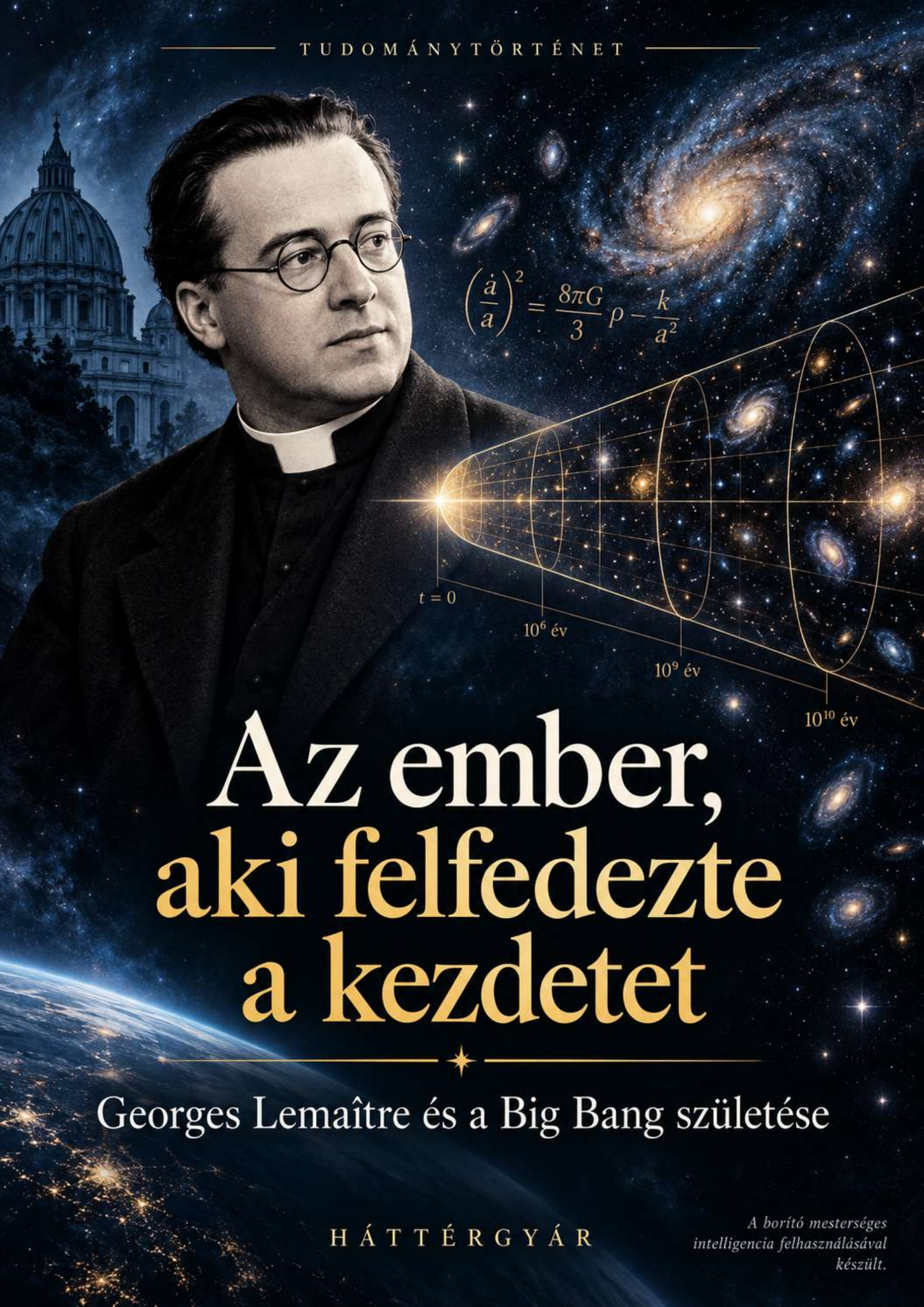




$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}$$

$t = 0$

10^6 év

10^9 év

10^{10} év

Az ember, aki felfedezte a kezdetet

Georges Lemaître és a Big Bang születése

H Á T T É R G Y Á R

*A borító mesterséges
intelligencia felhasználásával
készült.*

AZ EMBER, AKI FELFEDEZTE A KEZDETET

Georges Lemaître és a Big Bang születése

© Háttérgyár, 2026

Minden jog fenntartva.

Kiadó: Háttérgyár

Kiadás éve: 2026

hattergyar.hu

Ez a mű szerzői jogi védelem alatt áll. Részleteinek bármilyen formában való sokszorosítása, terjesztése vagy nyilvánosan elérhetővé tétele a kiadó előzetes írásbeli engedélye nélkül tilos.

A borító mesterséges intelligencia felhasználásával készült.

Tartalom

Előszó	4
1. A világegyetem, amelynek nem volt története	7
2. A lövészároktól a papi szemináriumig	12
3. Einstein új világa	17
4. 1927: az év, amikor az univerzum tágulni kezdett	21
5. Hubble belép a történetbe	25
6. Einstein nemet mond, majd meggondolja magát	29
7. Az ősatom	33
8. Pap a fizikusok között	37
9. A kozmikus sugarak és egy zsákutca tanulsága	41
10. A forró kezdet fizikája: Gamow, Alpher és Herman	44
11. A kezdet nélküli világ hívei	48
12. A rádiózaj, amely eldöntötte a vitát	51
13. A számítógéphez vezető út	54
14. Hubble-Lemaître: történeti igazságtétel vagy új mítosz?	57
15. A kozmológiai állandó visszatérése	61
16. A precíziós kozmológia kora	64
17. A James Webb és a korai galaxisok	67
18. Mi volt a Big Bang előtt?	70

19. A kozmikus távolságlétra: hogyan lett mérhető a világegyetem	73
20. A Solvay-világ és a fizika aranykora	78
21. A korkrízis és a „habozó univerzum”	82
22. XII. Pius, a teremtés és Lemaître óvatossága	86
23. Leuven, háború és az életmű késői évei	90
24. Miért nem kapott Nobel-díjat Lemaître?	94
25. Mit bizonyít ma a Big Bang?	98
26. Hogyan lett az „ősatomból” Big Bang?	103
27. Az életkor, amelyet a csillagok és az atommagok mérnek	106
28. Belgium emlékezete és Lemaître visszatérése a köztudatba	111
29. Száz évvel 1927 után	115
30. Az ember, aki történetet adott az univerzumnak	118
Utószó	122
Válogatott források és további olvasmányok	124

Előszó

Amikor a huszadik század elején Albert Einstein megalkotta az általános relativitáselméletet, még ő maga sem akart olyan világegyetemet, amelynek története van. A kor legtöbb fizikusa és csillagásza természetesnek vette, hogy a kozmosz a legnagyobb léptékben változatlan: csillagok születnek és pusztulnak, ködök alakulnak át, de maga a világegyetem örök színpad marad. A gondolat, hogy a tér egésze tágulhat, hogy a megfigyelhető világ valaha sűrűbb és forróbb lehetett, sőt hogy a kozmikus történelemnek fizikailag értelmezhető kezdete van, idegenül hatott még a relativitáselmélet megalkotójára is.

Ebben a tudományos közegben jelent meg Georges Lemaître, a belga pap, matematikus és fizikus. Életének különössége sokáig könnyebben megragadta az utókor képzeletét, mint tudományos teljesítményének pontos tartalma. A papi reverendában Einstein és Eddington társaságában látható tudós képe önmagában is emlékezetes. Lemaître jelentősége azonban abból fakadt, hogy néhány döntő pillanatban hamarabb értette meg a relativitáselmélet kozmikus következményeit, mint kortársainak többsége.

1927-ben francia nyelven közölt tanulmányában olyan világegyetemet írt le, amely tágul, és a korabeli extragalaktikus ködök távolság- és sebességadataiból számszerű kapcsolatot is felállított távolságuk és távolodásuk sebessége között. Két évvel később Edwin Hubble hasonló összefüggést tett világhíróvé. 1931-ben Lemaître tovább ment: azt vetette fel, hogy ha a kozmikus fejlődést visszafelé követjük, eljutunk egy rendkívül sűrű kezdeti állapothoz, amelyet később „ősatomnak” nevezett. Nem a mai értelemben vett Big Bang-elméletet írta le teljes részletességgel, de ő adta meg azt a fogalmi fordulatot, amelyből a modern forró ősrobbanásos kozmológia kinőhetett.

A könyv ezért nem egyetlen hős története. Lemaître pályája csak akkor érthető, ha vele együtt látjuk Einsteint, Willem de Sittert, Alekszandr Friedmant, Arthur Eddington, Vesto Sliphert, Edwin Hubble-t, Harlow Shapleyt, Fred Hoyle-t, George Gamowot, Ralph Alpher, Robert Hermant, Arno Penzias és Robert Wilsont is. A kozmológia megszületése nem egyetlen felfedezés pillanata volt, hanem matematika, megfigyelés és filozófiai előfeltevések hosszú ütközése. A szereplők gyakran ugyanazokat az adatokat látták, mégis mást olvastak ki belőlük, mert különböző elképzeléseik voltak

arról, milyen lehet egy elfogadható világegyetem.

A századik évforduló, 2027 jó alkalom arra, hogy Lemaître 1927-es tanulmányát ne pusztán egy névadási vita előzményeként idézzük fel. A Hubble-Lemaître-törvény mai elnevezése fontos történeti korrekció, de a lényeg ennél nagyobb. Lemaître megmutatta, hogy a világegyetem nem statikus tárgy, hanem történeti rendszer. Ettől kezdve a kozmológiának már nemcsak azt kellett megkérdeznie, milyen a világ, hanem azt is: honnan jutott el a jelenlegi állapotába.

1. A világegyetem, amelynek nem volt története

A modern kozmológia egyik nehezen átélhető kiindulópontja, hogy a huszadik század elején maga a „világegyetem” szó is mást jelentett a csillagászok többségének, mint ma. Nem létezett megbízható kozmikus távolságlétra, a Tejútrendszer méretéről is heves viták folytak, a spirális ködökről pedig nem lehetett biztosan tudni, hogy a mi csillagrendszerünkhöz tartoznak-e vagy távoli, önálló csillagvárosok. A csillagászat elképesztő mennyiségű megfigyelési adattal rendelkezett, de még nem volt egységes képe arról a térről, amelyben ezek az objektumok helyet foglalnak.

A newtoni fizika korában a végtelen, statikus világegyetem képe egyszerre tűnt kényelmesnek és problémásnak. Ha az anyag végtelenül és nagyjából egyenletesen tölti ki a teret, akkor a gravitációs erők összegezése matematikailag bizonytalanná válik. Ha viszont az anyag véges tartományban helyezkedik el, akkor mi akadályozza meg, hogy önnön gravitációja alatt összeomoljon? A kérdések régóta jelen voltak, de sokáig nem volt olyan fizikai elmélet, amelyben a világegyetem egésze dinamikai problémává válhatott volna.

Einstein 1915-ben befejezett általános relativitáselmélete megváltoztatta a helyzetet. A gravitációt nem a testek között ható hagyományos erőként írta le, hanem a téridő geometriájának tulajdonságaként. Az anyag és energia meghatározza a téridő görbületét, a görbült téridő pedig meghatározza az anyag mozgását. Az egyenletek ereje éppen abból származott, hogy nemcsak bolygók vagy csillagok környezetére lehetett őket alkalmazni, hanem elvileg az egész világegyetemre is.

Einstein azonban maga is olyan kulturális és tudományos közegből indult, amelyben a kozmosz időbeli állandósága szinte magától értetődőnek látszott. Amikor 1917-ben kozmológiai modellt készített saját elméletéből, statikus megoldást keresett. Az eredeti téregyenletek ezt nem kínálták könnyen: a gravitáló anyag hajlamosította volna a modellt az összehúzódásra. Einstein ezért bevezetett egy új tagot, a kozmológiai állandót, amely megfelelő értékkel ellensúlyozhatta a gravitációt, és lehetővé tette a statikus egyensúlyt.

A kozmológiai állandót később sokszor Einstein „legnagyobb tévedéseként” emlegették, noha a híres megfogalmazást George Gamow visszaemlékezése tette közismertté, és történeti hitelessége körül vita van.

Fizikailag maga a tag egyáltalán nem bizonyult értelmetlennek. A huszadik század végén, a gyorsuló kozmikus tágulás felfedezése után a kozmológiai állandó ismét a standard modell egyik központi elemévé vált. A valódi tanulság inkább az, hogy Einstein 1917-ben egy megfigyelésekkel még alig korlátozott területen esztétikai és filozófiai várakozásait is beépítette a modellválasztásba.

Ugyanabban az évben Willem de Sitter holland csillagász olyan relativisztikus kozmológiai megoldást mutatott be, amely anyagot alig tartalmazott, mégis érdekes vöröseltolódási tulajdonságokat produkált. A de Sitter-világ azt jelezte, hogy a relativitáselméletben a távoli objektumok spektrumának eltolódása és a kozmikus geometria között mély kapcsolat lehet. A modell nem volt realizisztikus leírása a tényleges világnak, de megmutatta, hogy Einstein egyenletei sokkal gazdagabb kozmológiát engednek meg a statikus univerzumnál.

A megfigyelési oldalon eközben Vesto Melvin Slipher dolgozott az arizonai Lowell Obszervatóriumban. Már az 1910-es években spektroszkópiai méréseket végzett spirális ködökön, és azt találta, hogy többségük jelentős vöröseltolódást mutat. A Doppler-hatás alapján ezeket a

jelenségeket nagy távolodási sebességként lehetett értelmezni. Slipher eredményei később alapvetővé váltak, de önmagukban még nem bizonyították a világegyetem tágulását, hiszen a spirális ködök távolsága sem volt ismert megbízhatóan.

A kozmológia így az első világháború végén sajátos félkész állapotban volt. Megszületett a gravitáció új elmélete, amely képes volt az egész világegyetem leírására, és gyűltek a távoli ködök mozgására utaló adatok. Hiányzott azonban az a személy vagy kutatói közeg, amely a matematikai lehetőségeket és a csillagászati számokat ugyanannak a problémának a részeként kezelte volna. Lemaître későbbi eredetisége éppen ebben állt: nem elégedett meg a relativisztikus modellek eleganciájával, és nem tekintette a vöröseltolódási adatokat pusztán csillagászati katalógusértékeknek.

Mielőtt azonban erre eljutott volna, Európa történetének egyik legsúlyosabb válságán ment keresztül. Lemaître nem békés egyetemi könyvtárban találkozott először a huszadik század technikai világával, hanem az első világháborúban. A lövészárók tapasztalata, a mérnöki tanulmányok és a matematika iránti vonzalom együtt formálta azt a gondolkodásmódot,

amely később a kozmológia egyik legmerészebb elméletéhez vezetett.

HÁTTÉRGYÁR

2. A lövészároktól a papi szemináriumig

Georges Henri Joseph Édouard Lemaître 1894. július 17-én született Charleroiban, Belgium iparosodó vallon vidékén. Családja a kor polgári világához tartozott, amely számára a műszaki pálya egyszerre jelentett társadalmi felemelkedést és modern hivatást. A fiatal Lemaître matematikai érdeklődése korán megmutatkozott, de kezdetben nem a tiszta tudomány felé indult: bányamérnöki tanulmányokat kezdett a leuveni katolikus egyetemen.

Az első világháború 1914-es kitörése ezt a pályát megszakította. Belgium német megszállása után Lemaître önként jelentkezett a hadseregbe, és tüzérségi szolgálatot teljesített. A tüzérség a modern háború egyik leginkább matematizált fegyverneme volt: ballisztikai táblázatok, szögmérések, időzítés és meteorológiai korrekciók határozták meg működését. A későbbi anekdoták szerint Lemaître még egy tüzérségi kézikönyv hibájára is felhívta felettesei figyelmét, ami nem feltétlenül segítette katonai előmenetelét, de jól illik ahhoz a képhez, amelyet későbbi kollégái róla őriztek: a tekintélyt tisztelte, a hibás számítást nem.

A frontélményből nem érdemes közvetlen pszichológiai magyarázatot gyártani későbbi kozmológiájára. Nincs szükség arra a romantikus képre, hogy a rombolás látványa vezette volna a világ kezdetének gondolatához. Annyi azonban bizonyos, hogy a háború megszakította eredeti életpályáját, és mire visszatért az egyetemre, már más irányt választott. Fizikát és matematikát tanult, miközben vallási hivatása is egyre határozottabbá vált.

A húszas évek elején Lemaître döntése, hogy pap lesz, nem jelentette a tudományos élet feladását. 1920-ban belépett a mecheleni szemináriumba, és 1923-ban pappá szentelték. A kor katolikus értelmiségi világában a természettudomány és a papi hivatás együttélése nem volt példa nélküli, de Lemaître későbbi pályája még így is szokatlan maradt. Nem apologetikát akart művelni fizikusként, hanem professzionális kutató kívánt lenni, aki történetesen pap is.

Ez a különbség később döntő jelentőségű lett. Lemaître tudatosan óvakodott attól, hogy a kozmológiai elméleteket közvetlen teológiai bizonyítékokká alakítsa. A teremtés a számára nem fizikai esemény volt, amelyet egy egyenletből le lehet vezetni. A fizika a megfigyelhető világ állapotainak kapcsolatáról beszélhetett, a teológia

pedig más kérdéskörben mozgott. Ez a két terület nála érintkezhetett, de nem helyettesítette egymást.

1923-ban külföldi ösztöndíjat kapott, és Cambridge-be utazott. A választás rendkívül szerencsésnek bizonyult, mert Arthur Stanley Eddington mellett dolgozhatott. Eddington nemcsak kiváló asztrofizikus volt, hanem Einstein elméletének egyik legismertebb angolszász közvetítője. Az 1919-es napfogyatkozási expedíció eredményeinek nyilvánosságra hozatalával kulcsszerepet játszott abban, hogy Einstein világhírűvé váljon, és Cambridge-ben a relativitáselmélet iránt érdeklődő fiatal kutató számára páratlan szellemi környezetet teremtett.

Lemaître itt tanulta meg, hogyan lehet a relativitáselméletet csillagászati problémákra alkalmazni. Eddington hatása nem abban állt, hogy kész kozmológiai programot adott volna tanítványának. Inkább a kérdezés módját közvetítette: a matematikai megoldásoknak fizikai jelentést kell adni, a fizikai értelmezést pedig megfigyelésekkel kell összekapcsolni. Ez a szemlélet Lemaître 1927-es munkájában vált teljesen láthatóvá.

Cambridge után Észak-Amerikába ment. A Harvard College Observatoryban Harlow Shapley környezetében

dolgozott, majd az MIT-n doktori tanulmányokat folytatott. Az Egyesült Államokban közvetlen közelről látta a korszak leggyorsabban fejlődő csillagászati kutatását. A nagy amerikai obszervatóriumok egyre jobb spektroszkópai és fotometriai adatokkal szolgáltak a galaxisokról, miközben a távolságmérés módszerei is javultak.

Az amerikai évek azért váltak meghatározóvá, mert Lemaître számára a kozmológia soha nem lett kizárólag geometriai játék. Ismerte a vöröseltolódási adatokat, figyelte a galaxisok távolságának meghatározására tett kísérleteket, és tudta, mennyire bizonytalanok még ezek a számok. Később éppen ezért volt képes olyasmire, amit sok elméleti fizikus nem tett meg: fogta a relativitáselméleti modellt, és tényleges megfigyelési adatokkal vetette össze.

1925-ben visszatért Leuvenbe, ahol tanítani kezdett. Két év múlva doktori fokozatot szerzett az MIT-n, és ugyanabban az esztendőben megjelent az a francia nyelvű tanulmány, amely száz évvel később a kozmológia történetének egyik alapidokumentumává vált. A munka címe hosszú és kevésbé látványos volt: homogén, állandó tömegű, növekvő sugarú világegyetemről szólt, amely magyarázza az extragalaktikus ködök radiális

sebességét. A címben azonban már ott volt a fordulat lényege. A világegyetem sugara nem állandó, hanem növekszik.

HÁTTÉRGYÁR

3. Einstein új világa

Lemaître 1927-es gondolatának megértéséhez szükség van arra, hogy a relativitáselmélet kozmológiai jelentését legalább fogalmilag kövessük. A modern olvasó számára a „táguló tér” kifejezés megszokott, de könnyen félrevezető képet idéz fel. Nem arról van szó, hogy galaxisok egy előre létező üres térben egy középponttól kifelé repülnek. A relativisztikus kozmológiában maga a nagy léptékű geometria változik, és a kellően távoli, egymással gravitációsan nem kötött objektumok közötti távolság ennek következtében nő.

Einstein egyenletei nem írnak elő egyetlen kozmikus történetet. Attól függően, hogyan oszlik el az anyag és energia, milyen a tér görbülete, és milyen értéket vesz fel a kozmológiai állandó, különböző megoldások adódhatnak. A húszas évek egyik nagy felismerése az volt, hogy a dinamikus megoldások nem matematikai különlegességek, hanem természetes következményei az elméletnek.

Alekszandr Friedmann orosz matematikus 1922-ben olyan megoldásokat közölt, amelyekben a világegyetem mérete időben változik. Einstein először azt állította, hogy Friedmann számítása hibás, majd amikor a hibát

nem sikerült kimutatnia, visszavonta kifogását. A történet sokszor úgy szerepel, mintha ezzel a táguló világegyetem elmélete már készen állt volna, és csak a megfigyelési igazolás hiányzott. Valójában Friedmann munkái kevésbé terjedtek el, ő maga pedig 1925-ben meghalt, még mielőtt a csillagászati adatok robbanásszerű fejlődése közvetlenül összekapcsolhatta volna egyenleteit a galaxisok világával.

Lemaître Friedmannhoz hasonlóan felismerte a dinamikus relativisztikus kozmológia lehetőségét, de más úton jutott oda, és más kérdést tett fel. Nem csupán azt vizsgálta, milyen matematikai világegyetemek engedhetők meg, hanem azt is, hogy egy dinamikus modell képes-e értelmezni a távoli ködök vöröseltolódását. Ez volt az a lépés, amely elméletet és megfigyelést egyetlen érvelésben kapcsolt össze.

A galaxisok vöröseltolódásának értelmezése akkor még korántsem volt olyan egyértelmű, mint a mai tankönyvek alapján gondolhatnánk. A spektrumvonalak hosszabb hullámhossz felé tolódását szokás sebességként kifejezni, és kisebb vöröseltolódások esetén valóban használható Doppler-szerű megközelítés. Kozmológiai léptékben azonban a jelenség értelmezéséhez már a táguló téridő geometriáját is figyelembe kell venni: a

fény olyan világegyetemen halad át, amelynek léptéke közben változik.

Lemaître számára a vöröseltolódások éppen azt jelezték, hogy a de Sitter-féle effektust és a dinamikus univerzumot nem kell külön problémaként kezelni. Ha a világegyetem léptéktényezője nő, a távoli objektumoktól érkező fény hullámhossza is megnyúlik. A megfigyelt vöröseltolódás így kozmikus fejlődés jele lehet. Ez a kapcsolat ma középiskolai ismeretterjesztésben is előkerül, de a húszas években radikálisan új nézőpontnak számított.

A korszak matematikai nyelve ráadásul sokkal kevésbé volt szabványosított. A mai kozmológus egy Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-metrika, egy léptéktényező és néhány sűrűségparaméter segítségével gyorsan elhelyez egy modellt a jól ismert elméleti térképen. Lemaître idején ez a térkép még épült. A különböző szerzők eltérő koordinátákat, jelöléseket és fizikai interpretációkat használtak, és nem mindig volt világos, hogy két formálisan különböző megoldás valójában ugyanannak a geometriai helyzetnek más leírása.

Ezért is feltűnő, milyen biztos fizikai érzékkel mozgott Lemaître a matematikai lehetőségek között. Nem ragaszkodott ahhoz, hogy egy elegáns képlet önmagában elég. Ha a modell nem tudott kapcsolatot teremteni a megfigyelésekkel, számára hiányos maradt. Ugyanakkor a bizonytalan adatokból sem akart többet kiolvasni, mint amennyit azok elbírtak. Ez a kettős óvatosság később abban is szerepet játszott, hogy 1931-ben saját kezűleg hagyta ki az angol fordításból 1927-es számszerű sebesség-távolság becsléseit, mert addigra elavultnak tartotta őket.

A relativitáselmélet kozmológiai alkalmazása jóval több volt technikai feladatnál. A kutatóknak el kellett fogadniuk, hogy a világegyetem egésze dinamikus objektum lehet, és hogy a „kezdet” vagy „fejlődés” szavak bekerülhetnek a fizikába anélkül, hogy metafizikai fogalmakká válnának. Einstein sokáig vonakodott ettől a lépéstől. Friedmann megmutatta, hogy a matematika megengedi; Lemaître pedig azt próbálta bizonyítani, hogy a csillagászati adatok is ebbe az irányba mutatnak.

4. 1927: az év, amikor az univerzum tágulni kezdett

Lemaître 1927-es tanulmánya a brüsszeli tudományos társaság évkönyvében jelent meg, francia nyelven. Nem a kor leghatásosabb nemzetközi folyóiratában közölték, és nem kísérte nagy sajtóvisszhang. A tanulmány történeti jelentősége ma mégis világos: dinamikus relativisztikus kozmológiai modellt kapcsolt össze konkrét csillagászati adatokkal, és számszerűen becsülte a távolság és radiális sebesség közötti arányt.

A munka címében szereplő „állandó tömeg” és „növekvő sugár” a kor nyelvén egy olyan homogén világegyetemet jelölt, amelynek nagyléptékű mérete változik. Lemaître nem úgy gondolta, hogy a galaxisok egy robbanás törmelékeként egy középpontból repülnek szét. A modell lényege geometriai volt: a kozmikus lépték nő, és ennek megfigyelési következménye van a távoli ködök fényében.

A kulcsfontosságú lépés az volt, hogy Lemaître összegyűjtötte a rendelkezésre álló radiális sebességeket és távolságbecsléseket. A sebességi adatok jelentős részének gyökere Slipher spektroszkópai munkájához vezetett, míg a távolságok több különböző, még

bizonytalan módszerből származtak. Lemaître ezekből kétféle súlyozással is meghatározott egy arányossági tényezőt. A kapott értékek a mai Hubble-állandónál jóval nagyobbak voltak, mert a galaxisok távolságait akkoriban erősen alábecsülték.

Ez nem csökkenti a módszer jelentőségét. A tudomány történetében egy korai mérés értékét nem lehet kizárólag a mai pontossághoz hasonlítani. Lemaître azt ismerte fel, hogy a kozmológiai modell egy megfigyelhető lineáris kapcsolatot jósol, és megpróbálta megbecsülni annak együtthatóját. Azt a gondolatot, amelyet ma $v = H d$ alakban tanítanak, már itt világosan összekötötte az univerzum tágulásával.

A tanulmány mégsem változtatta meg azonnal a kozmológiát. Nyelvi és publikációs okok egyaránt szerepet játszottak ebben. A francia nyelvű belga folyóiratot az angolszász csillagászok kevésbé olvasták, mint a nagy brit vagy amerikai lapokat. Lemaître sem rendelkezett olyan intézményi háttérrel, mint a Mount Wilson Obszervatórium, ahol a korszak legnagyobb távcsövei működtek. Tudományos eredmények sorsa gyakran nemcsak igazságtartalmuktól, hanem kommunikációs útvonalaitól is függ.

Lemaître személyesen is igyekezett ismertetni elképzelését. 1927-ben a brüsszeli Solvay-konferencián találkozott Einsteinnel, és beszélt neki a táguló világegyetemről. A későbbi visszaemlékezések szerint Einstein elismerte a számítások korrektségét, miközben a fizikai értelmezést elfogadhatatlannak tartotta; a leuveni archívum is a „matematikája helyes, de a fizikája rettenetes” értelmű mondat hagyományát idézi. Az epizód érzékelteti, milyen nehéz volt a statikus kozmosz képét elengedni még annak is, aki megalkotta az ehhez vezető egyenleteket.

Einstein ellenállását nem lehet pusztán személyes makacssággal magyarázni. A megfigyelési bizonyítékok még bizonytalanok voltak, a galaxisok távolságskálája ingatag lábakon állt, és a vöröseltolódás kozmológiai értelmezése sem volt egyeduralkodó. Egy elméletileg lehetséges dinamikus modellből nem következett automatikusan, hogy a tényleges világegyetem valóban tágul. Lemaître bátorsága abban állt, hogy az adatok tökéletlensége ellenére felismerte bennük a mintázatot.

Az 1927-es munka történetéhez hozzátartozik egy későbbi félreértés is. Amikor 1931-ben a tanulmány angol fordítása megjelent a *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* hasábjain, kimaradt a

sebesség-távolság kapcsolat korábbi számszerű tárgyalása. Sokáig felmerült a gyanú, hogy valaki utólag Hubble elsőbbségét próbálta védeni. A fennmaradt levelezés és az IAU 2018-as történeti összefoglalója szerint azonban maga Lemaître döntött a kihagyás mellett: a négy évvel korábbi radiális sebességekről szóló „előzetes tárgyalást” addigra már nem tartotta időszerűnek.

Ez a döntés tudományos szempontból érthető, történeti szempontból azonban drámai következménnyel járt. Az angol nyelvű olvasóközönség évtizedeken át olyan változatot ismert, amelyből éppen az a rész hiányzott, amely Lemaître prioritását a leglátványosabban bizonyította volna. A tudományos emlékezet így lassan Hubble köré rendezte a tágulás felfedezését, miközben Lemaître neve főként az „ősatom” és a Big Bang előtörténetéhez kapcsolódott.

5. Hubble belép a történetbe

Edwin Hubble 1929-es tanulmánya a kozmológia egyik legtöbbet idézett klasszikusa. A Mount Wilson Obszervatóriumban végzett munkája, a galaxisok távolságának becslése és a vöröseltolódási adatok összerendezése meggyőző megfigyelési alapot adott a sebesség-távolság kapcsolatnak. A tudománytörténeti vitákban ezért hiba volna Hubble szerepét egyszerűen Lemaître rovására csökkenteni. Két különböző típusú hozzájárulás találkozott: Lemaître kozmológiai értelmezése és Hubble megfigyelési programja.

Hubble már az évtized közepén kulcsszerepet játszott abban, hogy a spirális ködök „szigetvilágoknak”, vagyis önálló galaxisoknak bizonyuljanak. A Cepheida változócsillagok periódus-fényesség kapcsolatát felhasználva távolságot becsült az Androméda-köd és más objektumok számára. Ezek az értékek mai szemmel pontatlanok voltak, de egyértelművé tették, hogy az érintett rendszerek jóval a Tejútrendszer határain kívül helyezkednek el.

1929-es tanulmányában Hubble huszonnégy extragalaktikus köd távolságát és radiális sebességét vizsgálta, és lineáris kapcsolatot talált közöttük. A

dolgozat tömör, empirikus hangvételű volt. Hubble óvatosan beszélt a kapcsolat jelentéséről, és nem épített rá részletes relativisztikus kozmológiát. Az eredmény ereje éppen az egyszerűségben rejlett: a távolabbi galaxisok nagyobb vöröseltolódást, illetve nagyobb távolodási sebességet mutattak.

A későbbi tankönyvi történet gyakran ebből egyenes vonalat húzott: Hubble 1929-ben „felfedezte a világegyetem tágulását”. Ez túl egyszerű. Hubble megmutatta és később Milton Humasonnal sokkal nagyobb távolságokra kiterjesztette a sebesség-távolság összefüggést. A tágulás relativisztikus értelmezése azonban nem kizárólag az ő eredménye volt. Lemaître két évvel korábban már olyan elméleti keretben tárgyalta ugyanezt a jelenséget, amelyben a vöröseltolódás a változó kozmikus lépték következménye lett.

A prioritási viták azért is bonyolultak, mert a tudományos „felfedezés” ritkán egyetlen cselekedet. Más személy veheti észre a jelenséget, más mérheti meg először, más kapcsolhatja össze egy elmélettel, és megint más győzheti meg a közösséget arról, hogy az eredmény valóban alapvető. Slipher mérte a korai vöröseltolódásokat. Hubble megbízhatóbb távolságokat rendelt a galaxisokhoz és empirikus kapcsolatot

publikált. Lemaître dinamikus relativisztikus univerzumban értelmezte a kapcsolatot és már korábban kiszámította annak közelítő meredekségét.

A tudományos hírnév kialakulásában intézményi tényezők is működtek. A Mount Wilson a világ csillagászatának egyik központja volt, a száz hüvelykes Hooker-távcső pedig technikai fölényt biztosított. Hubble kiválóan érzékelte a nagy megfigyelési programok jelentőségét, és neve hamar összeforrt az extragalaktikus csillagászáttal. Lemaître ezzel szemben kisebb európai központban dolgozott, és 1927-es tanulmánya kevésbé hozzáférhető csatornán jelent meg.

Mindez nem indokol összeesküvés-elméletet. Nincs szükség arra a feltételezésre, hogy Hubble tudatosan eltulajdonította Lemaître eredményét. A korszak kommunikációs hálózata töredezett volt, és ugyanahhoz a felismeréshez több kutató különböző irányból jutott el. A történeti helyreigazítás célja ezért nem Hubble „trónfosztása”, hanem annak felismerése, hogy a táguló univerzum felfedezése kollektív folyamat volt.

2018-ban a Nemzetközi Csillagászati Unió tagsága nagy többséggel támogatta azt az ajánlást, hogy a korábban Hubble-törvényként ismert összefüggést

Hubble-Lemaître-törvénynek nevezzék. A döntés nem változtatott meg egyenleteket, és nem osztott újra Nobel-díjakat. Szimbolikus jelentősége mégis nagy: arra emlékeztet, hogy a névadás történeti emlékezetet rögzít, és ez az emlékezet időnként pontosításra szorul.

A legfontosabb azonban nem az, kié legyen a törvény neve. Az 1927 és 1929 közötti néhány év alatt a világegyetem képe megváltozott. A spirális ködökből galaxisok lettek, a vöröseltolódásokból kozmikus tágulás jelei, a relativitáselmélet dinamikus megoldásaiból pedig a valóság komolyan vehető modelljei. A következő kérdés már elkerülhetetlen volt: ha a világegyetem most tágul, milyen volt korábban?

6. Einstein nemet mond, majd meggondolja magát

Einstein és Lemaître viszonya a tudománytörténet egyik látványos példája arra, hogy a nagy elméleti újítók sem feltétlenül fogadják el azonnal saját elméletük minden következményét. Einstein 1917-ben statikus univerzumot épített, és a húszas évek végéig erős fenntartásokkal kezelte a dinamikus kozmológiát. Lemaître számításait matematikailag elfogadhatónak látta, fizikai jelentésüket azonban kezdetben elutasította.

A fordulatban döntő szerepe volt a megfigyeléseknek. Hubble és Humason egyre távolabbi galaxisokra terjesztették ki a vöröseltolódás-távolság kapcsolatot, és a statikus univerzum fenntartása egyre nehezebbé vált. Einstein 1931-ben ellátogatott a Mount Wilson Obszervatóriumba, találkozott Hubble-lel, és rövidesen feladta korábbi statikus modelljét. A kozmológiai állandót ekkor feleslegesnek tekintette, és olyan táguló modelleket kezdett vizsgálni, amelyekben erre a tagra nem volt szükség.

Lemaître számára Einstein véleményének megváltozása személyes elégtételnél többet jelentett. A relativitáselmélet megalkotójának támogatása erős

legitimációt adott egy olyan területnek, amelyet néhány évvel korábban sokan még matematikai spekulációnak tartottak. A harmincas évek elejére a táguló világegyetem már nem merész peremálláspont volt, hanem a kozmológiai kutatás kiindulópontja.

1933-ban Einstein és Lemaître Kaliforniában is találkozott, és közös nyilvános szerepléseik nagy figyelmet kaptak. Egy sokat idézett beszámoló szerint Einstein Lemaître előadását a teremtés legszebb és legkielégítőbb magyarázatának nevezte. Az idézet pontos kontextusát óvatosan kell kezelni, mert a visszaemlékezések különböző formában őrizték meg. Ami biztosabb: Einstein ekkorra már nagyra értékelte Lemaître kozmológiai teljesítményét.

A két tudós között ugyanakkor lényeges szemléleti különbség maradt. Einstein filozófiai ösztönei sokáig az örök vagy legalábbis kezdetlen világ felé húztak. Lemaître ezzel szemben 1931-től egy fizikailag különleges kezdeti állapot lehetőségét vizsgálta. Fontos azonban, hogy Lemaître ezt nem vallási dogmából vezette le. Éppen ő tiltakozott a legerősebben az ellen, amikor egyházi körök túl gyorsan próbálták a kozmológiai kezdetről szóló elméletet a teremtés közvetlen tudományos bizonyítékává tenni.

Einstein történetének van egy másik ironikus fordulata is. A kozmológiai állandót a tágulás elfogadása után sokáig mesterséges toldaléknak tekintették. Lemaître azonban nem dobta el ilyen könnyen. Bizonyos modelljeiben fontos szerepet adott neki, és az üres tér energiaszerű tulajdonságaként is értelmezte. Évtizedekkel később, a gyorsuló tágulás 1998-as felfedezése után a kozmológiai állandó ismét a világegyetem standard leírásának középpontjába került.

A történet arra figyelmeztet, milyen könnyen félrevezetővé válik a tudomány múltja, ha végleges győztesek és vesztesek sorozataként meséljük el. Einstein tévedett, amikor a statikus univerzumhoz ragaszkodott, de egyenletei tették lehetővé a dinamikus kozmológiát. A kozmológiai állandót azért vezette be, hogy megállítsa a világegyetemet, később pedig ugyanaz a matematikai tag a gyorsuló tágulás leírására szolgált. Lemaître kezdetben kisebbségi állásponton volt, ám éppen ő őrizte meg a kozmológiai állandó fizikai értelmezésének lehetőségét.

A harmincas évek elejére tehát az első nagy vita eldőlt: az univerzum tágul. De Lemaître számára ez csak a kezdet volt. Ha a galaxisok távolsága ma nő, akkor korábban közelebb voltak egymáshoz. Ha a folyamatot

elég messz visszafelé követjük, a sűrűség nő, a megszokott fizikai állapotok pedig eltűnnek. Innen már csak egy lépés volt feltenni a kérdést, amely sok kortársát megrémítette: lehetett-e a fizikai világnak kezdete?

7. Az ősatom

1931 májusában a Nature rövid levelet közölt Lemaître-től „A világ kezdete a kvantumelmélet szempontjából” címmel. A szöveg mindössze néhány bekezdés volt, mégis a modern kozmológia egyik legmerészebb gondolatát fogalmazta meg. Lemaître abból indult ki, hogy ha az univerzum tágulása valóságos, akkor a múltban az anyag és energia koncentráltabb állapotban volt. A kvantumelmélet új fogalmait felhasználva elképzelt egy kezdeti állapotot, amelyben a világegyetem teljes energiája egy rendkívül egyszerű, egyetlen kvantumhoz hasonló rendszerben összpontosult.

Később ezt nevezte „ősatomnak”. A kifejezés félrevezető lehet, ha mai atomra gondolunk. Lemaître nem hidrogénatom méretű tárgyat képzelt el, benne protonokkal és elektronokkal, hanem olyan kezdeti fizikai állapotot, amelyben a későbbi világegyetem struktúrái még nem különültek el. A bomlás és szétagolódás során egyre több kvantum és egyre összetettebb szerkezet jelent volna meg.

A gondolat háttérében a húszas évek kvantumforradalma állt. Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger és mások munkája alapjaiban

változtatta meg az anyagról és sugárzásról alkotott képet. Lemaître azt kérdezte: ha a kvantumelmélet az anyag mikroszkopikus világában érvényes, vajon a világegyetem legkorábbi állapotát is csak kvantumos fogalmakkal lehet-e megragadni? Ez a kérdés ma, a kvantumgravitáció kutatásában is nyitott, bár a fizikai nyelv teljesen átalakult.

Az ősatom-elmélet nem azonos a mai forró Big Bang-moddal. Nem tartalmazta a modern részecskefizikát, nem ismerte a nukleoszintézis részleteit, és nem támaszkodhatott a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzásra, amelyet csak évtizedekkel később fedeztek fel. Lemaître még a kozmikus sugarak eredetét is részben az ősatom szétesésének maradványaként próbálta értelmezni, ami később nem bizonyult helyesnek.

Mégis itt történt meg az a fogalmi áttörés, amely a tágulást történetévé változtatta. A dinamikus univerzum önmagában csak annyit mond, hogy a kozmikus lépték időben változik. Az ősatom hipotézise már azt állította, hogy a világegyetem múltjának radikálisan eltérő fizikai állapota lehetett, és ezt a kezdeti állapotot nem kell a jelenlegi struktúrák egyszerű összenyomásaként elképzelni.

Lemaître szerette a tűzijáték hasonlatát: a világegyetem fejlődését olyan látványhoz hasonlította, amelynek végén már csak füst és kihunyó parázs látható, miközben a kezdet vakító fényessége eltűnt. A kép költői, de tudományosan is fontos intuíciót hordoz. A kozmikus múlt nyomai nem feltétlenül nagy, ma is látható objektumok formájában maradnak fenn; lehetnek diffúz sugárzások, elemgyakoriságok vagy a nagyléptékű szerkezet statisztikai mintázatai.

Az elmélet egyik filozófiai következménye az idő fogalmát érintette. Ha a fizikai leírás visszafelé egy olyan határhoz jut, ahol a megszokott tér- és időfogalmak elveszítik jelentésüket, akkor értelmetlen lehet azt kérdezni, mi történt „előtte”. Lemaître ezt óvatosan kezelte. Nem állította, hogy a matematika teológiai értelemben bizonyította a semmiből való teremtetést. Azt mondta, hogy a fizikai világ ismert rendjének lehetett kezdete, és a tudomány feladata ennek a rendnek a leírása.

A kortárs reakciók vegyesek voltak. Eddington számára a hirtelen kezdet filozófiailag taszító volt, még ha a tágulást elfogadta is. Einstein is idegenkedett a kezdet gondolatától. Más kutatók úgy vélték, az elmélet túlságosan spekulatív, mert kevés közvetlen megfigyelési

támpont állt rendelkezésre. A harmincas években valóban nem lehetett eldönteni, hogy az univerzum egy ősi sűrű állapotból indult-e, vagy valamilyen örök, állandóbb kozmológia írja le jobban.

Lemaître ősatomja ezért nem azonnal győztes elmélet lett, hanem kutatási program. A következő évtizedekben a kozmológia egyik központi kérdésévé vált, hogy találhatók-e a forró, sűrű kezdetből származó maradványok. A válaszhoz új magfizika, rádiócsillagászat és műholdas megfigyelés kellett. Lemaître ebből már csak az első nagy megerősítést élhette meg.

8. Pap a fizikusok között

Lemaître alakját szinte lehetetlen úgy bemutatni, hogy papi hivatása ne kerüljön elő már az első mondatokban. Ez érthető, hiszen a modern kozmológia egyik alapítója és katolikus pap ugyanaz a személy volt. A tény azonban könnyen két leegyszerűsítéshez vezet. Az egyik szerint vallási hite vezette a „kezdet” elméletéhez, a másik szerint tudományos pályája bizonyítja, hogy vallás és tudomány között szükségképpen nincs semmiféle feszültség. Lemaître saját gondolkodása mindkét állításnál óvatosabb volt.

A tudományt szakmai autonómiával művelte. Fizikai cikkeiben nem hivatkozott Szentírásra, és nem próbált bibliai kronológiát összeegyeztetni kozmológiai modellekkel. A relativitáselmélet, a kvantumfizika és a csillagászati adatok nyelvén érvelt. Ha egy megfigyelés ellentmondott volna valamely kozmológiai elképzelésének, nem vallási okból ragaszkodott volna hozzá.

Teológiai szempontból is ragaszkodott a különbségtételhez. A keresztény teremtéstan nem azt állítja, hogy a világnak egy meghatározott fizikai modell szerint kellett elkezdődnie. A „teremtés” kapcsolatot

fejez ki Isten és a világ között, nem pedig egy mérhető első másodperc leírását. Egy örökké létező fizikai világegyetem is lehetne teológiai értelemben teremtet, míg egy időben kezdődő világegyetem kezdete önmagában még nem bizonyítaná a teremtő létezését.

Ez a megkülönböztetés különösen fontossá vált XII. Pius pápa 1951-es beszéde után. A pápa a Pápai Tudományos Akadémia előtt úgy fogalmazott, hogy a modern kozmológia eredményei összhangban vannak a teremtés gondolatával, és beszédének egyes részei azt a benyomást kelthették, hogy a Big Bang tudományos bizonyítékot szolgáltat a bibliai teremtésre. Lemaître ettől tartott.

Források szerint közvetve igyekezett elérni, hogy a Vatikán ne kapcsolja össze túl szorosan a kozmológiai modellt a teológiai tanítással. Ennek nem az volt az oka, hogy hitetlen lett volna saját tudományos elméletében, hanem éppen a tudomány változékonyságát vette komolyan. Ha az egyház egy konkrét fizikai modellhez köti tanítását, akkor annak későbbi módosulása felesleges hitbeli válságot idézhet elő.

Lemaître álláspontja ebben meglepően modern. A tudományos elméleteket nem tekintette végleges

metafizikai kijelentéseknek, hanem a megfigyelhető jelenségek legjobb aktuális magyarázatainak. A hitet pedig nem olyan hézagkitöltő eszköznek tekintette, amelyet oda kell behelyezni, ahol a fizika még nem tud választ adni. Ezért az úgynevezett „hézagok Istene” érvelésétől távol állt.

Papi életét eközben komolyan vette. Tagja volt egy papi közösségnek, rendszeresen imádkozott és lelkigyakorlatokon vett részt. Egyetemi kollégái számára mégsem hittérítőként jelent meg. A tudományos vitákban ugyanúgy számításokkal és adatokkal érvelt, mint bárki más. A reverenda feltűnő volt a fizikuskonferenciákon, de nem adott külön státuszt az egyenleteinek.

A tudomány és vallás kapcsolatáról szóló mai vitákban Lemaître ezért azért érdekes, mert nem szolgál könnyű jelmondatokkal egyik oldalnak sem. Nem bizonyítja, hogy minden vallási és tudományos állítás harmonikusan összeegyeztethető. Azt sem, hogy a hit magánüggvé válva semmilyen hatással nincs egy tudós világlátására. Inkább azt mutatja, hogy egy személy képes lehet szigorúan elválasztani a bizonyítás különböző szabályait, miközben mindkét területet komolyan veszi.

A paradoxon az, hogy éppen a pap Lemaître ragaszkodott erősebben a fizikai és teológiai állítások szétválasztásához, mint sok vallásos csodálója. A kezdet kozmológiája számára tudományos hipotézis volt, amelyet megfigyeléseknek kell igazolniuk vagy cáfolniuk. A teremtés kérdése más síkon helyezkedett el. Ez az intellektuális fegyelem életművének legalább olyan fontos része, mint az ősatom képe.

9. A kozmikus sugarak és egy zsákutca tanulsága

A nagy tudományos életművek bemutatásakor könnyű csak azokra az ötletekre figyelni, amelyek később igazolást nyertek. Ettől azonban hamis kép keletkezik a kutatásról. Lemaître pályáján is voltak olyan elképzelések, amelyek termékenyek voltak, de végül nem bizonyultak helyesnek. Ezek közül a legérdekesebb a kozmikus sugarak eredetéhez kapcsolódott.

A harmincas években a kozmikus sugárzás a fizika egyik nagy rejtélye volt. Nagy energiájú részecskék érkeztek a Földre az űrből, de eredetüket és gyorsítási mechanizmusukat alig ismerték. Lemaître az ősatom hipotéziséből kiindulva felvetette, hogy a kozmikus sugarak részben a kezdeti állapot szétesésének maradványai lehetnek. A rendkívül nagy energiák csábító kapcsolatot kínáltak egy rendkívül energiadús kozmikus kezdethez.

Mai tudásunk szerint a kozmikus sugarak túlnyomó többsége asztrofizikai gyorsítókból származik: szupernóva-maradványokból, aktív galaxismagok környezetéből és más nagy energiájú folyamatokból. A legnagyobb energiájú részecskék eredetének részletei

ma is kutatás tárgyai, de nincs szükség arra, hogy őket közvetlenül a Big Bang törmelékének tekintsük. Lemaître konkrét elképzelése tehát nem maradt fenn.

Mégsem volt értelmetlen próbálkozás. A korszakban a kozmológia és részecskefizika kapcsolata még csak kialakulóban volt. Lemaître ösztönösen felismerte, hogy a korai világegyetem nagy energiájú fizikai laboratóriumként gondolható el, és mai értelemben ez alapvetően helyes. A modern kozmológia valóban részecskefizikai folyamatokból magyarázza az ősi nukleoszintézist, a neutrínó-háttérrel, az anyag-antianyag aszimmetriát és számos más jelenséget.

A tévedés ezért érdekesebb annál, mint hogy egyszerűen kipipáljuk: „nem vált be”. Megmutatja, milyen nehéz volt az ősrobbanás korai elméletét konkrét, ma megfigyelhető maradványokhoz kötni. Lemaître tudta, hogy egy kozmológiai eredetelméletnek nyomokat kell hagynia. Nem mindig találta el, mely jelenségek ezek a nyomok, de a módszertani igény helyes volt.

A tudomány története tele van ilyen részleges sikerekkel. Egy kutató feltesz egy jó kérdést, de rossz objektumon keresi a választ. Vagy helyesen sejti, hogy két terület között kapcsolat van, de a kapcsolat

mechanizmusát hibásan írja le. Az utókor gyakran csak a végső helyes elméletet látja, pedig az odavezető út zsákutcákból épül.

Lemaître kozmikus sugárzással kapcsolatos munkája azt is mutatja, hogy nem egyetlen híres ötlet szerzőjeként élt. Matematikával, numerikus módszerekkel, relativitással és asztrofizikai kérdésekkel egyaránt foglalkozott. Később a számítógépes számítások iránt is érdeklődött, amikor ez még új és ritka kutatási eszköznek számított. Szellemi habitusában mindig jelen volt az a hajlandóság, hogy új technikai módszereket próbáljon ki.

A kozmikus sugarak hipotézise végül háttérbe szorult, de a mögötte álló gondolat tovább élt: ha a világegyetemnek forró, sűrű fiatalkora volt, annak megfigyelhető maradványokat kell hagynia. A negyvenes években egy fiatal amerikai fizikus, Ralph Alpher és mentora, George Gamow már sokkal pontosabb kérdést tett fel. Nem nagy energiájú részecskéket kerestek, hanem azt vizsgálták, létrejöhettek-e a kémiai elemek egy forró korai univerzumban.

10. A forró kezdet fizikája: Gamow, Alpher és Herman

A Big Bang-elmélet mai formája nem Lemaître ősatom-hipotéziséből készen bontakozott ki. A harmincas és negyvenes években új fizikai tartalommal kellett megtölteni a kezdet fogalmát. Ennek egyik legfontosabb lépése az volt, amikor George Gamow és fiatal munkatársa, Ralph Alpher a magfizika segítségével kezdte vizsgálni, hogyan alakulhatott ki az elemek összetétele a korai világegyetemben.

Gamow különös, szellemes és rendkívül kreatív fizikus volt, aki az atommagok kvantummechanikájától a kozmológiáig számos területen dolgozott. A világegyetem tágulását és forró kezdetét természetes módon összekapcsolta azzal a kérdéssel, hogy a nagy sűrűségű és magas hőmérsékletű anyagban milyen nukleáris reakciók mehetnek végbe. A kozmológia így egyre kevésbé csak geometriai tudomány lett, és egyre inkább az anyag történetének fizikájává vált.

Alpher doktori munkája során részletes számításokat végzett a korai nukleoszintézisről. Az 1948-ban megjelent híres tanulmány szerzői között Alpher, Hans Bethe és Gamow neve szerepelt, bár Bethe valójában

nem vett részt a munkában; Gamow tréfából illesztette be a nevét, hogy a szerzőlista az alfa-béta-gamma görög betűsorra hasonlítson. Az anekdota jól példázza Gamow játékosságát, ugyanakkor hosszú távon hozzájárult Alpher szerepének elhomályosításához.

A korai számítások nem tudták helyesen megmagyarázni az összes kémiai elem keletkezését. Ma tudjuk, hogy a Big Bang nukleoszintézise főként hidrogént, héliumot és kis mennyiségű lítiumot hozott létre; a nehezebb elemek nagy része csillagokban és csillagrobbanásokban keletkezett. Mégis alapvető eredmény született: a forró korai univerzum elvileg kiszámítható elemgyakoriságokat hagy maga után.

Ralph Alpher és Robert Herman 1948-ban még egy lépéssel tovább ment. Felismerték, hogy ha a világegyetem valaha rendkívül forró, sugárzás által dominált állapotban volt, akkor a tágulással lehűlő sugárzásnak ma is jelen kell lennie. Nagyságrendileg néhány kelvines háttérhőmérsékletet becsültek. A későbbi szakirodalom sokszor Gamow nevéhez is kötötte ezt az előrejelzést, de történeti kutatások hangsúlyozzák, hogy az 5 kelvin körüli konkrét reliktsugsugárzás-előrejelzés Alpher és Herman munkája volt.

Ez a felismerés utólag rendkívül modernnek tűnik. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás ma a Big Bang-modell egyik legerősebb bizonyítéka, és hőmérsékletét, spektrumát, valamint apró anizotrópiáit rendkívüli pontossággal mérjük. A negyvenes évek végén azonban a rádiócsillagászat még nem állt készen arra, hogy néhány kelvines, szinte minden irányból érkező háttérsugárzást megbízhatóan elkülönítsen.

Az előrejelzés ezért feledésbe merült. Ez a tudományos emlékezet egyik tanulságos epizódja: még egy később döntő fontosságúnak bizonyuló jóslat is eltűnhet a szakirodalom peremén, ha nincs meg a megfelelő kísérleti technika, közösségi figyelem vagy folyamatos kutatási program. Amikor a hatvanas években a háttérsugárzást ténylegesen felfedezték, a princetoni csoport részben újra feltalálta ugyanazt az elméleti igényt.

Lemaître közvetlenül nem vett részt ezekben a számításokban, de az ősatom gondolata ekkor kapott először olyan fizikai tartalmat, amelyből tesztelhető mennyiségek következtek. A világegyetem kezdetének kérdése már nemcsak filozófiai és geometriai probléma volt. A korai univerzum hőmérséklete, sűrűsége, reakciói és sugárzása a laboratóriumi magfizika törvényeivel

kerültek kapcsolatba.

Ezzel megszületett a forró Big Bang-program. Még hosszú út vezetett a standard kozmológiai modellhez, de a döntő módszertani váltás megtörtént. A kezdet elmélete csak akkor lehetett meggyőző, ha nemcsak a galaxisok távolodását magyarázza, hanem a világegyetem anyagi összetételét és egy ősi sugárzási hátteret is előre jelez.

11. A kezdet nélküli világ hívei

A második világháború után a Big Bang még korántsem volt egyeduralkodó kozmológia. 1948-ban Fred Hoyle, Hermann Bondi és Thomas Gold kidolgozta az állandó állapot elméletét, amely szerint a világegyetem tágul ugyan, de nagyléptékű tulajdonságai időben nem változnak. Ahhoz, hogy a tágulás ellenére az átlagos anyagsűrűség állandó maradjon, folyamatosan új anyagnak kell keletkeznie.

Mai szemmel ez a feltétel különösnek tűnhet, de az elméletnek komoly vonzereje volt. Elegáns „tökéletes kozmológiai elvet” kínált: a világegyetem nemcsak minden helyen és irányban nagyjából hasonló, hanem minden időpontban is. Nem volt szükség kezdetre, különleges kezdeti feltételekre vagy kozmikus születési pillanatra. A világ örökké létezhetett, miközben lokálisan galaxisok születtek és öregedtek.

Fred Hoyle kiváló asztrofizikus volt, aki a csillagok nukleoszintézisének megértésében alapvető eredményeket ért el. A Big Bang kifejezést ő tette közhírré egy 1949-es BBC rádióadásban. A név később úgy élt a köztudatban, mintha gúnyos

kifejezésnek szánta volna, bár a történeti árnyalatok ennél összetettebbek. Akár gúnynévként, akár leíró címkeként hangzott el, rendkívül hatásosnak bizonyult.

A két kozmológia közti vita tudománytörténeti szempontból azért fontos, mert megmutatja: a kezdet kérdését nem lehetett pusztán filozófiai ízlés alapján eldönteni. Mindkét modellnek megfigyelési következményei voltak. Ha az univerzum időben változatlan nagy léptékben, akkor a nagyon távoli galaxisok és rádióforrások statisztikai tulajdonságainak hasonlóaknak kell lenniük a közelebbi, fiatalabb kozmikus környezethez. Ha viszont a világegyetem fejlődik, erős evolúciós különbségek várhatók.

Az ötvenes és hatvanas évek rádiócsillagászati felmérései fokozatosan az evolúciós kép felé billentették a mérleget. A távoli rádióforrások eloszlása arra utalt, hogy a világegyetem múltbeli állapota nem azonos statisztikai értelemben a jelennel. A kvazárok felfedezése tovább erősítette ezt: bizonyos rendkívül aktív objektumok a korai kozmikus korszakban sokkal gyakoribbak voltak.

Az állandó állapot elméletének legnagyobb problémája azonban a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás lett.

Egy közel tökéletes hőmérsékleti spektrumú, minden irányból érkező relikiumsugárzás természetes következménye a forró korai univerzumnak. Az állandó állapot hívei különböző alternatív magyarázatokat kerestek, de egyre nehezebb volt az adatok teljes rendszerét egy kezdet nélküli modellbe illeszteni.

A vita tudományfilozófiai jelentősége abban áll, hogy mindkét oldalnak voltak erős elméleti előfeltevései. Hoyle és társai számára a kezdet nélküli világegyetem esztétikailag és filozófiailag vonzó volt. Eddington és Einstein korábbi ellenérzései a kozmikus kezdettel szemben hasonló intuícióból fakadtak. Lemaître viszont elfogadta a fizikai kezdet lehetőségét, miközben vallási meggyőződéséből nem akarta levezetni annak igazságát.

A végső döntést nem az hozta meg, hogy melyik világkép tűnt kellemesebbnek, hanem az, hogy melyik tudott több, egymástól független megfigyelést közös keretben megmagyarázni. Ez a Big Bang történetének talán legfontosabb módszertani tanulsága. A kozmológia olyan terület, ahol filozófiai előfeltevések szinte elkerülhetetlenül jelen vannak, de tartós tudományos státuszt csak az a modell szerez, amely mérhető nyomokat hagy.

12. A rádiózaj, amely eldöntötte a vitát

1964-ben Arno Penzias és Robert Wilson a Bell Telephone Laboratories holmdeli telephelyén egy nagy, tölcsér alakú antennával dolgozott. Nem a világegyetem eredetét akarták megfejtetni, hanem rendkívül érzékeny rádiómérésekhez igyekeztek csökkenteni a berendezés zaját. Egy makacs háttérjel azonban minden irányból és minden évszakban megmaradt.

A két kutató módszeresen kizárta a lehetséges műszaki okokat. Ellenőrizték az elektronikát, a környezetet és az antennát. A történet legismertebb részlete szerint még az antennába költözött galambok ürülékét is eltávolították, mert az is lehetséges zajforrásnak tűnt. A háttér azonban nem tűnt el. Körülbelül három kelvinnek megfelelő többletsugárzás maradt.

Eközben a közeli Princeton Egyetemen Robert Dicke, Jim Peebles, Peter Roll és David Wilkinson éppen olyan kísérleten gondolkodott, amely a forró korai világegyetem maradványsugárzását kereste volna. Amikor a két csoport kapcsolatba került, gyorsan világossá vált, hogy Penzias és Wilson valószínűleg azt

találták meg, amit a princetoniak elméleti okokból kerestek.

1965-ben két egymást követő tanulmány jelent meg az *Astrophysical Journal*-ban. Penzias és Wilson tárgyilagosan leírták a többlet antenna-hőmérsékletet, míg Dicke és munkatársai kozmológiai értelmezést adtak. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezése ezzel belépett a fizika történetébe. Penzias és Wilson 1978-ban Nobel-díjat kapott érte.

Az epizód különös igazságtalansága, hogy Alpher és Herman 1948-as előrejelzése ekkor már alig élt a közösségi emlékezetben. A felfedezés körüli első publikációk sem emelték ki megfelelően korábbi munkájukat. Később a történeti kutatás helyreállította szerepüket, de pályájuk idején nem kapták meg azt az elismerést, amelyet ma a kozmikus háttér előrejelzéséhez társítunk.

Lemaître viszont megérte a felfedezést. 1966-ban, röviddel halála előtt értesült a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás eredményeiről. Betegsége miatt már nem vehetett részt aktívan a tudományos vitákban, de számára a hír különleges jelentőségű lehetett. Harmincöt évvel az ósatom hipotézise után olyan megfigyelés

született, amely erősen alátámasztotta, hogy a világegyetem valóban forró és sűrű állapotból fejlődött ki.

A háttérsugárzás önmagában nem igazolta Lemaître minden részletét. Az ősatom konkrét mechanizmusa nem lett a modern elmélet része, és a Big Bang sem egyetlen pontszerű objektum szétrobbanását jelenti. Ami igazolást nyert, az a lényegi történeti intuíció: a jelenlegi táguló univerzum múltja fizikailag más állapot volt, és ennek maradványa ma is körülvesz bennünket.

A felfedezés után az állandó állapot elmélete gyorsan elvesztette vezető alternatív szerepét. A kozmológia hangsúlya megváltozott. Már nem elsősorban arról kellett vitázni, volt-e forró kezdet, hanem arról, pontosan milyen folyamatok zajlottak a korai világegyetemben, hogyan keletkeztek a galaxisok, és milyen anyag- és energiaösszetevők irányítják a tágulást.

Ettől kezdve a Big Bang nem filozófiai ízlés kérdése volt, hanem olyan kutatási keret, amely egyszerre magyarázta a tágulást, a könnyű elemek gyakoriságát és a kozmikus háttérsugárzást. Lemaître halálának évében az általa elindított gondolatmenet belépett a tudományos standard modell korszakába.

13. A számítógéphez vezető út

Lemaître-ről gyakran kialakul az a kép, hogy a húszas-harmincas évek kozmológiájának embere volt, aki nagy felismerése után fokozatosan háttérbe vonult. Valójában egész életében érdeklődött a matematika és a számítás új módszerei iránt. A numerikus munka számára nem másodlagos technikai feladat volt, hanem a fizikai problémák megoldásának önálló eszköze.

A relativitáselméleti egyenletek sok esetben nem oldhatók meg egyszerű zárt alakban. Már a korai kozmológiában is szükség volt közelítésekre, táblázatokra és numerikus integrálásra. Lemaître Eddington mellett és amerikai tanulmányai során is találkozott olyan számítási kultúrával, amelyben az elméleti fizikus nem választhatta el magát a konkrét számoktól.

A második világháború után az elektronikus számítógépek megjelenése új korszakot nyitott. Lemaître érdeklődött ezek iránt, és a leuveni egyetemen is támogatta a számítástechnikai fejlesztéseket. Ez első pillantásra távolinak tűnhet az ősatomtól, pedig ugyanaz a gondolkodásmód húzódik mögötte: az elmélet értékét növeli, ha konkrétan kiszámítható következményekhez

vezet.

A modern kozmológia ma elképzelhetetlen nagyteljesítményű számítógépek nélkül. Galaxisok milliárdjainak statisztikáját, sötétanyag-hálózatok kialakulását és a kozmikus háttér anizotrópiáit numerikus szimulációkban vizsgálják. Egy teljes világegyetemet természetesen nem lehet minden részecskéjével lemásolni, de közelítő modellek segítségével megfigyelhető szerkezetek állíthatók elő.

Lemaître nem láthatta ennek a fejlődésnek a mai méreteit, de az a nyitottság, amellyel a számítástudomány felé fordult, jól illik pályájához. Nem a nagy filozófiai kijelentések vonzották önmagukért. A kozmológia nála mindig együtt jelentette az elméleti geometriát, a megfigyelési adatokat és a számszerű ellenőrizhetőséget.

Ez azért fontos, mert a Big Bang népszerű története könnyen mítosszá alakítja Lemaître-t: magányos papként egyszer csak „kitalálta”, hogy a világnak kezdete van. A valóság prózaibb és érdekesebb. Egy kiválóan képzett matematikus és fizikus módszeresen egyesítette a relativitáselméletet a korszak csillagászati adataival, majd ugyanazzal a technikai kíváncsisággal követte a

fizika és számítástechnika fejlődését.

A számítógépes korszak egy másik történeti tanulságot is kínál. A kozmológia kezdetben rendkívül kevés adattal dolgozott: néhány tucat galaxis távolságával és vöröseltolódásával. Ma égboltfelmérések milliónyi, sőt milliárdnyi objektumot katalogizálnak. A probléma már nem az adathiány, hanem az adatok feldolgozhatósága. Mégis ugyanaz az alaplogika érvényes: a kozmológiai modellnek statisztikailag ellenőrizhető kapcsolatot kell teremtenie az elmélet és a megfigyelés között.

Lemaître ebben az értelemben nemcsak egy történeti elmélet szerzője, hanem a modern precíziós kozmológia egyik korai előfutára is. A számokhoz való ragaszkodása különböztette meg azoktól, akik a világegyetemről főként filozófiai rendszerként gondolkodtak. A kozmosz nála mérhető objektummá vált.

14. Hubble-Lemaître: történeti igazságtétel vagy új mítosz?

Amikor a Nemzetközi Csillagászati Unió 2018-ban azt ajánlotta, hogy a Hubble-törvényt Hubble-Lemaître-törvénynek nevezzék, sokan történeti igazságtételként ünnepelték a döntést. A szavazásban részt vevő tagok nagy többsége támogatta az új elnevezést. A lépés ráirányította a figyelmet az 1927-es tanulmányra és arra, hogy Lemaître két évvel Hubble előtt publikált sebesség-távolság összefüggést egy táguló kozmológiai modell részeként.

A névváltoztatás azonban önmagában nem oldja meg a tudománytörténet minden problémáját. Ha a régi egyszerű történet szerint „Hubble felfedezte a tágulást” pontatlan volt, akkor az új, fordított egyszerűsítés, amely szerint „valójában Lemaître fedezte fel, Hubble pedig elvitte a dicsőséget”, ugyanúgy félrevezető lehet. A felfedezés fogalmát több összetevőre kell bontani.

Slipher nélkül nem álltak volna rendelkezésre a korai vöröseltolódási adatok. Henrietta Leavitt Cepheida-kapcsolata nélkül nem létezett volna használható extragalaktikus távolságskála. Hubble nélkül

nem szilárdult volna meg olyan gyorsan a galaxisok különálló voltának és a távolság-vöröseltolódás kapcsolatának megfigyelési alapja. Friedmann nélkül a dinamikus relativisztikus univerzum matematikai lehetősége kevésbé lett volna világos. Lemaître nélkül pedig hiányzott volna az a korai szintézis, amely a relativitást és a konkrét galaxisadatokat egységes táguló modellbe foglalta.

A tudományos eponimák eleve torzítanak. Egy törvényhez egy vagy két nevet rendelnek, miközben az eredmény gyakran egész hálózat munkájából születik. A név praktikus rövidítés, de könnyen történeti tulajdonjoggá változik a közgondolkodásban. A Hubble–Lemaître elnevezés ezért akkor hasznos, ha nem újabb kizárólagos szerzőséget sugall, hanem emlékeztet az elmélet és megfigyelés kettős történetére.

A vita azért is tanulságos, mert a tudomány történeti önkorrekcióját mutatja. A levéltárak digitalizálása, levelezések vizsgálata és régi folyóiratok hozzáférhetővé válása lehetővé tette, hogy pontosabban rekonstruáljuk a prioritásokat. Lemaître 1931-es fordításának kihagyott részei körül például csak a dokumentumok részletes vizsgálata tisztázta, hogy maga a szerző döntött a rövidítés mellett.

Ez a tény árnyalja a „kitörölt felfedező” képét. Lemaître nem úgy viselkedett, mint aki mindenáron történeti elsőbbségét akarja rögzíteni. 1931-ben fontosabbnak tartotta a korszerű tudományos tartalmat, mint saját négy évvel korábbi számszerű becsléseinek újraközlését. Nevezhetjük ezt tudományos szerénységnek, de arra is rávilágít, hogy a kutató és a későbbi tudománytörténész más szempontok szerint mérlegeli ugyanannak a szövegnek a jelentőségét.

Az IAU döntése végül nem arról szólt, hogy Hubble érdemeit csökkentsék. A hivatalos indoklás mindkét kutató alapvető hozzájárulását hangsúlyozta. A törvény ma is annak egyszerű empirikus tényét fejezi ki, hogy a kozmológiai tágulásban a kellően közeli galaxisok recessziós sebessége közel arányos a távolságukkal. A név pedig arra emlékeztet, hogy az összefüggés elméleti értelmezése és megfigyelési megerősítése külön utak találkozásából született.

Lemaître rehabilitációjának valódi értelme ezért nem a névtábla megváltoztatása. Sokkal fontosabb, hogy visszakerült a kozmológia születésének központi történetébe. Nem mellékszereplő volt Einstein és Hubble között, hanem olyan kutató, aki a modern kozmológia több alapfogalmát egyetlen programban kapcsolta össze:

tágulás, vöröseltolódás, kozmikus kezdet és a megfigyelésekhez kötött relativisztikus modell.

HÁTTÉRGYÁR

15. A kozmológiai állandó visszatérése

A huszadik század végén a kozmológia újabb meglepetést tartogatott. Hosszú ideig az volt az alapvető kérdés, hogy a világegyetem tágulása mennyire lassul a benne lévő anyag gravitációja miatt. Ha elég nagy az anyagsűrűség, a tágulás akár meg is állhat, majd összehúzódás következhet. Ha kisebb, a tágulás örökké folytatódhat, de egyre lassabban.

1998-ban két kutatócsoport távoli Ia típusú szupernóvák fényességét vizsgálva arra a következtetésre jutott, hogy a kozmikus tágulás nem lassul, hanem gyorsul. Az eredmény annyira váratlan volt, hogy újra elő kellett venni Einstein régi kozmológiai állandóját vagy valamilyen más, negatív nyomású energiakomponenst. Megszületett a „sötét energia” fogalma.

A történet Lemaître szempontjából különösen érdekes. Ő a harmincas években nem vetette el automatikusan a kozmológiai állandót, miután Einstein már nem tartotta szükségesnek a statikus univerzumhoz. Olyan modelleket vizsgált, amelyekben az univerzum hosszabb ideig egy kvázistatikus állapot közelében maradhatott, majd

gyorsabb tágulási szakaszba lépett. Ezek a modellek nem azonosak a mai Λ CDM kozmológiával, de azt mutatják, hogy Lemaître a kozmológiai állandót fizikailag komolyan vehető összetevőként kezelte.

Még érdekesebb, hogy az üres térhez energiasűrűséget társító értelmezésekben is gondolkodott. A modern kvantumtérelmélet vákuumenergiája sokkal bonyolultabb problémát jelent, és nem lehet Lemaître-t egyszerűen a sötét energia felfedezőjének nevezni. Történetileg azonban figyelemre méltó, hogy olyan fogalmi lehetőséget tartott nyitva, amely évtizedekre kiment a divatból, majd új megfigyelési kényszer hatására visszatért.

A mai standard kozmológiai modell neve Λ CDM. A görög lambda a kozmológiai állandóra utal, a CDM pedig a hideg sötét anyagra. A modell rendkívül sikeresen írja le a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás anizotrópiáit, a galaxisok nagyléptékű eloszlását, a könnyű elemek gyakoriságát és a tágulás történetének nagy részét. Ugyanakkor két fő összetevőjének, a sötét anyagnak és a sötét energiának a mikrofizikai természete továbbra is ismeretlen.

Ez fontos ellensúly a diadalmas tudománytörténettel szemben. A Big Bang-modell nem azt jelenti, hogy „már mindent tudunk” a világegyetem eredetéről. A kozmológia ma sokkal pontosabb, mint Lemaître idején, de újabb rejtélyekkel szembesül. Nem tudjuk biztosan, mi a sötét anyag, mi okozza a gyorsuló tágulást, pontosan mi történt az infláció feltételezett korszakában, vagy hogyan írható le a gravitáció kvantumozott tartományban.

Lemaître módszertani öröksége ezért ma is releváns. Egy elegáns modellt nem célszerű végső metafizikai igazságként kezelni. A kozmológia akkor fejlődik, amikor az elméleti lehetőségeket új megfigyelések kényszerítik módosításra. Einstein kozmológiai állandója egyszer mesterséges stabilizátornak tűnt, később fölöslegessé vált, majd a huszadik század végén új jelentéssel tért vissza.

A tudomány története ritkán egyenes vonal. Fogalmak eltűnnek, majd új kontextusban visszatérnek. Lemaître pályája különösen alkalmas ennek bemutatására, mert életművében több olyan gondolat található, amelyet kortársai túl merésznek, fölöslegesnek vagy spekulatívnak véltek, később pedig a modern kozmológia központi kérdésévé vált.

16. A precíziós kozmológia kora

A hatvanas évek közepén a kozmikus háttérsugárzás felfedezése erősen támogatta a forró Big Bang-modellt, de a sugárzás részletes szerkezete még ismeretlen volt. A következő évtizedek egyik legnagyobb tudományos programja annak feltérképezése lett, milyen pontosan ez a háttér, milyen a spektruma, és vannak-e benne apró hőmérsékletkülönbségek, amelyekből később galaxisok és galaxishalmazok fejlődhetnek ki.

A COBE műhold 1989-es indítása után mérési pontosságban új korszak kezdődött. A FIRAS műszer megmutatta, hogy a kozmikus mikrohullámú háttér spektruma rendkívül pontosan fekete-test sugárzásnak felel meg, ahogy egy egykor termikus egyensúlyban lévő forró univerzum esetében várható. 1992-ben a COBE az égbolt apró hőmérséklet-ingadozásait is kimutatta. Ezek az eltérések százvezred nagyságrendűek voltak, mégis belőlük nőttek ki gravitációsan a későbbi kozmikus struktúrák.

A WMAP, majd az Európai Űrügynökség Planck műholdja még nagyobb pontossággal térképezte fel az anizotrópiákat. A háttérsugárzás mintázata alapján

meghatározhatóvá vált a világegyetem kora, geometriája és összetételének számos paramétere. Lemaître korában néhány tucat galaxis bizonytalan távolságából próbált kozmológiai állandót becsülni; egy évszázaddal később teljes égbolttérképek milliónyi mérési pontja szolgálja ugyanazt az alapvető célt.

A galaxisfelmérések szintén forradalmi mértékben nőttek. A Sloan Digital Sky Survey és más programok háromdimenziós térképeket készítettek a kozmikus hálóról. A galaxisok eloszlása jellegzetes szerkezetet mutat: filamentumokat, falakat és üregeket alkotnak. E szerkezet statisztikai tulajdonságai visszavezethetők a korai univerzum apró sűrűség-ingadozásaira.

A kozmológia ezzel „precíziós tudománnyá” vált. Ez a kifejezés nem azt jelenti, hogy minden kérdés lezárult, hanem azt, hogy egyes alapparamétereket százalékos vagy annál jobb pontossággal lehet becsülni. Ugyanakkor éppen a pontosság hozott új feszültségeket. A Hubble-állandó helyi mérései és a korai univerzum adataiból, standard modell alapján következtetett érték között tartós eltérés jelent meg, amelyet Hubble-feszültségnek neveznek.

A vita különös módon visszavezeti a kozmológiát Lemaître 1927-es problémájához. Mekkora a kapcsolat a távolság és recessziós sebesség között? A mérési technikák összehasonlíthatatlanul fejlettebbek, de az alapvető mennyiség ugyanaz. Ma Cepheidák, Ia szupernóvák, gravitációs lencsék, maserek és más módszerek építik a helyi távolságlétrát, miközben a háttérsugárzásból teljesen más úton következtetünk a tágulási ütemre.

Ha a feszültség tartósan megmarad, az jelezheti ismeretlen szisztematikus hibák jelenlétét, de akár a standard kozmológiai modell kiegészítésének szükségességét is. Ez jó példa arra, hogy a pontos mérés nem lezárja, hanem új szintre emeli az elméleti kérdéseket. Lemaître számára ez alighanem ismerős tudományos helyzet lenne: a számok akkor válnak igazán érdekessé, amikor nem illeszkednek tökéletesen a kényelmes képbe.

17. A James Webb és a korai galaxisok

A James Webb Űrtávcső működésének első évei újra közérdeklődés középpontjába helyezték a korai világegyetemet. Az infravörös megfigyelések segítségével olyan galaxisjelöltek és később spektroszkópiailag megerősített galaxisok váltak láthatóvá, amelyek a Big Bang után néhány százmillió évvel már léteztek. Egyes eredmények kezdetben olyan címeket szültek, mintha a Webb „megcáfolná a Big Banget”.

Ez a megfogalmazás félreérti a kozmológiai modellek természetét. A Big Bang alapvető állításai – a tágulás, a forró korai állapot, a könnyű elemek nukleoszintézise és a kozmikus háttérsugárzás – nem azon múlnak, pontosan milyen gyorsan épültek fel az első galaxisok. Ha a galaxisok bizonyos modelleknél korábban vagy gyorsabban alakultak ki, akkor elsősorban a struktúráképződés részleteit kell módosítani.

A Webb eredményei azonban valós kihívásokat adnak. Meg kell érteni, hogyan tudott a gáz ilyen gyorsan csillagokká rendeződni, milyen volt az első csillagpopulációk tömegeloszlása, és hogyan

nővekedhettek korán nagy tömegű fekete lyukak. Ezek a kérdések a kozmológia és asztrofizika határán helyezkednek el, ahol a nagy léptékű kezdeti feltételek találkoznak a bonyolult helyi visszacsatolásokkal.

Lemaître számára a távoli galaxisok vöröseltolódása a kozmikus tágulás kulcsadata volt. A Webb korszakában ugyanaz a vöröseltolódás időgépként is szolgál: minél távolabb nézünk, annál korábbi állapotban látjuk az univerzumot. A csillagászat így szó szerint történeti tudománnyá vált. A fény véges sebessége miatt az égbolt különböző mélységei különböző kozmikus korszakokat mutatnak.

Ez a fejlemény látványosan teljesíti ki Lemaître szemléleti fordulatát. A világegyetem változásának múltbeli szakaszai közvetlen megfigyelési nyomokat hagynak. Nem úgy vizsgálhatók, mint egy laboratóriumi kísérlet, amelyet újra és újra megismételhetünk, hanem az idő különböző mélységeiből érkező fény összehasonlításával. A kozmológus egyszerre fizikus, csillagász és a kozmikus múlt rekonstruálója.

A modern műszerek ezért nem teszik fölöslegessé az 1927-es történetet. Ellenkezőleg: megmutatják, milyen messzire jutott ugyanaz a kutatási program. Lemaître

néhány tucat galaxis adatából következtetett a tágulásra. A mai teleszkópok a világegyetem első milliárd évének galaxispopulációit statisztikailag vizsgálják. A különbség technikai méretében óriási, de a kérdés változatlan: hogyan lett a korábbi világból a jelenlegi?

18. Mi volt a Big Bang előtt?

A Big Bang népszerű magyarázataiban szinte elkerülhetetlenül felmerül a kérdés: mi volt előtte? A hétköznapi időfogalom azt sugallja, hogy minden eseménynek van korábbi pillanata. Ha a világegyetemnek kezdete van, ösztönösen szeretnénk egy még korábbi állapotot elképzelni. A modern fizika azonban nem biztos, hogy megengedi a kérdés ilyen egyszerű formáját.

Az általános relativitáselmélet klasszikus megoldásait visszafelé követve bizonyos feltételek mellett szingularitáshoz jutunk: a sűrűség és görbület formálisan végtelenné válik, az elmélet leíró ereje megszűnik. A szingularitás nem feltétlenül fizikai tárgy vagy tényleges végtelen sűrűségű pont. Inkább azt jelzi, hogy a klasszikus elmélet határához érkeztünk, és kvantumgravitációs leírásra lenne szükség.

Lemaître ősatomja ebben a tekintetben előfutár volt, de nem végleges válasz. Ő már érezte, hogy a kezdet közelében a kvantumelméletnek alapvető szerepe lehet. A modern fizika ezt még komolyabban veszi. A Planck-skála környezetében az általános relativitás és a kvantummechanika egyesítése szükséges, de ma nincs kísérletileg igazolt teljes kvantumgravitációs elméletünk.

Több hipotézis létezik. Egyes modellek kozmikus visszapattanást tételeznek fel, amelyben egy korábbi összehúzódó szakasz után kezdődik a jelenlegi tágulás. Más elképzelések ciklikus univerzumokról, kvantumos kezdeti állapotokról vagy örök inflációról szólnak. Ezek tudományosan vizsgálható programok lehetnek, de egyik sem rendelkezik olyan széles körű empirikus támogatással, mint a forró Big Bang-modell későbbi szakaszai.

Fontos tehát különbséget tenni a „Big Bang” két jelentése között. Az egyik a jól igazolt forró, sűrű korai univerzum modellje, amelyből a háttérsugárzás és a könnyű elemek gyakorisága következik. A másik a szó szoros értelmében vett végső kezdet, ahol a klasszikus téridő maga is megszületik. Az elsőről sokat tudunk, a másodiktól jóval kevesebbet.

Lemaître teológiai óvatossága itt ismét tanulságos. Ha a fizika egyszer olyan modellt találna, amely a jelenlegi táguló korszakot egy korábbi fázisból vezeti le, ez nem cáfolná automatikusan a teremtés vallási fogalmát, ahogy a jelenlegi Big Bang-modell sem bizonyítja azt. A tudományos kérdés az, milyen fizikai állapot előzte meg a megfigyelhető forró szakaszt, és vannak-e ennek mérhető nyomai.

A „mi volt előtte?” kérdés ezért ma is legitim kutatási motiváció, de nem szabad kész válaszokat hozzárendelni. A kozmológia története arra tanít, hogy a metafizikai vágy könnyen előreszalad a bizonyítékokhoz képest. Einstein örök statikus világot szeretett volna, Hoyle kezdet nélküli állandó állapotot, mások teológiai bizonyítékot láttak a Big Bangben. Az adatok egyikük filozófiai ízléséhez sem kötelesek alkalmazkodni.

19. A kozmikus távolságlétra: hogyan lett mérhető a világegyetem

A táguló világegyetem történetét nem lehet megérteni a távolságmérés története nélkül. A csillagászatban a távolság ritkán mérhető úgy, mint egy földi tárgy esetében. A közeli csillagoknál a parallaxis geometriai módszere használható: a Föld Nap körüli mozgása során ugyanaz a csillag kissé más irányban látszik a távoli háttérhez képest. Minél kisebb ez a látszólagos elmozdulás, annál távolabbi a csillag. A módszer azonban a huszadik század eleji műszerekkel csak viszonylag kis kozmikus környezetben működött.

A nagyobb távolságokhoz másfajta „standard gyertyákra” volt szükség: olyan objektumokra, amelyek valódi fényessége valamilyen mérhető tulajdonságból megbecsülhető. Henrietta Swan Leavitt a Harvard College Observatory fényképlemezeit elemezve fedezte fel, hogy a Kis Magellán-felhő Cepheida változócsillagainak pulzációs periódusa és fényessége között szabályos kapcsolat van. Mivel e csillagok nagyjából ugyanabban a távoli rendszerben helyezkedtek el, fényességkülönbségeik nem magyarázhatók

lényegesen eltérő távolsággal. Leavitt felismerése később az extragalaktikus távolságmérés egyik alapjává vált.

A kapcsolat kalibrálása után egy Cepheida periódusából meg lehetett becsülni abszolút fényességét, majd a megfigyelt fényességből távolságát. Hubble ezt a módszert használta az Androméda-ködben és más spirális ködökben talált változócsillagokra. A következtetés forradalmi volt: ezek a rendszerek nem a Tejútrendszer kisebb ködei, hanem saját csillagok milliárdjait tartalmazó távoli galaxisok.

A távolságlétra kifejezés pontosan érzékelteti a módszer szerkezetét. Egyetlen technika sem ér el a közvetlen közelünktől a kozmikus horizontig. Az egyik módszerrel kalibrálják a következőt, majd azzal egy még fényesebb objektumtípust. A létra alsó fokain a parallaxis, fölötte Cepheidák, majd többek között Ia típusú szupernóvák állhatnak. Minden fokozat bizonytalansága továbbterjed a következőre, ezért a kozmológiai tágulás mérésének története egyben a kalibrációk története is.

Lemaître 1927-es számításaiban ez döntő probléma volt. A rendelkezésére álló galaxis-távolságok jóval

kisebbség voltak a mai értékeknél. Ha ugyanahhoz a vöröseltolódáshoz túl kis távolságot rendelünk, a sebesség-távolság arányossági tényező, vagyis a Hubble-állandó túl nagy lesz. Ez történt a húszas években. A kapott több száz kilométer per másodperc per megaparszekes értékek a mainál sokkal gyorsabb tágulást jelentettek volna.

A következmény egy egész kozmológiai időskálát tett bizonytalanná. Ha a tágulási ütem nagyon nagy, akkor egyszerű visszaszámolással a világegyetem kora meglepően kicsinek adódik. Egy időben a kozmológiai kor még kisebbnek tűnt, mint a Föld geológiai kora vagy az ismert legöregebb csillagoké. Ez az úgynevezett korkrízis komoly problémát jelentett a korai táguló modelleknek.

Lemaître egyik oka arra, hogy a kozmológiai állandót és bizonyos összetettebb tágulási történeteket komolyan vegye, éppen az volt, hogy ezek enyhíthették a korkrízist. Egy univerzum tágulása nem feltétlenül zajlik mindig ugyanazzal az egyszerű ütemmel. Lehetnek lassabb és gyorsabb szakaszok, így a jelenlegi tágulási ráta nem fordítható vissza naivan az egész kozmikus múltba.

A távolságskála javítása később drámaian megváltoztatta a helyzetet. Walter Baade a második világháború idején és után különböző csillagpopulációkat és Cepheida-típusokat választott szét, amivel lényegében megduplázta bizonyos extragalaktikus távolságokat. Későbbi kalibrációk tovább finomították a skálát. A Hubble-állandó becsült értéke fokozatosan csökkent, és a világegyetem kora összhangba került a csillagfejlődési és geológiai korbecslésekkel.

A történet azért tanulságos, mert megmutatja, milyen könnyen tűnhet elméleti válságnak egy mérési skála hibája. Ugyanakkor az ellenkezője is igaz: egy tartós mérési feszültség valódi új fizikára utalhat. A mai Hubble-feszültség ezért olyan izgalmas. A kozmológusok pontosan tudják, hogy a távolságlétra történetében sokszor voltak rejtett kalibrációs hibák, mégis azt is, hogy az eltérés akár a standard modell hiányosságát jelezheti.

Lemaître korszakában egy galaxis távolsága bizonytalan, soklépcsős következtetés volt. A Gaia űrtávcső ma több mint egymilliárd csillag helyzetét és sok millió parallaxisát méri rendkívüli pontossággal, miközben a Hubble és a James Webb Cepheidákat és más távolságjelzőket figyel távoli galaxisokban. A

módszertani alap azonban ugyanaz maradt: a kozmikus távolságot nem közvetlenül látjuk, hanem egymásra épülő fizikai összefüggésekből rekonstruáljuk.

Ez Lemaître 1927-es teljesítményét is árnyalja. Nem „rosszul mérte” a Hubble-állandót abban az értelemben, hogy hibásan számolt volna. A kor rendelkezésre álló távolságadatait használta, és azok korlátai öröklődtek az eredményébe. A szám idővel elavult, a módszer viszont fennmaradt. Ez az egyik legtisztább példája annak, hogy a tudományban egy gondolat hosszabb életű lehet, mint az első számszerű eredmény, amellyel megszületett.

20. A Solvay-világ és a fizika aranykora

Az 1927-es év a fizika történetében nemcsak Lemaître tanulmánya miatt nevezetes. Októberben Brüsszelben rendezték meg az ötödik Solvay-konferenciát, amelyet később a modern fizika egyik legendás találkozájaként emlegettek. A csoportképen Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Dirac, Born, de Broglie és más nagy nevek láthatók. A találkozó központi témája az elektronok és fotonok új kvantumelmélete volt.

Lemaître jelenléte ebben a szellemi közegben fontos. A kvantummechanika és a relativitáselmélet ugyanabban az évtizedben alakította át a fizika alapfogalmait, de a két forradalom sokáig külön pályán haladt. A kvantummechanika az atomok és elemi részecskék világát rendezte át, az általános relativitás pedig a gravitációt és a kozmikus geometriát. Lemaître azon kevés kutató közé tartozott, akik korán érezték, hogy a világegyetem kezdetének kérdésénél e két elméleti világ előbb-utóbb találkozni fog.

A Solvay-konferenciák intézménytörténete is sokat elárul a korszakról. Ernest Solvay belga iparos vagyonából finanszírozta az első találkozókat, amelyek

kis létszámú, intenzív vitafórumként működtek. Ezek nem a megszokott kongresszusi formát követték, ahol egymást váltják az előadások, hanem olyan műhelyekként működtek, amelyekben a fizika legmélyebb értelmezési problémáiról is hosszan vitáztak.

1927-ben a figyelem főként Bohr és Einstein kvantummechanikai vitájára irányult. Einstein nem tudta elfogadni, hogy a kvantumelmélet alapvetően valószínűségi természetű legyen, Bohr pedig azt hangsúlyozta, hogy a mérési helyzet és a komplementaritás nem kerülhető meg klasszikus intuícióval. Lemaître kozmológiai elképzelése kevés figyelmet kapott ehhez képest, mégis ugyanebben a közegben került Einstein elé.

A történeti ironia szembetűnő. Einstein egyszerre két fronton szembesült olyan következményekkel, amelyek saját fizikai ösztöneivel ütköztek. A kvantummechanikában a meghatározatlanság és valószínűség zavarta, a kozmológiában a dinamikus, esetleg kezdettel rendelkező univerzum. Mindkét esetben ő alkotta meg azokat az alapvető gondolati eszközöket, amelyek az új elméletekhez vezettek, mégis kritikusan viszonyult azok egyes értelmezéseihez.

Lemaître számára a kvantumforradalom nem pusztán háttér volt. Amikor 1931-ben az ősatomról írt, kifejezetten a kvantumelméletből merített inspirációt. Úgy gondolta, hogy a világegyetem legkorábbi állapotában a klasszikus fogalmak már nem feltétlenül alkalmazhatók, és a kvantumok száma, illetve az entrópia fejlődése adhat támpontot a kezdet fizikai értelmezéséhez.

A mai fizikus számára az ősatom kvantumos érvelése kezdetlegesnek tűnhet, de történetileg jelentős. A kvantumgravitáció ma is a fundamentális fizika egyik legnagyobb megoldatlan problémája. A fekete lyukak belseje és a kozmikus kezdet olyan tartomány, ahol az általános relativitás klasszikus geometriai leírása és a kvantumelmélet egyszerre válik nélkülözhetetlenné. Lemaître nem rendelkezett az ehhez szükséges modern matematikával, de felismerte a probléma irányát.

A Solvay-korszak másik jellemzője a tudomány nemzetközi jellege volt egy politikailag szétszakadó Európában. Az első világháború sebei még frissek voltak, a harmincas években pedig hamarosan fasizmus, náciizmus, emigráció és újabb háború bontotta szét a kutatói hálózatokat. Lemaître belga tudósként Cambridge, Harvard, MIT, Párizs, Berlin és Kalifornia

között mozgott. Tudományos identitása kezdettől nemzetközi volt.

Ez is hozzájárult ahhoz, hogy képes legyen különböző hagyományokat összekapcsolni. A brit relativitáselméleti iskola Eddingtonnal, az amerikai megfigyelési csillagászat Shapleyval és Hubble-lel, a kontinentális matematika de Sitterrel és másokkal mind jelen voltak gondolkodásában. A tudományos áttörések gyakran éppen ilyen határhelyzetekben születnek, ahol valaki több közösség nyelvét egyaránt érti.

Az 1927-es Solvay-találkozó fotója ma a „zseniális generáció” szimbóluma. Lemaître története arra figyelmeztet, hogy a korszak teljesítménye sokkal szélesebb körhöz kötődik néhány híres névnél. A fizika forradalma intézmények, utazások, levelezések, fordítások és személyes találkozások hálózatában zajlott. Egy belga folyóirat francia nyelvű cikke ugyanennek a nemzetközi tudományos világnak volt a része, még ha kezdetben kevés olvasóhoz jutott is el.

21. A korkrízis és a „habozó univerzum”

A korai táguló kozmológia egyik legkomolyabb technikai nehézsége az univerzum becsült kora volt. Ha a galaxisok recessziós sebessége egyszerűen arányos a távolságukkal, akkor a Hubble-állandó reciproka első közelítésben jellegzetes tágulási időskálát ad. A húszas-harmincas évek nagy Hubble-állandó értékei alapján ez az időskála néhány milliárd évnél is kisebb lehetett.

A geológusok eközben radioaktív kormeghatározási módszerekkel egyre nagyobb kort rendeltek a Földhöz. A csillagfejlődés elmélete is hosszú időskálákat igényelt. Kínos helyzet alakult ki: a világegyetem a legegyszerűbb kozmológiai becslés szerint fiatalabbnak tűnt egyes benne található objektumoknál. Egy ilyen ellentmondás nyilvánvalóan azt jelenti, hogy legalább az egyik becslés hibás vagy a modell túl egyszerű.

Lemaître egyik válasza az úgynevezett habozó vagy stagnáló modell volt. A kozmológiai állandó megfelelő értéke mellett elképzelhető olyan tágulási történet, amelyben az univerzum hosszú ideig egy Einstein-féle statikus állapot közelében marad, majd később

gyorsabban tágulni kezd. Ezzel a jelenlegi nagy tágulási ütem mellett is jóval nagyobb teljes kor adódhat.

A modellnek más vonzereje is volt. Ha a világegyetem hosszabb időt tölt viszonylag lassú változásban, több idő állhat rendelkezésre galaxisok és nagy struktúrák kialakulására. Lemaître ezért a kozmológiai állandót nem pusztán matematikai maradványnak tekintette, hanem olyan paraméternek, amely megfigyelési problémákat oldhat meg.

A későbbi távolságskála-korrekciók megmutatták, hogy a korkrízis jelentős része a galaxisok távolságának alábecsléséből származott. A Hubble-állandó kisebb lett, a kozmikus időskála megnőtt. A habozó modell konkrét motivációja így gyengült. Mégsem vált teljesen érdektelenné, mert a kozmológiai állandó szerepének vizsgálata hosszú távon termékenynek bizonyult.

A történet módszertani szempontból különösen értékes. Amikor egy elmélet és megfigyelés ellentmond, több lehetőség van: hibás az elmélet, hibás az adat, hibás az adatok értelmezése, vagy hiányzik egy fizikai összetevő. A kutató ritkán tudja azonnal, melyik eset áll fenn. Lemaître nem tehetette meg, hogy egyszerűen elveti a tágulást, mert arra egyre több megfigyelés utalt.

Ehelyett a tágulási történet összetettebb formáját vizsgálta.

A mai kozmológiában hasonló helyzetek ismét előfordulnak. A Hubble-feszültség esetén is kérdés, hogy kalibrációs probléma, statisztikai eltérés vagy új fizika áll-e a háttérben. A sötét anyag és sötét energia története is részben abból született, hogy a meglévő elméletek és megfigyelések között következetes eltérések jelentkeztek.

Lemaître „habozó univerzuma” ma nem standard modell, mégis jó példa arra, hogyan dolgozik egy elméleti fizikus egy válsággal. Nem egyszerű javítást keresett a képleteken, hanem az általános relativitás által megengedett paraméterteret vizsgálta, és azt kérdezte, található-e benne olyan fejlődéstörténet, amely megfelel több független megfigyelési korlátnak.

A korkrízis végül megszűnt, de a világegyetem korának pontos meghatározása továbbra is fontos teszt maradt. A kozmikus háttér, a csillagpopulációk és a tágulási adatok ma nagyjából 13,8 milliárd éves univerzumra mutatnak. Az, hogy különböző módszerek összhangban vannak, a modern kozmológia egyik nagy sikere. E sikerhez azonban olyan korai válságok vezettek,

amelyek arra kényszerítették a kutatókat, hogy komolyan vegyék az időskálák következetességét.

HÁTTÉRGYÁR

22. XII. Pius, a teremtés és Lemaître óvatossága

A Big Bang és a keresztény teremtéstan kapcsolatáról szóló vita egyik legfontosabb történeti epizódja az ötvenes évek elején zajlott. XII. Pius pápa élénken érdeklődött a modern természettudomány iránt, és több beszédében foglalkozott azzal, hogyan kapcsolódhatnak az új fizikai eredmények a filozófiai és teológiai kérdésekhez. 1951-ben a Pápai Tudományos Akadémia ülésén olyan beszédet mondott, amelyben a kozmológia eredményeit a világ kezdetére és teremtésére vonatkozó érveléssel hozta összefüggésbe.

A beszéd háttérében érthető intellektuális lelkesedés állt. A huszadik század közepén a táguló világegyetem és a véges múlt lehetősége sokak számára úgy tűnt, mintha a modern fizika közelebb kerülne a bibliai teremtés hagyományos képéhez, mint a tizenkilencedik század öröknek gondolt kozmosza. Egy vallási vezető számára csábító volt ezt a fejleményt a hit és tudomány összhangjaként bemutatni.

Lemaître azonban veszélyt látott ebben. Nem azért, mert tagadta volna a teremtéshitet, hanem mert tudta, milyen gyorsan változhatnak a kozmológiai modellek. A

harmincas években még komoly alternatíva volt többféle tágulási történet, a negyvenes-ötvenes években pedig az állandó állapot elmélete is erős vetélytárs volt. Ha az egyház tanítását túl szorosan hozzákötnek a Big Banghez, egy későbbi tudományos fordulat teológiai vereségnek látszhatna.

A probléma mélyebb volt egyszerű kommunikációs óvatosságnál. A teológiai „teremtés” és a fizikai „kezdet” nem ugyanazt jelenti. A teremtéstan azt állítja, hogy a világ léte függ Istentől. Ez logikailag nem követeli meg, hogy a fizikai időnek legyen első pillanata. Aquinói Tamás például filozófiailag elképzelhetőnek tartotta, hogy egy öröktől létező világ is teremtetett legyen, még ha a hit alapján a világ időbeli kezdetét vallotta is.

Lemaître ezért úgy gondolta, hogy a Big Bang nem bizonyíthatja azt, amit a teológia más módszerrel állít. A fizika visszakövetheti a megfigyelhető állapotokat egy nagyon korai korszakig, de abból nem következik automatikusan metafizikai magyarázat arra, miért létezik egyáltalán valami. Az oksági kérdés fizikai és metafizikai jelentése nem azonos.

Az epizód történeti rekonstrukciójában vannak részletek, amelyek forrásonként eltérnek. Lemaître

közvetlenül vagy közvetítőkön keresztül jelezte aggályait, és a későbbi pápai megnyilatkozások valóban óvatosabbá váltak a kozmológiai modell teológiai felhasználásában. A lényeg azonban jól dokumentált: Lemaître ellenzett minden olyan érvelést, amely tudományos elméletét a teremtéstan empirikus bizonyítékaként használta volna.

Ez az álláspont különösen figyelemre méltó annak fényében, hogy Lemaître 1960-tól a Pápai Tudományos Akadémia elnöke lett. Nem kívülálló kritikusként beszélt, hanem egyszerre tartozott az egyházhoz és a professzionális tudományhoz. Éppen emiatt érzékelt pontosan a határátlépés veszélyét.

A modern tudomány-vallás viták gyakran két szélsőség között mozognak. Az egyik a konfliktusmodellt tekinti kizárólagosnak, mintha minden vallási és tudományos állítás szükségképpen ütközne. A másik túl gyors harmóniát hirdet, és minden új felfedezésben teológiai igazolást keres. Lemaître egyik táborhoz sem illik teljesen. Személyében a vallási hit és a tudományos kutatás összeegyeztethető volt, de ebből nem következett, hogy a két terület állításai közvetlenül lefordíthatók egymásra.

A Big Bang későbbi története igazolta óvatosságát. Az elmélet ma sokkal erősebb empirikus alapon áll, mint 1951-ben, de közben jelentősen megváltozott. Az ősatom képe helyett kvantumtérelméleti folyamatokról, inflációról, nukleoszintézisről és rekombinációról beszélünk. Ha egy vallási tanítás a régi fizikai részletekhez kötötte volna magát, folyamatosan újra kellett volna fogalmazni.

Lemaître intellektuális fegyelme ezért örökségének egyik legidőtállóbb része. A tudományt nem kisebbítette azzal, hogy határokat szabott neki. Éppen ellenkezőleg: megvédte attól, hogy olyan kérdések bizonyító eszközévé váljon, amelyekhez módszertanilag nincs hozzáférése. Ugyanígy a teológiát is megvédte attól, hogy egy változó fizikai elmélet sorsától függjön.

23. Leuven, háború és az életmű késői éve

Lemaître pályája nem egyenes vonalban haladt az 1927-es felismeréstől az 1966-os háttérsugárzásig. A harmincas évek európai tudományos életét politikai feszültségek, majd a második világháború törte meg. Belgium 1940-ben ismét német megszállás alá került. Leuven városa és egyeteme már az első világháborúban súlyos károkat szenvedett, és a második konfliktus sem hagyta érintetlenül.

Lemaître a háborús években Belgiumban maradt. Egyetemi oktatói és papi szerepe mellett tudományos munkáját is folytatta, bár a nemzetközi kapcsolatok természetesen beszűkültek. A háború utáni tudomány gyorsan átalakult. A fizika központjai részben az Egyesült Államokba tolódtak, a magfizika és később a részecskefizika óriási állami kutatási programokká vált, a rádiócsillagászat pedig teljesen új megfigyelési ablakot nyitott.

Lemaître ekkor már elismert professzor volt. 1934-ben megkapta a Francqui-díjat, Belgium egyik legrangosabb tudományos kitüntetését. A díj odaítélésében olyan nevek szerepeltek, mint Einstein, Eddington és Paul Langevin.

Ez fontos ellenpontja annak a későbbi képnek, amely szerint Lemaître életében teljesen mellőzött vagy elfeledett tudós lett volna. Tudományos körökben komoly tekintéllyel rendelkezett, még ha egyes eredményeinek történeti prioritása később el is halványult.

Az ötvenes-hatvanas években egyre több intézményi feladatot vállalt. 1960-ban XXIII. János pápa a Pápai Tudományos Akadémia elnökévé nevezte ki. Ez a testület különleges helyet foglal el: nem teológiai akadémia, hanem nemzetközi tudományos fórum, amelynek tagjai között vallási hovatartozástól függetlenül kiemelkedő kutatók szerepelnek.

Lemaître elnöksége összhangban állt egész pályájával. A Vatikánban sem vallási kozmológiát akart kialakítani, hanem a tudomány autonóm művelését támogatta. A hatvanas években emellett részt vett abban a szellemi környezetben, amelyben a katolikus egyház a II. vatikáni zsinat idején újrarendelte viszonyát a modern világhoz, bár Lemaître közvetlen szerepét ebben nem szabad eltúlozni.

Érdeklődése a számítógépek felé is fordult. Leuvenben korán támogatta az elektronikus számolás lehetőségeit, és programozási kérdésekkel is foglalkozott. A későbbi

legendákhoz képest ez kevésbé látványos, mégis sokat elárul róla. Nem a múlt nagy felfedezésének ünnepléséből élt, hanem továbbra is az új tudományos eszközöket figyelte.

Életének utolsó éveiben egészségi állapota romlott. Amikor a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezésének híre eljutott hozzá, már kórházi kezelésre szorult. A beszámolók szerint örömmel fogadta az eredményt. Nem azért, mert az minden korábbi részletet igazolt volna, hanem mert erős megfigyelési nyomot adott a forró kozmikus múltra.

1966 júniusában halt meg. Halálának időzítése szimbolikus: éppen abban a pillanatban távozott, amikor az ősrobbanásos kozmológia döntő megfigyelési fölénybe került. A következő évtizedek már nem az ő aktív részvételével építették fel a standard modellt, de újra és újra olyan kérdésekhez tértek vissza, amelyeket ő korán megfogalmazott.

Lemaître késői évei azért is fontosak, mert árnyalják a „magányos zseni” narratíváját. Intézményekben dolgozott, tanított, bizottságokat vezetett, egyházi és tudományos hálózatokban mozgott. A modern tudomány nem elszigetelt elmék terméke, hanem közösségi

gyakorlat. Lemaître nagy felismerései is csak azért válhattak a kozmológia részévé, mert később mások megmérték, vitatták, módosították és továbbfejlesztették őket.

A századik évfordulón az 1927-es cikk mellett érdemes az egész pályát látni. Egy háborús veteránból lett pap és matematikus, aki Cambridge-ben és Amerikában tanult, Leuvenben tanított, Einsteinnel vitázott, a Pápai Tudományos Akadémiát vezette, és élete végén már az elektronikus számítás felé fordult. Pályája maga is a huszadik századi tudomány történetének keresztmetszete.

24. Miért nem kapott Nobel-díjat Lemaître?

A tudománytörténet nagy alakjainál szinte automatikusan felmerül a kérdés, kaptak-e Nobel-díjat. Lemaître nem kapott, és ez utólag könnyen igazságtalanságnak tűnhet. A kérdés azonban összetettebb annál, mint hogy a Nobel-bizottság egyszerűen „nem vette észre” a kozmológia jelentőségét. A díj története, szabályai és az asztrofizika korabeli státusza egyaránt szerepet játszottak.

A fizikai Nobel-díjat hosszú ideig elsősorban olyan eredményekért ítelték oda, amelyek közvetlen kísérleti vagy megfigyelési igazolással rendelkeztek. A kozmológia a huszadik század első felében sok fizikus szemében részben spekulatív területnek számított. Kevés adat állt rendelkezésre, a távolságskála bizonytalan volt, és egymással versengő világmodellek éltek egymás mellett. Egy olyan elméleti hozzájárulás, mint Lemaître 1927-es vagy 1931-es munkája, nehezebben illeszkedett a díj hagyományos logikájába.

Hubble sem kapott Nobel-díjat, noha neve évtizedekre összeforrt a táguló univerzummal. Ennek egyik oka az volt, hogy a csillagászat sokáig nem számított

egyértelműen a fizikai Nobel területének. Hubble maga is törekedett arra, hogy a csillagászati felfedezéseket a fizikai díj szempontjából elfogadhatóvá tegyék. Mire a szemlélet lassan változott, ő 1953-ban meghalt, Nobel-díjat pedig nem adnak posztumusz.

Lemaître esetében az időzítés másként alakult, de hasonló nehézségekkel. Az ősatom hipotézise a harmincas években nem rendelkezett döntő megfigyelési bizonyítékkal. Az állandó állapot elmélete a negyvenes-ötvenes években komoly alternatíva maradt. A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzást 1965-ben fedezték fel, Lemaître pedig 1966-ban meghalt. Vagyis az a megfigyelés, amely a forró Big Banget látványosan megerősítette, csak élete legvégén érkezett.

A Nobel-archívum azt is mutatja, hogy Lemaître munkája nem került el teljesen a díj körüli figyelmet: 1954-ben Alexandre Dauvillier fizikai Nobel-díjra jelölte. A nyilvános jelölési adatbázisban 1956-ból egy kémiai jelölés is szerepel a neve mellett. A jelölés természetesen nem jelenti azt, hogy a Nobel-bizottság közel állt volna a díj odaítéléséhez, de cáfolja azt az egyszerű képet, hogy Lemaître neve egyáltalán nem merült fel. A Nobel-díj szabályai ráadásul legfeljebb három személy között engedik megosztani ugyanazt a díjat, miközben a

kozmológia története sok, egymásra épülő elméleti és megfigyelési hozzájárulásból állt.

Penzias és Wilson 1978-ban kapta meg a fizikai Nobel-díj felét a kozmikus mikrohullámú háttér felfedezéséért. Ekkor Lemaître már tizenkét éve halott volt. A díj nem a Big Bang „feltalálásáért” járt, hanem konkrét megfigyelési felfedezésért. A Nobel-rendszer logikája ezért nem ugyanaz, mint a tudománytörténeti jelentőség mérlege.

A kérdés másik oldala, hogy a Nobel-díj hiánya nem jelenti Lemaître korabeli ismeretlenségét. A Francqui-díj, nemzetközi meghívások, Einstein és Eddington elismerése, akadémiai tagságok és későbbi vatikáni pozíciója mind mutatják, hogy életében is jelentős tudósként tartották számon. Az a kép, amely szerint teljesen elfelejtetten dolgozott egy belga egyetemen, nem felel meg a történeti valóságnak.

A Nobel-kérdés inkább arra világít rá, mennyire veszélyes a tudományos nagyságot egyetlen kitüntetéssel mérni. A díj presztízse akkora, hogy utólag hajlamosak vagyunk a kitüntetetteket automatikusan fontosabbnak, a kimaradtakat kevésbé jelentősnek tekinteni. Pedig a díjazás mindig adott időpontban, adott bizonyítékok és

intézményi szokások alapján történik.

Lemaître esete különösen jól példázza, hogy egy elméleti eredmény jelentősége csak évtizedek alatt válhat teljesen világossá. 1927-ben a tágulási kapcsolat még bizonytalan adatokon nyugodott. 1931-ben az ősatom sokak szemében merész spekuláció volt. 1965-ben a háttérsugárzás már erősen támogatta a forró múltat. A század végére a precíziós kozmológia pedig olyan részletességgel igazolta a fejlődő univerzum képét, amelyet Lemaître nem láthatott.

A tudományos emlékezet ezért időnként igazságosabb lehet, mint a kortárs díjrendszer. Nem azért, mert utólag minden prioritási vitát tökéletesen eldöntünk, hanem mert hosszabb időtávon jobban látszik, mely gondolatok váltak termékeny kutatási programokká. Lemaître ma Nobel-díj nélkül is a modern kozmológia alapítói között szerepel.

25. Mit bizonyít ma a Big Bang?

A „Big Bang bizonyítékai” kifejezés gyakran úgy hangzik, mintha egyetlen döntő kísérlet igazolta volna az elméletet. A valóság ennél erősebb és érdekesebb: több egymástól független megfigyelési terület mutat ugyanabba az irányba. A modern kozmológiai modell ereje nem egyetlen jelenségből származik, hanem abból, hogy különböző fizikai folyamatokat ugyanaz a fejlődéstörténet kapcsol össze.

Az első pillér a kozmikus tágulás. A galaxisok vöröseltolódásának és távolságának kapcsolata ma hatalmas adathalmazokon mérhető. A Hubble-Lemaître-törvény a kisebb kozmológiai távolságokon közel lineáris, nagyobb vöröseltolódásokon pedig a teljes relativisztikus tágulási történetet kell figyelembe venni. Szupernóvák, barionakusztikus oszcillációk és más standardizálható távolságjelzők együtt rajzolják ki a világegyetem fejlődését.

A második pillér a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás. Az égbolt minden irányából érkező mikrohullámú jel önmagában még nem volna elegendő: döntő jelentőségű, hogy spektruma rendkívüli

pontossággal fekete-test sugárzásnak felel meg. Ilyen sugárzás természetes módon keletkezik egy valaha termikus egyensúlyban lévő forró anyag-sugárzás rendszerben. Hőmérséklete ma körülbelül 2,7 kelvin, és a tágulással folyamatosan csökken.

A háttér apró hőmérséklet-ingadozásainak mintázata további információt hordoz. A csúcsok és völgyek szögskálái a korai plazma akusztikus rezgéseinek lenyomatai. Ezekből következtetni lehet a normál anyag, sötét anyag és sötét energia arányára, valamint a tér geometriájára. Vagyis ugyanaz a sugárzás egyszerre őrzí a forró múlt bizonyítékát és a kozmológiai paraméterek részletes térképét.

A harmadik pillér az ősi nukleoszintézis. A korai univerzum első perceiben a hőmérséklet és sűrűség lehetővé tette könnyű atommagok kialakulását. A modell meghatározott arányokat jósol a hidrogén, hélium, deutérium és lítium számára. A megfigyelt ősi elemgyakoriságok nagy vonalakban megfelelnek ezeknek a számításoknak, bár a lítium esetében továbbra is ismert eltérés áll fenn.

A negyedik pillér a kozmikus struktúra fejlődése. A háttérsugárzás apró kezdeti sűrűség-ingadozásai

gravitáció hatására idővel felerősödtek. A sötét anyag gravitációs váza mentén galaxisok és galaxishalmazok alakultak ki, létrehozva a ma megfigyelhető kozmikus hálót. Számítógépes szimulációk és égboltfelmérések statisztikai összehasonlítása azt mutatja, hogy a standard fejlődési kép sok léptéken sikeres.

Ezek a bizonyítékok nem „azt mutatják, hogy minden egyetlen pontból robbant ki”. Ez a népszerű kép félrevezető. A standard kozmológia azt állítja, hogy a megfigyelhető világegyetem múltban forróbb és sűrűbb volt, miközben a tér léptéke kisebb volt. A Big Bang nem egy már létező térben bekövetkező robbanás, amelynek középpontját valahol meg lehetne találni.

Nincs kitüntetett középpont abban az értelemben, hogy a galaxisok egyetlen helytől távolodnának. A homogén kozmológiai modellben minden kellően távoli megfigyelő hasonló tágulási képet lát. A gyakran használt mazsolás kalács vagy felfúvódó léggömb hasonlat segíthet, ha tudjuk a korlátait: a lényeg a pontok közötti távolság növekedése, nem pedig egy külső térbe történő robbanás.

A Big Bang továbbá nem magyaráz meg mindent. Nem ad önmagában választ arra, miért ilyenek a természet

törvényei, miért létezik több anyag, mint antianyag, mi a sötét anyag, mi a sötét energia, vagy mi történt a legkorábbi kvantumgravitációs tartományban. A standard modell hatalmas időintervallumot ír le sikeresen, de a legelső fizikai állapot kérdése nyitott marad.

Ez fontos különbség Lemaître „kezdet” fogalma és a mai tudományos nyelv között. Lemaître merészen egy első kvantumról beszélt. A modern kozmológus gyakran óvatosabban fogalmaz: vissza tudjuk követni a fizikai fejlődést nagyon korai korszakokig, de bizonyos határ után jelenlegi elméleteink már nem megbízhatók. A tudományos szerénység nem visszalépés, hanem a mérési és elméleti határok pontosabb ismerete.

A Big Bang bizonyítékainak sokfélesége mégis rendkívül erős. A tágulás, a háttérsugárzás, a könnyű elemek és a struktúraképződés teljesen eltérő mérési módszerekkel vizsgálható. Ha mindegyikhez külön, egymással össze nem függő magyarázatot kellene kitalálni, az jóval kevésbé gazdaságos lenne. A forró, fejlődő univerzum modellje közös történetbe rendezi őket.

Ez az a pont, ahol Lemaître öröksége a legvilágosabb. Az ő 1927-es munkája még csak a tágulási összefüggést kapcsolta a relativisztikus modellhez. A következő száz év kutatásai ugyanazt az elvet követték: különböző megfigyeléseket egyetlen kozmikus történet részeként értelmezni. A modern Big Bang ezért nem egy megkövült 1931-es hipotézis, hanem sokszor módosított, mérési próbákon átment kutatási keret.

26. Hogyan lett az „ősatomból” Big Bang?

A tudományos elméletek neve gyakran utólag születik meg. Lemaître nem „Big Bang-elméletként” mutatta be saját elképzelését, és az 1931-es ősatom sem azonos azzal, amit ma e név alatt értünk. A „Big Bang” kifejezést Fred Hoyle használta 1949-ben egy BBC-rádióadásban, amikor a különböző kozmológiai modellekről beszélt. A név meglepően gyorsan terjedt el, mert egyszerre volt rövid, képszerű és könnyen megjegyezhető.

A kifejezés ugyanakkor kezdettől félreértéseket hordozott. A „nagy bumm” robbanást idéz fel: egy tárgy szétveti magát egy már létező térben, a törmelék pedig egy középpontból minden irányba repül. A kozmológiai modellben azonban nincs ilyen kitüntetett középpont. A tágulás a nagy léptékű tér geometriájának változása, ezért minden, egymástól kellően távoli, gravitációsan nem kötött galaxisrendszer között nő a távolság.

Hoyle maga az állandó állapot elméletének híve volt, ezért sokszor azt írják, hogy gúnyból alkotta meg a kifejezést. A történészek ennél óvatosabban fogalmaznak. A rádióadásban a szókapcsolat leíró funkciót is betöltött, és nincs szükség arra, hogy

rosszindulatú címkézésként értelmezzük. A név mindenesetre túlélte azt az elméletet, amelynek egyik ellenfele használta.

A terminológia sikere jól mutatja, milyen erősen alakítja a nyelv a tudomány közmegértését. A „Big Bang” ma olyan ismert kulturális kifejezés, hogy filmek, sorozatok, dalok és reklámok is használják. Ezzel együtt a hétköznapi jelentés sokszor eltávolodik a fizikaitól. A tudománykommunikáció egyik állandó feladata ezért elmagyarázni, hogy a modell nem egy kozmikus bomba felrobbanását állítja.

Lemaître „ősatomja” másféle képet adott. Abban az energia és a későbbi anyagi világ kezdeti egysége állt a középpontban. A modern kozmológia ezt a képet sem veszi szó szerint, mert a legkorábbi univerzumot kvantumtérelméleti állapotokkal, részecskékkel és sugárzással írja le, nem pedig egy gigantikus atommal. Mégis jobban érzékelteti, hogy a kezdeti állapot alapvetően eltért a mai, galaxisokból felépülő világtól.

A névváltozás a tudományos fogalom fejlődését is jelzi. Lemaître hipotézise, Gamow és Alpher nukleoszintézise, Alpher és Herman reliktsugárzása, Penzias és Wilson megfigyelése, majd a COBE és Planck mérései együtt

hozták létre azt, amit ma Big Bang-modellnek nevezünk. Nincs egyetlen pillanat, amikor a teljes elmélet készen megszületett volna.

Ezért pontosabb úgy tekinteni a Big Bangre, mint fejlődő kutatási programra. A név állandó maradt, miközben tartalma radikálisan gazdagodott. A harmincas években a kozmikus kezdet merész hipotézis volt; a hatvanas évekre megfigyelési támogatást kapott; a huszonegyedik században pedig részletes, paraméterezett standard modell része lett.

Lemaître szerepe ebben a fejlődésben nem attól nagy, hogy minden későbbi részletet előre látott. Tudománytörténeti jelentősége éppen abban áll, hogy olyan kérdést tett fizikailag komollyá, amelyre utána több generáció adott egyre pontosabb válaszokat. Az „ősatom” eltűnt a tankönyvek képleteiből, de a mögötte álló gondolat, hogy a világegyetemnek fizikailag vizsgálható korai állapota volt, a modern kozmológia alapja maradt.

27. Az életkor, amelyet a csillagok és az atommagok mérnek

A kozmológia egyik legfontosabb próbája mindig az volt, hogy a világegyetem számára meghatározott kor összeegyeztethető-e a benne található objektumok életkorával. A kérdés első pillantásra magától értetődő: egy csillag, bolygó vagy galaxishalmaz nem lehet idősebb annál a világegyetemenél, amelyben létrejött. A gyakorlatban azonban mind a kozmikus kor, mind az objektumok kora közvetett módszerekkel becsülhető, ezért az összevetés hosszú ideig jelentős bizonytalansággal járt.

A Föld korának meghatározása a radioaktivitás felfedezésével vált fizikai problémává. A radioaktív izotópok ismert felezési ideje lehetővé tette, hogy kőzetek és meteoritok kialakulásának idejét becsüljék. A huszadik század közepére egyre világosabbá vált, hogy a Naprendszer több mint négymilliárd éves. Ez önmagában kizárta azokat a korai kozmológiai paramétereket, amelyekből ennél rövidebb univerzum-életkor adódott volna.

A csillagok másfajta órák. Fejlődésük sebességét főként tömegük és összetételük határozza meg. A nagy tömegű csillagok gyorsan elégetik nukleáris üzemanyagukat, a kisebb tömegűek sokkal lassabban fejlődnek. Egy csillaghalmaz szín-fényesség diagramján megfigyelhető, mely csillagok hagyták már el a főágat; ebből következtetni lehet a halmaz korára. Az idős gömbhalmazok a Tejútrendszer legöregebb ismert csillagpopulációi közé tartoznak.

A huszadik század második felében a csillagfejlődési modellek egyre pontosabbak lettek, és a legöregebb csillagok kora nagyjából összhangba került a kozmológiai korbecslésekkel. Ez nem triviális siker. A két módszer teljesen különböző fizikára épül: az egyik a világegyetem tágulásának és összetételének történetéből számol, a másik csillagok belső nukleáris folyamataiból.

A kozmikus háttérsugárzás mérései új szintre emelték az életkor meghatározását. A háttér anizotrópiáinak mintázata érzékeny a világegyetem anyag- és energiatartalmára, görbületére és tágulási történetére. A standard Λ CDM modell keretében ezekből nagyon pontos korbecslés adódik, amely körülbelül 13,8 milliárd év. Ez a szám nem egyetlen közvetlen „kozmosz óra” leolvasása, hanem több paraméterből és egy fizikai modellből

következő eredmény.

Az életkor meghatározásának története azért kapcsolódik szorosan Lemaître-hez, mert a húszas-harmincas években éppen ez volt az egyik legerősebb ellenérv a túl egyszerű tágulási modellekkel szemben. A nagy Hubble-állandó túlságosan fiatal univerzumot adott. Lemaître nem söpörte félre a problémát, hanem olyan tágulási történetet keresett, amely nagyobb kort enged meg. Ebben a kozmológiai állandó fontos szerepet kapott.

A mai helyzet sokkal kedvezőbb, de nem teljesen problémamentes. Egyes nagyon idős csillagok korbecslései időnként közel kerülnek a kozmológiai kor felső határához, és a mérési bizonytalanságok gondos kezelését igénylik. Ezekből nem következik automatikusan ellentmondás. A csillagok távolsága, kémiai összetétele, opacitása és a csillagfejlődési modellek részletei mind befolyásolják a becsült kort.

A kozmikus kronológia más módszereket is használ. Bizonyos radioaktív elemek csillagokban mért arányai nukleokozmokronológiai óraként működhetnek. Fehér törpék lehűlése szintén életkorinformációt adhat csillagpopulációkról. Ezek a módszerek nem olyan

pontosak, mint a háttérsugárzásból származó kozmológiai paraméterbecslés, de független ellenőrzést nyújtanak.

A világegyetem életkorának kérdése filozófiai értelemben is érdekes, de a fizika számára elsősorban konzisztenciateszt. Ha egy modell 13 milliárd éves univerzumot jósol, miközben megbízhatóan 16 milliárd éves csillagokat találunk, valami hibás. Lehet a kozmológiai modell, lehet a csillagfejlődési számítás, vagy valamely mérési kalibráció. A tudomány fejlődését gyakran éppen az ilyen kellemetlen összeütközések gyorsítják.

Lemaître idején a korkrízis valódi, súlyos eltérés volt, amely több kutatót óvatossá tett a táguló univerzummal szemben. A probléma végül nem a tágulás elvetésével oldódott meg, hanem a távolságskála javulásával és a kozmikus dinamika pontosabb megértésével. Ez jó példa arra, hogy egy helyes alapgondolat mellett is lehetnek rossz paraméterek, és a tudományos modell értékelésekor a kettőt külön kell választani.

Ma a 13,8 milliárd éves kor gyakran végleges, szinte hétköznapi adatként szerepel. Pedig mögötte száz év mérési és elméleti munka áll. A szám története a

Cepheidák kalibrációjától a szupernóvákon át a mikrohullámú háttérig vezet, és közben újra meg újra felülvizsgálták. A kozmológia egyik legnagyobb teljesítménye, hogy több, egymástól független fizikai „órával” is ellenőrizni tudja a világegyetem életkorát.

Lemaître 1927-es táguló univerzuma ezzel nyerte el teljes történeti jelentését. A tágulás ugyanis nemcsak térbeli kapcsolatot mond el a galaxisokról, hanem kozmikus órát is létrehoz. Ha a léptéktényező változik, a világegyetemnek fejlődési kronológiája van. A kozmológia ettől vált a szó legszorosabb értelmében történeti fizikává.

28. Belgium emlékezete és Lemaître visszatérése a köztudatba

Georges Lemaître tudományos rangját szakmai körökben soha nem felejtették el teljesen, a szélesebb közvélemény emlékezetében azonban hosszú időn át Hubble, Einstein és később Hawking neve sokkal erősebben kötődött a kozmológiához. Belgiumban természetesen más volt a helyzet. Leuven és Louvain-la-Neuve egyetemi hagyományában Lemaître mindvégig kiemelt alak maradt, és hagyatékának megőrzése később alapvető szerepet játszott nemzetközi újrafelfedezésében.

Az egyetemi levéltárban fennmaradt kéziratok, levelezések, előadásanyagok és fényképek lehetővé tették, hogy a tudománytörténészek ne csupán későbbi visszaemlékezésekből rekonstruálják munkáját. A digitalizálás különösen fontos fordulatot hozott. Olyan dokumentumok váltak világszerte hozzáférhetővé, amelyek korábban csak helyben kutathatók voltak, és ez megkönnyítette az 1927-es tanulmány, az 1931-es fordítás és a prioritási viták újraértékelését.

A történeti érdeklődés növekedését több évforduló és tudománytörténeti konferencia is segítette. Lemaître születésének, ősatom-elméletének és halálának kerek évfordulóí új publikációkat és kiállításokat hoztak. A 2012-ben megjelent, életét, tudományát és örökségét tárgyaló angol nyelvű tanulmánykötet már annak a korszaknak a része volt, amikor nemzetközileg is egyre pontosabban kezdték elhelyezni szerepét a modern kozmológia kialakulásában.

Az IAU 2018-as döntése a Hubble–Lemaître elnevezés ajánlásáról ennek a hosszabb folyamatnak a látványos állomása lett. A döntés nyomán olyan olvasók is találkoztak Lemaître nevével, akik korábban csak Hubble-t ismerték a tágulási törvény kapcsán. A tudományos közösség ezzel egyben azt is jelezte, hogy a történeti pontosság nem pusztán muzeális kérdés: a névadás alakítja azt, hogyan tanítjuk egy felfedezés megszületését.

Belgium számára Lemaître nemzeti tudományos ikon is lett, de életműve ellenáll a pusztán nemzeti kisajátításnak. Kutatói pályája kezdettől nemzetközi volt, és eredményei csak brit, amerikai, holland, orosz és más tudományos hagyományok összekapcsolásával érthetők. Éppen ezért a belga emlékezet legfontosabb

hozzájárulása nem a nemzeti büszkeség, hanem a források gondos megőrzése és hozzáférhetővé tétele.

A centenárium közeledtével várhatóan tovább nő az érdeklődés az 1927-es cikk iránt. Ez jó alkalom arra, hogy az ünneplés ne leegyszerűsítő hőstörténetet hozzon létre. Lemaître tudományos jelentősége akkor látszik igazán, ha megmaradnak mellette a többiek is: Friedmann, Slipher, Leavitt, Hubble, Eddington, Alpher, Herman, Penzias és Wilson. A modern kozmológia hálózatban született, nem egyetlen zseni magányos pillanatában.

A levéltári források egyik legfontosabb tanulsága éppen ez. Egy felfedezés mögött levelek, konferenciák, fordítások, adatcserék és félreértések állnak. Egy 1927-ben kevéssé olvasott francia cikkből évtizedek alatt tankönyvi alapelv lehet, miközben egyes részletei közben feledésbe merülnek, majd újra előkerülnek. A tudományos emlékezet maga is történeti folyamat.

Lemaître visszatérése ezért nem egyszerű rehabilitáció. Inkább annak példája, hogyan válik pontosabbá a tudomány saját múltjáról alkotott képe. A felfedezések rangsora helyett egyre inkább a hozzájárulások természetét vizsgáljuk: ki milyen adatot

adott, ki milyen elméleti összekapcsolást végzett, és mikor vált egy ötlet a közösség számára meggyőzővé. Ebben a részletesebb történetben Lemaître helye nem kisebb, hanem világosabb.

A centenáriumi megemlékezésnek ezért akkor van tudománytörténeti értelme, ha nemcsak egy dátumot ünnepel. Az 1927-es cikk ma azért olvasható újra különös erővel, mert benne még egyszerre látszik a bizonytalanság és az áttörés: a távolságadatok pontatlanok, a kozmológiai nyelv kiforratlan, a következtetés viszont már a modern világegyetem felé mutat. A későbbi tankönyvek letisztított képletei mögött itt még érzékelhető a kutatás kockázata. Lemaître nem kész tudást örökölt, hanem különböző eredmények között teremtetett kapcsolatot, és ezzel új kérdésformát adott a kozmológiának. A jubileum legfontosabb üzenete ezért nem az, hogy száz éve megszületett egy végleges elmélet, hanem az, hogy száz éve egy fizikailag mérhető történet kezdett kirajzolódni a világegyetemről.

29. Száz évvel 1927 után

2027-ben száz éve lesz annak, hogy Georges Lemaître közzétette táguló világegyetemről szóló tanulmányát. Az évforduló nem azért fontos, mert egyetlen dátumhoz rendelhetnénk a modern kozmológia születését. Inkább azért, mert az 1927-es munka különösen tisztán mutatja a tudományos gondolkodás három elemének találkozását: matematika, megfigyelés és fizikai interpretáció.

A matematika önmagában megengedte a dinamikus univerzumot, amint Friedmann is megmutatta. A megfigyelés önmagában feltárta a vöröseltolódásokat, ahogy Slipher mérte őket. Lemaître újítása az volt, hogy a kettőt összekapcsolta, és a galaxisok távolodását nem helyi mozgások halmazaként, hanem a világegyetem történetének jeleként értelmezte.

Egy évszázad alatt a kozmológia olyan mennyiségi tudománnyá vált, amelynek pontossága Lemaître számára alighanem elképzelhetetlen lett volna. Ismerjük a kozmikus háttérsugárzás hőmérsékletét és spektrumát, mérjük a galaxisok nagyléptékű eloszlását, gravitációs lencsézést használunk tömegterképezésre, és többféle módszerrel becsüljük a tágulási ütemet. Ugyanakkor a legnagyobb kérdések egy része továbbra is nyitott.

Mi a sötét anyag? Mi a sötét energia? Mi történt az infláció alatt, ha valóban volt ilyen korszak? Hogyan kapcsolódik a kvantumelmélet a gravitációhoz a legkorábbi pillanatokban? Miért éppen olyan kezdeti feltételekből fejlődött a világegyetem, amelyek galaxisok, csillagok és végül megfigyelők létrejöttét tették lehetővé? Ezekre nincs végleges válasz.

A tudományos bizonytalanság nem gyengeség, hanem működési feltétel. Lemaître pályája ezt különösen jól példázza. 1927-es számai pontatlanok voltak, de a kapcsolat helyes. Az ősatom részletei elavultak, de a forró kezdet gondolata termékenynek bizonyult. A kozmikus sugarak eredetére adott magyarázata téves volt, de a korai univerzum megfigyelhető maradványainak keresése helyes kutatási program lett.

A századik évfordulón ezért nem egy tévedhetetlen zseni szobrát kell felállítani. Sokkal érdekesebb az a kutató, aki tévedésekkel együtt is merte követni az egyenletek és megfigyelések közös logikáját. Nem ragaszkodott ahhoz, hogy a világegyetem olyan legyen, amilyennek filozófiailag kényelmes elképzelni. Ha az adatok tágulást mutattak, elfogadta a tágulást; amikor pedig a tágulás sűrűbb múltbeli állapotot sugallt, megpróbálta elképzelni annak fizikáját.

Lemaître életének egyik legszebb vonása az intellektuális mértéktartás. Papként nem akarta a fizikát teológiai bizonyító gépezetté alakítani. Fizikusként nem akarta a tudományt világnézeti végső válaszok forrásává emelni. A két terület határán nem falat épített, hanem szabályokat tartott be: más kérdésekhez más módszerek tartoznak.

A huszonegyedik században, amikor kozmológiai eredmények gyakran azonnal világnézeti viták tárgyává válnak, ez a hozzáállás különösen időszerű. Egy új galaxisrekord nem cáfolja meg a Big Banget, egy kozmikus kezdet nem bizonyít vallási tanítást, és egy ismeretlen fizikai komponens nem jelenti a tudomány kudarcát. A jó tudomány nem attól erős, hogy mindenre kész választ ad, hanem attól, hogy pontosan megmutatja, mire van bizonyíték és hol kezdődik a bizonytalanság.

30. Az ember, aki történetet adott az univerzumnak

Georges Lemaître 1966. június 20-án halt meg Leuvenben. Halálakor a kozmikus háttérsugárzás felfedezése már ismert volt, de a modern precíziós kozmológia még távoli jövőnek számított. Nem láthatta a COBE fekete-test spektrumát, a WMAP és Planck térképeit, a gyorsuló tágulás felfedezését vagy a James Webb első galaxisképeit. Mégis ezek mind abban a fogalmi világban értelmezhetők, amelynek kialakításában kulcsszerepet játszott.

Lemaître legnagyobb teljesítményét nehéz egyetlen mondatba sűríteni. Nem ő volt az első, aki dinamikus relativisztikus megoldást talált; Friedmann megelőzte. Nem ő mérte a legtöbb galaxis vöröseltolódását; Slipher és később Hubble megfigyelési munkája nélkülözhetetlen volt. Nem ő dolgozta ki a forró Big Bang modern részecskefizikáját; Gamow, Alpher, Herman és sokan mások tették ezt meg. Nem ő fedezte fel a kozmikus háttérsugárzást; Penzias és Wilson mérése tette döntővé az elméletet.

Az ő különleges helye abban áll, hogy korán összekapcsolta ezeket a különálló irányokat. Felismerte,

hogy a relativitáselmélet dinamikus univerzuma és a galaxisok vöröseltolódása ugyanannak a történetnek a része. Aztán tovább kérdezett: ha a világegyetem tágul, milyen volt korábban? E kérdésből nőtt ki az ősatom hipotézise, és ezen keresztül a kozmológia időbeli tudománnyá vált.

A középkori és kora újkori kozmológiák is beszéltek világkezdetekről, de ezek filozófiai vagy teológiai rendszerek részei voltak. Lemaître újdonsága az volt, hogy a kezdet lehetőségét fizikai modellel és megfigyelési adatokkal kötötte össze. Ettől fogva a világegyetem története mérhetővé vált. A „mikor?” és „hogyan?” kérdések beléptek a fizikába.

A század során ez a történet elképesztően részletessé vált. Ma körülbelül 13,8 milliárd éves kozmikus fejlődésről beszélünk, és külön korszakokra bontjuk az univerzum történetét: korai inflációs fázisról, részecskék kialakulásáról, nukleoszintézisről, rekombinációról, sötét korszakról, első csillagokról, reionizációról, galaxisfejlődésről és a sötét energia által uralt késői tágulásról. E részletek többsége Lemaître számára ismeretlen volt, de az alapvető kérdezési irány már az övében jelen volt.

A tudományos hírnév változékony. Hubble neve évtizedeken át sokkal ismertebb lett, Lemaître pedig részben a vallás és tudomány különös találkozásának szereplőjeként élt a köztudatban. A huszonegyedik századi történeti kutatás lassan helyreállította arányait. Ma már nemcsak a Big Bang egyik előfutáraként, hanem a tágulási törvény korai megfogalmazójaként és a megfigyelési kozmológia egyik alapítójaként is számon tartják.

Mégis hiba volna a történetet azzal lezárni, hogy az utókor végül „igazságot szolgáltatott”. A tudományban nincs végleges történeti bíróság. Új dokumentumok, új elemzések és új szempontok tovább árnyalhatják a képet. Lemaître örökségéhez éppen az illik, hogy a történet nyitott maradjon, ahogy a világegyetemről alkotott modelljeink is nyitottak az új adatok előtt.

Az 1927-es tanulmány századik évfordulója ezért több mint emlékezés. Arra emlékeztet, milyen nagy változást okozhat, amikor valaki két, addig külön kezelt kérdést összekapcsol. Lemaître egyenleteket és galaxisméréseket nézett egyszerre, és ebből megszületett a táguló univerzum fizikai képe. Néhány év múlva pedig megtette a következő lépést: a tér változásához időbeli eredetet rendelt.

A világegyetem ettől nem lett egyszerűbb. Ellenkezőleg, egy sor új probléma nyílt meg. De lett története. És a modern kozmológia azóta is ennek a történetnek a következő fejezeteit próbálja elolvasni.

HÁTTÉRGYÁR

Utószó

Georges Lemaître életművének jelentősége különösen jól látszik abból, mennyi kérdés maradt nyitva száz évvel az 1927-es tanulmány után. A tágulás ténye ma már szilárd, de pontos üteméről vita van. A forró korai univerzumot több független megfigyelés támasztja alá, de a legelső pillanatok fizikáját nem ismerjük. A kozmológiai állandó ismét alapvető, de nem tudjuk, valóban vákuumenergia-e, és ha igen, miért olyan kicsi az elméleti várakozásokhoz képest.

A modern kozmológia tehát nem lezárt rendszer, hanem rendkívül sikeres, mégis hiányos tudomány. Ebben a helyzetben Lemaître nem azért példa, mert mindenben igaza volt, hanem mert a bizonytalanságot nem tekintette a gondolkodás akadályának. Merész hipotéziseket fogalmazott meg, de ragaszkodott ahhoz, hogy azok tudományos státuszát megfigyelések döntenek el.

A tudomány történetének nagy alakjai gyakran szoborra merevednek. Einstein a zseni, Hubble a felfedező, Lemaître a pap, aki megjósolta az ősrobbanást. A valóság ennél gazdagabb. Einstein képes volt felülvizsgálni saját kozmológiai előfeltevését, Hubble megfigyelési programja nélkül a tágulás nem vált volna

meggyőző tényé, Lemaître pedig nem jóslatot tett, hanem matematikai és csillagászati érveket kapcsolt össze egy új világképben.

Ez a könyv ezért nem valamelyik szereplő kizárólagos elsőségének bizonyításával kíván zárulni. A modern kozmológia kollektív teljesítmény. Lemaître helye azért különleges benne, mert az egyik legfontosabb átjárót nyitotta meg elmélet és megfigyelés között. Ezen az átjárón azóta egész tudományág haladt keresztül.

Válogatott források és további olvasmányok

Georges Lemaître: „Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques”, Annales de la Société scientifique de Bruxelles, 1927.

Georges Lemaître: „The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory”, Nature, 1931. május 9.

Edwin Hubble: „A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae”, Proceedings of the National Academy of Sciences, 1929.

Aleksandr Friedmann: a relativisztikus dinamikus univerzumokról szóló 1922-es és 1924-es tanulmányok.

Université catholique de Louvain, Archives Georges Lemaître: életrajzi és kéziratos gyűjtemény, digitalizált dokumentumok.

International Astronomical Union: Resolution B4 és a Hubble-Lemaître-törvény 2018-as elnevezéséről szóló dokumentumok.

Rodney D. Holder – Simon Mitton (szerk.): Georges Lemaître: Life, Science and Legacy. Springer, 2012.

Vatican Observatory: Georges Lemaître életéről, tudományáról és vallásfelfogásáról szóló történeti anyagok.

Ralph A. Alpher – Robert Herman: a korai univerzum reliktsugárzásának hőmérsékletére vonatkozó 1948–1949-es tanulmányok.

Arno A. Penzias – Robert W. Wilson: „A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s”, *Astrophysical Journal*, 1965.

Robert H. Dicke – P. J. E. Peebles – P. G. Roll – D. T. Wilkinson: „Cosmic Black-Body Radiation”, *Astrophysical Journal*, 1965.

Nobel Prize Nomination Archive: Georges Lemaître 1954-es fizikai és 1956-os kémiai jelölési adatai.

NASA és ESA kozmológiai archívumok: COBE, WMAP, Planck, Hubble Space Telescope és James Webb Space Telescope tudományos háttéranyagai.

Hogyan született meg az a gondolat,
hogy a világegyetemnek története van?
A könyv **Georges Lemaître**, a belga pap,
matematikus és fizikus nyomán követi végig
a modern kozmológia egyik legnagyobb fordulatát:
a táguló világegyetem és az ősrobbanás
elméletének megszületését.



A történetben feltűnik **Einstein**, **Hubble**,
Eddington és **Fred Hoyle** is, miközben
kirajzolódik, miként változott meg az emberiség
képe a kozmoszról. A kötet tudománytörténeti
elbeszélés, életrajz és eszmetörténet egyszerre.

Ez a könyv nemcsak egy felfedezés története,
hanem annak a száz évnek a krónikája is,
amely alatt az univerzum kezdete a modern
tudomány egyik központi kérdésévé vált.

H Á T T É R G Y Á R

A borító mesterséges intelligencia felhasználásával készült.