüli pályára a Holdat. Ez a becsapódás lehet az oka annak, hogy a Föld ennyire gyorsan forog a tengelye körül. Valószínű a becsapódásnak köszönhető a Föld tengelyének a ferdesége is, amely az évszakok változását okozza.

5.2. Föld fejlődése

A Föld belső szerkezete. Amint a tömegvonzás a Földet alkotó porfelhőt összehúzta, az anyaga megolvadt. Egyrészt a tömegvonzásos összehúzódás során felszabadult hőből, de hevítette a kialakuló bolygót a becsapódások során keletkezett hő, valamint a földi kőzetek radioaktivitása során felszabaduló energiája is. Még ma is sokezer fokos a hőmérsékletet a Föld belsejében. Ezt részben a radioaktív atommagok bomlása során felszabaduló energia tartja fenn. 4,5 milliárd évvel ezelőtt a radioaktivitás szintje még sokkal magasabb volt. Legmagasabb hőmérsékletek a Föld belsejében alakultak ki. A megolvadt földgolyóban megindult az elemek áramlása. Lefelé a magba süllyedtek a nehezebb elemek, a könnyebb elemek meg felfelé törekedtek. Ez az elrendeződési folyamat nem fejeződhetett be teljesen, mert közben a lehűlés folyamán a Föld kérge megszilárdult. Földünk kőzeteinek kora a kőzetekben található izotópok arányából határozható meg. Nézzve a még meglévő radioaktív elem és a bomlása során belőle keletkezett izotóp mennyiségét, valamint a bomlási időt, a kőzet megszilárdulásának időpontja egyszerűen megkapható.

Földünk sugara 6371 kilométernyi. Magjának sugara kb. 3400 km, főleg vasból és nikkeltől áll. Valószínű az 5000 Celsius fokot is meghaladja a mag hőmérséklete, de olyan nagy a nyomás, hogy a fém a mag belső részében szilárd halmazállapotú. A mag külső részén a nyomás már kisebb, itt a fém olvadt állapotban van. Vastag köpeny fedi a magot, ez főleg szilíciumot, magnéziumot, vasat és oxigént tartalmaz. Ezt a köpenyt a földkéreg takarja, melynek vastagsága az óceánfenéki részeken néha csak 3 kilométer, másutt a 70 kilométert is elérheti.

Földünk belsejének milyenségéről a földrengések tanulmányozásával szerezhetünk ismereteket, ez a földrengéstan (szeizmológia) tárgya. Amikor egy földrengés kipattanása, rezgéshullámok keletkeznek, amelyek ugyanolyan jellegűek, mint a hanghullámok. Csak nem a levegőben, hanem a szilárd kőzetekben terjednek. Ezeknek a hullámoknak a terjedési sebessége függ attól, milyen összetételű, halmazállapotú, hőmérsékletű közegekben terjednek. Közeghatárhoz érve visszaverődhetnek vagy törést szenvedve behatolnak a közegbe és átjárják a bolygók belsejét. Így a földrengéshullámok mintegy 'átvilágítják' a Föld belsejét, akárcsak a röntgensugarak az embert. Mindenfelé a különböző földrészekeken megfigyelőállomások működnek, ahol felfogják és rögzítik a keletkezett rezgéshullámokat fogják fel. Együtt elemezve a különböző helyeken észlelt adatokat feltérképezik, milyen a Föld belsejének szerkezete.

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. Ha a Naphoz közelebb volna, a napszél lefújta volna róla a vízmolekulákat. 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 jelenségeken keresztül meghatározó módon befolyásolta a földi élet kialakulását.

Légkör és felszín kialakulása. Bolygónk eredeti alkotórészei, az összetömörödött por és kőzetdarabkák még bőven tartalmaztak gőzöket és gázokat, gondoljunk például a rájuk fagyott jégre. Eredetileg a napszél csak a szemcsékhez nem kötött illó gázokat tudta kisépenni. 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 egy további része a Naprendszer belsejét rendszeresen látogató üstökösök anyagából került ide, az üstökösök nagy mennyiségű jéggel, széndioxiddal és kisebb szerves molekulákkal terítették be a Földet.

Amint megszilárdult a földkéreg és hűlt lefelé, lecsapódott a felszínre tört vízgőz és kialakult az őstenger. Földrészek még nem alakultak ki, csak a tűzhányók létrehozta szigetek emelkedtek a vízszint fölé. Az ősi légkört elsősorban széndioxid, kevés nitrogén és vízgőz alkották, nyomokban volt benne még ammónia, metán, kénsav és sósav is. A Földdel ütköző kisbolygók, meteoritok óriási tölcseréket ütöttek a földkérgen. Akár az őstenger vizét is felforralhatta az ütközések energiája és törmelékei szigeteket építhettek. De a nagyobb kisbolygók még a földkérget is átütötték, hatalmas mennyiségű anyagot és energiát juttatva a Föld mélyébe. Ezután akár a teljes földkéreg is megolvadhat és valamennyi korábbi fejlődés eredménye eltűnik.

Működésbe lépett a légkörben lévő széndioxid és vízgőz hatására az üvegházhatásként ismert jelenség is, amely növelte a felszín hőmérsékletét, lásd lentebb. Ugyanakkor a víz és a savak hatására beindult a vegyi mállás, mert a savas víz oldja a kőzetek egyes elemeit. Ezen oldott elemek közül legfontosabb a kalcium, ami megköti a légkör széndioxidját, miközben mészkő keletkezik. Ha a légkörben kevesebb a széndioxid, csökken az üvegházhatás, ezzel alacsonyabb lesz a hőmérséklete is. Ekkor vízpára csapódik ki a légkörből és még kedvezőbbé válnak a széndioxid légkörből való kivonásának feltételei. Ennek az öngerjesztő folyamat eredményeként a Föld felszíni hőmérséklete egyre csökken, a tengerben lévő víztömeg egyre nő.

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

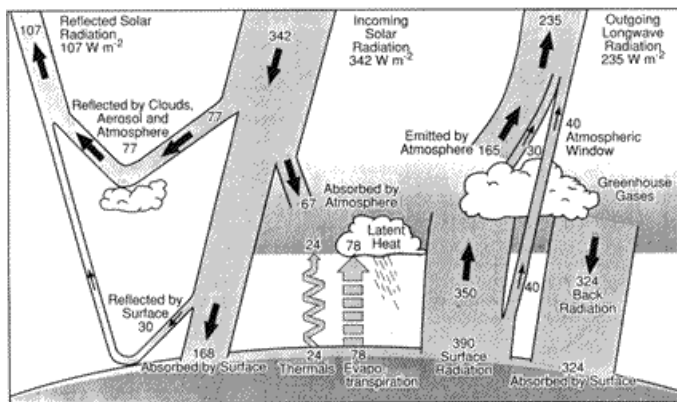
5.3. Körforgások a Földön

Földünk felső rétegei, mint a kéreg, felszín és légkör számos körforgásban vesznek részt. Ezeket a körfolyamatokat a földmélyből származó és a Nap által sugárzott energiák tartják fent.

Kőzetek körforgása. Bolygónk felszínének 71%-át víz borítja, 29% a szárazföldek aránya. Ez a viszony a földkéreg tevékenységére vezethető vissza. Ha a kéreg merev lenne, akkor a víz, a szelek pusztító hatása egyenletesre koptatná a szilárd anyagot és a szárazföldeket szerte a bolygón mindenütt azonos mélységű vízréteg borítaná. De a földkéreg állandó változásban van, kb. tucatnyi nagyobb és jónéhány kisebb lemezre van szabdalva, amelyek lassú mozgásban vannak. Ez a földrészvándorlások magyarázata. Amerika és Európa évente pár centit távolodnak egymástól. A kéreglemezek mozgásának oka az, hogy a Föld belseje meleg, de a nehezebb elemek a kezdeti megolvadt állapotban nem süllyedtek le mind a Föld belsejébe, mert a kéreg megdermedése hamarabb következett be. Emiatt a belső rétegek átalakulása folyamatban van, a lemezek csúsznak, mozognak. Távlodásuk süllyedésekhez, találkozásuk hegységek keletkezéséhez vezet, utóbbit tűzhányók működése és földrengések kísérik. A hegységek magasságának a hegyek súlya szab határt. Ez akkora nyomást gyakorol a hegység alatti kőzetekre, hogy azokban az atomi és molekuláris kötések széttöredeznek, azaz a nyomással a kőzet szilárdsága, olvadáspontja csökken. Emiatt a kőzet olvadni kezd és így a hegység szépen belesüllyed a földkéregbe. Addig, amíg az alapjára ható nyomás annyira le nem csökken, hogy az alapon lévő anyag megszilárdulhat. A Himalája magassága a lehetséges magasság közelében van, a Mount Everestnél sokkal magasabb hegycsúcs nem létezhet.

A felszínre került tűzhányó (vulkanikus) kőzeteket a víz, jég és szél munkája darabolja, pusztítja. Egyenletessé igyekeznek koptatni a felszínt, az eső, a szél és a folyók a magasabban fekvő anyagot az alacsonyabban lévő helyekre hordják. Az így keletkezett anyag, a tengeri állatok maradványai által képzett üledék alkotja azután az üledékes kőzeteket. A lesüllyedt üledékes kőzetek a nagy nyomás és hőmérséklet hatására átalakulnak (metamorfoknak) nevezett kőzetté válnak. Átalakult kőzet a márvány is. Kezdetben a márvány a mészvázú tengeri állatokból képződött üledékes kőzetként, mészkőként létezett. Egyre mélyebbre került a mészkő. Majd a kéregmozgások során a lemezek összetorlódásakor fellépő nagy nyomások és magas hőmérsékletek a mészkövet márvánnyá alakították. Azután a márvány a feltorlódó hegységek anyagaként került a felszínre.

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



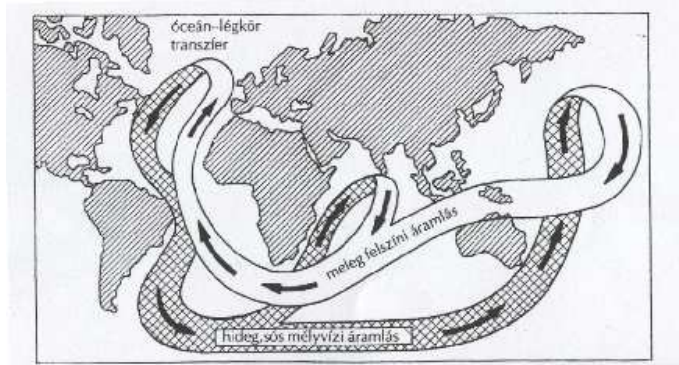
13. ábra. Földünk felszínére 342 W/m^2 napsugárzás jut. Ebből 77 W/m^2 -nyit a levegőburok, felhők, légköri szemcsék azonnal visszavernek, 30 W/m^2 -nyit a talaj felszíne ver vissza. A felszín által elnyelt teljesítmény 168 W/m^2 -nyi. A beérkező napsugárzásból 67 W/m^2 -nyit a légkör nyel el. A felszínről 24 W/m^2 a levegő felmelegedésével, 78 W/m^2 párolgási hőként távozik. A felszín hősugárzása 390 W/m^2 , ebből 40 W/m^2 jut ki közvetlenül a világűrbe, a többit a légkör az üvegházhatás eredményeként elnyeli. A légkör 324 W/m^2 -nyit sugároz a felszínre. A légkör 165 W/m^2 -nyi, a felhőzet 30 W/m^2 -nyit sugároz ki a világűrbe.

Felszín által elnyelt és kibocsátott sugárzások. A felszíni folyamatokat a napsugárzás tartja fent. Amint a 13. 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 a hő egyrészt a levegő felmelegítésével, a párologással valamint sugárzással távozik, ugyanakkor a légkör sugárzása is melegíti a felszínt. A sugárzási mérleget a légkör és a talajszint kisugárzása egyenlíti ki.

Üvegházhatás. A légkör gázainak elnyelőképességéről lásd a 2. ábrát. Ez mutatja, hogy a kisebb hullámhosszú ibolyántúli sugárzást az oxigén molekulák és az ózon szinte teljesen elnyelik. Utána a látható fény tartományában, a légköri ablakban alig van elnyelés. Majd a hosszabb hullámhosszú tartományában a vízgőz és a széndioxid nyelik el a sugárzást. Hosszabb hullámhosszú tartományban elsősorban a Föld felszíne sugároz, ezeknek a visszatartása a már említett üvegházhatás. Közel állandó a földi átlaghőmérséklet, ami az üvegházhatás függvénye. Az üveg a napfényt átterszi, a szobából illetve üvegházból kisugárzott hőt viszont elnyeli. Ezen alapul az üvegházak környezetnél magasabb hőmérséklete. Bizonyos nagyobb molekulájú gázok, elsősorban a vízgőz és a széndioxid, ugyanígy viselkednek, azaz a napsugárzást szabadon átterszik, viszont a Föld által kibocsájtott hősugárzást elnyelik. Üvegház gázoknak nevezzük őket, mert hőcsapdaként szolgálnak. Például ha a széndioxid mennyisége lecsökken, akkor csökken a felszíni hőmérséklet. Ha a légkörben a széndioxid felszaporodik, akkor a hőmérséklet megnő. Továbbá a lehülés miatt a Föld felszínén lévő hó és jég felszaporodása a hőmérséklet további csökkenéséhez vezet, ugyanis a hó és jég visszaveri a felszínre jutó napfényt. Ezért a jegesedett területek növekedése öngerjesztő jelenség, jégkorszakok kialakulásához vezet.

Az időjárás légköri körforgásai a napsugárzás energiáját csoportosítják át. Az egyenlítői térségekben felhevült levegő felemelkedik és a sarkok felé áramlik. Ott aztán lesüllyed és az onnan indult hideg szelek az egyenlítő felé fújva zárják be a légkörzést. Ha a Föld nem forogna, akkor az északi féltekén a talaj színjén állandó északi szél fújna. Ám a légkörzések jellegét a Föld forgása is befolyásolja, ennek megfelelően a mérsékelt égövben az északi féltekén az uralkodó szél nyugatról keletre fúj.



14. ábra. A nagy óceáni szállítószalag. Nem az áramlások tényleges képét mutatja, azok ennél jóval összetettebbek, hanem a világoceánok vízkörzésének általános képét szemlélteti. Végeredményben a szállítószalag a három óceán forró égövi térségeiből hatalmas mennyiségű hőt visz át az Atlanti-óceán északi térségébe.

Tengeráramlatok. Hatalmas összefüggő rendszert alkotnak a tengeri, óceáni áramlatok. Ez az úgynevezett nagy óceáni szállítószalag, amely az Atlanti-, Csendes- és Indiai-óceán egyenlítői térségeiből szállítja a meleget az Atlanti-óceán északi részébe, lásd a 14. ábrát. Maga a Golf-áram csak egy része ennek a világtengereket összekötő áramlási rendszernek. Ezt az áramlást végsősoron az Atlanti-óceán vizének magasabb sótartalma hajtja. Azért sósabb az Atlanti-óceán, mert viszonylag kicsi a felszíne. Ezért az elpárologott víz jórésze a szárazföldekre hull vissza. Viszont a másik két óceán vizét a párologás nem teszi számottevően töményebbé, hiszen a csapadék esetükben ezekbe az óceánokba hull vissza. A víz 4 Celsius fokon a legsűrűbb, de az eléggé sós víz annál sűrűbb, minél alacsonyabb hőmérsékletű. Északra érve a Golf-áram

melegebb vize lehűl, majd ott, mivel sósabb, lesüllyedhet az óceánfenéig és hideg mélyvízi áramlatként visszaviszi a vizet az Indiai- és Csendes-óceán trópusi övezeteibe. Odáig eljutva sótartalma csökken, mert felhígul. Nagyjából a Galapagos-szigetek térségében tör a felszínre, az áramlási kör így zárul.

Ha az Északi-sark jéghegyei olvadásnak indulnak, akkor ott a víz sótartalma lecsökken és így a nagy óceáni szállítószalag le is állhat. Újabb mérések szerint ez máris folyamatban van, a Golf áram vészesen gyöngül. Grönlandi jégtakarójába mélyen lefúrva tízezer évekre visszamenően meghatározták, hogy milyenek voltak az adott években a átlaghőmérsékletek. Innen tudjuk, hogy az átlaghőmérséklet akár pár évtized alatt is több fokot képes emelkedni vagy süllyedni. 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.

Igen 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 rendellenesség, hanem éghajlatváltozás volt. Meglehet, hasonló esemény pusztíthatta ki Szibériában és Alaszkában a mamutokat. Ott ma is gyakran találnak megfagyott, de egyébként sértetlenül és egészségesen, nem éhezve elpusztult állatokat.

Földünk vízkészletének jelentős része jég állapotú. Időről-időre a Föld vízkészletének egy nagyobb része eljegesedik, ilyenkor beszélünk jégkorszakokról. Ilyenkor az óceánok vízszintje lecsökken, mert nagyon sok víz kifagy a grönlandi vagy anktartiszi szárazföldre. Az Amerikába átvándorló ember is ilyen időszakban, a tenger szintjének csökkenésével kialakult szárazföldi átjárón jutott át Ázsiából Alaszkába. Körkörös viselkedést mutatnak a jégkorszakok, ezeket legegyszerűbben a Föld forgástengelyének változásaival magyarázhatók. Ez ugyanis befolyásolja, mennyi napfényt nyelhet el a Föld felszíne.

Víz és a vegyi elemek körforgásáról. A természetben való körforgása során a tengerekből, óceánokból elpárolgó víz a fellegekbe kerül, onnan csapadékként visszajuthat 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 körforgásoknak természete. Például az óceáni áramlatok helyzete, sebessége erősen függhet a hőmérsékleti viszonyok változásaitól, kaotikus viselkedést mutathat, gondoljuk az El-Nino rendszertelen megjelenéseire. A Golf-áram fentiekben tárgyalt leállása a kritikus helyzethez közeledve szintén nagyon kis változások függvénye lehet.

6. Élet és fejlődése

Földünk felszíni viszonyainak alakításában fontos szerepe van a Föld élővilágának is. Nehéz pontosan meghatározni, mit nevezünk élőnek. Szaporodási és növekedési képességgel az élettelen is rendelkezhet. Terjed a tűz, a kristályok is növekednek. Igazából nehéz az élő és az élettelen közötti határt megvonni. Józannak tűnik az életet az anyagcsere alapján meghatározni. De vannak olyan élettelen rendszerek, amelyeket az élőkéhez hasonló anyagcserefolyamatok jellemzik és ismeretesek olyan, sokak által élőnek tekintett szervezetek, melyeknek nincs anyagcseréjük. Például a sejtélődsi (vírus) csak a gazda szervezetének segítségével tud szaporodni. De ha a sejtélődsit elszigetelt állapotában vizsgáljuk, száraz porként mutatkozik.

6.1. DNS és gének

Mindenképp az élő sajátja a magas fokú szervezethez. Hatalmas mennyiségű adat szükséges az élő meghatározásához, ennek hordozója a DNS (deoxiribonukleinsav). 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, ütemes ismétlődés, ami a kristályokat jellemzi, a DNS-ben nincsen. Egy verssor 'Hazádnak rendületlenül..' nem tartalmaz egyszerű ismétlődő sorozatokat. Hasonlóan a DNS-láncon lévő bázisok sorozata sem jellemezhető valamiféle szabállyal. Hogy milyen a DNS-láncon a bázisok sorrendje, azt nem egyszerű fizikai vagy kémiai törvények, hanem élettani jellemzők adják meg.

Fehérje, aminosav, gén. Egy sejt életét fehérjék működése és együttműködése szabályozza. Például valamennyi enzim fehérje és a hormonok nagy része is fehérjemolekula. A DNS-lánc egyrészt az életfolyamatok vezérléséhez szükséges fehérjék készítéséhez adja meg a leírást. Másrészt a DNS-lánc megszabja a folyamatok egészét is vezérli, megadja, hogy mikor éppen mely fehérjék készüljenek el és mely fehérjék termelése szűnjön meg.

20 alapvető aminosav építi fel a fehérjéket. Egy fehérje általában ötven-től tízezerig terjedő számú aminosavból áll. A DNS tárolja a fehérjét felépítő aminosavak sorrendjét, meghatározva ezzel a fehérjetermelés folyamatát, azt, hogy mikor melyik aminosav épüljön be a fehérjét alkotó láncba. Egy fehérje alakja, vegyi, villamos és egyéb tulajdonsága érzékenyen függ attól, milyen a fehérjét felépítő aminosavak sorrendje. Mivel az egyes aminosavak meghatározott módon kötődhetnek egymáshoz, ezért akár egyetlen aminosavnak egy másikra való cseréje is komoly változást idézhet elő. Ha ugyanis az adott helyen egy másik aminosav szerepel, akkor ott másféle módon csavarodhat a fehérjelánc. Emiatt más lehet a fehérje egészének alakja és változhatnak tulajdonságai. Az egyetlen fehérjét leíró DNS-szakaszt géneknek nevezzük. Fehérjegyártás közben a DNS a sejtmagban marad. A sejt többi részével való kapcsolat tartása egy másik nukleinsav, az RNS (ribonukleinsav) feladata.

Aminosavak kijelölése, a genetikai kód. Míg a számítógép kettes számrendszerben dolgozik, a DNS négyes számrendszerű, merthogy négyféle bázisa létezik, jelöléseik T, C, A, G. Kiderült, a DNS ennek a 4 bázisnak a segítségével címezi meg a 20 alapvető, fehérjét felépítő aminosavat. Ez a címező táblázat a genetikai kód. A genetikai kódban a T betű az U betű szerepel, mivel a DNS-ről leolvasott adatokat közvetítő RNS molekulában a T jelű bázisnak az U jelű bázis felel meg.

Egy aminosavat a DNS 3 egymás melletti bázisa jelöl ki. Felhasználva a fenti négy betűt, 3 egymás melletti 3 bázis $4^3 = 64$ aminosavat tudna 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. Aminosavak jelölésére a 64 bázishármas közül csak 61 szolgál, három bázishármas a gén kezdetét illetve végét jelöli ki. A Egyetemes, minden élőre azonos a genetikai kód. Ez is az élővilág közös eredetét bizonyítja.

Genom, kromoszóma. A teljes emberi DNS-lánc, amit az emberi genomnak nevezünk, 3,2 milliárd bázispárból áll kb. 2 méter hosszú. Hasonlóan beszélünk egy élőcske, a rizs vagy az egér genomjáról. Nem egyetlen hosszú láncba, hanem kromoszómákba rendeződik a DNS, melyek a DNS láncot felcsavarodott alakzatokban tartalmazzák. 23 pár kromoszómája van az embernek. Megkettőződve tartalmazzák a DNS-láncot a kromoszómák, egyik lánc az apától, másik az anyától származik.

Kérdés, minek gondolhatjuk el az egyén öröklöttségét, azaz a kromoszómáiban tárolt adatok összességét. Mondjuk mint tervraktárt foghatjuk fel. Mi valósulhat meg belőle, az már a környezettől is függ.

Mint említettük, minden génből is eleve kettő van bennünk. Csak a legegyszerűbb tulajdonságok vezethetők vissza egyetlen génre vagy egy-két gén együttműködésére. Általában jóval több gén finoman hangolt együttműködése vezet valamilyen feladat teljesítésére. Nem merev gépezet az egész, komoly hibatűréssel rendelkezik. Felfoghatjuk a DNS-t úgy is, mint éléskamrát, melyben ott vannak az alapanyagok. Vannak részletes szakácskönyvek, de minden szakács (itt a környezet) mást hoz ki belőle.

Legegyszerűbb élőcske (baktérium) génjeiről. Egy sejtélő DNS állománya néhány ezer bázisból áll, az élőcskék (baktériumok) DNS lánc néhány millió, a magasabb rendű élőlényeké több milliárd bázist tartalmaz. A legegyszerűbb ismert élőcske 517 génnel rendelkezik, ezeket pontosan feltérképezték. Ismert, hogy az élettevékenységekhez a DNS lánc nem minden egyes génje egyformán fontos, vannak olyan gének is, amelyek ugyan ott vannak a DNS-ben, de szükségtelennek véljük őket. Feltételezik, hogy ezek ténylegesen sem valók semmi olyanra, ami a fennmaradáshoz és szaporodáshoz kapcsolódna, ezért hulladék-DNS-nek tartották és nevezték el. Találomra megrongálva géneket, meg lehet mérni, hány gén játszik tényleges szerepet az élőcske életében. A vizsgálatok szerint a valóban szükséges gének száma 265-350 között van, ezek közül kb. száz gének a szerepét még nem ismerik. Nemrég közölték egy még egyszerűbb élőcske genomját, amely csupán 192 gént tartalmaz.

Bioinformatika. Az emberi genom génjeinek feltérképezését már ebben az évezredben fejezték be, az előzetes eredményeket 2001-ben tárták a nyilvánosság elé. 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 kb. ezer aminosavból, azaz háromezer bázispárból áll, egyetlen mintavétellel általában még egyetlen gényi bázissorozatot sem tudunk kiolvasni. Egy genom feltérképezésének fő nehézségét éppen a megfelelő viszonyítási pontok, mondjuk úgy, határvégek kijelölése jelentette. Egy 2 millió bázisból álló baktérium DNS lánc feltérképezéséhez legkevesebb 4000 darabra kell hasítani a láncot ($2\text{ millió}/500=4000$). Ezek után a különböző alkalmakkor leolvasott szakaszokat össze kell tudni illeszteni, hogy az egyes gének bázissorrendjét és a kromoszóma teljes génállományát fel tudjuk térképezni.

A genom feltérképezését az ezzel foglalkozó két csoport versengése gyorsította fel. Az eredeti csoportból ugyanis kivált egy kutató, aki a bázissorrend megállapításának egy gyorsabb módját fedezte fel. Módszere szerint a tanulmányozott kromoszóma DNS állományát véletlenszerűen darabokra törik, és minden alkalommal meghatározzák az egyes kis darabok bázissorrendjét. Ahelyett azonban, hogy a térképpontok kijelölésével foglalkoztak volna, a feldarabolást véletlenszerű módon kb. hússzor megismétlik, és minden alkalommal meghatározzák az egyes darabok bázissorrendjeit. Darabok érintkező határterületei így egy másik darabolás esetén egy ottani darab belsejében lehetnek. Így, egyszerre tekintve a különböző darabolások eredményeit, számítógépes összefűző programokat használva a kromoszóma teljes állománya, valamennyi génje azonosítható. A bioinformatikának nevezett tudományág éppen ilyen jellegű feladatokkal foglalkozik. Rövidebb kromoszómák esetén a bioinformatika gyorsan célhoz ér, de hosszabb kromoszómák esetén a feladat egyre nehezebb.

Élőlények genomjainak összevetése. Még pár éve azt tételezték fel, hogy az ember és általában a fejlettebb élőlények összetettebb életműködései egyszerűen több gén, azaz többféle fehérje működésének tulajdonítható. Ez a feltevés ma már nem tartható. Ugyanis az embernek nincs sokkal több génje, mint a fonálférgeknek. Egyik nagyon alaposan tanulmányozott fonálféregnek kevesebb mint száz sejtje és 19000 génje van, ami nem sokkal kevesebb, mint az ember 24000 génje. Továbbá ezek között sok közös vagy nagyon hasonló gén található. Ez arra utal, hogy a genom nem egyszerűen a gének egymásmellettségét jelenti. Miközben a gének hasonlóak vagy ugyanazok, az egyik állomány a bélférget, a másik az embert építi fel, működteti. Mint ahogy ugyanolyan építőkövekből lehet disznóolat és palotát is építeni.

Csupán az emberi genom 1,2-1,4%-a kódol fehérjét, ennyi felel meg a géneknek. Valószínű a többi rész, amit eddig csupán hulladéknak tartottak rendezni, szervezi a gének működését. Minél magasabbrendű az

élőlény, annál kisebb helyet foglalnak el a genomban a gének és annál többet a géneket bekapcsoló, kikapcsoló, szervező egységek. Tehát a genom nem a gének egyszerű összessége. Például a DNS-nek ugyanaz a szakasza a szervezet fejlődésének különböző szakaszaiban különböző géneket kódolhat. Magasabban fejlett lényeknek nincs sokkal több génjük, hanem a géneik bekapcsolásának, működésének összehangolása a különböző. Mindez, a különböző bekapcsolási, vezérlési rendszerek erősen függhetnek a környezeti hatásoktól. Ezért az élőlényt nem lehet egyszerűen az egyes gének túlélőgépeinek tekinteni.

Élőt jellemző adathalmaz forrása. Idővel a szétszórtság növekszik, ahogy ezt a hőtan második főtétele, az entrópia növekedésének törvénye megfogalmazza. Zárt rendszer rendje az idővel a felbomlás felé halad, egészen addig, amíg minden a legnagyobb mértékben szét nem esik, szóródik benne. Ezért joggal kérdezhajjuk, végül is honnan származnak a szervezett rendszerek, az élőlények és általában a Világegyetem hordozta adathalmaz? Magától adathalmaz nem jön létre, a természettan tételei szerint keletkezéséhez munka szükséges. A 2,726 Kelvinés kozmikus háttérsugárzás mért szinképe nagyon egyenletes. Ez arról tanúskodik, hogy a sugárzásnak az anyagtól való elválásakor, - ez, mint már említettük az ősrobbanás után 380000 évvel történt - a Mindenség a hőegyensúly állapotában volt. Ilyen állapotban a szétszórtság a lehető legnagyobb, vagy ami ugyanazt jelenti, az állapotot jellemző adathalmaz a lehető legkisebb. Hőtanegyensúly esetén a Mindenség állapotának leírásához csupán két szám, - a hőmérséklet és a sűrűség értéke - szükséges.

Miközben az ősrobbanást követő 380000 évvel a világegyetem adattartalma elenyészően csekély, a mai világegyetem viszont nincs hőegyensúlyban. Állapotának jellemzésére roppant sok adat kell, gondoljunk csupán a földi élet leírásához szükséges adathalmaz mennyiségére. Honnan a munka, ami az adatokat hordozó rendszerek kialakulásához kellett? A szükséges energia az egyensúlyi állapotot megszüntető tömegvonzási folyamatok során szabadult fel. Ugyanis anyag csomósodásakor a tömegvonzásnak megfelelő helyzeti energia egyre csökken és a felszabaduló energiák, mint a csillagok kisugározta energia szolgál az adathalmaz forrásául.

Bár az űrbeli háttérsugárzás szinképe hőegyensúlyra utal, a tömegvonzás miatt nem beszélhetünk igazi egyensúlyról, a korai mindenség entrópiája ezért nem a lehető legnagyobb, hanem igen alacsony entrópiájú állapot volt. Azaz az egyenletesen eloszló, szerkezet nélküli, ám a tömegvonzás hatása alatt álló gáztömeg lappangó módon hatalmas mennyiségű adathalmaz hordozója. Ahogy a rendszer a csomósodás közepette fejlődik és távolodunk az egyensúly állapotától, úgy a lappangó adathalmaz átkerül az anyagba és egy része mint az élővilágot leíró adathalmaz rögződik.

Bár az élet vegyi folyamatok összességének tűnik, vannak olyan vélemények, hogy az élet lényegét nem a vegyi folyamatok részletes tanulmányozásában, hanem az adathalmazra vonatkozó jellemzőkben kellene keresni, mivel az élőlény egy nagyon összetett, adatokat feldolgozó rendszer. Központi kérdés, hogyan keletkezik a DNS örökítő anyagában hordozott adathalmaz. A választ a véletlen másulat (mutáció) és a természetes kiválasztódás folyamatának tanulmányozása adja meg. A DNS csak azon másulatai maradhatnak meg, amelyeket a természetes kiválasztás úgymond visszaigazol, utalván arra, hogy a keletkezett változat életképes. Az adatokat a környezet a természetes kiválasztódás közvetítésével írja be a DNS-be.

De az adathalmaz rögzítésében oly fontos másulatok, mint zajszerű képződmények, zavarják az adatok átvitelét, azok elvesztését is eredményezhetik. Minél összetettebb a DNS, az adathalmaz annál védettebb, vagyis a biztos adatátvitel nagyobb fokú összetettséget, azaz minél több adat átvitelét követeli meg. Emiatt nem világos, hogyan jöhettek létre az első élőlények, amelyek örökítő állománya nyilván jóval kevesebb adatot tartalmazott, ezért örökítő anyaguk továbbadását a másulatok okozta zaj igen erősen zavarhatta. Ez az ellentmondás egyike annak a számos ellentmondásnak, amelyek az első élőlény kialakulásának leírásait jellemzik.

6.2. Élet keletkezéséről

Számos elképzelés van arról, mint keletkezhetett az élet. Ezek a kialakulás körülményeiben, természeti feltételeiben is eltérnek egymástól.

Darwin az élet keletkezésének helyéül szerves vegyületekben gazdag, meleg vizű tavacsákat tételezett fel. Ahogy telt az idő, a vegyületek egyre bonyolultabbakká váltak, összekapcsolódtak, maguk a vegyi folyamatok is egyre összetettebbé váltak és kezdetleges, de már élőnek tekinthető szervezetként kezdtek viselkedni. Darwin fenti elképzelése majdnem száz éven át meghatározta az élet keletkezéséről alkotott elképzeléseket. Tó helyett az élet születésének helyéül a tengert tételezték fel és megkísérelték megérteni, milyen lépések során jöhettek létre az élet építőkövei. Meleg vizű, ásványokban gazdag tavakban ténylegesen megvizsgálták, helytálló lehet-e a darwini feltételezés. Határozott nem a válasz, az élethez szükséges molekulák alkotórészei sokkal inkább a vízben lévő agyagszemcsékhez kötődnek, ahelyett, hogy egymással vegyülnének.

1953-ban sikerült olyan kísérletet elvégezni, melynek eredményét sokáig perdöntőnek fogadták el. Miller egy üvegedényben olyan körülményeket hozott létre, amelyek az akkori elképzelések szerint elgondolt ősi földi környezetet jellemezte. Tengernek az üvegedényben lévő víz, ősi légkörnek metán, ammónia és hidrogén keveréke felelt meg. Szikrakisüléseket keltve az üvegben villámlások hatását utánozták. Egy hét után Miller az üvegedényben szerves vegyületek sokaságát azonosította, közöttük nagy mennyiségű aminosav is volt. Mivel ez utóbbiak a sejt fehérjéinek építőkövei, az élet rejtélyét sokan megoldottnak kezelték. Mára a fenti elképzelés kétséssé vált. Újabb adatok szerint a korai légkörben nem volt jelentősebb mennyiségű metán, ammónia vagy hidrogén. Továbbá, bár Millernek sikerült fehérjék építőköveit előállítani, sok kutató azt tételezi fel, hogy a fehérjegyártást vezénylő RNS molekula a fehérjék keletkezése előtt jött létre.

Egyre régebbi kövületek vizsgálata arra utal, hogy az élet nem valamely kellemes, langyos vizű tengerben, hanem inkább nagynyomású fazékhoz hasonló környezetben jöhetett létre. Mint az óceánok mélyén feltörő hőforrások környezete. Itt a keletkezést jellemző vegyi folyamatok meglehetősen gyorsak lehetnek. Ugyanis bőséggel rendelkezésre állhatnak a megfelelő szerves vegyületek, és a hőtani feltételek is jóval kedvezőbbek.

Lehetséges, hogy az élő anyag alkotórészeinek nagyobb hányada a világmindenségből került bolygónkra. Sőt, az sem kizárt, maga az élet is a világűrűből érkezett Földünkre. A csillagközi tér anyaga, amely gázból és porból áll, a Tejútrendszer tömegének kb. 10%-át teszi ki. Ez a csillagközi anyag van ahol összesűrűsödik, van ahol ritkább. Új csillagok összesűrűsödött csillagközi anyagfelhőkből keletkeznek. Elsősorban gáz a csillagközi anyag, kb. egy százaléka por, a hőmérséklete 10-20 Kelvin. Főleg hidrogénmolekulákból áll a gáz, de van benne még széndioxid, metán, ammónia is. A porszemcsék szénből, vasból, szilikátokból valamint a különálló vagy a rajtuk lévő jégből tevődnek össze.

Nemrég közöltek olyan munkát, amelyik a világűri térség Miller kísérletének nevezhető. Laboratóriumi körülmények között az űrbélit utánzó anyagfelhőt ibolyántúli fényvel világították meg és tanulmányozták a keletkezett új vegyületeket. Olyan jóval összetettebb molekulák keletkeznek, amelyek azután egymással összekapcsolódva önszervező folyamatok szereplőivé válnak. Számos, az élő szervezetek vázához szükséges vegyületlánc alakul ki. Ezek alkotják a meteoritokban felfedezett szerves vegyületeket, továbbá az üstökösök részeként betérítik a naprendszerek bolygóit. Így a lehűlt bolygók felszínére nagy mennyiségű szerves anyag juthat, melyek jelenléte felgyorsíthatja az élet kialakulása felé vezető folyamatokat.

Geomikrobiológia. A geomikrobiológia, a mélyen a felszín alatt élő szervezeteket kutató tudományág gyakorlatilag az utóbbi három évtizedben született meg. Egészen máig azt hittük, hogy a felszín gazdag élővilága alatt ott vannak a talajban élő szervezetek, de a talajban bizonyos mélységektől kezdve, vagy főleg ha a kőzetekre gondolunk, már nem élhet meg semmi. Ez nem így van, több kilométer mélyen a kőzetekben is találtak élő szervezeteket. Élet számára egyetlen igazi korlátnak a lefelé növekvő hőmérséklet tűnik. Eddigi csúcst a kb. 5 km mélyen, 113 C⁰-on élő szervezetek adják, van viszont már bizonyíték 169 C⁰ hőmérsékleten élő paránylányekre is.

A mélyben létező, más élőktől évmilliók óta elzárt szervezetek életmódját az anyagcsere különleges változatai és a nagyon lassú szaporodás jellemzi. Anyagcseréjükhez szerves vegyi folyamatok energiáját használják fel. Különböző hőmérsékleteken más-más vegyi folyamat ajánlkozhat energia nyeresre és a különféle paránylények ezeket használják fel táplálékkul. Vannak olyan paránylények, amelyek fémionok másféle vegyi állapotba vitelével jutnak energiához. Átalakíthatják a belső vulkánosság során felszabaduló vegyületeket és így geokémiai változásokat okoznak. Egyes becslések szerint a mélyeségi élet által termelt élő anyag mennyisége 0,1%-a a felszíni élővilág által termelt élő anyagnak, de az is lehet, hogy összemérhető vele.

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

Élet terjedése a világűrben. Kőzetekben élő szervezetek bármely bolygón, ahol van vulkanikus tevékenység, megélhetnek. Mivel ilyen bolygók szerte a Mindenségben gyakran előfordulhatnak, a Mindenség akár hemzseghet az ilyen szintű élettől. Felszínen kialakuló, fénymegkötésre (fotoszintézisre) épülő élet már jóval ritkább lehet, mivel ennek megjelenéséhez és megmaradásához számos feltétel teljesülése szükséges. Értelmes élet pedig csak hosszabb törzsfajlódási folyamat során alakulhat ki, ami megköveteli, hogy a kedvező feltételek egész hosszú időn keresztül fennálljanak. Ezért az értelmes élet megjelenésének esélye csekély.

Kőzetekben élő parányi lények átkerülhetnek, át is kerülhetnek egyik bolygóról a másikra. Felszínre becsapódó meteorit kőzetdarabokat robbanthat ki és ezek a bolygó vonzásából kiszabadulva más bolygók felszínére juthatnak. Így bolygók folyamatos kölcsönhatásban állnak egymással és viszonylag védett környezetben, nagyobb meteoritkövek belsejében utazó betokozódott parányi lények a teljes Naprendszerben elterjedhettek. Egy marsi kődarab nagyon kedvező pályaadatok mellett akár száz éven belül átjuthat a Földre, az ide becsapódó marsi kődarab átlagosan kb. tízmillió évet repül a világűrben. A belső bolygók kőzeteiben lévő parányi lények hasonló módon eljuthatnak a Naprendszer külső tartományaiban lévő égitestek, például a Jupiter holdjainak felszínére is.

Üstökösök közvetítésével akár naprendszerek között is közlekedhetnek életet hordozó kőzetdarabkák. 3,8 milliárd éve, amikor a Föld és a Mars felszíni viszonyai hasonlóak voltak, a parányi lények átkerülhettek egyik bolygóról a másikra és ott elterjedhettek. Így ha a Marson Föld-féle élet maradványait fedeznék fel, egyesek szerint nem okozna különösebb meglepetést, mivel ilyen életnek a Marson valaha léteznie kellett. Ezért csak az ismerttől eltérőnek mondható életfajta utalhatna biztonsággal a földitől független élet létezésére.

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

6.3. Törzsfajlódás nagy lépései

A darwini evolúciós elmélet alapvető eleme a természetes kiválasztódás. Ez arra vonatkozik, hogy a természetben azok az egyedek, amelyek a legjobb túlélési és szaporodási képességekkel rendelkeznek, tulajdonságaikat utódaikra is átörökítik. Ezzel az élőlény számára hasznos tulajdonságok elterjedtté válnak.

Elképzelhetetlenül összetettek az élő szervezetek. Nehéz lenne elhinni, hogy a természetes kiválasztódás elve egyedül meg tudná magyarázni az élők bonyolultságát. Ma már a DNS felfedezése és a genomra

vonatkozó ismereteink lehetővé teszik, hogy az összetettebb szervezetek megjelenésére vonatkozó feltételezéseket ezen a nyelven kíséreljük meg megfogalmazni. Most Szathmáry Eörs és John Maynard Smith: A földi élet regénye című könyve nyomán egy ilyen fejlődéstörténetet vázolunk. Szerintük az élet megjelenése és fejlődése nyolc igen jelentős változásra, nagy lépésre vezethető vissza.

Első lépés: kettőződő molekuláktól a csoportosuló molekuláig. Elsőként az önmagukat megkettőzni, azaz önmagukról másolatot készíteni képes molekulák rendelkeztek a sokszorozódás, a sokféleség és az öröklődés tulajdonságaival. Ezek a molekulák ugyan képesek voltak sokszorozódni, ám nem hordoztak arra utasításokat, miként épüljenek fel más alakzatok. Ahhoz, hogy előrelépés történjen, arra volt szükség, hogy a különböző, másolni képes molekulák hálózatba kapcsolódva együttműködjenek egymással. Arra vonatkozik az együttműködés, hogy segítik egymás sokszorozódását.

Második lépés: génektől a kromoszómáig. Ma élő szervezetekben az önmagukat kettőzni képes molekulák - a gének - végeikkel egymáshoz kapcsolódva kromoszómába, összetettebb rendszerek esetén kromoszómákba rendeződnek. Ez arra vezet, hogy a gének nem egyenként, hanem a többivel együtt kettőződnek meg. Ez az összehangolt kettőződés kiküszöböli az egy csoportba tartozó gének közötti versengést és együttműködésre kényszeríti őket.

Harmadik lépés: RNS-világtól a DNS és a fehérjék világáig. Ma munkamegosztás figyelhető meg a kétféle molekulatípus között: a DNS és az RNS az adattárolással és továbbítással foglalkoznak miközben a fehérjék a sejt működését vezérlik és szerepük van a szervezet felépítésében is. Egyre biztosabban tudjuk, hogy korábban nem létezett ilyen feladatmegosztás, hanem mindkét tennivalót RNS-molekulák végezték. Ahhoz, hogy az RNS-világot a DNS és a fehérjék világa váltsa fel, meg kellett jelennie a genetikai kódnak, amelyben a bázishármasok határozzák meg a fehérjék szerkezetét.

Negyedik lépés: sejtmag nélkülektől az eukariótáig. Két fő csoportba sorolhatók a sejtek. A már korábban ismertett baktériumok és archaeák az első csoportba tartoznak, ezeket prokariótáknak nevezzük. Merev a sejtfaluk, nincs sejtmagjuk és rendszerint egyetlen kör alakú kromoszómával rendelkeznek. Az eukarióták közé a sejtmaggal rendelkező élőlények tartoznak. Sejtmagjukban pálcika alakú kromoszómák vannak és a sejt egyéb sejt szervecskéket is tartalmaz.

Ötödik lépés: sejtosztódástól az ivaros szaporodásig. Míg a prokarióták és az eukarióták egy része csak a sejtek kettéosztódásával képesek szaporodni, az eukarióták többségében megjelenik az ivaros szaporodás. Ez azt jelenti, hogy a különböző egyedek által termelt ivarsejtek összeolvadásával keletkezik új egyed.

Hatodik lépés: egysejtűektől a soksejtűekig. A gombák, növények és állatok szervezetét sokféle sejt építi fel. Ezek az egyedek nem egyetlen példányban tartalmazzák az öröklődésre vonatkozó adatokat, hanem sok millióban. Egyes sejtek a DNS-ből csak a rájuk vonatkozó utasításokat részeket használják fel. Hogyan válnak különbözővé az azonos DNS-t tartalmazó sejtek, miként rendeződnek szervezetté?

Hetedik lépés: magányos egyedek - kolóniák. Egyes állatok, mint a hangyák, méhek, darazsak és termeszek olyan telepekben élnek, amelyekben csak néhány egyed szaporodik. Többsejtű szervezethez hasonlíthatjuk őket, melyben a terméketlen dolgozók az testi sejteknek, a szaporodó egyedek pedig az ivarsejteket létrehozó sejteknek felelnek meg. Kérdés, hogyan alakulhattak ki ezeket az egyedeket magasabbrendű szervezetbe betagoló rendszerek.

Nyolcadik lépés: főemlős társadalmak - emberi társadalmak. A majom és az emberi társadalmak közötti átmenet döntő lépése a nyelvkészség megjelenése lehetett. Már korábban, a 6.1. részben tárgyaltuk az emberi nyelv és a genetikai kód közötti hasonlóságot. Ez a két módszer nagyszerű öröklődési rendszert tesz lehetővé.

E nyolc nagy lépés közül kettő kivételével az összes egyedi esemény volt és egyetlen leszármazási vonalra vezethető vissza. Két kivétel a többsejtűség, amely a törzsfejlődés során háromszor, valamint a terméketlen kasztokkal rendelkező kolóniák, amelyek többször is megjelentek. Érdekes, hogy a hat nagy átmenet - az élet keletkezésével együtt, amit szintén események egyedi láncolatának tarthatunk - egyetlenegyszer játszódott le. Ha csak egy is elmaradt volna, most nem léteznénk és semmiféle, ránk kicsit is hasonló élő sem létezhetne.

6.4. Élet megjelenése és fejlődése a Földön

Földünk létezésének első ötszáz millió évét kozmikus csapások jellemezték. Ezek minden korábbi fejlődés eredményét semmissé tették. Rögtön a 3,8 milliárd évvel bekövetkezett utolsó nagy becsapódás után a földrészek és az óceán érintkezési pontjain, a partvidékeken már megjelent az élet. Van olyan feltételezés, hogy a korábban a Földből kiszakadt és az ide később visszatérő kődarabokban betokosodott paránylények 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 baktérium kövületét találták meg. Ezek a világon ma is mindenütt fellelhető kék-zöld algák közeli rokonainak tekinthetők, azok maradványainak feleltethetők meg.

A felszíni élővilág egyik első képviselői még a főleg kénrel táplálkozó és máig fennmaradt bíbor baktériumok lehettek, amelyek még oxigén nélküli légkörben éltek. Ahogy azonban az ilyen típusú baktériumok a táplálékforrások közelében felszaporodtak, az efféle táplálékok ritkábbá váltak. Ez behatárolta a vegyületek energiáit felhasználó baktériumok életlehetőségeit. Azok a felszíni szervezetek válhattak inkább sikeresebbé, amelyek, a Napból merítve az ehhez szükséges energiát, maguk készítettek maguknak táplálékot. Ilyen szervezetek a fentebb említett kék-zöld algák, másnéven kémoszatok. Megkötve a napfényt, a vízből kivonják a hidrogént, miközben oxigén szabadul fel. Mindenütt megjelentek ahol volt víz. Ezek voltak a legfejlettebb élőlények, uralták a Földet. Ami oxigént termeltek, azt egy ideig a kőzetképződési folyamatok azonnal megkötötték. Mintegy kétmilliárd éve következett be az élővilág fejlődésének és légkört kialakító szerepének meghatározó pontja. Ekkorra annyira felszaporodott az oxigén, elérve a jelenlegi érték egy százalékát, hogy ezt a kémoszatok már nem tudták elviselni, oxigénmérgezés szenvedtek. Elvesztették életterüket, kénytelenek voltak oxigénmentes helyekre, a tavak, mocsarak, tengerek iszapjába húzódní, ahol máig is élnek.

A légköri oxigén felszaporodásának további következménye a felsőbb légkörben kialakult ózonréteg megjelenése volt. Az ózonréteg kiszűri a Nap ibolyántúli sugárzását, lásd a 2. ábrát, kialakult az ózonpajzs. Ez lehetővé tette az addigiaktól 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, a térfogatuk a baktériumokénak átlagosan tízezerszerese. Egyre összetettebbre szerveződtek az egysejtűek, lassan elérték a maiakhoz hasonló fejlettségi szintet. Egysejtű lények együttélése, munkamegosztása odáig fejlődött, hogy 900 millió évvel ezelőtt megjelentek a soksejtűek legegyszerűbb típusai. Ilyen lények például a szivacsok.

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 viágtengerek jó részét is jég borította. 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 egyszerre nagyon sokféle állat jelent meg,

mert az akkortól megjelenő mézspáncél, a csontok nagyszerű lehetőségeket biztosítottak a fejlődésre. Ezeknek megkövesedett maradványainak segítségével 540 millió évvel ezelőtől máig millió éves pontossággal tudjuk követni az élővilág fejlődését. Az 540 millió évtől 245 millió ezelőtti korban, a paleotikumban jelentek meg a halak, kétéltűek, 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 szervezeti fok elérésére képes emlősök életteréhez jussanak.

6.5. Az ember megjelenése

Még nem teljesen ismert a főemlősök törzsfája. Genetikai távolságok vizsgálatából az adódott, hogy az emberhez vezető ágtól a gorilla kb. 7-9, a csimpánz kb. 6-7 millió éve vált el. Legközelebbi élő állati rokonunk a csimpánz, a génjeink különbsége, a bázisokban való különbséget nézve kb 1%, azaz génjeink 99%-ban azonos alakúak. Még csak részben ismert, milyen események történtek a csimpánzoktól való elválás után. 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. Nemrég találtak Dél-Afrikában kb. 90 ezer éves barlangrajzokat, amelyek kidolgozottságukban magas szintű, elvont gondolkodásra is utalnak. Például elődeink mértani idomokat is rajzoltak. Afrikából 55-60 ezer évvel ezelőtt indulhatott el a széttelepülés. Arábián, Ázsián, a Maláj-félszigetet érintve az ember 45 ezer évvel ezelőtt jutott el Ausztráliába, évenként kb. 1 kilométert haladva. Afrikából szárazföldi úton úgy 40 ezer éve jutott el a mai ember Európába.

Emberelődeink már százezer évekkkel ezelőtt használhatták a tüzet. Arról, hogy mióta visel az ember öltözetet, mostanában adhatunk becsléseket. Az emberi tetvek, a fejtetű és a ruhatetű igen közeli rokonok. Mivel a kínálkozó életteret az újonnan megjelenő fajok igyekeznek minél gyorsabban kihasználni, a közös tetűs kétféle tetűvé fejlődése arra az időre tehető, amint az ember ruhát kezdett hordani. Genetikai kormeghatározás szerint ez hatvanezer évvel ezelőtt történhetett. A ruházatot viselő ember már hidegebb éghajlaton is megélhetett.

Neandervölgyi ember. A neandervölgyi ember, amelyen agymérete a mi agyméreteinket is meghaladta, kb. 230000 éve jelent meg Euráziában és 29000 éve tűnt el. Tőlünk külön fajt képeztek és az eddig végzett genetikai vizsgálatok szerint nem olvadtak velünk össze. Ma is folynak az ezzel kapcsolatos vizsgálatok, szinte minden évben újabb érdekes felismerés születik.

Egyre valószínűbb, hogy őseink okozták vesztüket. Hiszen ugyanazokon a területeken, ugyanazokban a barlangokban éltek, ugyanazokra az állatokra vadásztak. 40000 évvel ezelőtt 6 fokkal csökkent az átlaghőmérséklet. Ehhez a mai ember jobban tudott alkalmazkodni. Melegen öltözött, jobban értett a tűzrakáshoz. Most közzétett adatok szerint őseink és a neandervölgyi csak rövid időket, ezer évet éltek azonos földrajzi területen, egymás közvetlen közelében. Utána a neandervölgyi eltűnt a körzetből.

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