

HELYÜNK AZ UNIVERZUMBAN – A CSILLAGÁSZAT RÖVID TÖRTÉNETE II. RÉSZ

UJFALUDI LÁSZLÓ

Eszterházy Károly Főiskola, Fizika Tanszék

Abstract: Our place in the Universe – A brief history of astronomy. Part 2. Astronomy in the 20th Century made an unbelievable development, the new recognitions resulted in a basic change of our relation to the Universe. Einstein's theory of relativity reformed the classical image of space and time. Hubble's discovery about the expanding Universe and its consequences founded a picture of an ever changing Universe instead of the traditional stationary one. Motion of galaxies proved the existence of a mysterious dark matter; the accelerating expansion of space is associated with a mysterious dark energy. In the meantime a huge volume of space research developed, using space crafts, probes, satellites. Man landed on the Moon, satellites aid the communication and navigation and space probes explore the objects of the solar system. The latest discovery: the extrasolar planets feed our hope that once we can make connection with people of an alien civilization.

A modernkori csillagászat rövid története

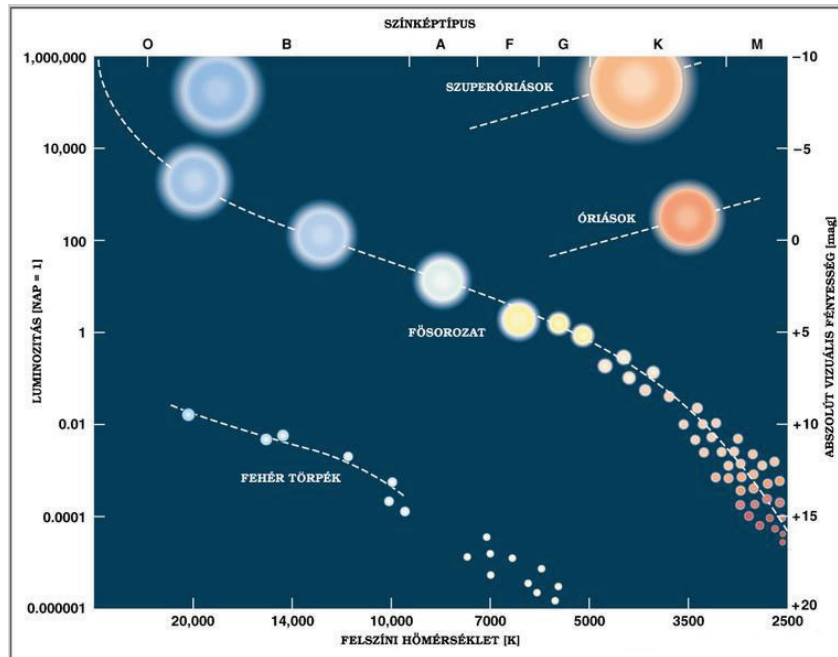
A csillagászati fotográfia, amely már a 19. században elkezdődött, a csillagászati észlelések lehetőségeit óriási mértékben megnövelte. A hosszú expozíciós idők lehetővé tették olyan területek feltérképezését, ahol a hagyományos észleléssel égitesteket egyáltalán nem lehetett megfigyelni. A fényképezés egyik úttörője a 19–20. század fordulója táján Edward Barnard volt, aki amellet, hogy számos üstököszt felfedezett, felvételeket készített a Tejút központi régióiról. Képein sötét tartományok jelentek meg, amelyek egy részéről ma már tudjuk, hogy a látható anyag többszörösét kitevő ún. sötét anyagból állnak.

A 20. század elején a kvantumhipotézis (Planck) és a relativitáselmélet (Einstein) forradalmi szemléletváltást hozott a mikrovilág és a világegyetem fizikájában. Bebizonyosodott, hogy az atomok és a kozmikus méretek tartományában más természettörvények érvényesek, mint a hagyományos makro-méretek tartományában. Az új fizika nem érvénytelenítette a klasszikus fizika törvényeit, csak kijelölte annak érvényességi határait.

A század elején indult meg az (azóta is folyamatos) óriástávcső-építési program, amelynek élharcosa George Hale volt. Több nagy obszervatóriumot alapított, így a híres kaliforniai Mount Wilsont (1903) ahol egy 150, majd egy 250

cm átmérőjű teleszkópot állítottak fel. Az új teleszkópok már mind a hagyományos, ún. refraktoroknál sokkal hatékonyabb (lényegében Newton-rendszerű) tükrös távcsövekkel készültek.

1910-ben Herzprung és Russell kidolgozta a csillagtípusok összefoglalására szolgáló diagramot (HRD).



A diagram a megfigyelt csillagokat ábrázolja a felszíni hőmérsékletük és fényességük figyelembevételével. Csak jóval később derült ki, hogy a HRD a csillagok fejlődési fokozatait mutatja (magyarázatát ld. később).

A 10-es években születtek az atommodellek (Rutherford és Bohr), és Einstein általános relativitáselmélete. Az 1919 évi teljes napfogyatkozás pedig alkalmat adott Eddingtonnak arra, hogy bizonyítékokat szerezzen az elmélet igazolására.

A század 20-as évei a kozmológia nagy évtizedét hozták. A Világegyetemről alkotott korábbi kép, a stacionárius (állandó, változatlan) Világegyetem semmi- vé foszlott az új elméleti és megfigyelési eredmények tükrében. 1927-ben Georges Lemaitre, egy belga fizikus-pap az Einstein-egyenletek megoldása alapján arra az eredményre jutott, hogy az Univerzum nem lehet változatlan, hanem tágulnia kell.

Ha a tágulási folyamatot időben visszafelé extrapoláljuk, kell lennie egy kezdpontnak, amikor az egész Univerzum egy igen kicsiny térfogatban sűrűsödött, ezt az állapotot nevezte Lemaitre „ősatomnak.”



Georges Lemaître

Ez a bizarr fejlődési modell sokaknak nem tetszett (köztük Einsteinnek sem). Alig két év múlva azonban bebizonyosodott, hogy Lemaitrenek igaza van. A közvetlen bizonyítékot Edwin Hubble és asszisztense, Milton Humason megfigyelési eredményei szolgáltatták.

Hubble 1919-től dolgozott a Mount Wilson 250 cm-es teleszkópjánál. Kezdetben változócsillagok észlelésével foglalkozott, majd az Andromeda-köd (akkor még így nevezték) részletes vizsgálata során kiderítette, hogy az nem egy születőben lévő naprendszer, ahogy akkoriban hitték, hanem galaxis. Távolságát 1 millió fényévnél nagyobbra becsülte (a mai, pontosabb érték 2,4 millió fényév), és egyértelműen megállapította azt is, hogy – a korábbi hiedelemmel ellentétben – nem lehet a Tejút része (a Tejút átmérője ugyanis csak 100 ezer fényév).

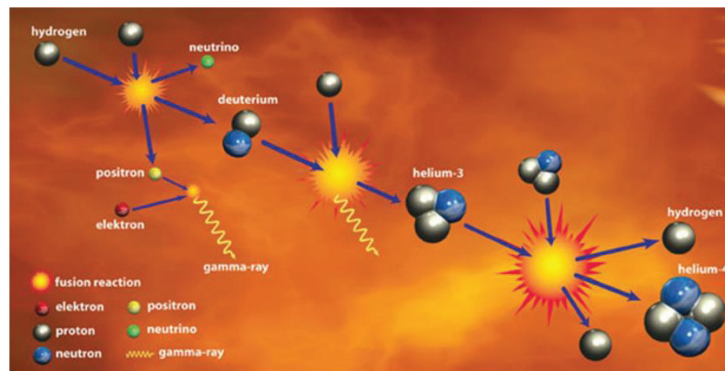


Edwin Hubble

Később Humason spektroszkópai észleléseinek értékelése alapján megállapította, hogy a galaxisok egymástól nagy sebességgel távolodnak és a távolodás sebessége arányos a galaxis távolságával (1929). A korábbi elmélet (Lemaitre) és az újabb megfigyelések a táguló világegyetemről egyértelművé tették, hogy a stacionárius világegyetem-kép nem tartható tovább.

Az Univerzum fejlődésének tudománya, a kozmológia tehát a 20-as évek végére alakult igazi tudománnyá. A változatlan világegyetem-képet felváltotta az Ősrobbanással (Nagy Bummal) kezdődő, majd egyre táguló világegyetem elképzelés, más néven Forró Univerzum modell. Még most sem volt azonban a fizikusoknak reális elképzelése arról, hogyan működnek a csillagok. Korábban volt néhány hipotézis, arról, hogy mi lehet a csillagok energiaforrása. Az egyik elképzelés szerint a gáztömeg lassú, gravitációs összehúzódása folytán keletkezik a hő, a másik szerint meteorok állandó becsapódása hozza létre a sugárzáshoz szükséges hőt. Egyik folyamat sem elegendő azonban a csillagok hatalmas és hosszú élettartamú energiaforrásának magyarázatára. A problémát Hans Bethe oldotta meg 1938-ban.

Magyarázata szerint a csillagok energiaforrása a belső magban lejátszódó atommag-fúzió; ennek során hidrogén-atommagok egyesülnek hélium-atommagokká, eközben az össztömeg csökken (ezt nevezik tömegvesztésnek, vagy tömegdefektusnak).

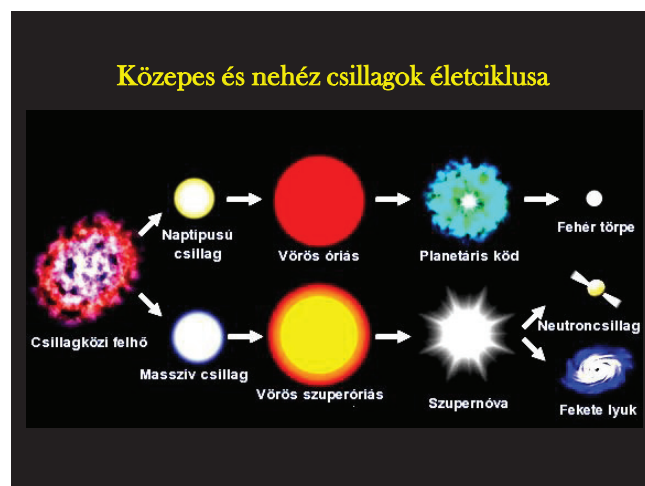


A tömegvesztés alakul át energiává (a folyamat Einstein relativitáselmélete alapján magyarázható). Mivel igen kicsiny tömeg átalakulása óriási energiát eredményez, érthetővé válik, hogyan lehetséges a csillagok évmilliókon, vagy évmilliárdokon át tartó energia-kibocsátása.

Az atommagfúzió révén érthetővé vált a csillagok működése, sőt a különböző csillag-típusok fejlődésének magyarázata is lehetővé vált. A magban lejátszódó hidrogén-hélium fúzió eredményeképp a csillag összetétele lassan megváltozik. Mikor felhasználta teljes hidrogén-készletét, a mag lehül, a gáz nyomása lecsökken. Ekkor a gravitáció hatására (amellyel korábban a nyomás egyensúlyt tartott) a mag térfogata hirtelen lecsökken, „összeroppan”, ami által a hőmérséklet olyan mértékben megnő, hogy a hélium-atommagok széné, majd a szén neonná, a

neon oxigénné fuzionál. A szén és az oxigén fúziójából szilícium keletkezik, majd a szilícium-magok vasmagokká egyesülnek. A fúzió ezzel végállomásához érkezett: a vasnál nehezebb elemek létrehozása már több energiát fogyasztana, mint amennyit termelne, további energiaforrása nem lévén, a csillag megint a gravitáció hatása alá kerül: hirtelen összeroppan. A korábbi, évmillióig, vagy milliárdokig tartó önfenntartó fúzió után ez a folyamat kevesebb, mint egy nap alatt végbemegy. A nap-típusú csillagok kisméretű, igen tömör égitestekké, fehér törpe-csillagokká esnek össze. Eközben az összeroppanás által keltett lökéshullám ledobja a csillag külső gázburkát, amely folyamatosan táguló, világító glóriaként ragyog, létrehozva az univerzum leglátványosabb égitesteit, a planetáris ködöket. A fehér törpékben az atommagok olyan szorosan összepréselődnek, hogy közöttük nincs elég hely az elektronpályák létrejöttéhez, az elektronok az atommagok közötti szűk térben száguldoznak, hasonlóan a fémek szabad elektronjaihoz. A fehér törpe még sokáig sugároz, de végül energiája elfogy, láthatatlan fekete törpévé alakul.

A Napnál jóval nagyobb méretű csillagok esetén azonban a fehér törpe állapot sem stabil. Az ilyen (a Napnál legalább 1,4-szer nagyobb) csillagok összeroppanása tovább folytatódik. Az összehúzó erő itt akkora, hogy már az elektronok is bepréselődnek az atommagokba, semlegesítik a protonok pozitív töltését és egy tisztán neutronokból álló képződmény: a neutroncsillag jön létre. A folyamat lefolyása olyan gyors, hogy a csillag többi része nem tudja követni, az egymás fölötti rétegek (héjak) sorozatosan belezuhannak a magba. A folyamat hatására létrejött lökéshullám (energiája a teljes energia 99%-a!) óriási robbanást generál, amelynek milliárd fokos hőmérsékletén létrejönnek a periódusos rendszer vasnál nehezebb elemei. Ez a grandiózus jelenség a szupernóva. A csillag külső gáztömegei a robbanás hatására egyre táguló látványos, egyes esetekben hálós, máskor szálas szerkezetű alakzatokat: szupernóva-maradványokat hoznak létre.



Ezek egyik tipikus példája a Bika csillagképben található Rák-köd, amely egy 1054. évi szupernóva robbanás maradványa, jelenleg is tágul, a tágulás sebessége még ma is igen jelentős; mérete naponta egy Föld–Nap távolságnyi nő. A szupernóvák nélkül nem jöhetett volna létre élet. Ezek termelik azokat a vasnál nehezebb elemeket (réz, cink, szelén, molibdén stb.), amelyek létfontosságúak a növény- és állatvilág életfunkcióihoz. A nehéz elemek létrejöttének magyarázatára csak az 50-es években került sor, az elméletet G. és M. Burbidge, W. Fowler és F. Hoyle dolgozta ki. A fenti ábrát az első ábrával összehasonlítva, látható, hogy a HR-diagram tulajdonképpen életútjuk különböző szakaszaiban lévő csillagokat ábrázol és a csillagok – méretüktől függően – különböző útvonalakon végig haladnak a diagramon.

A 30-as években történt a másik nagy áttörés: Karl Jansky antennájával észlelte a Tejút rádiósugárzását. Ezzel elkezdődött a rádiócsillagászat korszaka. A 40-es években további fejlődést hozott ezen a területen a radarberendezések kiépítése (eredetileg háborús célokra). Ezekkel sok új rádióforrást fedeztek fel, többek között a Rák-ködöt, a Jupitert, majd egyre több extragalaktikus (a Tejút kivüli) forrást, ezek az ún. rádiógalaxisok.



George Gamow

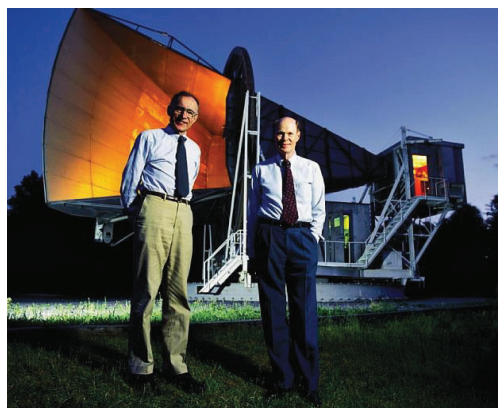
1948-ban George Gamow és Ralph Alpher újabb bizonyítékokkal állt elő a forró Univerzum hipotézis igazolására. Feltételezésük szerint a táguló gáztömeg röviddel az Ősrobbanás után, folyamatos lehűlése közben rövid időre olyan hőmérsékletű volt, amelyen végbemehetett a H-He fúzió, ezért a csillagközi anyagnak héliumot is kell tartalmaznia. Néhány év múlva feltételezésük bizonyosságot nyert: a mérések szerint a H/He arány közel akkora (80%/20%) , mint az általuk megjósolt érték. Gamow és Alpher további feltételezése az volt, hogy a H és He atommagok egy idő után elektronokat fogtak be (a folyamatot rekombinációnak nevezik) és semleges atomokká alakultak.

A rekombináció jelentős fénykibocsátással járt, ez a fény a folyamatos tágulás közben egyre hosszabb hullámú sugárzássá gyengült, de ha létezik, akkor egy mikrohullámú infravörös sugárzás formájában ma is észlelhető kell, hogy legyen. Becslésük alapján a sugárzás 3 kelvin (-273 Celsius fok) hőmérsékletnek felel meg, amely tulajdonképpen az Univerzum jelenlegi hőmérséklete kell, hogy legyen.

Az 50-es és a 60-as évek a szovjet–amerikai űrverseny jegyében teltek. 1957-ben a Szovjetunióban fellövik az első mesterséges égitestet, a Szputnyik-1-et, amely megkerüli a Földet. 1958-ban az USA Explorer űrszondája felfedezi a Föld körüli Van Allen sugárzási övezetet. Egy szovjet űrszonda (Lunyik-3) megkerüli a Holdat és lefényképezi kísérőnk addig soha nem látott túlsó oldalát. 1961-ben az első űrhajós, Jurij Gagarin űrhajóján megkerüli a Földet, egy évvel később már az USA is embert küld a világűrbe (John Glenn). A 60-as évek közepén az amerikai Mariner-űrszondák elrepülnek a Vénusz és a Mars mellett. Az amerikai Apollo-program csúcspontja: 1969-ben az első ember a Holdra lép.

A 60-as években jelentős kozmológiai felfedezések is születtek. 1963-ban felfedezték az első kvazárokat, amelyekről ma már tudjuk, hogy a legelső galaxisok maradványai. Óriási energia-kisugárzásuk onnan származik, hogy a központjukban lévő szupernehéz fekete lyukakba állandó nagy sebességű anyagbeáramlás történik. A kvazárok a legtávolabbi észlelhető égitestek az Univerzumban.

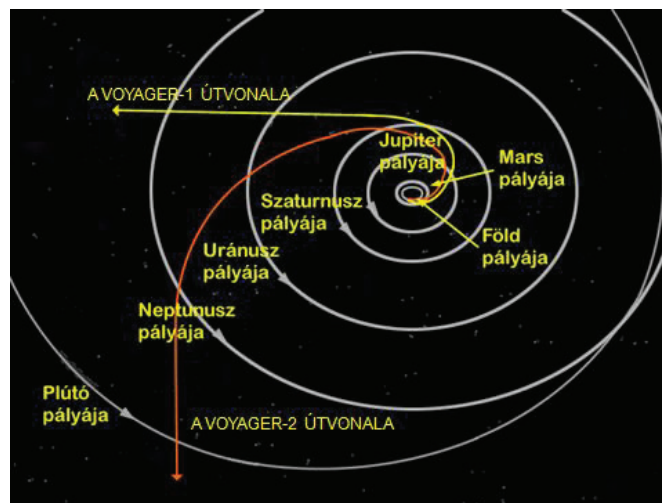
1965-ben Penzias és Wilson különleges antennájukkal New Jerseyben (USA) észlelik a Gamow és Alpher által korábban (1948) már megjósolt mikrohullámú háttérsugárzást; megállapítják, hogy az $2,7^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletnek felel meg. (Különös mozzanata a történetnek, hogy néhány évvel korábban egy orosz fizikus, Igor Novikov cikket írt a háttérsugárzásról és ott leírta, hogy Penzias és Wilson New Jerseyi antennája alkalmas lenne annak észlelésére. Sajnos, a hidegháború miatt a kommunikáció a Szovjetunió és az USA között olyan alacsony szinten állt, hogy a hír nem jutott el New Jerseybe.)



Penzias és Wilson

A 70-es években minden eddignél nagyobb szabású űrprogramok indultak a Naprendszer felfedezésére. (A médiában ezeket Kolumbusz és Magellán korszakos felfedező utazásaihoz hasonlítják.) 1977-ben felbocsátották a Voyager-1 és Voyager-2 űrszondát, a Naprendszer külső tartományainak tanulmányozására.

Felfedezések hosszú sora jelzi a két űrszonda sikeres útját: a Jupiter halvány gyűrűje, az örökké vulkános Io felszíne, az Európa jeges felszíne alatti óceán megsejtése, a Szaturnusz gyűrűjének finomszerkezete, a Neptunusz vulkanikus holdjának (Triton) felfedezése – csak a legfontosabb eredményeket említve.

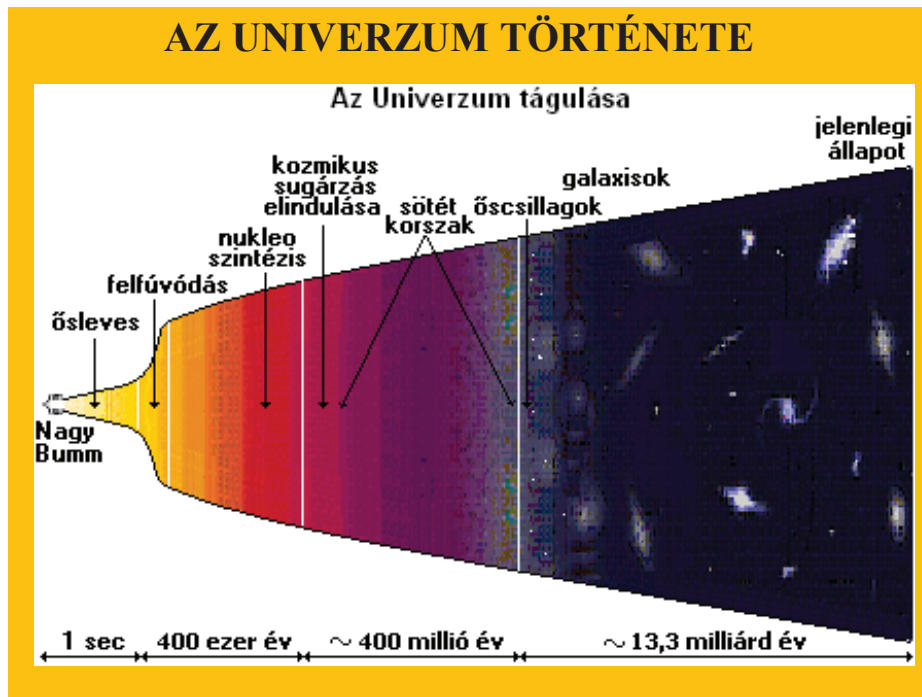


[A Voyager-1 és -2 az egyik legnagyobb léptékű vállalkozás az űrkutatás történetében. A két űrszonda energiaellátásáról radioaktív izotóp bomlási hőjét hasznosító generátor gondoskodik. A Voyager-1 (Vo-1) jelenleg (2013. október) 18 milliárd, a Voyager-2 (Vo-2) pedig 10 milliárd km-re jár a Naptól és mindkettő zavartalanul üzemel, várhatóan 2020-ig. A Vo-1 átlagsebessége 60 000km/h, a Vo-2-é 33 000km/h. Jelenlegi távolságukat tekintve az információ (elektromágneses hullám) a Vo-1-ről 156 óra alatt, a Vo-2-ről 89 óra alatt ér a földi irányító központba. Sebességükkel haladva egy űrhajó a legközelebbi csillagot (Proxima Centauri) 85 000 év, ill. 155 000 év alatt érné el.]

1981-től az amerikai űrkutatás kulcsszereplői az űrrepülőgépek voltak egészen 2010-ig. Ezek a többször felhasználható űrjárművek sok űrmisszió eszközeit és űrhajósait állították Föld körüli pályára. 1986-ban pályára állították a szovjet Mir űrállomást. (2000-ben ezt váltotta fel az azóta is folyamatosan működő Nemzetközi Űrállomás.)

A 80-as évek elején látott napvilágot az ún. inflációs (felfúvódási) elmélet. Eszerint röviddel a Nagy Bumm után röviddel (10^{-35} másodperccel) az akkor még igen kicsiny világegyetem hirtelen felfúvódott, mérete sokszorosára nőtt, majd ismét lelassult növekedése. Ekkoriban a ma ismert négy kölcsönhatás (gravitációs-, elektromágneses-, gyenge- és erős kölcsönhatás) még nem vált külön,

együtt működtek. Ennek következtében fellépett egy kvantum-gravitációs hatás, vagyis a gravitációban kisebb-nagyobb eltérések, inhomogenitások jöttek létre.



Ezek alakították ki az anyag eloszlásában azokat az összesűrűsödéseket, amelyekből később a csillagok, galaxisok létrejöttek. (Ha ez nem történt volna, sohasem jöhettek volna létre nagyobb objektumok, az egész univerzumot egyenletesen hidrogéngáz töltené be.) Ugyancsak az infláció alatt lett az Univerzum geometriája „sík” (nem kétdimenziós, hanem görbület nélküli!), tehát euklidészi.

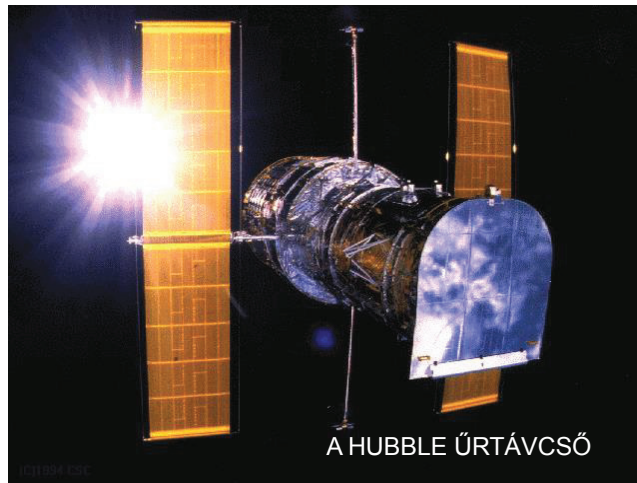
A sok mozaikból a 20. sz. végére összeállt a Világegyetem történetének nagy léptékű tablója (ld. a fenti ábrát). A Nagy Bumm után röviddel megtörtént az infláció (felfúvódás), melynek során az Univerzum korábbi méretének sokszorosára tágult. Ezt követően kvarkokból létrejöttek az atommag alkotórészei a protonok és a neutronok, majd ahogyan a lehülés folytatódott, rövid ideig 10 millió fok körüli hőmérséklet uralkodott, ezen létrejött a Gamow és Alpher által megjelölt nukleoszintézis (hélium keletkezése). A hidrogén- és a hélium-atommagok röviddel ezután befogták a már korábban meglévő elektronokat, vagyis H- és He-atomok jöttek létre (rekombináció), miközben fénykibocsátás történt. Ez a fény lett a később Penzias és Wilson által észlelt infravörös kozmikus háttérsugárzás; az eredeti fénysugarak hullámhossza ugyanis a tér tágulása következtében megnyúlt. A rekombináció befejeztével a fénykibocsátás is befejeződött és egy hosszú, kb. 400 millió éves sötét korszak kezdődött. Ez alatt a gravitáció hatására kisebb-nagyobb anyag-tömörödések jöttek létre a meglévő hidrogén és

hélium gázból, majd a folyamat előrehaladtával létrejöttek a csillagok, majd a galaxisok – a Világegyetem ismét felfénylett és lassan kialakult a mai szerkezete. (Ha figyelembe vesszük, hogy a Világegyetem becsült kora 13,7 milliárd év, a fenti ábra léptéke alapján 1cm nagyjából 1 milliárd évnél felel meg. Ennek alapján a dinoszauruszok kihalása óta eltelt 65 millió év 0.65 mm, az emberi civilizáció nagyjából 10 ezer éve 1 tized mm, honfoglalásunk pedig 1 század mm távolságra van a kép jobb szélétől.)

1990-ben helyezték földköri pályára a Hubble Űrtávcsövet, amely még ma (2013 novemberében) is működik. Megfigyelési eredményei óriási mértékben megnövelték a csillagászat és a kozmológia ismeretanyagát és sok új felismeréshez vezettek.

Az eredeti tervek szerint az űrtávcső célja (1) az intergalaktikus közeg beható vizsgálata, (2) az Univerzum távoli vidékeinek beható tanulmányozása, (3) a változócsillagok pontos megfigyelése alapján a kozmikus távolság-skála kalibrálása, majd ennek felhasználásával az ún. Hubble-állandó és a Világegyetem korának eddiginél pontosabb meghatározása.

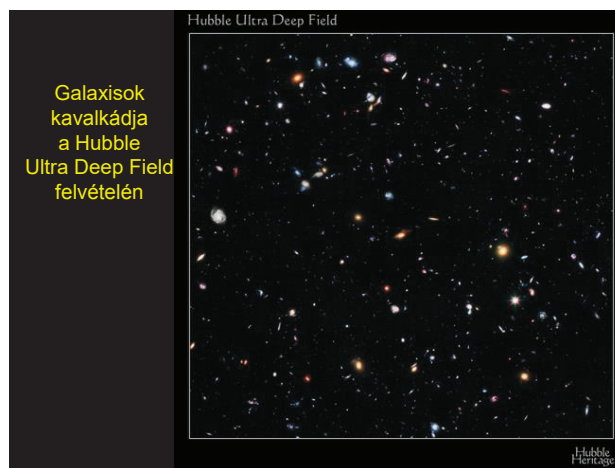
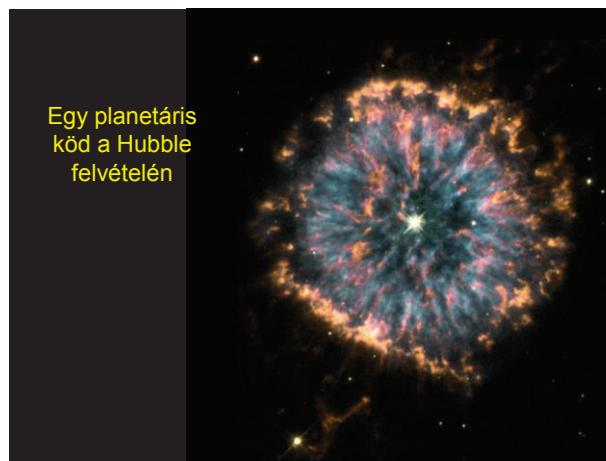
Az eddig eltelt 23 év alatt a Hubble eredményei messze túl mutattak az eredeti célkitűzésben megfogalmazottaktól. Lássunk egy rövid listát a főbb eredményekről:



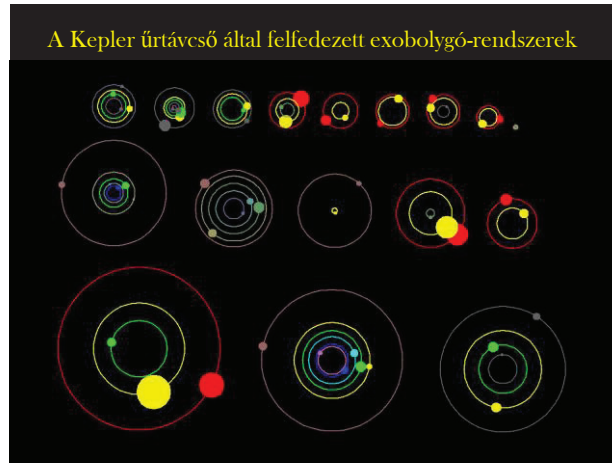
A HUBBLE ŰRTÁVCSŐ

- a változócsillagok minden eddiginél pontosabb megfigyelése alapján a Hubble-állandó (és az Univerzum korának) nagy pontosságú meghatározása;
- távoli Ia-típusú szupernóvák vizsgálata alapján a Világegyetem gyorsuló tágulásának felfedezése;
- nagy felbontású spektrumok és más adatok alapján annak megerősítése, hogy a közeli galaxisok centrumában fekete lyukak vannak, továbbá hogy szoros összefüggés van a galaxisok tulajdonságai és a fekete lyukak tömege között;

- a Shoemaker-Levy 9 üstökös Jupiterbe történő ütközésének megörökítése (1994); az első részletesen megfigyelt hasonló esemény a csillagászat történetében;
- proto-planetáris (bolygó keletkezési) korongok megfigyelése az Orion-ködben, amely extraszoláris bolygók keletkezésével (ld. később) függ össze;
- A Deep Field (Mély Ég), majd az Ultra Deep Field és az Extreme Deep Field kamerák segítségével az égbolt üresnek vélt kisméretű szegmenseiről hosszú expozíciós idejű felvételek készítése, amelyekből kiderült, hogy több milliárd fényév távolságban is rengeteg galaxis van;
- az űrfelvételek nagyszerű és hatalmas gyűjteménye a naprendszerrel és az Univerzum távoli vidékeiről (Hubble Heritage).

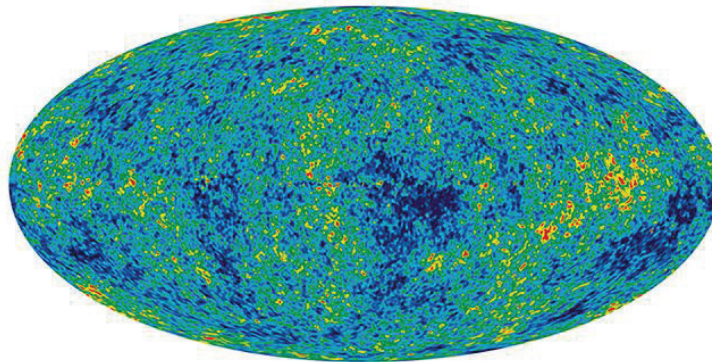


A 90-es években sok új felfedezés született, közülük is kiemelkedik kettő: az első Naprendszeren kívüli (extraszoláris) bolygók felfedezése (1995), és annak a már említett ténynek a felismerése, hogy az Univerzum gyorsulva tágul (1998).

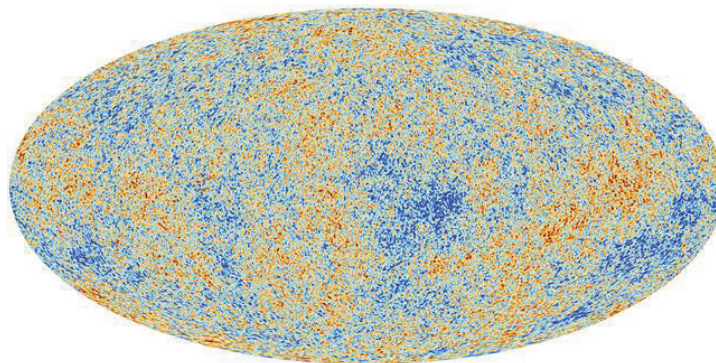


Az egyértelműen azonosított extraszoláris bolygók száma azóta 1000 fölé emelkedett; közöttük találtak néhányat, ahol a körülmények (víz jelenléte és a megfelelő hőmérséklet) alkalmasak az élet létrejöttéhez. Az Univerzum gyorsuló tágulásának felfedezése a kozmológiai elméletek újragondolását indította el. A korábban már azonosított sötét anyag mellett a gyorsuló tágulást (egyfajta antigravitációs hatást) előidéző sötét energiát tételeznek fel a legújabb kozmológiai modellekben.

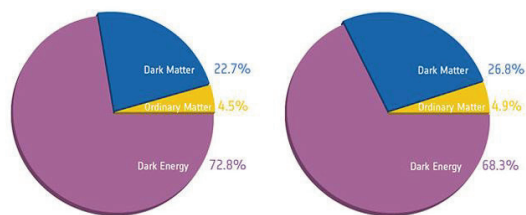
A Gamow által korábban előre jelzett, majd 1965-ben felfedezett mikrohullámú háttérsugárzás mikroszerkezetének (parányi hőmérséklet-ingadozásainak) vizsgálatára az utóbbi évtizedekben három űreszközt is felbocsátottak. A COBE 1989-ben, a WMAP 2001-ben, a Planck műhold 2009-ben kezdte el működését. Méréseik egyre pontosabb és jobb felbontású képet adtak az Univerzum keletkezése után 380 ezer évvel fennálló állapotokra; az ezredfok nagyságrendű eltérések a kezdeti Univerzum anyageloszlásában mutatkozó egyenlőtlenégekről tanúskodnak, amelyek a későbbi nagyléptékű objektumok (csillagok, galaxisok) magvát alkották. A háttérsugárzás eloszlásának részletes elemzése lehetővé tette a látható anyag, a sötét anyag és a sötét energia pontos arányainak meghatározását, továbbá bizonyítékot szolgáltatott a kezdeti infláció létezésére, valamint arra, hogy az Univerzum geometriája euklidészi. Az alábbi ábra a két űrszonda mikrohullámú égboltképét mutatja, valamint az adatok alapján a Világegyetem összetételére kapott eredményeket. (A bal alsó diagram a WMAP, a jobb a Planck mérései alapján számolt adatok. Dark matter=sötét anyag, Ordinary matter=normális anyag, Dark energy=sötét energia.)



A WMAP-űrszonda



A Planck-űrszonda



Before Planck

After Planck

Időrendi táblázat**1900.**

Max Planck közlése a kvantum-hipotézis. Annie Jump Cannon publikálja az első katalógust a csillagspektrumokról.

1905.

A speciális relativitáselmélet megjelenése (Albert Einstein).

1908.

A szibériai üstökös (Tunguszka) becsapódása.

1910.

A Herzprung-Russell diagram (HRD) közzététele. A Nagy Januári Üstökös feltűnése (nappal is látható volt).

1911.

Rutherford atommodellje.

Henrietta Leavitt felfedezi a Kefeida változó-csillagok periódusidő-fényesség kapcsolatát (a kozmikus távolságmérésnél lett később nagy jelentősége).

1913.

Niels Bohr atommodellje.

1915.

Einstein általános relativitáselmélete.

Az első fehér törpecsillag (Szíriusz-B) felfedezése.

1916.

Karl Schwarzschild elméleti úton meghatározza a fekete lyukak méretét.

1918.

Harlow Shapley meghatározza a Tejút méretét és azon belül a Nap helyzetét.

1919.

Arthur Eddington lefényképezi a Dél-Afrikai napfogyatkozást, ezzel az általános relativitáselmélet bizonyítást nyer.

1923.

Edwin Hubble az „Andromeda-köd”-ben kefeida változócsillagokat figyel meg; ezzel bebizonyosodott, hogy az Andromeda-köd valójában galaxis.

1925.

Cecilia Payne-Goposhkin meghatározza a csillagatmoszférák hőmérsékleti skáláját (O,B,A,N,G,K,M színkép-típusok).

1927.

Georges Lémaitre felvázolja a táguló világegyetem modelljét az általános relativitáselmélet egyenletei alapján.

Heisenberg felfedezi a határozatlansági relációkat.

1928.

Paul Dirac elméletileg megjósolja az antianyag létezését.

1929.

Edwin Hubble megfigyelései alapján megállapítja az Univerzum tágulását.

1930.

Subrahmanyan Chandrasekhar (indiai asztrofizikus) meghatározza az egyes csillagtípusok tömeghatárait.

Wolfgang Pauli kísérleti adatok alapján következtet a neutrínó létezésére.

1931.

Karl Jansky észleli a Tejút centrumának rádióhullámain.

1932.

James Chadwick felfedezi a neutron.

1934.

Walter Baade és Fritz Zwicky megállapítják, hogy a szupernóvákból neutroncsillagok jöhetnek létre.

1937.

Zwicky felfedezi a sötét anyagot a Coma galaxis-halmazban.

1938.

Hans Bethe kidolgozza a csillagok energiaforrásának (atommagfúzió) elméletét.

1944–1949.

Gerard Kuiper felfedezései a Naprendszer külső régiójában (a Titán légköre, az Uránusz és a Neptunusz egy-egy holdja)

1946.

Martin Ryle felfedezi az első extragalaktikus (Tejúton túli) rádióforrást a Cygnus (Hattyú) csillagképben.

1948.

Georger Gamow és Ralph Alpher megjósolják a mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás létezését.

1950.

Jan Oort feltételezi, hogy a hosszú periódusú üstökösök egy távoli hatalmas régióból származnak; ennek neve ma: Oort-felhő.

1951.

H. Ewan és E. Purcell felfedezi a csillagközi tér hidrogénjétől származó 21 cm-es hullámhosszúságú sugárzást.

1957.

A Szputnyik-1 (az első mesterséges égitest) fellövése (Sz.U.)

Amerikai és brit asztrofizikusok kidolgozzák annak elméletét, hogyan jönnek létre a nehéz elemek a csillagokban

1958.

Az Explorer-1 űrszonda felfedezi a Van Allen sugárzási övezetet a Föld körül.

1959.

A Luna-1 űrszonda elsőként hagyja el a Föld vonzáskörét.

1961.

Jurij Gagarin az első ember, aki űrhajón megkerüli a Földet.

1962.

John Glenn az első amerikai, aki űrhajón megkerüli a Földet.

A Mariner-2 űrszonda elrepül a Vénusz mellett.

1963.

Felfedezik az Univerzum legnagyobb energiájú objektumait, a kvazárokat (Marten Schmidt).

1965.

Penzias és Wilson felfedezik a (Gamow és Alpher által elméletileg megjósolt rövidhullámú kozmikus háttérsugárzást.

Leonov első „űrsétája”.

A Mariner-4 elrepül a Mars mellett.

1967.

Az első pulzár (szabályos jeleket adó neutroncsillag) felfedezése (Jocelyn Bell-Burnell és Anthony Hewish).

Az első gamma-felvillanások észlelése.

1968.

Apollo-8: az első embert szállító űrhajó, amely elhagyja a Föld gravitációs terét.

1969.

Az Apollo-11 leszáll a Holdra.

1971.

A Mariner-9 űrszonda a Mars körüli pályán kering.

A Mars-3 űrszonda leszáll a Marsra.

1973.

A Pioneer-10 a Jupiter közelében halad.

1974.

A Mariner-10 elhalad a Merkúr mellett.

R. Hulse és J. Taylor felfedez egy kettős pulzárt, amellyel bebizonyítják a gravitációs hullámok létezését.

1976.

A Viking-1 és -2 a Marson landol.

A West üstökös legfényesebb pozíciójában a Nap közelében.

1977.

Felfedezik az Uránusz gyűrűjét.

A Voyager-1 és -2 fellövése.

1979.

A Voyager-1 és -2 elhalad a Jupiter mellett.

A Pioneer-11 elhalad a Szaturnusz mellett.

Felfedezik az első gravitációs lencsét.

1980.

A Voyager-1 elhalad a Szaturnusz mellett.

Louis és Walter Alvarez publikálják elképzelésüket: a 65 millió évvel ezelőtti kihalást egy égitest becsapódása okozta.

1981.

Az űrrepülőgép első fellövése.

Alan Guth közli az univerzum inflációs (felfúvódási) elméletét.

1982.

Felfedezik az első pulzárt.

1983.

A Pioneer-10 elhagyja a Naprendszert.

1986.

A Voyager-2 elhalad az Uránusz mellett.

A Challenger űrrepülőgép felrobban, 11 fős személyzete meghal.

A szovjet MIR űrállomás első egységét pályára állítják.

1987.

Megfigyelik az 1987A-jelű szupernóvát a Nagy Magellán-felhőben (400 éve a legfényesebb szupernóva).

1989.

A Voyager-2 elrepül a Neptunusz mellett.

Pályára helyezik a COBE (Cosmic Background Explorer) műholdat a mikro-hullámú háttérsugárzás észlelésére.

A Galileo űrszonda fellövése (a Naprendszer külső tartományainak vizsgálata).

1990.

A Hubble űrtávcső fellövése.

A Magellán űrszonda radar-készüléke feltérképezi a Vénusz felszínét.

1991.

Fellövik a Compton Gamma-sugárzás észlelő obszervatóriumot.

1992.

A kozmikus háttérsugárzásban kisebb egyenetlenségeket („fodrozódásokat”) fedeznek fel, ezek lehetnek a későbbi nagyobb struktúrák magjai.

A Kuiper-övezet első égitestjeinek felfedezése.

Két, pulzár körül keringő bolygót fedeznek fel.

1993.

Felavatják a 10m átmérőjű Keck-távcsövet.

1994.

A Shoemaker-Levy 9 üstökös darabokra szakad, majd darabjai belezuhanak a Jupiterbe.

1995.

Az első Nap-típusú csillag körül keringő (extraszoláris) bolygó felfedezése (Michel Mayor, Didier Queloz).

A Galileo a Jupiter közelébe ér.

Felfedezik az első barna törpe csillagot.

1997. A Hale-Bopp üstökös láthatóvá válik (erős fénye miatt nappal is látható). Gamma-felvillanások észlelése távoli galaxisokban.

1998.

A csillagászok bizonyítékokat találnak arra, hogy az Univerzum gyorsulva tágul.

2001.

Pályára helyezik a WMAP-űrszondát (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) a mikrohullámú háttérsugárzás pontosabb elemzése céljából.

2009.

A Planck-űrszonda fellövése (a WMAP eredményeinek további pontosítása céljából).

A Kepler-műhold fellövése extraszoláris bolygók felkutatása céljából.

Felhasznált irodalom

Zeilik, M – Gregory, S.A. – Smith, E.P.: Astronomy and astrophysics. Saunders College Publishing, Philadelphia, 1992.

Herrmann, D.B.: Az égbolt felfedezői. Gondolat, Budapest, 1992.

Whitney, C.A.: A Tejútrendszer felfedezése. Gondolat, Budapest, 1978.

Ceman, R. – Pittich, E.: A Világegyetem. Slovart Print, Bratislava, 2007.

Eicher, D. (editor): Explore the Universe. Astronomy Extra Issue, 2000.

Eicher, D. (editor): Cosmology's Greatest Discoveries. Astronomy Extra Issue, 2010.