

banásmodell szerint túl sok volt belőlük. Az elméletileg számolt monopólus-sűrűség akkora, hogy az mindössze harmincezer évvel az ősrobbanás után leállította volna a kozmikus tágulást. Az infláció a monopólus-sűrűség felhígításával kerüli ki ezt a nehézséget, illetve azzal, hogy a keletkező néhány monopólus kisodródott a megfigyelhető világegyetem horizontján kívüli tartományokba. A felfúvódó világegyetemben keletkezhettek ugyan nagy számban monopólusok, de mi (vagy bármilyen más megfigyelő) sokkal ritkábban találkozhatunk velük, mint hógolyóval a Szaharában. A számítások arra utalnak, hogy az infláció annyira szétszórta őket, hogy egy átlagos megfigyelő legfeljebb egyetlen monopólust találhatna az egész megfigyelhető világegyetemben.<sup>7</sup>

Ennyit az infláció jótékony hatásairól. De mi az inflációs elmélet ténylegesen fizikai tartalma? Ennek a kérdésnek a megválaszolásához közelebbről meg kell vizsgálni a vákuum fogalmát.

A vákuum szó a latin *vacuus*, azaz üres szóból ered és idiomatikusan a vákuum – a semmi, mindennek a hiánya. Az előbbi értelemben vett vákuum fontos szerepet játszott a görög atomisták gondolatvilágában. Ők a tárgyakat apró, oszthatatlan részecskékből állónak gondolták. (*Atom* annyit jelent, hogy „oszthatatlan”.) A mozgás értelmezéséhez az atomisták posztulálták az üresség létét: ellenkező esetben az atomok mindenütt összezsúfolódtak volna, és nem jöhetett volna létre mozgás. Az üresség vagy vákuum (*kenon*) mozgásteret teremtett az atomok számára. Az atomok tárgyak, a vákuum a semmi. Ahogyan Démokritosz kifejezte: „Csak az atomok és az üresség létezik.”<sup>8</sup> A kép felületesen nézve nagyon tetszetős és ezt tanítják még ma is az iskolákban. Csakhogy egy logikai bukfenec van benne. Ha a vákuum szó szerint semmi, hogyan beszélhetünk létezéséről? Arisztotelész mutatott rá erre a hiányosságra, amikor bírálta Démokritosz mesterét, Leukipposzt, aki, mint írja, „feltételezve, hogy nem létezhetne mozgás üresség nélkül, hogy az üresség nem-létezés és a semmi, ami *van*, nem része a nem-létezésnek; ennél fogva pontosabban fogalmazva a *van* teljes mértékben telített.”<sup>9</sup> Röviden: az az érv, hogy az üresség létezik, ugyanakkor kijelenteni, hogy az üresség semmi, ellentmondó követelés, amivel azt mondjuk, hogy létezik valami, ami nem létezik.<sup>10</sup>

Ez több üres szócsavarásnál. Hiszen amikor a természetet, mint egészet tekintjük – és a *világegyetem* éppen azt jelenti, hogy „minden egyvalamivé alakult” – azt kell gondolnunk, hogy a világegyetem *létezik*. De hogyan létezhet úgy, hogy át- meg átjárja a vákuum márványereze, amit úgy határoztunk meg, mint *nemlétezőt*? Legjobb esetben is egy ilyen töredezett kozmosz nem egy egységes egészet alkotna, hanem nagyszámú különálló tartományt – a lét szigeteket elválasztja egymástól a nemlétező. Ez nem elégitette ki sem Arisztotelészt, sem Platónt, sem másokat, akik a kérdéssel közelebbről foglalkoztak. Jónéhányan arra a következtetésre jutottak, hogy a vákuumnak tele kell lennie valamivel. A vákuumra vonatkozó elképzelések évszázadokon keresztül ebben a körben mozogtak, egyesek a semmivel, míg mások a kitöltött térrel azonosították. A kitöltött tér elképzelés uralta a tizenkilencedik századot, amikor is a legtöbb fizikus azt feltételezte, hogy a teret úgynevezett éter tölti ki. Tartott ez mindaddig, amíg a Michelson–Morley kísérlet be nem bizonyította, hogy éter nem létezik, Einstein pedig megmutatta róla, hogy elméletileg felesleges is.

Alig ürült ki azonban a vákuum, a kvantumfizika ismét megtöltötte. A kvantumfizika vákuuma a fortyogó aktivitás tengere. Ez különösen az olyan nagyenergiájú környezetekben áll fenn, amilyen a csillagok belseje; viszont így is marad – bár alacsonyabb szinten – a világmindenség leghidegebb, legüresebb sarkaiban. A kvantumfizika az úgynevezett hullám–részecskedualitás révén a természetet mondhatni kétféle szemmel nézi, az egyiket keresztül a hullámokat, a másikon keresztül a részecskéket látja. A részecskéket látó szemével azt látni, hogy minden „valós” (másképpen hosszú élettartamú) elektronra nagyszámú „virtuális” elektron és pozitron jut. A hullámokat látó szemmel nézve pedig azt, hogy a kvantumterek úgy korbácsolják fel a vákuumot, mint a szél a vizet. Hajlamosak vagyunk a mezőket energiának tekinteni („erőterek”), de a hullámmechanikában az anyag is leírható hasonló módon, csak az kvantummezőkből tevődik össze. (Azt kérdezni, hogy „valójában” miből is áll a természet – részecskékből vagy mezőkből – ugyanaz, mintha azt kérdeznénk: melyik szemünkkel látunk, ha mindkét szemünk nyitva van.)

Manapság tehát a vákuum egyfajta keverék. Ahogy Hans Christian von Baeyer atomfizikus fogalmazza: „A modern vákuum vég-

eredményben egy kompromisszum Démokritosz és Arisztotelész felfogása között: az előbbinek igaza volt abban, hogy azt bizonygatta, a világ atomokból és ürességből áll, míg az utóbbinak abban, hogy azt állította, nem létezik igazi és abszolút üresség. (...) A dinamikus vákuum olyan, mint egy nyugodt tó egy nyári éjszakán, felületét enyhe ingadozások borzolják, miközben köröskörül elektron- és pozitronpárok villannak fel és hűnynak ki, mint szentjánosbogarak. Ez mindenképpen egy sokkal forgalmasabb és barátságosabb hely, mint Démokritosz félelmes üressége vagy Arisztotelész jeges étere.”<sup>11</sup>

Az infláció szempontjából fontos, a vákuum kvantumképe azt emeli ki, hogy nem minden vákuum alakult ki egyformán. A vákuumban fluktuáló kvantumterek minden lehetséges hullámhosszal rendelkeznek, és minden lehetséges irányban mozognak. Ha a kvantumterek értékei az időre átlagolva megsemmisítik egymást, akkor a klasszikus vákuumot kapjuk, ami, mondhatjuk, hasonlít az ódivatú üres térre. Ha azonban a terek nem semmisítik meg egymást, akkor kapjuk azt, amit a fizikusok „hamis” vákuumnak neveznek. A hamis vákuum több energiát tartalmaz, mint a klasszikus vákuum. Ezért mondják azt, hogy nem a minimális energia állapotában van. Napjaink világegyetemében a hamis vákuum csak bizonyos körülmények között észlelhető. Például a kvarkok egy hamis vákuumot töltenek be, nagy energiáit az erős magerő-terek keltik, amelyek az egyes kvarkokat kapcsolják össze egymással. Számos egyesített elmélet szerint azonban a kozmikus történelem első pillanataiban a környező energia olyan hatalmas volt, hogy a teljes világegyetem a hamis vákuum állapotában volt. A hamis vákuum energiája úgy működik, mint egyfajta antigravitáció, és előidézheti a tér exponenciális sebességű felfúvódását. Ez lehetett az a hatás, ami az inflációt létrehozta. Az infláció alatt a világegyetem csaknem teljesen üres volt, energiatartalmát elnyelte a hamis vákuum. Amikor a hamis vákuum valódi vákuummá alakult, felesleges energiája leülepedett, mint az esőcseppek, amelyek összeálltak egy hegyi zivatarban, az ősrobbanás miriádnyi forró részecskéivé.

Mint amikor a lehullott eső lezúdul a völgybe, vagy ahogy az óra lejár, a természetes rendszerek is a magasabb energiájú állapotból az alacsonyabb energiájú állapot felé törekszenek. Ezért a termé-

szet irtózik a hamis vákuumtól, és az alacsonyabb energiaállapotú klasszikus vákuumot preferálja, következésképp mi is azt tekintjük normálisnak. Felmerül a kérdés, hogy miért tűrte el a világegyetem a hamis vákuum állapotot egészen  $10^{-34}$  másodpercig; ez az időtartam emberi léptékkal hallatlanul rövid, a korai világegyetem fizikája szempontjából szinte véget nem érő időszaknak tűnik, olyan volt, mint egy unalmas és rossz Lohengrin-előadás. Az egyik lehetséges magyarázat az, hogy a világegyetem a felfúvódás közben *túlhűlt*. Túlhűlés akkor lép fel, amikor egy anyag hőmérséklete olyan gyorsan csökken le, hogy állapotának megváltozása nélkül az alá a hőmérséklet alá tud hűlni, amelynél normál esetben állapotváltozás menne végbe. A túlhűlés következtében a kozmikus tér tovább maradhatott a hamis vákuum állapotában, mint naivan gondolnánk, s csak aztán lökte ki magából az inflációt mozgató energiát. A világegyetemben talán soha nem állt le teljesen az infláció; erre a lehetőségre a későbbiekben még visszatérünk.

A inflációs elmélet 1980-ban került az érdeklődés homlokterébe, amikor Alan Guth, az MIT fizikusa, akkor a Stanford Linear Accelerator Center tudományos munkatársa, azt egy cikkben nyilvánosságra hozta. Guth a mágneses monopólusok problémájára és a világegyetem közel kritikus tömegsűrűségére keresett magyarázatot. 1979. december 6-án este végezte el a döntő számításokat, és azonnal felismerte jelentőségüket: amikor másnap reggel felébredt, csupa nagybetűvel egy papírlapra felírta: „SZENZÁCIÓS FELISMERÉS”, majd bekeretezte és sütkérezett a későbbi karrierjét meghatározó megvilágosodás fényében. Az élet azonban nem olyan egyszerű, és Guth elmélete, amit ma „régifláció” néven ismerünk, a későbbiek során rengeteg módosításon ment keresztül. Már 1981–82-ben kiütötte a nyeregből az „új inflációs modell”, amit Linde dolgozott ki Oroszországban, és tőle teljesen függetlenül nem sokkal később Andreas Albrecht és Paul Steinhardt, a Pennsylvania Egyetem munkatársai.

A Guth-féle világegyetem szépen felfúvódott, de amikor az infláció véget ért, olyan buborékhabbá esett szét, ami sokkal kevésbé homogén, mint a valós világegyetem. Egy ideig a kutatók azon a véleményen voltak, hogy a problémát meg lehet oldani, ha feltételezik, hogy a buborékok egymásba olvadnak; ez az elképzelés azonban nem működött, mivel a folytatódó tágulás során megmaradtak

a buborékok. Így a „rég” inflációs modell ellentmondásba került a megfigyelt kozmikus homogenitással; ezt a rejtélyt nevezték „méltóságjeljes átmenetnek”. Az „új” inflációs modell megoldotta a kérdést, megmutatta, hogyan ment át a hamis vákuum a klasszikus vákuumba sokkal lassabban, mint ahogyan azt Guth eredeti modellje leírta. A „lassú átmenet” elkerülte a buborékproblémát és olyan kozmikus struktúrát mutatott be, ami összhangban áll a megfigyelésekkel.

Mindehhez egyes kritikus paraméterek finomhangolására volt szükség. A különbséget úgy tudjuk legkönnyebben megmagyarázni, ha egy olyan absztrakt kvantumteret képzelünk el, amelyben a hamis és a valódi vákuumállapotokat korlát választja el egymástól. Guth eredeti modelljében a korlát magas volt, és az átmenet során a világegyetem egy kvantumugrást (kvantumos alagútozás, „quantum tunneling”) hajtott végre a korláton keresztül. Ez fizikailag elfogadható, de ahogy már említettük, túlságosan sok buborékot eredményezett. Az új infláció alacsonyabbra helyezte a korlátot, és lehetővé tette a vákuum méltóságjeljes átmenetét a hamis vákuumból a klasszikusba. Ez az elképzelés nagyon hasonlít a Kanadai Légierő egyik olyan játékára, amelyben egy akadálypályát két tengely mentén el lehet fordítani, és így megakadályozni, hogy egy golyó lefutása során beleessen a pályába fúrt számos lyuk bármelyikébe. Mivel a hamis vákuumállapotából az átmenet könnyű, fontos, hogy a korlát értékét helyesen válasszuk meg, csak így lesz elfogadható az infláció sebessége. Nem született kielégítő magyarázat arra, miért épp ekkorák ezek az értékek. Ezért fölmerült a gyanú, hogy bár az új inflációs modell sokat segített, mégsem kielégítő. „A legtöbb elméleti kutató (bennünket is beleértve) az ilyen finomhangolást valószínűtlennek tartja – vallotta be Guth és Steinhardt –, a forгатókönyv azonban annyira eredményes, hogy felbátorít minket, reménykedhetünk egy olyan realiztikus elmélet kidolgozásában, amelyben ilyen lassú átmenet játszódik le, de a finomhangolásra nincs szükség.”<sup>13</sup> Az elméleti kutatók tovább törték a fejüket az új infláción. Steinhardt és Robert Crittenden kidolgoztak egy ígéretes modellt, amely szerint az infláció véget ért még a hamis vákuumból történő átmenet előtt. Ez a munka valószínűleg folytatódik, és remélhetőleg az egyesített elmélet terén folytatott kutatások fejleményei és a kozmikus mikrohullámú

háttérsugárzás szerkezetének jobb megfigyelései együttesen rántják majd le a leplet az infláció valódi természetéről.

Időközben Linde kidolgozta és 1983-ban közzétette új elméletét, a „kaotikus infláció” teóriáját. Míg Guth eredeti modellje, és az új inflációs elmélet, szerint a nagyon korai világegyetem igen forró volt, és az inflációt egy termodinamikai fázisátmenethez lehetett hasonlítani, addig Linde modelljében nem volt szükség hőre. „Felesleges, sőt káros az a feltételezés, hogy a világegyetem az infláció előtt forró volt” – jelentette ki Linde.<sup>14</sup> A kaotikus infláció sokkal hatékonyabb és előbbre mutató elképzelés, mint elődei; Linde szerint sokkal „természetesebb”, bár ahogyan a princetoni fizikus, Ed Turner figyelmeztette kollégáit: „az emberben felmegy a pumpa, ha azt hallja, hogy »az én modellem természetesebb, mint a te modelled«”.<sup>15</sup>

Ahhoz, hogy megértsük Linde elképzelését, közelebbről meg kell vizsgálnunk az infláció forgatókönyvének egyik alapvető mechanizmusát, a skalárterek szerepét. Mint már említettük, az összes egyesített elmélet térelmélet (a húrelmélet kivételével), és feltételezik a szimmetriát megtörő és a részecskéket tömeggel felruházó Higgs-mezők létezését. Általánosabb értelemben viszont a Higgs-mező csupán a számtalan lehetséges skalártér egyike. A skalárterek az anyag domináns előfordulási formái nagyenergiájú feltételek között, amilyenek az ősrobbanáskor is fennálltak, de (bár kevésbé nyilvánvaló módon) alacsonyabb energiaszintek mellett is léteznek. A kvantumfizika szerint a skalárterek kitöltik a kozmikus teret, de csak akkor észlelhetők, ha a terek között potenciálkülönbség lép fel. Ezt a jellegzetességet Linde az elektromossággal hasonlítja össze: „Elektromos tér csak akkor alakul ki, ha [elektrosztatikus] potenciáljuk nem egyenlő, mint az elemek sarkai között, vagy akkor, ha a potenciál időben változik” – írja –; ha a teljes világegyetem elektromos potenciálja mondjuk 220 Volt lett volna, úgy azt senki sem vette volna észre; a potenciál akkor csak egy másik vákuumállapotnak látszana. Ugyanígy egy állandó skalártér úgy néz ki, mint a vákuum: nem láthatjuk, ha teljesen körülvesz minket.”<sup>16</sup>

A skalárterek csak nagysággal rendelkeznek, míg például egy elektromágneses térnek, ami vektortér, minden egyes pontjához a nagyság mellett egy irányt is hozzárendelünk. A kirándulók tér-

képei egyfajta skalárterek: a topográfiai térképeken a nagyság a tengerszint feletti magasság, az azonos magasságú helyeket görbék kötik össze.<sup>17</sup> A skalárterek kivétel nélkül minden részecskére részrehajlás nélkül hatnak, nem úgy, mint az elektromágneses terek, amelyek csak olyan részecskékre gyakorolnak befolyást, amelyeknek elektromos töltésük van. Ebben az értelemben a skalártér az üres tér viselkedését utánozza, amely igazságosan bánik mindennel. Ezért hasznos eszköz a vákuum viselkedésének magyarázatához. Végül, ami a jelen kontextusban nagyon fontos, a skalárterek olyan taszítóerőt hozhatnak létre, amely elég nagy a gravitáció legyőzéséhez.

A skalártér fokozhatja az inflációt, de ugyanakkor fékezni is képes. Az általános relativitáselmélet ugyanazon egyenletei, amelyek először jelezték a kozmikus tágulást, azt mutatják, hogy a világegyetem tágulási sebessége arányos a tömegsűrűséggel. A skalárterek energiát tartalmaznak – ami természetesen egyenértékű a tömeggel –, így növelni tudják a kozmikus tömegsűrűséget, és ezzel létrehozzák az exponenciálisan gyors tágulást, amit inflációnak nevezünk. Miután létrehozták, le is tudják állítani azt. A feltevések szerint a leállítás akkor történik, amikor a döntő skalárterek elérték minimális potenciális energiájukat. A tudósok sok munkát fektettek e folyamat megértésébe, amely a régi és az új inflációs modellekkal eltérő paramétereket ad meg skalártereikre. Ezeket úgy szokták elképzelni, hogy a vákuum egy a tetején benyomott cowboykalap. A kalap tetején lévő benyomódás képviseli az adott skalártér helyi minimumértékét. Az infláció során a skalártér a bemélyedésben marad, saját helyi minimumértékén. Az infláció akkor szűnik meg, amikor a skalártér lecsökken a kalap karimájáig, ami a globális minimumértéket szimbolizálja. A régi és az új inflációs modell abban tér el, hogy másként képzelel el a skalártér csökkenését a kalap karimájáig. A régi modellben a tér kvantumalagút-hatással jut keresztül a kalap tetején. Az új modellnél a kalap behorpadása sokkal kisebb mértékű, és a skalártér kipottyan belőle, mint hal a tepsiből. A régi inflációs modell, mint említettük, túlságosan inhomogén világegyetemet eredményezett. Az új inflációnak a skalárteret elegendően hosszú ideig kellett a behorpadásban tartania, hogy az infláció végbemenjen, és mégis lehetővé tegye a kiugrást, hogy véget is érhessen. Mindkét forga-

tókönyv meglehetősen problematikus. Ugyanakkor mindkettőnél feltételezték, hogy a világegyetem kezdeti állapota forró.

A Linde-féle kaotikus modell kiterjesztette az infláció vizsgálatának kereteit. Linde kimutatta, hogy a világegyetem nem feltétlenül csak egyfajta skalártérrel kezdődhetett, aminek valamilyen meghatározott értéke volt (kezdeti feltétel), hanem tengersokféle skalártérrel. Ez a „kaotikus” rész. A skalárterek számos különböző minimumértékkel rendelkeztek; a különbség az volt közöttük, hogy milyen távol voltak a minimumtól és mennyire voltak homogének. A mi megfigyelhető világegyetemünkre azt mondják, hogy olyan skalártérből alakult ki, amely csaknem homogén volt, és a kialakulás a skalártér minimális értékétől távol ment végbe. Egy ilyen skalártér lassan „váltott át” és hozta létre azt a világegyetemet, amiben mi most élünk. Más skalárterek teljesen eltérő tartományokat hozhattak létre. Ez a kulcsa a többszörös világegyetemekre vonatkozó modelleknek, amelyet a következő fejezetben tárgyalunk. Itt most az a fontos, hogy Linde el tudott tekinteni a legtöbb kezdeti feltételtől. A kaotikus inflációnál nagyjából az egyetlen kezdeti feltétel a káosz. A világegyetemnek nem kellett forrónak lennie a kezdetkor. Az inflációs roham végén a részecskék kisarjadzása a vákuumból, amit „újrafelmelegítésnek” is szoktak nevezni, Linde szerint minden valószínűség szerint az *első* felmelegedés volt egy előzőleg hideg világegyetemben. Ugyancsak nem szükségszerű, hogy a világegyetem egyetlen skalártérből alakult ki, azonnal a helyes értékekkel. Csupán az szükségszerű, hogy a *mi* világegyetemünk egy ilyen térből keletkezett. Hogy megédesítse az életet, Linde beiktatott egy mechanizmust a(z újra)felfűtésre, amelyben a szükséges energiát a minimális energiaszintjére eső skalártér oszcillációja hozza létre. Amit mi ősrobbanásnak nevezünk, az Linde szerint az első heves kitörés volt, ami akkor következett be, amikor a skalártér kitört a fékező kozmikus vákuumból.

Összefoglalva az eddigieket, úgy látszik, az inflációnak jó esélye van arra, hogy a standard ősrobbanást tartalmazó kozmológiába beépüljön; pontosabban fogalmazva egy olyan szélesebb távlatot mutató képet adjon, amelynek az ősrobbanás is része. Ez teljesen eredeti elképzelés; a Berkeley egyetem asztrofizikusa, Joseph Silk nem túloz olyan nagyon, amikor azt állítja, hogy „az infláció az egyetlen új gondolat a kozmológiában Einstein óta.”<sup>18</sup> Nagyon ko-