



## Az elemi részecskék standard modellje

Az ősröbbanás-elmélet kiteljesedésében fontos mozzanat annak felismerése, hogy a proton, a neutron nem elemi részecske (9. ábra).

1964-ben *Murray Gell-Mann* és *George Zweig* amerikai fizikusok részecskefizikai munkássága elvezetett az elemi részecskék standard modelljéig (SM).


A látható világ<sup>8</sup> kialakulásában fontos szerepet játszanak az SM első oszlopában lévő u-kvark, d-kvark, elektron, valamint a bozonok közül a foton és gluon (10. ábra). Az SM többi részecskéi (c-kvark, s-kvark, t-kvark, b-kvark,  $Z^0$ ,  $W^\pm$  bozonok) a részecskefizikai jelenségek mélyebb értelmezésében kapnak szerepet. A protonok és neutronok 3-3 kvarkos szubatomi részecskék, amelyek a hadronoknak nevezett részecskék csoportjába tartoznak.

A háromkvarkos hadronokat barionoknak nevezi a részecskefizika. A látható világot barionos világnak is mondhatjuk. A standard modellben a Higgs-bozon is szerepel, amelyet évtizedekig kerestek és végül 2012-ben a Nagy Hadronütköztető segítségével találták meg. Létezését *Peter Higgs* az SM alapján jósolta meg. A Higgs-tér bozonja felelős a többi részecske tömegéért, a tömeg nélküli fermionok a Higgs-térrel kölcsönhatásban tömeget nyernek.

A standard modellben a fermionok anyagi részecskék, a bozonok az erőhordozók. A fermionoknak léteznek antirészecskéi (ezeket általában felülvonással jelöljük), amelyek elektromos töltésük előjelében különböznek, a többi adat (tömeg, spin) változatlan. Például az elektron antirészecskéje a pozitron. Az u-kvark elektromos töltése  $+2/3$ , az anti u-kvark elektromos töltése  $-2/3$ . A d-kvark elektromos töltése  $-1/3$ , antirészecskéjének ugyanezen paramétere  $+1/3$ . A neutrónoknak nincs elektromos töltése, a részecske-antirészecske megkülönböztetést a leptonszámmal<sup>9</sup> jellemezhetjük. Összetett részecskék (például

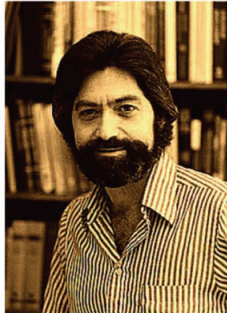
<sup>8</sup>Van egy nem látható világ is sötét anyaggal és sötét energiával.

<sup>9</sup>*Marx György* nevéhez fűződik a fogalom megalkotása 1951-ben. Például az elektronneutrínó leptonszáma  $+1$ , anti-elektronneutrínó leptonszáma  $-1$ .

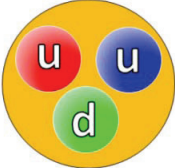


**Murray Gell-Mann**  
1929-2019  
amerikai fizikus

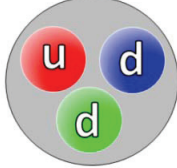
**1964:**  
**A hadronok egyszerűen felépíthetők három kvarkból:**  
**u-kvarkból, d-kvarkból.**



**George Zweig**  
1937-  
amerikai fizikus



**Proton**



**Neutron**

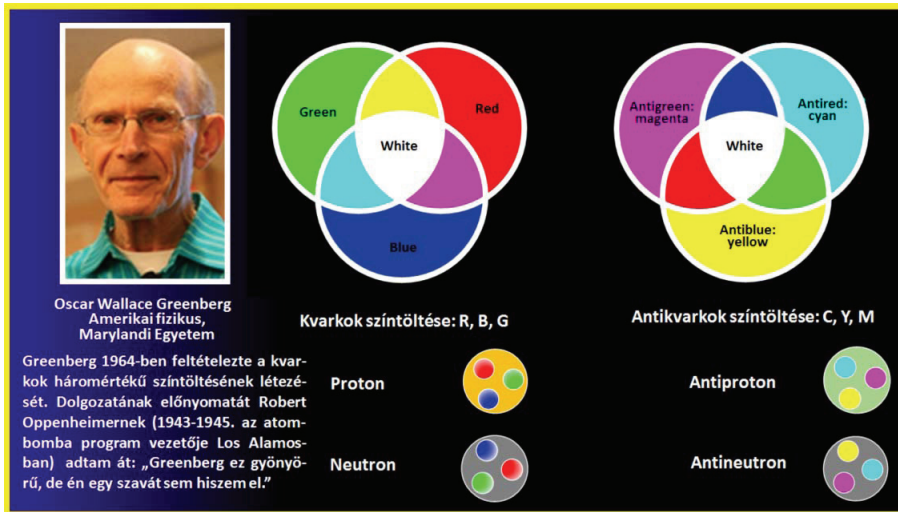
9. ábra. A proton, a neutron nem elemi részecskék, kvarkokból épülnek fel.

proton) antirészecskéi anti-elemirészecskékből tevődnek össze. A proton szerkezete  $p = uud$ , az antiprotoné  $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$ . A neutron szerkezete  $n = udd$ , az antineutroné  $\bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$ .

A fermionok spinje  $1/2$ , a bozonoké  $1$ . A Higgs-bozon spinje  $0$ . A részecskék tömegét nem csak  $kg$ -ban lehet kifejezni, hanem az einsteini tömeg-energia azonosság elve ( $E = mc^2$ ) alapján  $eV/c^2$  egységben is. Ennek a táblázatban használt prefixumai  $M$  (mega,  $10^6$ ) és  $G$  (giga,  $10^9$ ). Például az elektron tömege  $0,511 \text{ MeV}/c^2$ , míg a tau-részecske tömege  $1,777 \text{ GeV}/c^2$ . A fermionokat tekintve, az első oszlopban lévő kvarkok és leptonok (u-kvark, d-kvark, elektron, elektronneutrínó) a legkönnyebbek. Az SM-ben második oszlop tagjai már nehezebbek, a legnehezebb fermionok pedig a harmadik oszlopban találhatóak. A bozonok közül a fotonnak és gluonnak nincs tömege, míg a  $Z^0$  és  $W^\pm$  bozonok jelentős tömeggel rendelkeznek. A második legnehezebb elemi részecske (a t-kvark után) a Higgs-bozon. Az elektron töltése  $-1$ , ugyanennyi a müon és tau-részecske töltése is. Az

10. ábra. Van körülöttünk egy látható világ, amely kvarkokból, leptonokból épül fel, a bozonok aktív közreműködésével.

Standard Modell				Bozonok		
Fermionok	Kvarkok	<b>u</b> u-kvark 2,3 M 2/3 1/2	<b>c</b> c-kvark 1,27 G 2/3 1/2	<b>t</b> t-kvark 173 G 2/3 1/2	<b><math>\gamma</math></b> foton 0 0 1	
		<b>d</b> d-kvark 4,8 M -1/3 1/2	<b>s</b> s-kvark 95 M -1/3 1/2	<b>b</b> b-kvark 4,2 G -1/3 1/2	<b>g</b> gluon 0 0 1	<b><math>W^{+-}</math></b> 80,4 G -1 +1 1
		<b>e</b> elektron 0,511 M -1 1/2	<b><math>\mu</math></b> müon 105,7 M -1 1/2	<b><math>\tau</math></b> tau 1,777 G -1 1/2	<b><math>Z^0</math></b> 91,2 G 0 1	
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrínó <2,2 0 1/2	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrínó <0,17 M 0 1/2	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrínó <15,5 M 0 1/2	<b>H</b> Higgs 125 G 0 0		
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrínó <2,2 0 1/2	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrínó <0,17 M 0 1/2	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrínó <15,5 M 0 1/2	<b>Tömeg [eV/c<sup>2</sup>]</b> <b>Töltés</b> <b>Spin</b>		



11. ábra. Kvarkisméltés lépett fel egyes hadronokban. A Pauli-féle kizárási elv érvényesítésére Greenberg bevezeti a kvarkok, gluonok színtöltését.

u-, c-, t-kvarkok töltése  $+2/3$ , a d-, s-, b-kvarkok töltése  $-1/3$ . Nincs elektromos töltése a fotonnak, gluonoknak, Higgs-bozonnak és a három neutrínónak.

## A kvarkok, gluonok színesek

A proton 3 kvarkból épül fel, szerkezete – mint már szerepelt – u-kvark + u-kvark + d-kvark. A neutron összetétele udd. A Pauli-féle kizárási elv szerint az azonos kvantumszámú kvarkisméltődés egy rendszeren belül nem megengedett. *Oscar Wallace Greenberg*<sup>10</sup> amerikai fizikus a hadronokban előforduló kvarkisméltődés problémáját azzal oldotta fel, hogy bevezette a színtöltés, mint új kvantumszám fogalmát és színeredőként színsemlegességet (white) írt elő (11. ábra). A kvarkok színtöltése vörös, zöld, kék lehet; ezek színeredője fehér. Az antikvarkok színtöltése cián, magenta, sárga – ezek eredője is fehér. Az ábrán láthatjuk, hogy a proton (uud), a neutron (udd) kvark színei RGB, ezek színeredője fehér (white). Az antiproton ( $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ ), az antineutron ( $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ ) kvarkszínei cyan, magenta, yellow; amelyek színeredője ugyancsak white.

Nem csak a kvarkok színesek, hanem az erős kölcsönhatást közvetítő gluonok is, amelyek a szupererőről levált erős kölcsönhatás bozonjai. Ezek már a Big Bang utáni 1 ns időpontban rendelkezésre álltak és várták, hogy közreműködhessenek a hadronba záródás folyamatában.

A színtöltés bevezetésével a Pauli-féle kizárási elv úgy telje-

sül, hogy a protonban a két u-kvark eltérő színtöltésű. A neutronban a két d-kvark is eltérő színtöltésű. Egy rendszeren (hadron) belül nincs jelentősége annak, hogy melyik részecskénél kezdjük az RGB színek kiosztását. Például az  $u(R), u(G), d(B) = u(G), u(B), d(R)$ . Mint látható teljesül a színeredő egyenlő fehér feltétel. Az is teljesül, hogy a két u-kvark eltérő színű, tehát eltérő kvantumállapotúak.

A gluonok szín-antiszín színerezűek, 6 ilyen színes eredőjű gluon van (R-Y, R-M, G-C, G-Y, B-C, B-M) (12. ábra). A gluonok másik csoportjának színeredője szintelen,

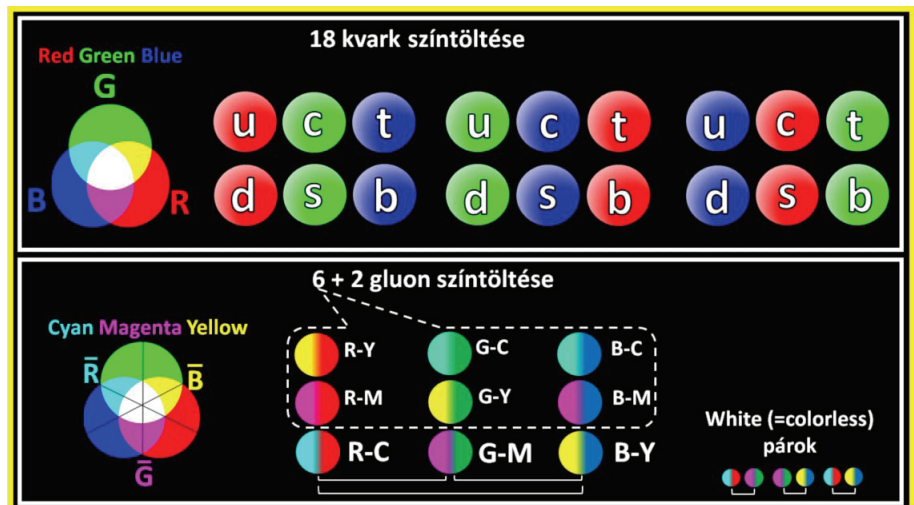
colorless. Színszerkezetük szín-saját antiszín kombinációjúak, (például kék-sárga). Három ilyen tulajdonságú colorless pár van (R-C, G-M, B-Y), de ezek közül csak egy colorless-pár szerepelhet együtt más színes eredőjű gluonokkal. A gluonokra nem érvényes a Pauli-féle kizárási elv, egy rendszerben több azonos kvantumállapotú gluon jelenléte megengedett.

## Gravitációs összeomlás, tágulás, fekete lyukak

*Karl Schwarzschild* német fizikus már 1916-ban, egy lövészárokban megoldotta Einstein gravitációs egyenletét és kiszámította a később róla elnevezett  $r_s$  Schwarzschild-sugarat, amely égitestek számára határértéket jelent. Ez az a sugár, amely alatt az égitest részecskéi közötti vonzóerőnek visszafordíthatatlanul gravitációs összeomlást (kollapszust) kell okoznia:

$$r_s = \frac{2 G m}{c^2},$$

12. ábra. A kvarkok, gluonok színtöltése egy új kvantumszám.



<sup>10</sup><https://academictree.org/physics/peopleinfo.php?pid=167089>

ahol  $G$  a gravitációs állandó,  $m$  az égitest tömege,  $c$  a vákuumbeli fénysebesség. Minden olyan objektumot, amelynek sugara kisebb, mint a Schwarzschild-sugara, fekete lyuknak nevezünk. Einstein nem hitte, hogy valóban léteznek a fekete lyukak, amelyek vonzásából még a fény sem szabadulhat.

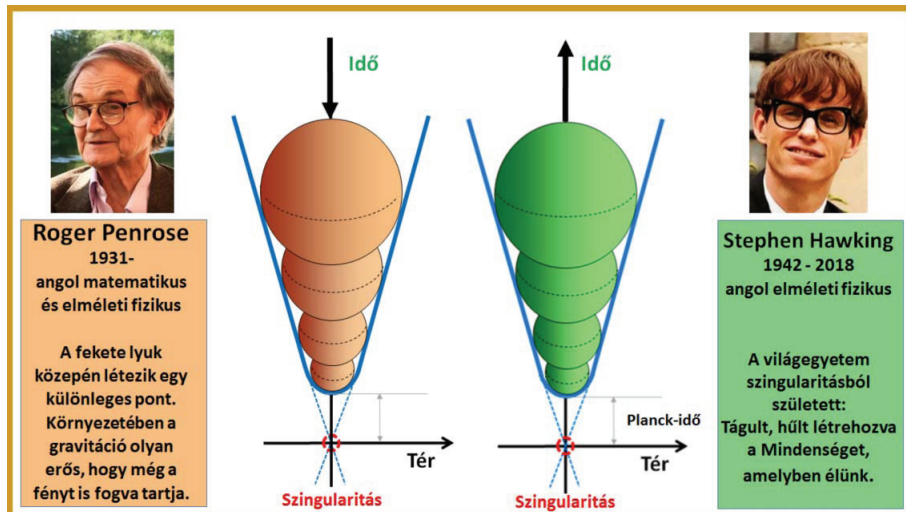
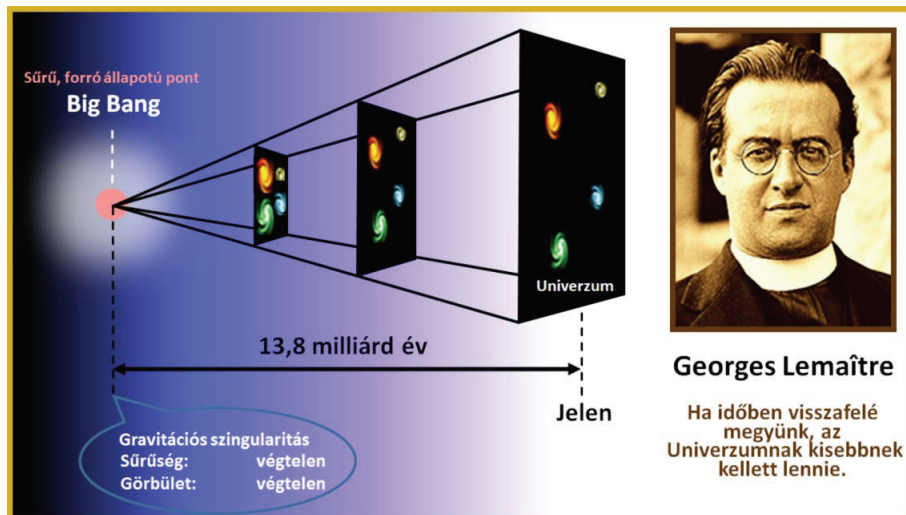
1965-ben jelent meg *Roger Penrose* angol kutató cikke<sup>11</sup> a fekete lyukak kialakulásáról (13. ábra). Penrose megmutatta, hogy gravitációs összeomlás során a megfelelő tömegű csillagból fekete lyuk keletkezhet. A fekete lyuk középpontjában szingularitást<sup>12</sup> rejteget.

*Stephen Hawking* angol fizikus 1965-ben meghallgatta Roger Penrose előadását a gravitációs összeomlásról és a szingularitásról. Felmerült benne a kérdés, hogy működhet-e fordítva is az összeomlás folyamata? Penrose elméletében az időirányt megfordítva Hawking bizonyította, hogy létezhet a fordítottja is. 13,8 milliárd évvel ezelőtt az ősrobbanás olyan esemény volt, mint egy fekete lyuk keletkezése visszafelé játszva.

## Az ősrobbanás-elmélet, Big Bang

Georges Lemaître 1927-ben hozta nyilvánosságra ősrobbanás-elméletét, amely az Univerzum keletkezését és fejlődését tárja fel. Az elmélet koncepciójában dinamikus világszemléletű. A huszadik század elején a statikus szemlélet volt az elfogadott nézet. Néhány kutatási eredmény, amely az ősrobbanás-elmélet dinamikusságát és a keletkezés tényét támogatta:

14. ábra. Georges Lemaître ősrobbanás-elméletét Einstein gravitációs egyenletéből bontotta ki.



13. ábra. Penrose a fekete lyukakkal kapcsolatos kutatásaiért 2020-ban Nobel-díjat kapott. Hawking megfordította az idő irányát Penrose vizsgálódásaiban.

- Stephen Hawking megmutatta, hogy a Világegyetem szingularitásból született, válaszul *Fred Hoyle*-nak, aki nem fogadta el, hogy az Univerzumnak volt kezdete.

- *Edwin Hubble* mérte az Univerzum tágulását, ezzel cáfolta a statikus szemléletet.

- Az elemi részecskék standard modellje Lemaître halála után bontakozott ki, de a benne megjelenített gondolat<sup>13</sup> jól kapcsolódik az ősrobbanás-elmélet fejlődési vonalához.

A kurzusban nem csak Lemaître eredeti elméletét mutatjuk be, hanem a fizika fejlődésével keletkezett új eredményeket is beépítettük az ősrobbanás-elméletbe.

## Big Bang

Lemaître szerint az Univerzum tágul, ha a jelenből a múlt felé haladunk, mérete egyre kisebb lesz (14. ábra). A csökkenő térfogatban az egész Univerzum mindig benne lesz, más és más paraméterű állapotokban. 13,8 milliárd évet visszapörgetve eljutunk egy ponthoz, amit évtizedekkel később Hawking az Univerzum kezdetének tekintett. Ebben a pontban a komprimálás miatt az anyag paraméterei, az energia, nyo-

g

<sup>11</sup>R. Penrose: Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys. Rev. Lett.* 14 (1965) 57–59.

<sup>12</sup>Singularitás: a gravitációs mezőt leíró modellben végtelen mennyiségek fordulnak elő.

<sup>13</sup>Az Univerzum tágul és hűl. Anyagi struktúrák a gravitációs mezőtől kiindulva fejlődnek a bonyolultabb rendszerek kialakulása felé. A hőmozgás csillapodása lehetővé teszi egyes szerkezetek kifagyását.



15. ábra. A kurzusban a Planck-idő utáni Univerzummal foglalkozunk.

A szupererő felbomlik kölcsönhatásokra

Az Univerzum tágul és hűl, a szupererő felbomlik a négy kölcsönhatásra, kialakulnak az erős, elektromágneses, gyenge és gravitációs kölcsönhatások (16. ábra). Közvetítő részecskéik a gluon, a foton, a  $Z^0$ , a  $W^\pm$  és a graviton. A közvetítő részecskéket a standard modellben bozonoknak nevezzük.<sup>14</sup>

Kozmikus infláció, felfúvódás

Egy felfúvódás módosíthatja az Univerzum geometriáját.

más, hőmérséklet, a téridő görbülete rendkívüli értékeket vesz fel. Ez a hely a gravitációs szingularitás. Ekkor keletkezik a Big Bang esemény. Viselkedését a jelenlegi fizikai ismeretek felhasználásával nem lehet leírni. Legyen a Big Bang esemény a téridő 0 pontja, amikor kezdődik a robbanásszerű tágulás.

### Planck-idő

13,8 milliárd évvel ezelőtt keletkezett az Univerzum egy robbanásban (15. ábra). A robbanás pillanatától a téridő tágulni kezdett, és ma is ezt teszi. Az Univerzum folyamatosan bővül. A Big Bang után eltelik  $5,4 \cdot 10^{-44}$  s, a Planck-idő. Az Univerzum történetének legkorábbi, megismerhető időszaka. Ennél rövidebb időtartam alatt nincs értelme összehasonlítani az Univerzum két egymást követő állapotát. A Big Bang pontban, a szingularitásban végtelen a sűrűség, végtelen a téridő görbülete.

Az ellentmondásokat elkerülhetjük, ha nem  $t = 0$ -tól, hanem a Planck-időtől kezdődően vizsgáljuk az Univerzumot.

Ismert geometriák a hiperbolikus (negatív görbület), lapos (a görbület nulla), gömb (pozitív görbület) a 17. ábrán láthatók.

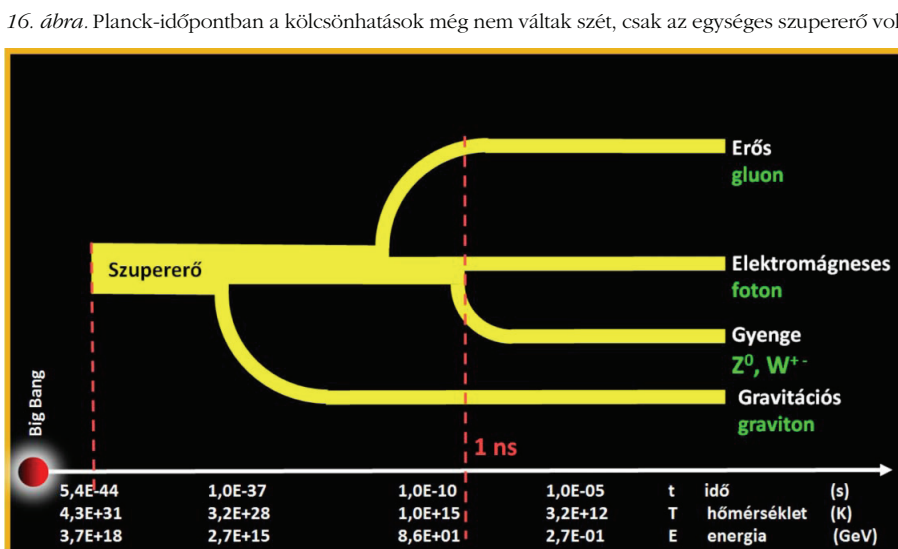
A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás fontos adatforrás a korai Univerzumból. A WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) űrszonda (2001) mérte az Univerzum tényleges/kritikus sűrűségét és  $1,02 \pm 0,02$  értéket kapott. Ha a hányados 1,00, akkor az Univerzum lapos. A lapos univerzum nem alakulhatott volna ki azzal a tágulási szorzóval, ami az Univerzum történetében ismert és elfogadott volt.

Alan Guth amerikai elméleti fizikus 1981-ben javasolta, hogy az ősrobbanás-elméletben a forró Univerzum a Big Banghez közeli időben exponenciálisan táguljon, ezáltal az a laposabbnál is laposabbá váljon.

A felfúvódás javítja a laposságot, a 17. ábrán jobbra, alul nyomon követhetjük a jól felfújt léggömb példáján. Feltételezhetjük, hogy az ősrobbanás kezdeti alakja pozitív görbületű gömb volt. A felfúvódás növeli a görbületi sugarat, a felületen javul a laposság. Minél nagyobb a görbületi sugár, annál kisebb a görbültség mértéke.

Az Univerzum története a 13,8 milliárd évvel ezelőtti, ősrobbanással (Big Bang) kezdődött. Ezt rövid ideig tartó ( $10^{-36}$ – $10^{-32}$  s), de intenzív tágulás követte. Az infláció során az Univerzum  $10^{78}$ -szorosára növelte méretét, hőmérséklete csökkent. Az inflációnak jelenleg nincs bizonyítéka. Az igen költséges, bonyolult CMB kutatások eddig nem hozták a várt eredményt.

<sup>14</sup>Graviton a gravitációs kölcsönhatás feltételezett közvetítő részecskéje. Még nem találták meg, ezért az elemi részecskék standard modelljében nem szerepel a bozonok között.



## Kvarkok, elektronok keletkezése

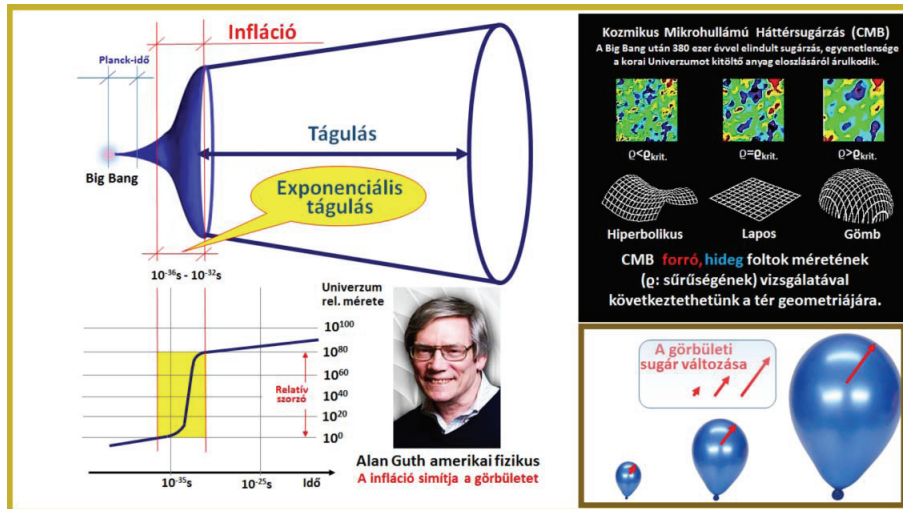
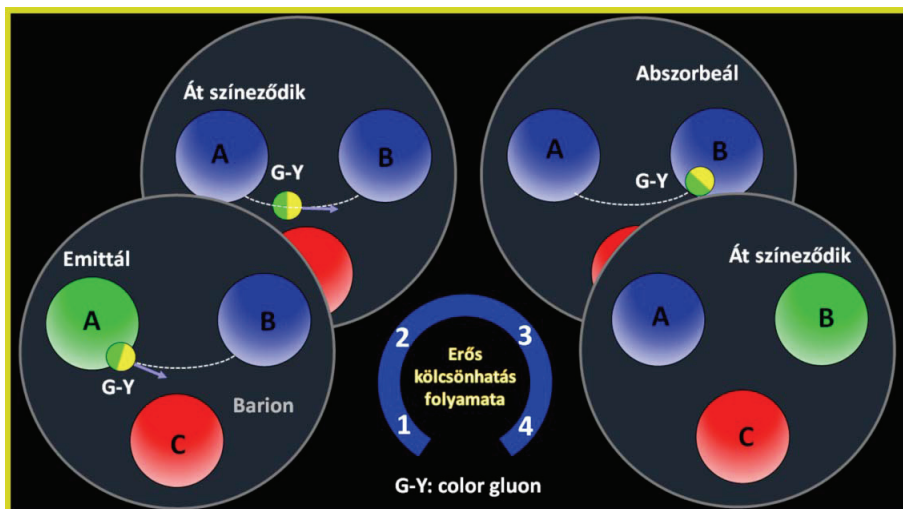
A kvarkok keletkezésének időpontjában ( $t = 10^{-12}$  s) a hőmérséklet  $10^{16}$  K. Megindul a kvark-antikvark ütközés és az annihiláció (18. ábra). Ha a folyamatban ugyanannyi részecske lenne, mint antirészecske, akkor ezek páronként annihilálnának, világunk tisztán sugárzásból állna. Ezzel szemben van egy látható világunk. Ez csak úgy lehetséges, ha több az anyag, mint az antianyag, például egy milliárd antirészecskére csak eggyel több ( $10^9 + 1$ ) részecske jutna, a többletből is felépülhetne a látható világ.

A Big Bang után 1 másodperccel az elektron-antielektron annihilációjából győztesen kerül ki az elektron  $(10^9+1)/10^9$  anyag/antianyag arány mellett).

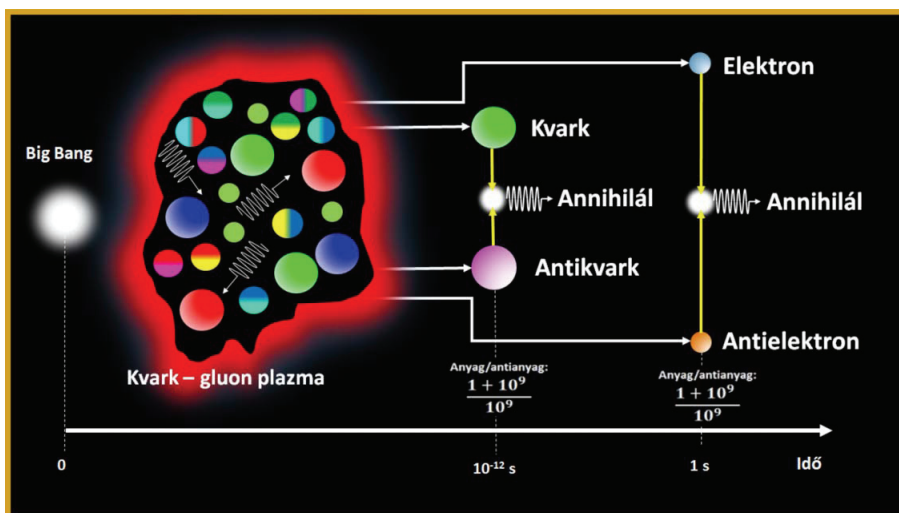
## Az erős kölcsönhatás folyamata, hadronba záródás

A Big Bang utáni  $10^{-6}$  s időpontban,  $10^{13}$  K hőmérsékleten a kvarkok hadronba záródnak az erős kölcsönhatás alatt. A kvarkoknak, gluonoknak van színtöltése, ez a kvarkok között fellépő erős kölcsönhatás forrása. A gluonok közvetítik az erős kölcsönhatást két kvark között: az egyik kvark gluont emittál, a másik kvark ezt ab-

19. ábra. Zöld-sárga színes eredőjű gluon adogatása két kvark között.



17. ábra. A különböző méretre felfújt léggömbök a „laposnál is laposabb” kijelentést szemléltetik.



18. ábra. 1 ps időpont: egy kicsit több a kvark az Univerzumban, mint az antikvark. 1 s időpont: ugyanilyen arány érvényesült az elektron-antielektron párra is.

szorbeálja. Ma már szabad kvarkok nincsenek, mert a gluon adogatás-fogadás folyamat következtében a szabad kvarkok mind hadronba zárultak.

A színes (color) gluonokkal közvetített erős kölcsönhatás jellemzője, hogy a folyamat alatt a barion<sup>15</sup> kvarkjai átszíneződnek (19. ábra), míg a színtelen (colorless) gluon által közvetített erős kölcsönhatás folyamata nem okozza a barion kvarkjainak átszíneződését (20. ábra).

Tekintsük a háromkvarkos (A, B, C) barionokban lejátszódó erős kölcsönhatás fo-

<sup>15</sup>A három kvarkos hadront például a proton, neutron barionnak is nevezzük.

lyamatát a 19. ábrán. Mivel a barion színeredője szintelen kell legyen, a benne lévő három kvark színe vörös (C), zöld (A) és kék (B). A kívánt feltételt kielégíti. A kölcsönhatásban résztvevő egyik kvark (A) színes (color) eredőjű G-Y gluont emittál és ezt egy másik kvark (B) abszorbeálja. A folyamat közben ez a kvark átszíneződik (színt cserélnek), így végül a barion három kvarkja eleget tesz a Pauli-féle kizárási elvnek: a vörös, zöld és kék kvarkok színeredője fehér lesz.

Részletesen az erős kölcsönhatás folyamata: az „A” zöld kvark G-Y színes gluont emittál. Amint elhagyja az „A” kvarkot, az „A” kvark átszíneződik kékre. G-Y gluont „B” kvark abszorbeálja, „B” kvark átszíneződik zöldre. A színes gluon az emittálás, abszorbeálás folyamatban színcserét hoz létre az érintett két kvark között, a harmadik kvark nem vesz részt a kölcsönhatásban, színtöltése változatlan (vörös) marad.

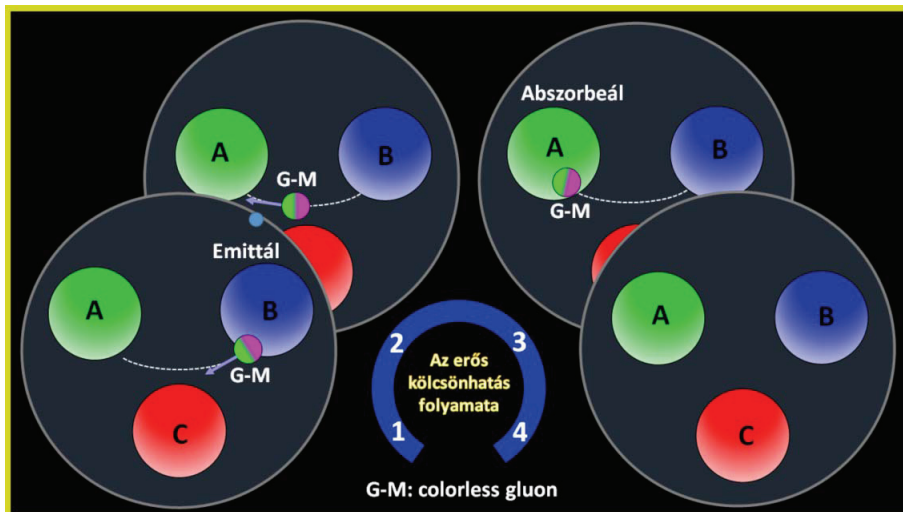
A 20. ábrán a barion „B” kvarkja G-M colorless gluont emittál, „B” kvark nem színeződik át, marad kék. Az „A” kvark abszorbeálja G-M colorless gluont, az „A” kvark nem színeződik át, marad zöld színű. A vörös „C” kvark nem vett részt a kölcsönhatásban, színtöltése változatlan. Colorless gluon esetén a barion kvarkjainak színtöltése változatlan maradt. A gluonok kvarkokat ragasztanak össze és hadronokat építenek fel.

Gluon-gluon között is működhet az erős kölcsönhatás, miközben a kvarkok hadronba záródnak.<sup>16</sup>

$10^{-6}$  s időpontban tömegesen megindult a kvarkok és gluonok hadronba záródása az erős kölcsönhatás közreműködésével. Létrejöhettek a neutronok, protonok (21. ábra). A standard modell adatai alapján az u-kvark elektromos töltése  $+2/3$ , a d-kvarké  $-1/3$ . A 21. ábrán nyomon követhetjük, hogy a neutron elektromos töltése 0, a protoné  $+1$ .

### Atommagok keletkezése

Az atomok tömegének legnagyobb része az atommagban van, amely protonokból és neutronokból áll. A Big Bang utáni századik másodpercben keletkeztek az atomma-



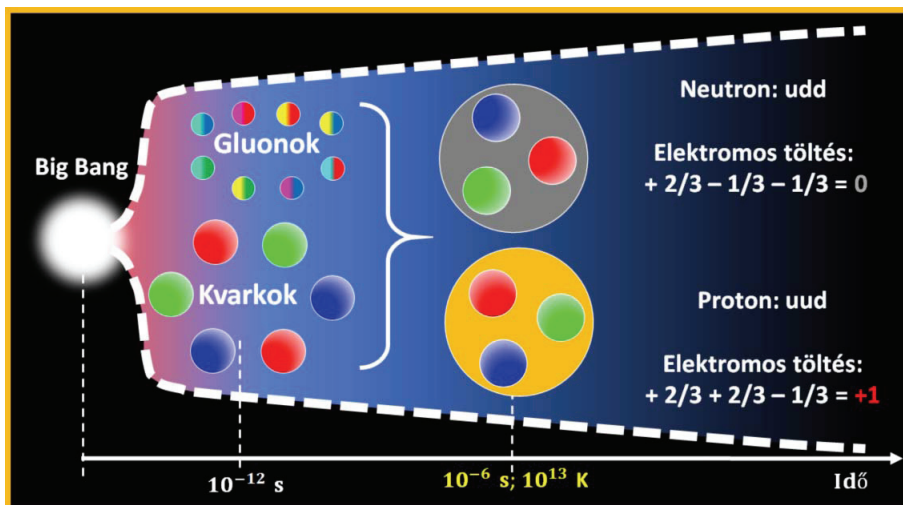
20. ábra. A zöld-magenta színtöltésű közvetítő részecskét, az úgynevezett colorless gluont emittálja a barion egyik kvarkja és a másik kvark ezt abszorbeálja. A barion kvarkjai nem színeződnek át.

gok. A protonok és neutronok összege az atom tömegszámát adja; a protonok száma pedig az atom rendszámával egyenlő. Ezt a két jellemzőt a vegyjel bal oldalán szokás megjeleníteni; alul a rendszámot, felül a tömegszámot. Például  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Ebben az uránmagban 92 proton és  $(235 \text{ nukleon} - 92 \text{ proton})$  143 neutron van.

Használatos a következő jelölés is:  ${}^4\text{He}$ , ahol nincs megadva a rendszám, mivel az a vegyjelből és annak a periódusos rendszerben elfoglalt helyéből következik. A magban lévő protonok taszítják egymást, a mag azért nem hullik szét, mert működik a magerő, amely a proton-proton közti taszítást kompenzálja. A magerő – egyik értelmezése szerint – a szórt vagy maradék erős kölcsönhatás következménye.

100 másodperccel a Big Bang után,  $10^9$  K hőmérsékleten létrejöttek a hidrogén-1, hidrogén-2 (deutérium), hidrogén-3 (trícium), hélium-4 izotópok magjai (22. ábra). A periódusos rendszer nehezebb elemei többnyire a csillagokban keletkeztek, majd a csillag halálával szóródtak szét az Univerzumban.

21. ábra. Elektromos töltések hadronba záródás után.



<sup>16</sup>The Structure of the Proton. YouTube.

## Elektronbefogás

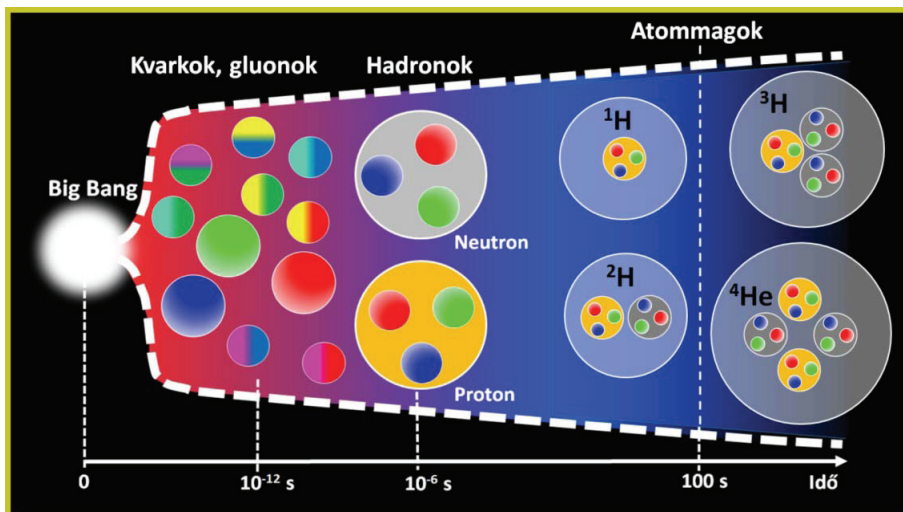
Az atom rendszáma megegyezik a magban lévő protonok számával. Az atom semlegeségének feltétele, hogy az atom fő- és alhéján ugyanennyi elektron legyen (23. ábra). Egy adott atomnak több elektronehéja is lehet, ezek magtól való távolsága növekvő energiájú pályákat jelentenek, jelölésükben számokat, betűket használunk: 1 (K), 2 (L), 3 (M), 4 (N)... Az elektronehéjak *s*, *p*, *d*, *f* alhéjakra bomlanak. Például a mangán-55 izotóp rendszáma 25, tömegszáma 55. A magban 25 proton és 30 neutron van, fő- és alhéjakon összesen 25 elektron található az alábbi eloszlásban:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^5$  (a felső index az elektronok számát jelenti). A 4s alhéj betöltése megelőzi a 3d alhéjat, mert 4s energiaszintje kisebb, mint a 3d energiaszintje.

Az elektronbefogás a Big Bang után 380 ezer évvel történt. Milyen előzmények voltak, hogy semleges atomok létrejöhessenek (24. ábra)?

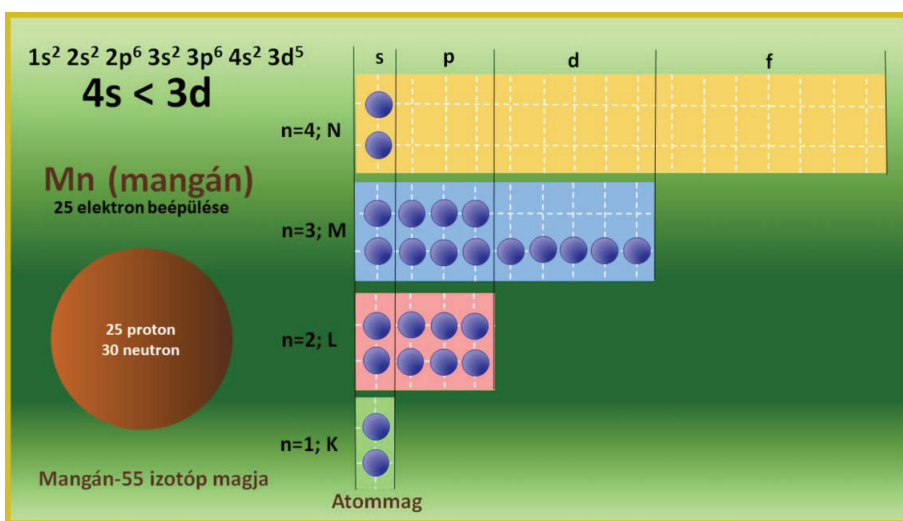
A kvarkok-antikvarkok annihilációjában keletkeztek a kvarkok  $(10^9+1)/10^9$  anyag/antianyag arány mellett,  $10^{-12}$  s időpontban. 1 ns-ra kifagytak a kölcsönhatások, rendelkezésre állt az erős kölcsönhatás bizonnya a gluon, az elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéje a foton. 1  $\mu$ s időpontban gluoncserével a kvarkok hadronba záródtak. 1 s elteltével zajlott az elektron-pozitron annihiláció, megjelentek az elektronok. 100 s után már működnek a magerők, létrejönnek az atommagok. 380 ezer év elteltével megszülettek a semleges atomok.

## Kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (25. ábra)

1948-ban George Gamow és doktoranduszhallgatói megjósolták, hogy az ősröbbanás-

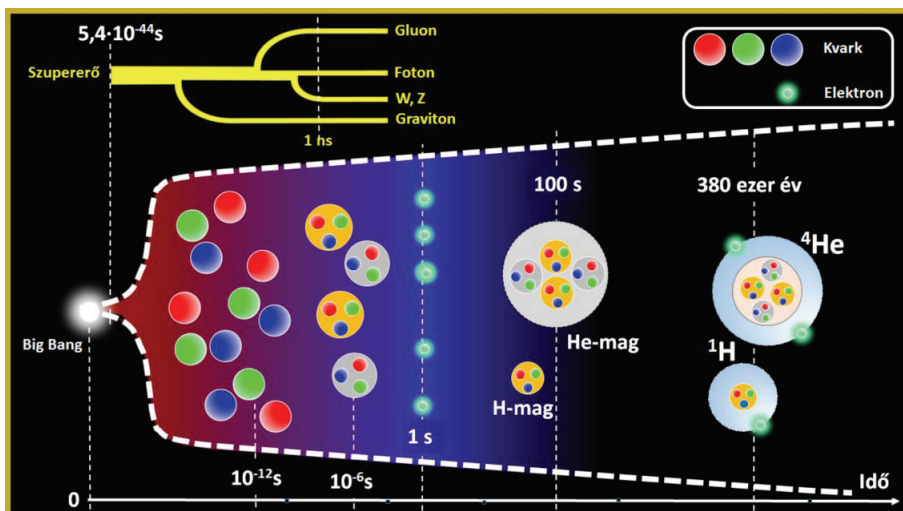


22. ábra. A hélium-4 atommagban két proton van. Ezek a Coulomb-erő miatt taszítják egymást, az atommag mégis stabil, mert működnek a magerők.



23. ábra. Az elektronburok belülről, az atommag felől épül kifelé.

24. ábra. 1 pikoszekundum időpontban léteznek a kvarkok. 1 nanoszekundumra szétváltak a kölcsönhatások, 1 mikroszekundumra a kvarkok hadronba záródtak. 1 másodperc: elektron-pozitron annihilációban győzedelmese az elektronok. 100 másodperc: könnyű atommagok keletkeznek. 380 ezer év: a pozitív magok elektront fognak be.



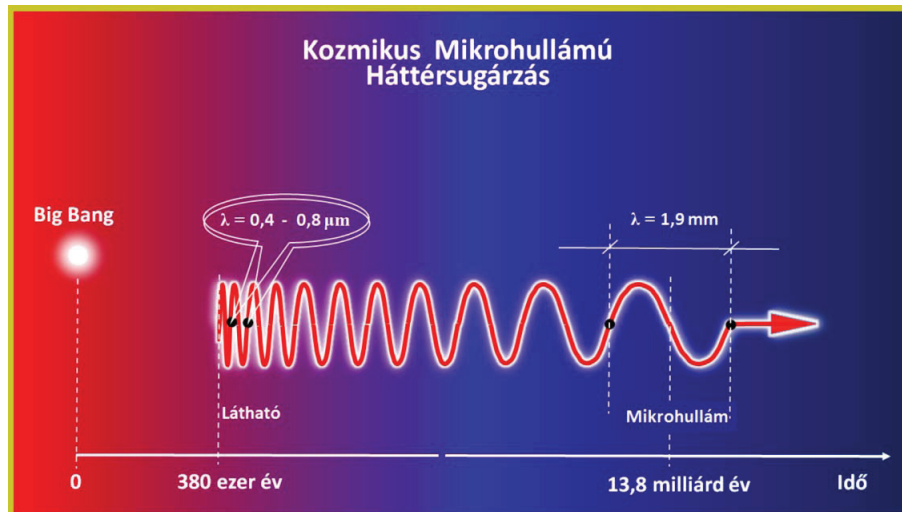
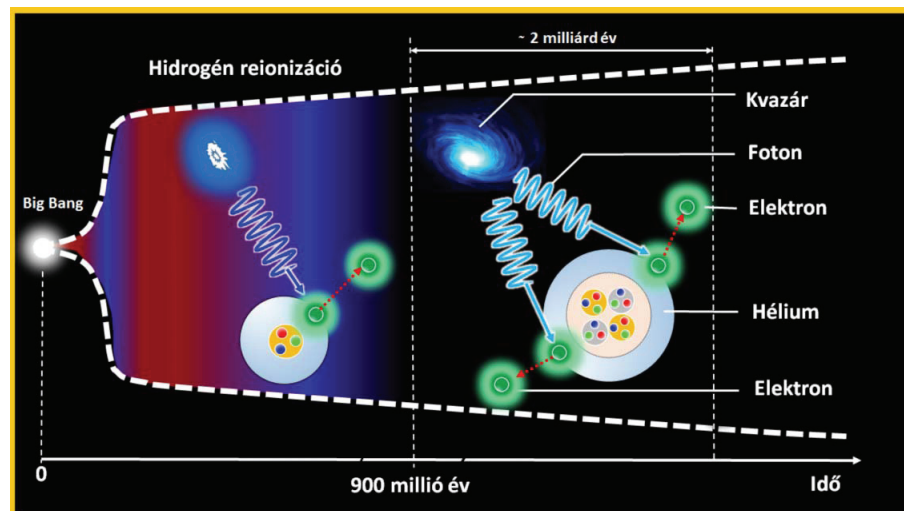


nak nyomot kellett hagynia az Univerzumban. 1965-ben Dicke és Peebles a Princetoni Egyetemen is arra az elméleti megállapításra jutottak, hogy az ősrobbanásnak nyoma kell legyen az Univerzumban. Keresni kezdték. 1965-ben a Bell Telephone Laboratories Crawford Hill-i telephelyén Arno Penzias és Robert Wilson egy használaton kívüli, hírközlési műholdkövető, 15 méteres, kürt alakú, mikrohullámú antennát kezdtek használni az Univerzum vizsgálatára. Az antennát az égboltra irányították és 2 K hőmérsékletet mértek. Penzias és Wilson ennek okát nem értették. Még ebben az évben a princetoni kutatók Crawford Hillbe látogattak. Vezetőjük, Dicke megállapította, hogy a Penzias és Wilson által mért 2 K hőmérséklet a keresett háttérsugárzás következménye. Miután a csoport visszatért Princetonba, Dicke mondta: „Fiúk, megelőzték minket”. Penzias és Wilson 1978-ban a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezéséért Nobel-díjat kapott.

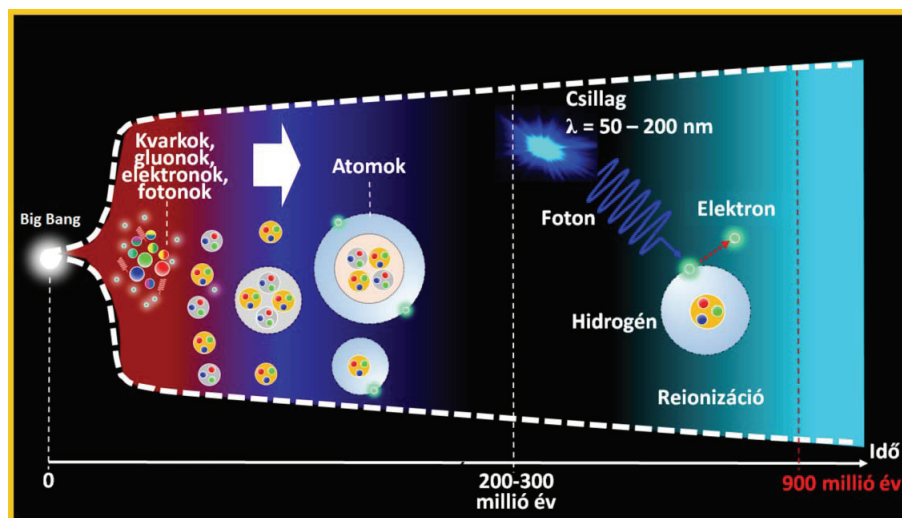
### Az első csillagok, reionizáció

Az első csillagok hidrogén-, héliummolekula-felhőkben keletkeztek. A felhők stabil képződmények voltak; átlagos élettartamuk 40 millió év.

27. ábra. Héliumatomokról már nehezebb elektronokat leszakítani, csak a kvazárok voltak képesek erre.



25. ábra. 380 ezer év: látható fotonként elindult a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás, útközben hullámhossza megnyúlik. A jelenbe 1,9 mm-es mikrohullámként érkezik.



26. ábra. Megjelennek az első csillagok, főleg az ultraibolya-tartományban sugároznak.

Az első csillagok hidrogén-, héliummolekula-felhőkben keletkeztek. A felhők stabil képződmények voltak; átlagos élettartamuk 40 millió év. A csillagkeletkezés első fázisában a felhőben sűrű magok (csomók) alakultak ki. A magok a saját gravitáció hatására összehúzódtak, forgásba jöttek. Megfelelő környezeti feltételek esetén összehúzódáskor hőmérséklet emelkedik, 10-15 millió kelvinen pedig beindul a fúzió, a csillag világít. A fúzió alatt az összehúzódás megáll, mert az égés miatti belső gáznyomás a gravitáció összehúzó hatását kompenzálja.

Az Univerzumban elsőként megjelent csillagok az ultraibolya (50–200 nm) sávban sugároztak (26. ábra). Az UV sugárzás a csillagok közelében a semleges hidrogénatomokat re-



elektron eltávolításához szükséges energiát a héliumatom magas frekvenciás fény elnyelésével szerzi meg.

Várni kellett a nagyobb energia kisugárzására képes kvazárok megjelenésére. A kvazárok a rádióhullámok mellett fényt is sugároznak, középpontjukban hatalmas, mindent felfaló fekete lyuk van, amely biztosítja a különlegesen nagy fényteljesítményhez szükséges energiát.

### A Naprendszer

Tejútrendszer az Univerzum spirális karú galaxisainak egyike. A Tejútrendszer korong alakú, átmérője körülbelül 100 ezer fényév, a korong alak legnagyobb vastagsága mintegy 16 ezer fényév. A 100 milliárd csillag mellett lehet benne 100 milliárd bolygó, 100 millió fekete lyuk. A Tejútrendszer égi vetülete a Tejút, az égen szabad szemmel látható fényes sáv, amely távcsőben szemlélve csillagokra bomlik.

A Naprendszer a Tejútrendszer spirális karjainak egyikében található, a Tejútrendszer középpontjától 25 ezer fényévnire.

A Big Bang után 9,2 milliárd évvel indult el Naprendszerünk kialakulása, ennek fázisai a 28. ábrán láthatók.

28. ábra. Az anyagfelhő összehúzódott, forgásba jött. Belső része felforrósodott. Külső része nagy kerületi sebességgel forgott, levált a belső részről, ebből alakultak ki a bolygók.

ionizálta. A hidrogénmaghoz befogott elektronok az UV gerjesztést követően az atomokról leszakadtak; szabad elektronokká váltak és az Univerzum ismét átlátszatlaná vált. Végül is a fokozódó átlátszatlanóság a hidrogén reionizációt a 900 milliomodik évben leállította.

A hidrogén reionizációját követően jelentős késéssel indulhatott a hélium reionizációja (27. ábra). Az első csillagok ultraibolya sugárzási energiája nem volt elegendő a sokkal nagyobb ionizációs energiát igénylő héliumban kötött elektronok kiszakítására. A hidrogén ionizációs energiája 13,6 eV, a hélium mindkét elektronjának leszakításához 70,9 eV szükséges. Az

## XXV. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY – 3. rész

Sükösd Csaba  
BME Nukleáris Technika Tanszék

### Visszatekintés és a döntő nem-elméleti részének készítői

Az előző két részben bemutattuk a XXV. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny elődöntőjében, illetve a döntőben feladott elméleti feladatokat és megoldásu-



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatóssal kapcsolatos program vezetője.

kat. A mostani, befejező részben a döntő kísérleti és számítógépes szimulációs feladatát, valamint a verseny eredményét ismertetjük. A kísérleti feladat és a számítógépes feladat mindegyikére másfél óra állt rendelkezésre. A kísérleti feladat végrehajtásához szükséges eszközöket az Energetikai Technikumban Csapó János úr készítette Borbély Venczel tanár úr által tervezett és készített prototípus, valamint a tanár úr útmutatásai alapján. A szimulációs feladat ötlete Tarján Péter tanár úrtól származik, a kódolást pedig – mint egy kivétellel minden esetben a korábbi szimulációs feladatok esetében is – Sükösd Csaba, a versenybizottság vezetője végezte, de a feladat tesztelésében és a végső változat kidolgozásában nagy szerepet vállalt Papp Gergely, Tarján Péter és Halász Máté versenybizottsági tag is. Mind a kísérleti, mind a számítógépes feladatot az Energetikai Technikum termeiben hajtották végre a diákok.