

Univerzum

1. A világegyetem működése

1.1 Egy kis történeti áttekintés

- XIX. század vége: fizikusok közel érzik magukat a világ teljes leírásához
 - Az akkori elképzelés szerint a teret (űrt) egy „éter”-nek nevezett közeg tölti ki → fénysugarakat és rádióhullámokat ezen éter hullámzásainak tartották
- XIX. század vége: ellentmondások az éterrel kapcsolatban
 - Elmélet: fény az éterhez képest állandó sebességgel halad → Várt eredmény: ha szemben haladunk a fényvel, gyorsabbnak érezzük, mintha vele egy irányban
 - *Kísérletek*: fény sebessége mindig állandónak tűnt a megfigyelőhöz képest, függetlenül attól, hogy az milyen gyorsan és milyen irányban mozgott (1887 Michelson-Morley, Cleveland, USA)
- 1905: Einstein¹: éter fogalmát elveti, alapfeltevés: tudomány törvényszerűségeinek minden szabadon mozgó megfigyelő számára ugyanolyannak kell látszania (így fény sebessége minden irányból azonos) → univerzális idő elvetése → órák mozgó rendszerekben máshogyan járnak (*kísérlet: két repülőgép fedélzeten egy-egy atomórával ellentétes irányban kerüli meg a Földet → óráik között (minimális) eltérés*) → **Speciális relativitáselmélet**: csak a relatív, viszonylagos mozgás a fontos. Nincsen abszolút, csak relatív idő → ez az elmélet kényelmetlen, fizikusok nagy része, még a húszas, harmincas években sem fogadta el, mára már elfogadott, sok megfigyelés igazolja az elmélet előrejelzéseit
 - Relativitáselmélet következménye: fény sebességénél semmi sem haladhat gyorsabban, ha valamit mégis fel szeretnénk gyorsítani, tömege megnő, ezért nehezebb lesz gyorsítani. Elemi részecske fénysebességre gyorsításához is végtelen energia kell → **Energia és tömeg közötti kapcsolat**: $E = m \cdot c^2$ (következményre példa: urán atommag felhasítása két olyan atommagra, aminek együttes tömege kisebb az urán atommag tömegénél → hatalmas energia szabadul föl. Alkalmazás: láncreakció: atombomba).
 - Relativitáselmélet jól illeszkedik az elektromosságot és mágnesességet leíró törvényekhez, de Newton gravitációs törvényeihez nem:
 - hiszen ha egy anyagtömeget elhelyezünk valahol, akkor gravitációs hatása ugyanabban a pillanatban a Világegyetemben bárhol érzékelhetővé válik
 - végtelen sebességű információáramlás ↔ relativitáselmélet: semmi sem haladhat a féynél gyorsabban
 - abszolút, univerzális idő (mert pillanatszerű változás csak ebben értelmezhető) ↔ relativitáselmélet: nincsen abszolút, csak relatív idő
- 1915: Einstein: **Általános relativitáselmélet**: A tömeg és az energia meggörbíti a téridőt (ld. 1.2.1 A téridő és a gravitáció) → a különféle tárgyak a téridőben egyenes vonalak mentén próbálnak meg mozogni, de mivel maga a tér görbült úgy érzékeljük, hogy a gravitációs térben elgörbül a pályájuk → egyenletekkel leírható ez a görbület a tömeg és/vagy energia fv.-ben
 - Általános relativitáselmélet egyenleteinek nincs olyan megoldása, amely statikus Világegyetemet feltételez (mert Világegyetem tele van anyaggal, ami meggörbíti a téridő szerkezetét és emiatt a testek egymás felé akarnak esni) → **változó Világegyetem**² (ld. 1.4 A Világegyetem kialakulása és 1.5 A Világegyetem vége fejezetek)
- Összefoglalás: Relativitáselmélet: nagy méretekre – Kvantummechanika: atomi méretekre
- A feladat a kettő összeegyeztetése egy közös elméletbe (ld. 1.2.4 A mindenség elmélete).

- Vörösén izzó testek sugárzását klasszikus fizikai törvényekkel nem tudják megmagyarázni
- 1900: Planck³: Magyarázat: **Kvantumelmélet**: Fény csak diszkrét, kvantumoknak nevezett energiacsomag formájában sugározható ki, vagy nyelhető el.
- 1920: Heisenberg-Dirac-Schrödinger: **Kvantummechanika** alapjai.
- 1926: Heisenberg⁴: **Határozatlansági-elv**: Parányi részecskének nincsen pontosan meghatározható helye és sebessége – a kettő egy adott bizonytalansággal (Planck-állandó) határozható meg. Minél pontosabban határozzuk meg a helyüket, annál pontatlanabban ismerjük a sebességüket és fordítva (*magyarázat: részecskét meg kell világítani a jellemzők méréséhez, a mérés azonban nem lehet pontosabb, mint a fény hullámhegyeinek távolsága, ezért rövid hullámhosszú fényt kell alkalmazni. A fény mennyisége azonban Planck kvantumelmélete miatt nem lehet akármilyen kicsiny; legalább egy fénykvantumot fel kell használni, ez a kvantum azonban megzavarja a részecske pályáját és sebességét egy előre meg nem jósolható módon, annál nagyobb mértékben minél nagyobb a fény frekvenciája (azaz minél kisebb a fény hullámhossza)*) → fizikai jelenségek, véletlenszerű, határozatlan jellege → nagyobb, makroszkopiai méretekben statisztikusan kijönnek a klasszikus fizikai törvényei
- Plank elmélete szerint a fény úgy viselkedik, mintha részecskékből állna, Heisenberg határozatlansági elve szerint pedig bizonyos szempontból hullámokként viselkednek: valamilyen valószínűség-eloszlással szétkenődnek a térben → **Hullám-részecske kettőség**: időnként hullámként, időnként részecskéként írjuk le a fényt.

¹ Albert Einstein (1879-1955): amerikai elméleti fizikus. Ő fejlesztette ki a relativitáselméletet és nagymértékben hozzájárult a kvantummechanika, a statisztikus mechanika és a kozmológia fejlődéséhez. 1921-ben a fizikai Nobel-díjat egy kisebb munkájáért, a fényelektromos jelenségért kapta és nem a relativitáselméletéért, mert abban az időben még idegenkedett a szakma tőle és még kísérletek sem támasztották alá.

² Einstein nem akarta elhinni a változó Világegyetemet, ehelyett bevezetett egy „kozmológiai állandót”, amivel úgy toldozgatja-foldozgatja az egyenleteit, hogy változatlan (statikus) Világegyetemet adjanak ki. Amikor a megfigyelések (először 1920-as években, az amerikai Wilson-hegyi távcsővel) kimutatták, hogy a Világegyetem tágul, Einstein élete legnagyobb tévedésének nevezte a kozmológiai állandó bevezetését. A sors fintora, hogy a változó Világegyetem ellenére úgy tűnik, hogy mégis van egyfajta kozmológiai állandó, igaz, mértéke kisebb, mint Einstein eredetileg hitte.

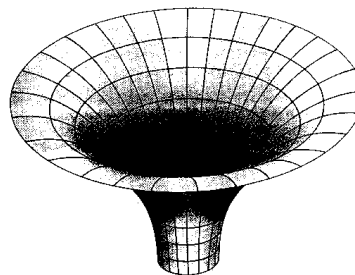
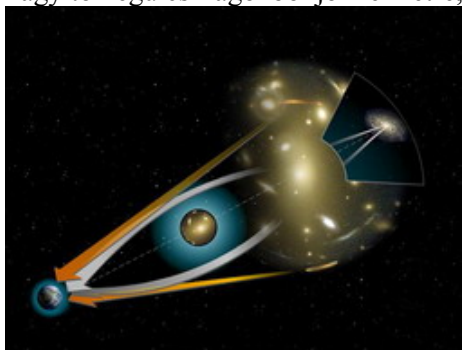
³ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1957): Nobel-díjas német fizikus, a kvantummechanika megalapítója.

⁴ Werner Karl Heisenberg (1901-1976): Nobel-díjas német fizikus, Planck után, a kvantummechanika egyik megalapítója.

1.2 Alapvető fizikai törvények

1.2.1 A téridő és a gravitáció

Az általános relativitáselmélet egyesíti egymással a tér 3 és az idő 1 dimenzióját és létrehozza ezáltal az ún. **téridőt**. Az elmélet a gravitációt is tartalmazza: a tömeg és energia eloszlása a Világegyetemben meggörbíti, torzítja a téridőt, ezért az nem sík (*Szemléltető példa: 2D-ben: golyó körül besüpped a gumilepedő, 3D-ben: gömb környékén összebb szorul a hasábpalást*). A testek egyenesen próbálnak mozogni, ám ez a görbült téridőben egy ívnek felel meg (*pl. űrhajó kering egy bolygó körül*). Nagyobb tömegű testek képesek magának a fénynek is az eltérítésére, meggörbítésére az ún. **gravitációs lencse** jelenség során. A **fekete lyuk** egy kiterjedés nélküli pont, egy **szingularitás**, ami azonban hatalmas tömeggel rendelkezik: olyan nagy mértékben meggörbíti maga körül a téridőt, hogy létrejön a környékén egy gravitációs kút (ld. ábra), amiből még a fény sem képes elszabadulni⁵; innen származik a fekete lyuk elnevezés. A szingularitásban megszűnik az idő fogalma, az időnek vége van (vagy kezdete, mint az Ősrobbanás esetében, ahol az Univerzum egy kiterjedés nélküli szingularitásból alakult ki ld. 1.4 A Világegyetem kialakulása fejezet). Mivel a fekete lyuk láthatatlan, ezért csak a környezetére gyakorolt gravitációs hatásából következtethetünk jelenlétére (*pl. körülötte keringő csillagok pályájából vagy gravitációs lencse hatásából*). A fekete lyukak tipikusan összeomló nagy tömegű csillagokból jönnek létre, kialakulásukat a 2.2.2 A csillagok életútja c. fejezet tárgyalja.



Gravitációs lencsehatás működési elve és példája: az elliptikus galaxis a mögötte lévő galaxis képét egy gyűrűre képezi le. A fekete lyuk környékén meggörbült téridő

1.2.2 Termodinamikai tétel (Termodinamikai idő irány)

- A rendezetlenség az idővel nő.

Példák:

- gázok adott térrészből kieresztve egy nagyobb térrészre
- magára hagyom a házat, szobát: idővel rendezetlenség jelenik meg (piszok, dolgok tönkremennek...stb.)
- a tanulás ellenpélda lenne, hiszen ekkor információt rendezek, de a tanulás miatt általam elégetett hő sokkal-sokkal nagyobb rendezetlenséget ad (rendezett anyag: táplálék → rendezetlenség: energia)

1.2.3 Erők áttekintése

Virtuális részecskék (*pl. gravitáció esetében gravitron*) cserélődése hozza létre.

4 féle erő van:

➤ Gravitáció

- leggyengébb erő a 4 közül
- hatalmas távolságokon keresztül működik és mindig vonzó jellegű → emiatt két nagy test (*pl.: Nap és Föld*) egyedi részecskéi közötti igen gyenge erők összegződnek → tekintélyes erők jöhetnek létre

➤ Elektromágneses erő

- elektromosan töltött részecskékkel (*pl. elektronokkal és kvarkokkal*) lép kölcsönhatásba
- sokkal erősebb a gravitációnál: két elektron között 10^{47} -szer akkora az elektromágneses erő, mint a gravitáció!
- két azonos töltés között taszító, két ellentétes töltés között vonzóerő jön létre → nagyméretű testek esetében (*pl.: Nap és Föld*) ez általában kiejti egymást, az atomok és molekulák méretében azonban domináns erő

➤ Gyenge magerő

- radioaktivitást is ez okozza

➤ Erős magerő

- ezek tartják össze a kvarkokat a protonokban és neutronokban, valamint a neutronokat és a protonokat az atommagokban

GUT – Nagy egyesített elmélet: A gravitáció kivételével az összes erő egyesítése. Kicsit túlzó a név, mert esetlegesen felvett paramétereket alkalmaznak, hogy a megfigyelések eredményeivel egyezzen az elmélet. Az elmélet alapvető elképzelése: igen-igen nagy energián (ez a nagy egyesítési energia) mindhárom erő ugyanakkora lesz, így felfoghatók ugyanannak az erőnek a különféle megnyilvánulásaként (ennek közvetlen észleléséhez akkora energia kéne, amit csak egy Naprendszer méretű részecskegyorsító tudna szolgáltatni, így jelenleg csak kis energiájú következmények vizsgálata van előirányozva).

⁵ Bármennyire is furán hangzik, a fekete lyukak sem örök életűek, hiába nyelnek el mindent. Nagyon lassan képesek elpárologni. Ennek az elmagyarázása azonban kívül esik az előadás vizsgálgódsági körén. Az érdeklődők olvassák el a felhasznált irodalomban jelölt 2 Hawking könyvet!

1.2.4 A mindenség elmélete

- A cél:
 - Gravitáció és kvantumelmélet egyesítése
 - Egy olyan modellt megalkotása, ami leírja a világegyetem működését a lehető legegyszerűbb módon (**Occam⁶ borotvája** elv: a lehető legegyszerűbb, de még működőképes modell).
- Jelenlegi tudásunk: olyan, mint egy kirakósjáték, aminek a szélei már ki vannak rakva (azaz ismertek a könnyebben kezelhető határfeltételek: nagy méretek esetén → relativitáselmélet, kis méretek esetén → kvantummechanika) és a közepét nem ismerjük.
 - *Ilyen értelemben hasonló volt a helyzet már régebben is:*
 - a Newtoni törvények az Einsteini általános relativitáselmélet közelítései a gyenge gravitáció határfeltétel esetén
 - a klasszikus fizikai törvények a kvantummechanika közelítései nagyobb méretek esetén
- A modellek jellege: Mindegyik több (tipikusan 8-11 között) dimenziós tereket használ, de ebből csak a 4 dimenziós téridőt vagyunk képesek érzékelni, a többi felcsavarodott.
 - Példa: Egy gömb felületén mozgó amőba csak 2 dimenziós (\leftrightarrow és \downarrow irányok) felületet lát 3 dimenziós környezetéből
 - Érdekesség: A több dimenzió (elvi szinten) lehetővé teszi a gyors utazást távoli helyekre (pl. más galaxisokba...stb.).
 - Példa: a tórusz (a tórusz az gyakorlatilag egy úszógumi alakú test) két átellenes pontja között a legrövidebb út, hogyha kilépünk a tóruszból (azaz, mintha kilépnénk a test dimenziójából) és keresztülvágunk a téren.
- Kik versengenek a mindenség elméletéért?
 - **Szupergravitáció:**
 - A téridő szokásos 4 dimenzióján kívül további, felcsavarodott dimenziók, az ún. **Grassmann-dimenziók** léteznek, amelyekre antikommutativitás jellemző, azaz ezekben a dimenziókban $x * y = -y * x$.
 - **Húrelmélet:**
 - a hurok 1 dimenziós, kiterjedt objektumok, amelyeknek csak hosszuk van
 - a hurok lehetnek végesek – ezek a nyitott hurkoknak nevezzük – vagy alkothatnak hurkokat – ezek a zárt hurkok.
 - a hurok a téridő háttérében mozognak, a hurok fodrozódásait elemi részecskéknek érzékeljük
 - a hurok egyesülhetnek és kettéválhatnak
 - 10-26 dimenziót feltételez, csak ekkor ellentmondásmentes az elmélet
 - Öt húrelmélet van (1 nyílt és 4 felcsavarodott, zárt): valószínűleg ugyanannak a jelenségnek a különálló megnyilvánulásai, határfeltételei (azaz a kirakósjáték szélei ☺), csak az objektumok egy nagyobb osztályának képviselői.
 - **M-elmélet:**
 - Az öt húrelmélet és a 11 dimenziós szupergravitáció egyesítése
 - Még nem ismerjük teljesen, csak különböző határfeltételek esetén érvényes közelítései vannak.
 - Ez az elmélet arra pályázik, hogy a természet legkisebb lehetséges mérettartományában – a **Planck-hosszúságban** – is érvényes legyen.
 - **Bránok elmélete:**
 - Az eddigi elméletek azt feltételezték, hogy a téridő 4 dimenzióján kívül a továbbiak nagyon kis méretűre fel vannak csavarodva, ebben az elméletben azonban az extra dimenziók közül egy vagy kettő nagy kiterjedésű, akár végtelen is lehet és mi ennek a magasabb dimenzióknak a felületén, egy bránvilágon élünk.
 - Az anyag és a nem gravitációs jellegű erők a bránra korlátozódnak – a gravitáció kivételével minden úgy viselkedik, mintha 4 dimenziós lenne a világunk.
 - Az extra dimenziók azonban – hogy a gravitáció a megfigyelésekkel egyezzen⁷ – egy másik, általunk lakott brántól nem távol véget érnek. A gravitáció tehát lényegében a bránra korlátozódik.
 - Mi az egyik bránban élünk és a közelünkben egy másik, „árnyék” bránvilág van, ezt azonban nem láthatjuk, lévén, hogy a fény terjedése az egyes bránokra korlátozódik, abból nem tud kilépni. Az árnyékbrán gravitációs hatását azonban éreznénk: a mi bránunkról úgy tűnne, mintha ezt olyan „sötét” objektumok okozták, amelyeknek a létezéséről semmilyen más módon nem szerezhetünk tudomást, csak a gravitációs hatásuk révén. *Szemléltető példa: Egymással párhuzamos, kissé fényáteresztő papírlapok. Fekete festés jelzi a gravitációs teret. Az adott lap fekete festései jól látszódnak. Az eggyel mögötte lévő lap fekete festései halványan látszanak, csak az erősebbek kivehetők (ami pl. egy fekete lyukat szimbolizál). A távolabbi lapok festései nem látszanak.*
 - Elmélet létjogosultsága: ha meg akarjuk magyarázni az egyes csillagok mozgását a galaxisokban, akkor úgy tűnik, hogy jóval több anyag létezik, mint amit meg tudunk figyelni: ez a **sötét anyag**⁸. Nem tudunk róla semmit, csak annyit, hogy létezik... ..erre egy lehetséges magyarázat a bránelmélet (de más magyarázat is lehetséges, pl. egzotikus részecskék)!
 - Az is lehet persze, hogy az extra dimenziók nem a másik bránon érnek véget, hanem végtelenek, de erősen görbültek. Ez a görbület hasonló módon, árnyékbránként éreztetné hatását: a gravitáció a brán szűk környezetére korlátozódna. A két elmélet között az egyik különbség, hogy az árnyékbrán modellben elképzelhető, hogy egy feketelyuk átnyúlik egy másik bránra.

⁶ William of Occam (1285-1348): angol nemzetiségű ferences rendi szerzetes, a skolasztikus filozófia kiemelkedő személyisége.

⁷ Ha gravitáció több dimenzióban terjedne a végtelenségig, akkor nagyobb távolságokban rohamosan lecsökkenne. Ekkor a bolygópályák instabilak lennének: vagy belezuhanának a Napba, vagy végérvényesen kiszabadulnának a vonzásából.

⁸ Pl. a spirálgalaxisok központi vidéke túlnyomórészt csillagokból áll, ám a külsőbb részein a közvetlenül nem látható, sötét anyag az uralkodó.

1.3 Távolságok mérése színeképelemzéssel

Színekép (spektrum): Valamilyen elektromágneses sugárzás (*pl. fény*) hullámhosszak szerint felosztása, másképp fogalmazva a kisugárzott teljesítmény eloszlása a frekvencia függvényében.

Színeképelemzés: Az objektumok színeképeinek előállításának és tanulmányozása. Mivel a színekép sok tényezőtől függ – például kémiai összetétel, sűrűség, hőmérséklet, áramlások, mágneses tér...stb. – ezért a színeképelemzés segítségével fényt deríthetünk a vizsgált objektumok (bolygók, csillagok, galaxisok...stb.) fizikai és kémiai tulajdonságaira és az ott lejátszódó fizikai folyamatokra.

Vöröseltolódás: A színeképvonalak eltolódása a nagyobb hullámhosszak irányába annak következményében, hogy a megfigyelt és a megfigyelt objektum távolodik egymástól. Tulajdonképpen ugyanaz a **Doppler-effektus**, mint amikor a tőlünk távolodó rendőrautó szirénáját mélyebbnek halljuk. Mivel bizonyos csillag- és galaxistípusok színeképeit ismerjük, ezért a megfigyelt és az ismert színekép közötti vöröseltolódás mértékének segítségével meg tudjuk adni, hogy milyen gyorsan távolodnak tőlünk, ezáltal pedig azt, hogy milyen messze vannak tőlünk.

1.4 A Világegyetem kialakulása

Ősrobbanás: 13,7 milliárd évvel ezelőtt a Világegyetem ebből jött létre. Időbeli leírás:

- Kezdet: erről fogalmunk sincs
- **Felfúvódási korszak:** 10^{-43} és 10^{-35} másodperccel az ősrobbanás után: Az Univerzum ismeretlen erők hatására tágulni kezd (fény sebességénél gyorsabban több milliárdszorosára: protonnál is kisebb térfogathoz 0.1-100m nagyságúra), megszületik a tér. Gravitációs erő különválik a többi 3 alapvető erőtől. Hőmérséklet: 10^{27} K
- **Kvarkkorszak:** 10^{-35} és 10^{-9} másodperccel az ősrobbanás után: Tágulás lassul, az erős kölcsönhatás leválik a maradék 2 alapvető erőtől. Kialakulnak az alapvető **részecskék** és **antirészecskék**: **kvarkok**, **antikvarkok**, **bozonok**. Létrejönnek az **elektronok** és **pozitronok** (antielektronok) valamint kialakulnak a **fotonok**. A ma létező összes anyag a Világegyetemben annak tulajdonítható, hogy a részecskék kicsit túlsúlyba kerültek az antirészecskékkel szemben: 1 milliárd antirészecskére 1 milliárd plusz 1 db részecske jutott átlagosan. Einstein törvényei hatályba lépnek, az Univerzum tovább tágul (a korábbi méretéről kb. 1 milliárd km méretűre) és hűl (hőmérséklet: 10^{27} K-ről 10^{15} K-re hűl)
- **Az elektroyenge erő szétválása:** 10^{-9} és 10^{-6} másodperccel az ősrobbanás után: A 2 erőt tömörítő elektroyenge erő szétválik a gyenge kölcsönhatásra és erős kölcsönhatásra: megszületik tehát a 4 alapvető erő, a természet erői és a fizika törvényei a Világegyetemben már olyanokká válnak, amilyeneknek ma ismerjük őket. A hőmérséklet 10^{15} K-ről 10^{13} K-re hűl, az Univerzum átmérője nagyjából 100-szorosára nő.
- **Hadronkor és leptonkor:** 10^{-6} és 100 másodperccel az ősrobbanás után: A kvarkok hármas csoportokba rendeződnek és speciális bozonok egy fajtájával a **gluonokkal** és **protonokat** és **neutronokat** hoznak létre. Rengeteg **elektron** (és egyéb lepton) nyüzsög, a kor végére az elektronokkal találkozó pozitronok szétsugárzódnak. A hőmérséklet 10^{10} K-re hűl.
- **A nukleoszintézis kora:** 100 másodperccel az ősrobbanás után a neutronok és protonok hidrogén, hélium, lítium és deutérium **atommagokat** hoznak létre (9 hidrogén atommagra jutott 1 hélium, lítiumból és deutériumból aránylag kevés keletkezik). Az Univerzum hőmérséklete olyan gyorsan zuhan, hogy nehezebb atommagok nem tudnak képződni.
- **Az anyag kora:** 300 000 évvel az ősrobbanás után az Univerzum hőmérséklete már csak 3000K, a protonok és az atommagok egyre gyakrabban kaptak el elektronokat; megszületnek az első **atomok**. Az elektronok így már az atomok fogságában keringenek; nem szórhatják szét a fotonjaikat, az anyag és a sugárzás tehát különválik; a fotonok szabadon száguldhattak át a Világegyetemen; az Univerzum **átlátszóvá** vált. Ezek az első szabad fotonok még most is érzékelhetőek a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás formájában.

1.5 A Világegyetem vége

Mostani tudásunk szerint az alábbi végkifejletek lehetségesek:

- **Nagy recss:** Minden anyag és energia egy végtelenül forró és sűrű pontba, a **szingularitásba** omlik össze. Ez a legvalószínűtlenebb forgatókönyv, hacsak a sötét energia hatása a jövőben nem változik ellenkezőjére, ám még ebben az esetben sem kerülhetne erre sor tízmilliárd évnél előbb. *Szemléltető példa: gyorsan leeresztő lufi*
- **Nagy fagy:** A világegyetem tágulása folytatódik, a csillagok szépen lassan elveszítik tüzelőanyagukat, leállnak. Az Univerzum kihűl és egy lassú, fagyos halál következik. Ez a verzió szolgáltatja a leghosszabb haláltusát, hiszen 1 billió (10^{12}) évig a galaxisok gáza elegendő új csillagok létrehozásához. Legvégül a galaxisok közepén lévő szupernagy tömegű fekete lyukak elnyelnek mindent, majd elkezdenek párologni és csak fotonok és elemi részecskék maradnak (de ehhez 10^{100} év kell). *Szemléltető példa: végtelenségig táguló lufi*
- **Nagy szakadás:** Ha a sötét energia hatása növekszik, akkor túlszámolja az összes többi erőt és egész egyszerűen szétszaggatja a világegyetemet. Ekkor először a galaxisok repülnek szét, majd a naprendszerek. Néhány hónappal később felrobbannak a csillagok és a bolygók, majd az atomok is szétesnének. Azután megáll az idő. Ez húsz-harminc milliárd év múlva következhet be. *Szemléltető példa: túvel kilyukasztott, szétduzzadó lufi*

2. A Világegyetem szerkezetei

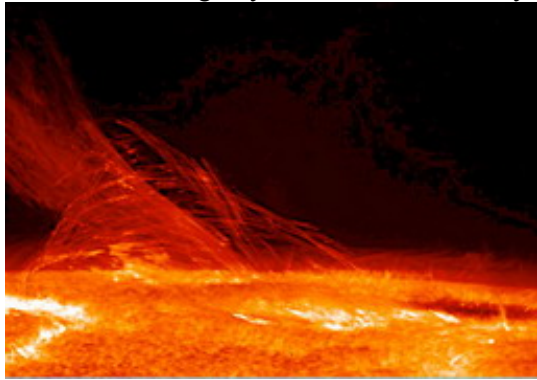
2.1 Léptékek

- **Naprendszer** (Átmérő: 0,6 fénynap ($1,5 \cdot 10^{13}$ km); 1 csillag, 8 bolygó, törpebolygók, sok hold, több millió aszteroida és üstökös)
- **Csillagszomszédok** (Átmérő: 40 fényév; 79 csillagszomszéd 106 csillaggal)
- **Tejútrendszer** – a galaxisunk (Átmérő: 100 000 fényévnél nagyobb; 200 milliárd csillag, gigantikus gáz és porfelhők, közepében egy szupernagy tömegű fekete lyuk)
- **Lokális csoport** – a galaxishalmazunk (Átmérő: 10 millió fényév; 46 galaxis (nagy része törpegalaxis))
- **Virgo-szuperhalmaz** – a galaxishalmazok csoportja (Átmérő: 100 millió fényév; galaxisok tízezrei)
- **Fonalak** – a szuperhalmazok fonalakat alkotnak, amelyek között óriási üres terek vannak; ezek a fonalak hálózák be az Univerzumot

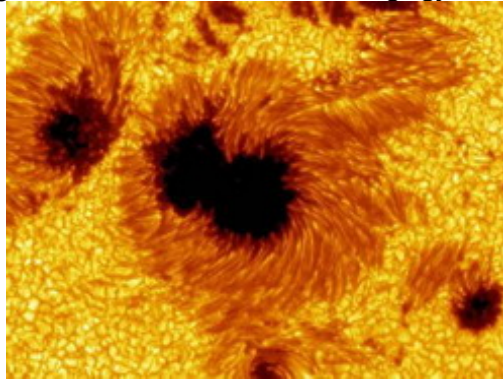
2.2 Csillagok

2.2.1 Felépítés, működés, alapfogalmak

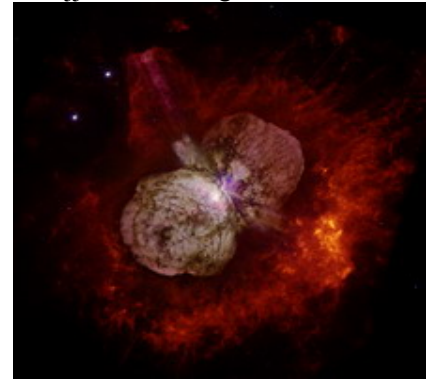
- Nagy tömegű, forró gázból és plazmából áll
- **Magreakció** (fősorozatban: hidrogén atomok fúziója hélium atomokká⁹) → energia → hő és fény kibocsátása¹⁰
- Belső nyomása egyensúlyt tart a gravitációval (élete legnagyobb részében)
- Csillagok mérete:
 - Minimum 0,08 naptömeg – különben nem indul be a magfúzió
 - Maximum 100 naptömeg (**Eddington¹¹-határ**) – különben instabil, a felfokozott fúziós reakciók olyan erős sugárnyomást keltenek, amely a gravitáció fölé kerekedik: a csillag egyszerűen lefújja külső rétegeit.



Napkitörések



Napfoltok



A 100 naptömegű, rendkívül instabil öreg csillag, az éta Carinae

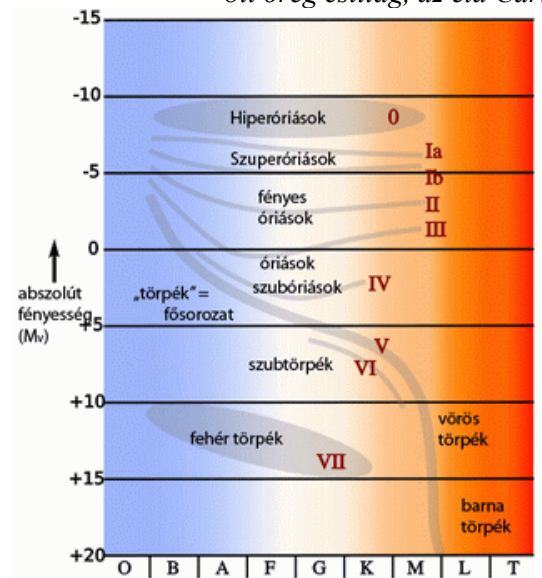
○ Hertzsprung-Russel Diagram (HRD):

- Csillagok alapvető tulajdonságait adja meg
- **Színképük** alapján 7 fő osztályba sorolja a csillagokat (jelölés O-tól M-ig a HRD-n) → következtetni lehet a színkép vonalak helyéből a fotoszférában lévő elemekre, a vonalak erőssége a csillag hőmérsékletét jelzi

Típus	szín	felszíni hőm.	példa
O	kék	45.000 °C	Regor
B	kékesfehér	30.000 °C	Rigel
A	fehér	12.000 °C	Szíriusz
F	sárgásfehér	8.000 °C	Procyon
G	sárga	6.500 °C	A Nap
K	narancs	5.000 °C	Aldebaran
M	vörös	3.500 °C	Betelgeuse

- **Luminozitási** (abszolút fényességi) **osztályba** is soroljuk őket (római számokkal jelölve a HRD-n), amelyek megadják a csillag típusát (ld. 2.2.2 A csillagok életútja fejezet – *például V: fősorozat, fölötté óriások, alatta törpék*)

- Az ionizált plazmában a negatív töltésű elektronok a pozitív töltésű ionoktól elszabadulva, önállóan mozognak → mágneses tér → csillag forgása következtében felcsavarodhatnak a mágneses erővonalak → **napfoltok**



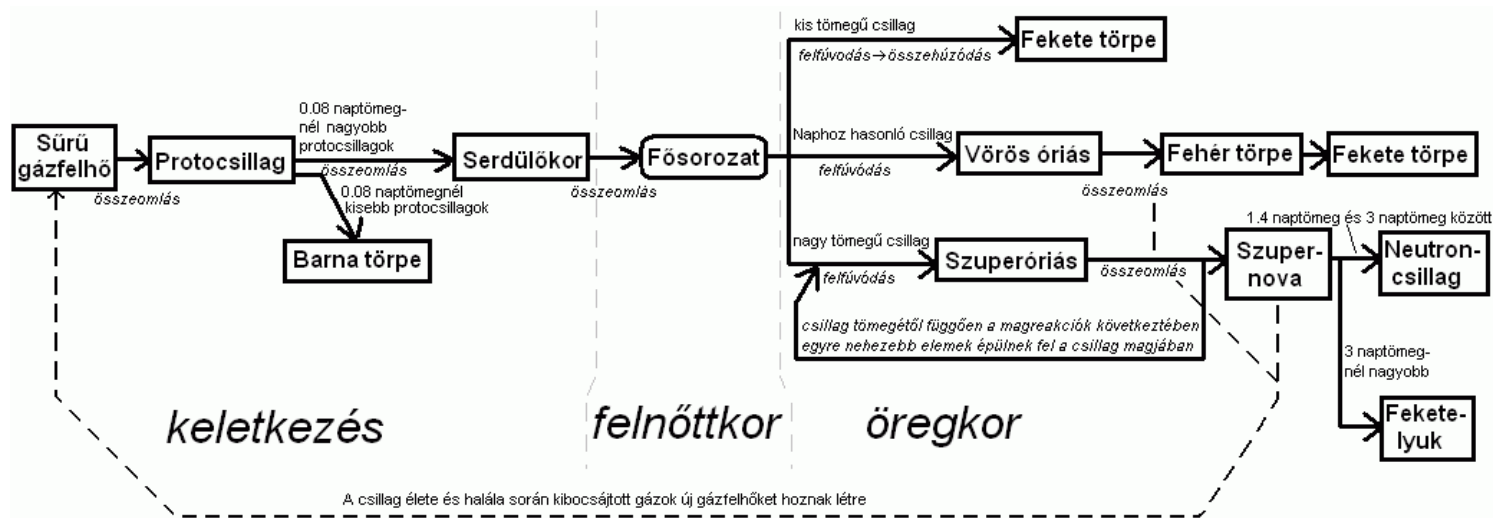
A Hertzsprung-Russel diagram

⁹ A Nap esetében másodpercenként 600 millió tonna hidrogén alakul át héliummá. A reakció leírása: $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\gamma + 2\nu_e$ (26.7 MeV). A kisugárzott energia gamma-sugárzás formájában felszabadul és fokozatosan utat tör a felszín felé; mire ideér már a színkép látható tartományába esik a sugárzás.

¹⁰ 1 millió év kell a Nap esetében ahhoz, hogy a megtermelt energia kijusson a csillag felszínére!!!

¹¹ Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944): angol asztrofizikus, Einstein általános relativitáselméletének népszerűsítésben nagy szerepe volt.

2.2.2 A csillagok életútja

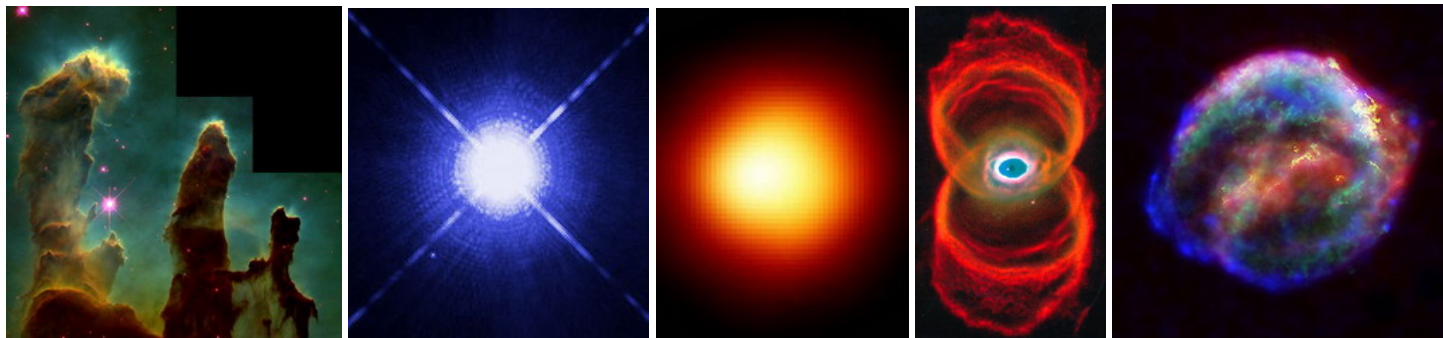


Keletkezés: A csillagközi gázfelhő (legnagyobb részt H_2 -ből áll) gravitáció hatására összeomlik és kisebb, különböző méretű és tömegű részekre szakad, **protocsillagokat** hozván létre. A protocsillag összeomlása folytatódik, miközben a belsejében a hőmérséklet és a nyomás egyre növekszik. Minél nagyobb a tömege, annál nagyobb a nyomás: 0,08 naptömeg esetén a nyomás elegendő ahhoz, hogy beindítsa a magfúziót; a csillag ekkor **fősorozatba** lép, ám még mielőtt ezt elérné, a **csillag serdülőkorában** az összehúzódó gáz egyre gyorsabban forog – porkorongot hoz létre maga körül, miközben maga a csillag instabil és erős csillagszelet bocsát ki.

Felnőttkor: A kellően nagy tömeg miatt a csillagban beindulnak a **magreakciók**: hidrogén atomok egyesülnek hélium atomokká, a nyomás és a hőmérséklet ellene tart a gravitációnak, a csillag stabil állapotban van. A csillag körüli anyagkorong hűlni kezd, az elemek elkezdnek összetapadni, majd a nagyobb csomók vonzzák a kisebbeket, amíg ki nem alakul a csillag körül a bolygórendszer. A csillagok nagy része életének 90%-át a fősorozatban tölti. A nagyobb tömegű csillagok sokkal gyorsabban fogyasztják el nukleáris üzemanyagukat, mint a kicsik, ezért sokkal kevesebb időt töltenek a fősorozatban: A Nap viszonylag kis méretű a fősorozati csillagok között, ezért ebben az állapotban mintegy tízmilliárd évet tölt, míg a tíz naptömegű csillagok mindössze tízmillió évig maradnak a fősorozaton.

Öregkor: Amikor egy csillag befejezi magjában a hidrogén égetését, a hidrogénégés a héjakban folytatódik, minek hatására a hőforrás egyre inkább a csillag szélére szorul és ennek hatására a csillag elkezd tágulni. A tágulás hatására a külső rétegek lehűlnek, majd elkezdődik az összehúzódás, ami Naphoz hasonló csillagok esetében teljesen kihűlt, **fekete törpe** formájában végződik. A Naphoz hasonló csillagoknál ezzel szemben a tágulás hatalmas, **vörös óriások** hoz létre, aminek elveszített külső rétege **planetáris ködöket** hoz létre. A vörös óriás ezután összeomlik; a hatalmas nyomás elegendő ahhoz, hogy a fősorozatban kialakult hélium atomok magfúziója is beinduljon szén atomokat hozván ezáltal létre. Miután a magban kifogy a hélium, az égés ismét a külsőbb rétegekre tevődik át, a csillag ismét felfúvódik. Ezután összeomlik és külső rétegeit planetáris köd képében ledobja, miközben a csillag egy **fehér törpévé** omlik össze. Ez a fehér törpe az idő múlásával lassan elhalványodik és fekete törpévé válik. Különösen nagy csillagok esetében az összeomlás utáni új magfúzió mindaddig folytatódik, amíg ahhoz elegendő nyomás van: egyre nehezebb elemek épülhetnek fel az ilyen ciklusokban, egészen a vasig. Ezután a csillag **szupernovaként** felrobban, miközben a vasnál is nehezebb elemeket hoz létre. A robbanás után a csillag összeomlik: ha tömege meghaladja az 1.4 naptömeget (ez az ún. **Chandrasekhar¹²-határ**), akkor a nyomás mértéke meghaladja az atomok közötti taszítóerő nagyságát és egy rendkívül sűrű képződmény, az ún. **neutroncsillag** jön létre (a szabályos időközönként irányított rádióimpulzust kibocsátó neutroncsillagokat pedig **pulzár**nak nevezzük). Ha ezen test tömege 3 naptömeg felett van, akkor a neutronok közötti taszítóerő sem tudja összetartani az anyagot, az egyetlen pontba (ún. **szingularitásba**) összeomolva egy **fekete lyukat** hoz létre, aminek annyira erős a gravitációja, hogy semmit, még a fényt sem engedi ki magából.

Példák:



A teremtés oszlopai

Szíriusz A és B

Betelgeuse

Homokóra-köd

Kepler csillaga

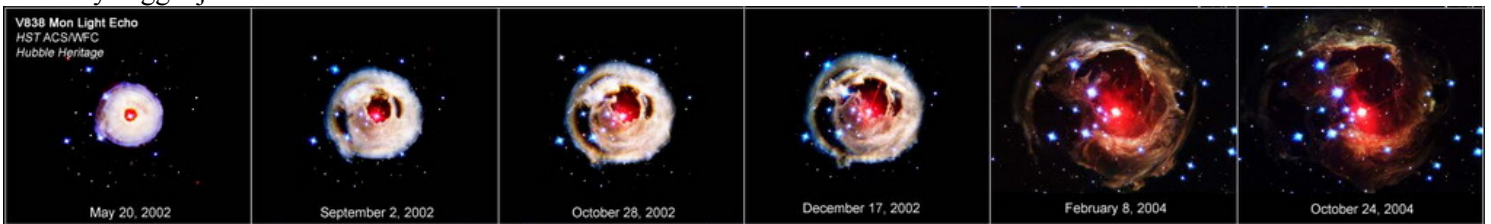
- Csillagközi gázfelhő, protocsillagok, serdülőkorban lévő csillagok: *A teremtés oszlopai* a Sas-ködben (*pillars of creation, IC 4703*), *Lófej-köd* (*Bernard 33*), *Orion-köd* (*NGC 1976*), *Trifid-köd* (*M20*), *IC 1396*, *Kúp-köd* (*NGC 2264*)
- Fősorozatbeli csillag: *mi napunk*, *Szíriusz A*
- Vörös Óriás: *Betelgeuse*

¹² Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995): Nobel-díjas indiai származású amerikai fizikus, asztrofizikus és matematikus.

- Planetáris kód: *Homokóra-kód (MyCn18)*, *Monocerotis V838,Csiga-kód (NGC 7293)*, *Eszkimó-kód (NGC 2392)*, *Macskaszem-kód (NGC 6543)*, *Hangya-kód (Menzel 3)*, *Bogár-kód (NGC 6302)*, *NGC3132*
- Fehér Törpe: *Szíriusz B*
- Szupernova: *Kepler csillaga (SN1604)*, *Cassiopea A (SN 1680)*, *SN 1987A*
- Neutroncsillag: *RX J0822-4300*

2.2.3 Többszörös rendszerek, változócsillagok

- **Többszörös rendszerek:** Kettő vagy több csillagot kölcsönös gravitációjuk tart össze (Tejútrendszer csillagainak 60%-a feltehetően ilyen). Távolságuk és keringési periódusuk nagy mértékben változhat – utóbbi néhány órától évmilliókig terjedhet. A többes rendszerek tagjai is fejlődnek (ld. 2.2.2 A csillagok életútja fejezet) és méretükből adódóan nem feltétlenül ugyanott tartanak életútjukban. Előfordulhat, hogy például az egyik vörös óriássá alakul, míg társa anyagot szív magába ettől az óriástól – részleteket ld. Nova és Ia típusú szupernóva magyarázataiban!
- **Változócsillagok:**
 - **Pulzáló változócsillagok:** A csillag külső rétegeiben tágulás és összehúzódás lép fel. A pulzáló csillag állandóan a sugárzás és gáz kifelé ható nyomását a befelé ható gravitációjával próbálja egyensúlyba hozni → fényessége változik.
 - **Nova:** Olyan kettős rendszer, amely egy óriáscsillagból és egy körülötte keringő fehér törpéből áll. Az óriáscsillag olyan hatalmasra fúvódik fel, hogy anyagának külső rétegeit már a saját gravitációja nem képes megtartani, így az átáramlik a fehér törpe kísérőre. Egy idő múlva a felhalmozódott anyagban megindul a termonukleáris fúzió, ami legalább egymilliószorosára növeli a csillag energia kisugárzását és több nagyságrenddel megnöveli fényességét. A fehér törpén lévő gázok nem engedelmessé válnak a gáztörvényeknek: nem tágulnak, így a robbanás „megszalad”; csak akkor fejeződik be, amikor a szükséges üzemanyag elfogy. Az elnevezés onnan kapta a nevét, hogyha a folyamat előtt a csillag szabad szemmel láthatatlan volt, akkor a robbanáskor felfénylik, mintha új csillag (latinul: nova) jelent volna meg az égen.
 - **Ia típusú szupernova:** Itt is egy óriáscsillag és egy fehér törpe kering egymás körül. A nővéval ellentétben az átáramló anyag nem vált ki nóva jelenséget, hanem a fehér törpe egyre csak nő, amíg eléri egy kritikus sűrűséget, ahol elindul a szén és az oxigén fúziója. Ez a folyamat megállíthatatlanul terjed, míg egy Ia típusú szupernóvának nevezett hatalmas robbanásba torkollik. A folyamat ugrásszerű fényességnövekedéssel és a csillagközi térbe dobódó hatalmas anyagmennyiséggel jár.



A V838 Monocerotis pulzáló vörös szuperóriás poros felhőt dob le magáról

2.3 Galaxisok

2.3.1 Galaxisok típusai

- Hubble¹³-féle osztályozás:
 - **Spirálgalaxisok (S):** Világegyetem hozzánk közel eső részében a galaxisok 25-30%-a ilyen. Gömb alakú magot vagy kidudorodást egy porban és gázban gazdag lapos anyagkorong veszi körül. A mag főként sárga és vörös csillagokból áll. A korongban mindenhol vannak csillagok, de a kék és fehércsillagok nagy része a spirálkarokban található. A korong alatt és fölött helyezkedik el a „haló”, ahol gömbhalmazok és néhány magányos csillag leledzik. A spirálkarok lassan forognak: többnyire néhány száz millió év alatt tesznek meg egy fordulatot, a középponttól távolabbi csillagok lassabban forognak, mint a maghoz közelebbiek. (Példák: *Tejútrendszer (a mi galaxisunk)*, *Androméda-galaxis (M31)*, *Örvénygalaxis (M51)*, *Napraforgó-galaxis (M63)*, *Szélkerék-galaxis (M101)*, *Triangulum galaxis (M33)*, *Sombrero-galaxis (M104)*; *küllős-spirálgalaxisok: NGC 1300, NGC 1365, NGC 253*)
 - **Elliptikus galaxisok (E):** Egyszerű forgási ellipszoid alak (jellemzés lapultság mértékével). A legkisebb és legnagyobb galaxisok egyaránt elliptikusak. A **törpegalaxisok** csak néhány millió csillagból állnak és nagyobb galaxisok között helyezkednek el és a pusztán összetartáshoz nagy mennyiségű sötét anyagot kell tartalmazniuk. Az **óriás elliptikus galaxisok** ezzel szemben gyakran sok száz milliárd csillagból állnak és ezek csak a **galaxishalmazok** közepén fordulnak elő. Az elliptikus galaxisokban csaknem minden csillag sárga és vörös, nagyon ritkán fordul elő benne a csillagok keletkezéséhez szükséges gáz vagy por; a csillagok keletkezése már régen befejeződött bennük. Minden egyes csillag saját pályán (nem egy síkban) kering a galaxis sűrű magja körül. (Példák: *M32, M49, M59, M60, M87, M89, M105*)
 - **Lentikuláris galaxisok (S0):** Öreg, sárga és vörös csillagokból álló nagyjából gömb alakú mag jellemzi őket, akárcsak az elliptikus galaxisokat, ám a mag körül egy csillagokból és gázból álló korong van, akárcsak a spirálgalaxisok esetében. Méretükben a spirálisokra hasonlítanak, de magjuk általában jóval nagyobb annál, mint amekkora egy hasonló méretű spirálisgalaxisé lenne. A korongban nincsenek spirálkarok és alig keletkeznek itt új csillagok. (Példák: *NGC 5866, NGC 1553*)
 - **Szabálytalan (irreguláris) galaxisok (IR):** A főnti osztályokba nem besorolható galaxisok. Jellemzően sok gázt, port és forró kék csillagot tartalmaznak. Gyakoriak bennük a ködök, ahol a csillagok keletkeznek. (Példák: *A tejútrendszer legfényesebb kísérőgalaxisai a Nagy és Kis Magellán-felhő PGC 17223 és NGC 292*)

¹³ Edwin Powell Hubble (1889-1953): amerikai csillagász, aki felfedezte, hogy a galaxisok nem a Tejútrendszer részei, valamint a kozmikus vöröseltolódás felfedezésével amellel érvelt, hogy azt a Világegyetem tágulása okozza.

A legtöbb (bár nem az összes) galaxis belsejében egy sokmillió naptömegű **szupernehéz fekete lyuk** található. A megfigyelések azt mutatják, hogy a legtöbb spirális és elliptikus galaxis esetében ez több milliárd naptömeget is kitesz. A legtöbb galaxis esetében az anyag már régen pályára állt körülötte; nyugvó állapotban van. Ha viszont valamilyen okból anyag közelít feléje, akkor a szupernehéz **fekete lyuk aktivizálódik**: miközben magához rántja az anyagot, az felforrósodik és sugározni kezd¹⁴. Szélsőséges esetekben – tipikusan galaxisok születésénél, összeütközésénél – a fekete lyuk anyagutánpótlása folyamatos: egyre újabb és újabb csillagok, gáz és por hullik belé, a **galaxis aktív válik**. Ekkor, ahogyan a fekete lyuk beszippantja az anyagot, a felforrósodott gáz spirális pályán tömegbefogási korongot alkot miközben nagy energiájú, ragyogó sugárzást bocsát ki. A fekete lyukat körülvevő erős mágneses tér megkaparintja a befelé hulló anyag egy részét és a befogási korongra merőleges irányban – a mágneses pólusok környékén – két, keskeny formájú, vakítóan sugárzó gáznyaláb formájában kilöki az ürbe (ld. kép). A világító gáznyalábok aztán lelassulva több ezer fényév hosszú lebenyekké terebélyesednek. Az aktív galaxisok négy fajtáját különböztetik meg a csillagászok: **rádiógalaxis**, **kvazár**, **blazár** és **Seyfert-galaxis**. Egy mostani, elfogadott modell szerint a négy típust csak az aktivitás erőssége és az különbözteti meg, hogy milyen irányból látunk rá a rendszerre¹⁵.



2.3.2 Galaxisok fejlődése

Galaxisok kialakulása: Az anyag szálakba tömörül, a szálakon belül kialakulnak az irreguláris **protogalaxisok**, amelyek nagyobb, irreguláris galaxisokká egyesülnek. Az anyagszálak idővel **galaxisok láncáivá** fejlődnek, és az irreguláris galaxisokból, fejlettebb galaxisok alakulnak ki – például elliptikusak. Amikor az univerzum nagyjából 7,5 milliárd éves, az anyagszálakban egyre több anyag gyűlik össze és megjelennek a galaxishalmazok, amelyek már néhány óriás elliptikus galaxist is tartalmaznak. A Világegyetemben kialakult szálak azért fontosak, mert lokális szinten ez hat ellene az Univerzum tágulásának: itt az elemek nem távolodnak, hanem gravitációjuk összetartja őket.

Ütköző és kölcsönható galaxisok:

Méretükhöz képest a galaxisok sokkal közelebb vannak egymáshoz, mint a csillagok, ezért nem ritkák közöttük az ütközések. Ekkor a kölcsönható galaxisok gázfelhői egymásba préselődnek, ami kiváltja új csillagok keletkezését. A keletkező csillagokból sok igen nagy méretű, ebből következően rövid élettartamú és néhány millió év múlva nagy fényes szupernova robbanással fejezi be életét – a galaxisok összeütközése tehát heves szupernova tevékenységgel jár. Két nagyobb galaxis összeütközése akár több százmillió évig is eltarthat, a végén a galaxisok általában egyesülnek, egy új, nagyobb galaxist létrehozva. Az ütközés közben a galaxisok egymás gravitációs hatása miatt megváltoztatják alakjukat: a hatás a másik galaxishoz közelebb lévő széleken erősebb, két spirálgalaxis találkozásánál a spirálkarokat akár teljesen leszakíthatja a másik galaxis gravitációja. A galaxisok középpontjában lévő szupernehéz fekete lyukak a galaxisok ütközése után az új galaxis középpontjában egymás körül keringenek, egyre közelebb kerülnek egymáshoz, majd egyesülnek. Az egyesülés előtt nagyon sok csillagot és gázanyagot nyelnek el, az elnyelődés alatt álló anyag korongba rendeződve igen magas hőmérsékletre hevül, és erős elektromágneses sugárzást bocsát ki, valamint középpontjából gáznyaláb indul ki; a galaxis aktív válik. Ha nagyobb galaxis útjába törpegalaxisok kerülnek (a törpegalaxisok nagy száma miatt ez meglehetősen gyakori, a Tejútrendszer körül is több törpegalaxis kering), akkor a nagyobb galaxis gravitációja a törpéket egyre jobban megnyújtja, és csillagaik a nagyobb galaxis tömegközéppontja körül kezdenek el keringeni, majd elkeverednek a nagyobb galaxis csillagai között: a Tejútrendszerben is sok csillagról kimutatták, hogy más törpe galaxisokból származnak. De a Tejútrendszert sem kerülheti el a nagyobb galaxisokkal való ütközés, majd összeolvadás: 5 milliárd éven belül összeütközik a legközelebbi spirálisgalaxissal, az Andromédával (M31).

(Példák galaxisok összeütközésére: *Egerek (NGC 4676)*, *Csápok galaxispár (NGC 4038 és NGC 4039)*, *NGC 2207 és IC 2163*, *Örvény-galaxis (M51)*, *NGC 1097*, *NGC 520*, *M82*)



Csápok galaxispár (NGC 4038 és NGC 4039)



Egerek (NGC 4676)

¹⁴ 1997-ben a Tejútrendszer középpontjától 3000 fényévre hatalmas gamma-sugárzó felhőket fedeztek fel, ami azt bizonyítja, hogy a Tejútrendszer magja nem túl régen aktivizálódott.

¹⁵ Eszerint a legerősebb természetes rádióforrásként ténykedő rádiógalaxisra oldalról látunk rá, ahol a por eltakarja a központi vidéket. A kvazároknál belátunk a porgyűrű mögé; a központi mag és korong ragyogó erős fénye elnyomja a galaxis csillagainak fényét. Seyfert-galaxis esetén szintén belátunk a porgyűrű mögé, de az aktivitás ebben az esetben gyengébb. Blazár esetén a galaxist lapjával látjuk, a ragyogó fénynyalábok irányából.

2.3.3 Galaxishalmazok

A **galaxishalmazok** galaxisok csoportosulásai, gravitációsan kötött objektumok, amelyek akár több mint ezer galaxist is tartalmazhatnak. Az egyes galaxishalmazok össztömege elérheti a $10 \cdot 10^{15}$ naptömeget, átmérőjük pedig a $3 \cdot 10^7$ fényévet. A galaxishalmazok mérete és alakja a fejlődésükkel áll kapcsolatban: a halmazok gázban gazdag, szabálytalan és spirálgalaxisokat tömörítő csoportoktól a fejlődésben előrehaladott halmazokig terjednek, amelyeket óriás elliptikus galaxisok urálnak. Az öreg halmazok középső részén forró, röntgensugárzást kibocsátó gázfelhő helyezkedik el. (Példák: *Lokális csoport (Tejútrendszer ebben van)*, *Stephan kvintettje (NGC 7320)*, *Seyfert szextettje (NGC 6027)*). Ha egy kompakt galaxishalmaz egy távolabbi galaxis előtt helyezkedik el, akkor a galaxishalmaz hatalmas tömege elgörbíti a mellette haladó fény útját, egyfajta lencseként működik: a mögötte lévő galaxis képe egy körív formájában jelenik meg. Ezt a hatást a **gravitációs-lencse-jelenségnek** nevezzük (szép példa látható erre az *Abell 2218* halmaz esetében). A halmazokat még nagyobb szerkezetekké ún. **szuperhalmazokká** tartja össze a gravitáció. A szuperhalmazok fonalak formájában kapcsolják össze a galaxishalmazokat, ők az ősrobbanásakor jelenlévő helyi egyenetlenségek mai lenyomatait, a Világegyetem általunk ismert legnagyobb szerkezeteit.

3. Felhasznált és ajánlott irodalom

- Könyv:
 - Fizikai törvények érthető leírása miatt:
 - Stephen Hawking: Az idő rövid története. Akkord. 2003. Bp. http://konyv.uw.hu/az_ido_rovid_tortenete/index.html
 - Stephen Hawking: A világegyetem dióhéjban. Akkord. 2002. Bp.
 - Képanyaga és szövege miatt: Univerzum. Szerk.: Martin Rees. Ikar. 2006. Bp.
 - Képanyaga miatt: National Geographic 2004-es és 2008-as különszáma az űrről, Geo különszámok (Nr. 6 és 33)
- Dokumentumfilm:
 - National Geographic: Kozmikus szörnyek, Pusztuló univerzum, A Hubble űrtávcső
- Internet:
 - Wikipédia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Star>, <http://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy>, http://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole
 - Hubble-képek: <http://hubblesite.org/>, <http://www.spacetelescope.org/images/index.html>, <http://heritage.stsci.edu/gallery/gallery.html>