

**K**edves Olvasó! A következő oldalakon nehéz, mégis magasztos cél elérésével próbálkozom meg: szeretnék rövid betekintést nyújtani az elméleti fizika egyik legnagyobb intellektuális kihívásába, a szuperhúr-elméletbe. Kérlek, helyezkedj el kényelmesen, és élvezd az utazást egy olyan különös világ felé, ahol még a tudományos fantasztikum eszméin edződött elmék is kétségbeesetten kiáltanak ismerős fogódzók után.

**A kezdetek**

A XX. század második felében a részecskefizikusok egy kis csoportja lefektette annak az elméletnek az alapjait, amely eddig egyedülálló módon képessé tehet bennünket a világegyetem legmélyebb szintű megértésére. Eme páratlan elmélet megszületése azonban korántsem volt előzmények nélküli esemény. Mint annyi más korszakalkotó elképzelés esetében, itt is számos korábbi felfedezés szolgáltatotta a megfelelő alapot. Ahhoz, hogy elképzelést alkothassunk a húrok elképesztő világáról, egészen az 1860-as évek közepéig kell visszanezünk az időben.

Európában a XVII. század végén indult tudományos forradalom a XIX. század második felére kiteljesedett. A Newton nevével fémjelzett fizikai világnézet bámulatosan egységes képet festett a minket körülvevő világ működéséről. A később klasszikusnak elnevezett elmélet a mechanikától a termodinamikáig, az optikától a gravitációig minden megfigyelt folyamatra épkezésként magyarázatot dolgozott ki. A tudósok arra is különös gondot fordítottak, hogy a felfedezett fizikai összefüggések mögött egységessé szervezett, megkérdőjelezhetetlen axiómák rendszere biztosítsa a szilárd elméleti alapokat. Így a korabeli – munkájukkal meglehetősen elégedett – kutatók jelentős része úgy gondolta, a fizika egy gyakorlatilag lezárt tudomány. Éktelenkedett ugyan még néhány fehér folt, főleg a kísérleti fizika térképén, de ezek elszigetelten jelentkeztek, és az akkori modern felszerelésekkel éppen, hogy csak kimutatható problémákat okoztak. A legtöbb kutató ez idő tájt úgy vélekedett ezekről a „jelentéktelen” paradoxonokról, hogy évek, esetleg évtizedek kérdése a kapcsolatok tisztázása az elmélet törzsét alkotó törvényekkel.

Nem mindenki volt azonban ilyen optimista. James Clerk Maxwell skót fizikus Michael Faraday angol kísérleti fizikus munkáinak nyomán, elméleti úton sikeresen egyesíteni tudta az elektromosság és a mágnesesség leírását. Az 1862-ben közzétett Maxwell-egyenletek teljesen váratlanul arra utaltak, hogy az elektromágneses zavarok hullámként, rögzített és megváltoztathatatlan sebességgel terjednek a térben.<sup>1</sup> A terjedési sebességre a számítások a fény mért sebességét adták,<sup>2</sup> ezért Maxwell és kortársai (Lorentz és Hertz) hamarosan arra is rádöbbsentek, hogy a fény is elektromágneses hullám.

Felületes szemlélő számára ezek az eredmények nem utaltak különösebb ellentmondásra, de mégis ez a felfedezés vezette el először a newtoni fizikát olyan területre, ahol érvényességét meg kellett kérdőjelezni.

Az igazi problémát a terjedési sebesség állandósága jelentette. Néhány kutató

hamarosan feltette magának a kérdést: Mi történik akkor, ha egyre növekvő sebességgel üldözni kezdjük a fényt? Newton elmélete nem gördít semmiféle akadályt elénk; szerinte minden további következmény nélkül utolérhetjük, és akár megállni is láthatjuk a fényhullámokat. Ezzel szemben Maxwell elmélete egyetlen megfigyelőnek sem engedélyezte a stationer fény megfigyelését (az elektromágneses hullámok az őket alkotó tér változását jelképezik, ha pedig nincs változás, nincs hullám sem).

## **A speciális relativitás elmélete**

Az ellentmondás feloldásán sokan törték a fejüket. Miután 1887-ben Michelson és Morley híres kísérlete mérésrel is igazolta, hogy az elektromágneses hullámok (köztük a fény) valóban rögzített sebességgel terjednek a vákuumban, egyértelművé vált a newtoni mechanika hibája. A tudomány művelőinek azonban majd húsz évet kellett várni a megfelelő magyarázatra. Ekkor, 1905-ben lépett színre a 26 éves Albert Einstein, aki a speciális relativitáselméletben adott számot a fény különös viselkedésének okairól.<sup>3</sup>

Einstein a kortárs Poincare és Lorentz munkáit tanulmányozva rájött, hogy nem a fényvel van a baj, hanem a newtoni elmélet által leírt és a hétköznapi életünkben is megszokott térszemlélettel. Einstein átvette Hermann Minkowski matematikustól azt a gondolatot, hogy az idő egy újabb (negyedik) dimenzióként kezelhető, és ebben a három tér és egy idődimenzióból álló tér-idő kontinuumban írta le a különböző megfigyelők mozgását.

Teljesen kifordítva Newton nyugalomról alkotott elképzeléseit, Einstein azt feltételezte, hogy minden tárgy állandó fénysebességgel halad keresztül az univerzumot alkotó négydimenziós tér-idő szerkezeten. Továbbá azt is kimondta, hogy ez a sebesség tetszőlegesen megosztható az egyes tér és az idő-dimenziók között, de abszolút értéke sosem változhat.<sup>4</sup>

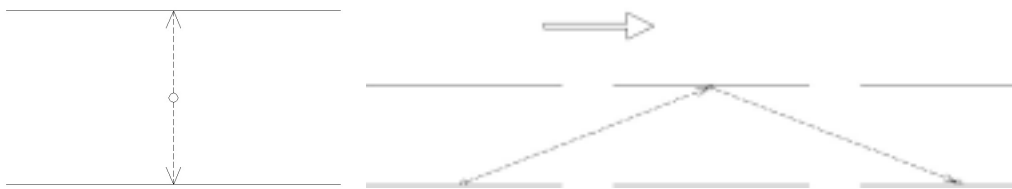
A fenti gondolatmenetből könnyen megmagyarázhatóak a fény megfigyelt tulajdonságai,<sup>5</sup> de mindez a newtoni világképre és az intuíciónkra végzetes csapást mér. Lássuk részletesebben a következményeket!

### ***Az idődilatáció***

Abban az esetben, ha egymáshoz képest nem mozognak a különböző térbeli helyeken tartózkodó megfigyelők, kizárólag az időbeli dimenzióra korlátozódik a mozgásuk. Abban az esetben azonban, ha két megfigyelő egymáshoz képest állandó sebességgel mozog, akkor mindkét megfigyelő (szimmetrikusan) azt érzékeli, hogy a hozzá képest mozgó társának az órája lelassul. Einstein szerint ez a jelenség abból adódik, hogy ilyenkor a tér-időn való áthaladás sebességén – az időn kívül – a térdimenzióknak is osztozniuk kell, azaz a térbeli sebesség csak az időbeli sebesség rovására növekedhet.

Az idődilatáció az alábbi, viszonylag egyszerű példán keresztül könnyen megérthető. Vegyünk két tükörlapot az 1. ábrának megfelelően és indítsunk útjára bennük egy elektromágneses hullámot. A hullám fénysebességgel halad a tükörfelületek között, és adott időközönként visszaér ugyanarra a pontra. Tekintsük egy időegységnek azt az időtartamot, ami ahhoz kell, hogy a fény megtegye a tükrök közötti oda-vissza utat. Most indítsunk el egy így létrehozott órát a térben a fénysebességgel összemér-

hető sebességgel. Az órán kívül elhelyezkedő megfigyelő a fény pályáját az ábrának megfelelően nem egyenesnek fogja látni, így a fénynek nagyobb utat kell megtennie a tükrök között, mint az álló helyzetben vizsgált társának (hiszen a fény sebessége a külső megfigyelő számára továbbra is ugyanakkorának adódik). A mozgó órában a fénysugár az indítás után az álló esetben megállapított időegységénél hosszabb idő alatt fogja elérni az alsó tükrölapot. Ebből az következik, hogy a külső megfigyelő szemszögéből a mozgó óra lassabban fog járni. Tehát az egymáshoz képest mozgó megfigyelők eltérően kell, hogy érzékeljék az időt.



1. ábra  
TÜKRÖLAPOKBÓL ÁLLÓ FÉNYÓRA MŰKÖDÉSE

### **A hosszérték változása**

A speciális relativitáselmélettel leírt univerzumban az egyes megfigyelők egymáshoz viszonyított sebességeinek meg kell egyezniük, függetlenül attól, hogy mely koordináta-rendszerből szemléljük őket (ezért mérhető minden irányban azonosnak a fény sebessége).<sup>6</sup> De ha a megfigyelésünk szerint a hozzánk képest mozgó megfigyelőnek lelassul az órája, mégis hogyan érzékelheti ő, hogy mi ugyanazzal a sebességgel mozgunk hozzá képest?

A magyarázat szerint ez csak úgy lehetséges, ha a mozgó megfigyelő egy mozgásirányban megrövidült térben halad (ezt a hatást nevezzük Lorentz-kontrakciónak).<sup>7</sup> Tehát a hozzánk képest mozgó megfigyelők haladás irányú mérete a mi méréseink szerint a sebességtől függően lecsökken éppen annyira, hogy kompenzálja a mozgó megfigyelő időlassulását. Így az egyenletesen mozgó megfigyelő koordináta-rendszerére áttérve azt tapasztaljuk, hogy az ő szemszögéből nézve mi rövidültünk meg, és a mi időnk lassult le az övéhez képest.

### **Az impulzus és az energia**

Kevésbé kézenfekvő, de roppant jelentős változásokon esik át Einstein értelmezésében a newtoni mechanika hagyományos impulzus fogalma is. Tekintettel arra, hogy a négydimenziós tér-idő idődimenziójában is mozgást végeznek a testek, Einstein erre a mozgásra is általánosította az impulzus fogalmát (energia-impulzus négyesvektor). Ebben a dimenzióban az impulzusra azonban energia dimenziójú mennyiség adódott a képletekből. Ez a mennyiség a relatív térbeli sebesség növekedése során fénysebességhez közelítve gyorsan növekedni kezd, majd fénysebességnél a végtelenbe tart.<sup>8</sup> Ezzel Einstein rámutatott egy olyan folyamatra, ami meggátolja, hogy bármely test elérhesse a fény térbeli sebességét; Maxwell majd fél évszázados paradoxonja feloldást nyert.

Einstein elmélete felrázta a kortárs fizikusokat, akik közül néhányan saját munkáikban hasonló eredményekre jutottak, de egyikük sem tudott elszakadni a klasszikus fizika fogalomrendszerétől annyira, hogy a fenti radikális gondolatokat megfogalmazza. Einstein világhíres nézeteinek napvilágra jutása után a fizikusok között nyílt viták robbantak ki a newtoni mechanika igazáról.

Poincare örökre a klasszikus fizika híve maradt, de mégis a nevéhez fűződik annak az összefüggésnek a felismerése, ami később a relativitáselmélet legfőbb hírnökévé vált. Poincare még 1900-ban azt figyelte meg, hogy az elektromágneses hullámok a részecskével való kölcsönhatásokban úgy viselkednek, mintha tehetetlen tömeggel rendelkeznenek. Meg is határozta, hogy az adott sugárzás energiája  $E/c^2$  nagyságú tömeggel helyettesíthető az impulzus egyenletekben. Einstein 1905-ben erre a munkára hivatkozva magyarázza meg a fúziós kölcsönhatásokban a résztvevő felek energiaegyensúlyát, de végül is Max Planck egyik 1906-ban közzétett cikkében jelent meg végső alakjában az  $E = mc^2$  összefüggés, azaz a tömeg-energia azonosságának elve.

Planck az összefüggést be is illesztette a speciális relativitáselméletbe, és azt jósolta, hogy az Einstein által felfedezett idő-impulzus a testek tehetetlen tömegének növekedéseként lesz kimutatható.<sup>9</sup> Walter Kaufmann az elektronokkal végzett gyorsítási kísérletei során detektálta a tömegváltozásokat, és tökéletes egyezést talált a speciális relativitáselmélet jóslataival. Ezzel a newtoni világhép korábbi egysége örökre megbomlott.

## **Az általános relativitás elmélete**

Einstein, miután a speciális relativitáselméletével megoldotta a fénysebesség állandóságának problémáját, újabb önellentmondásba sodorta a newtoni mechanikát. Ahogy korábban láttuk, magyarázatának egyértelmű következményeként előállt, hogy semmilyen hatás nem terjedhet a térben fény sebességénél gyorsabban.

Newton a XVII. században – sok egyéb mellett – megalkotta a gravitáció máig is jól használható leírását, de ebben szó sem esik arról, hogy a gravitáció miként fejti ki hatását a testekre. Ha a képletét jobban megnézzük,<sup>10</sup> nyomát sem találjuk benne a tömegvonzás időtől való függésének. Hogy megértsük a problémát, tegyük fel, a Napot hirtelen eltávolítjuk a Naprendszer közepéből. Ekkor – Newton leírása szerint – a Föld azon nyomban letér a pályájáról, és egyenes vonalban folytatja tovább az útját. Ez még nem meglepő következmény, de ha figyelembe vesszük azt a tényt, hogy a fény véges sebességgel terjed, máris előáll a képtelenség: a Föld úgy nyolc perccel azelőtt tér le a pályájáról, mielőtt bárki észlelhette, hogy a Nap nincs a helyén. Einstein természetesen rögtön előállt azzal a sejtéssel, hogy a gravitáció terjedésére is érvényes a speciális relativitáselmélet, de kijelentésének igazolásához gyökeresen fel kellett forgatnia a Newton-féle leírást, és életre kellett keltenie az általános relativitás elméletét.

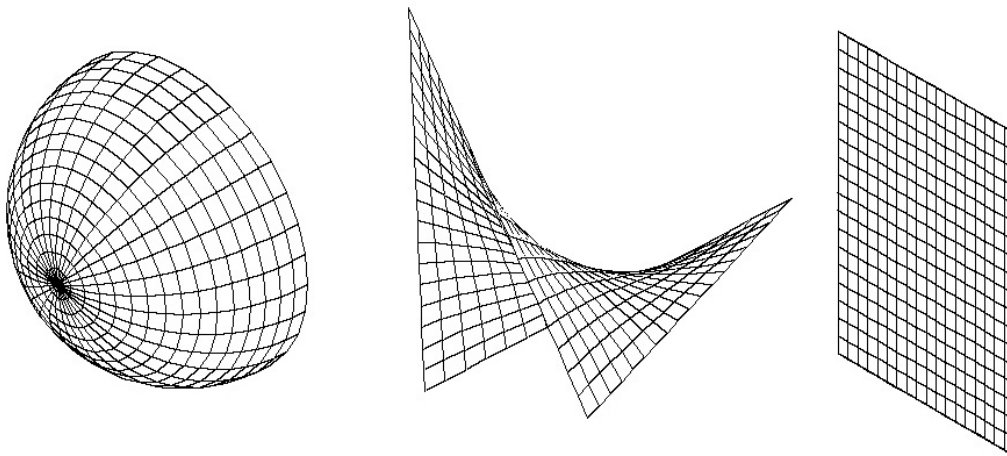
## A tehetetlen és a gravitáló tömeg egyenlősége

A XX. század hajnalán sok kutató töprengett azon, hogy a testek tehetetlensége (gyorsulással szembeni ellenállása) és a gravitáló tömegük miért mutatkozik hasonlóan nagyoknak. Eötvös Lóránd kísérleti munkásságának jelentős részét arra áldozta, hogy ezt az egyezést a lehető legpontosabban igazolja. Az általa alkotott inga segítségével 1/200.000 rész pontossággal megmérte a két tömeg azonosságát.<sup>11</sup> Einstein – Eötvös munkájára építve – joggal feltételezte, hogy a két mennyiség valóban azonos, és így a gyorsulás hatásait tanulmányozva tört utat a tömegvonzás természetének megismerése felé.

Gondolatban egy nagy, igen sebesen forgó kereket képzelt el, melyen sugárirányban kifelé haladva vizsgálódott. A forgó kerékben – akárcsak a vidámpark ciklonjában – könnyen belátható, hogy a sebesség irányának megváltozása miatt a kör középpontja felé mutató állandó gyorsulás lép fel. A rendszerre kívülről rátekintve azt is rögvest megállapíthatjuk, hogy a kerék kerületi sebessége a középponttól távolodva folyamatosan növekszik. A speciális relativitáselmélet alapján így a külső szemlélő különös hatást figyelhet meg.

## A görbült terek elmélete

Ha egy bátor kísérletező egy érintőirányba fordított méterrúddal a kezében a kerék közepétől a legkülső ív felé halad, a külső szemlélő azt tapasztalja, hogy a rúd kerületi sebesség növekedése miatt egyre jobban megrövidül. Ha ekkor a kellően rátermett emberünk, dacolva a rá ható erőkkel sugárirányba fordítja a pálcát, akkor az visszanyeri eredeti méretét, hiszen a Lorentz-kontrakció csak a mozgás irányába hat. Akármennyire is furcsának tűnik, de ez a jelenség egy igen súlyos geometriai természetű problémához vezet: ha a kerék kerületének mérésére használjuk a megrövidült méterrúdat, azt tapasztaljuk, hogy a kerület hosszabb, mint a sugár két  $\pi$ -szerese. Márpedig ez a megfigyelés, a newtoni mechanika által is használt euklideszi geometria<sup>12</sup> korlátai közé sehogysem szorítható be.



2. ábra

GÖRBÜLT TEREK: A GÖMB-, A HIPERBOLOID- ÉS A SÍKFELÜLET ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Einstein több, mint tízévi gondolkodás után 1916-ban tette közzé az újabb probléma feloldozását.<sup>13</sup> Munkájában arra mutatott rá, hogy a forgó kerekeknél jelentkező  $K > 2\pi r$  egyenlőtlenség kialakulása megmagyarázható, ha feltételezzük, hogy a tér-idő a gyorsulás hatására meggörbül. Ebben az esetben – akár a hiperboloid felületére rajzolt kör esetén – a kerület bővülése könnyen előállítható.<sup>14</sup>

Tehát – magyarázta Einstein – a gyorsuló testek meggörbítik maguk körül a tér-idő szerkezetet, és ez a görbület mutatkozik meg előttünk „tehetetlen” tömeg érzeteként. Einstein a magyarázattal nem állt itt meg. Eötvös vizsgálataira építve kijelentette, hogy hasonlóan a gyorsulókhöz, a tömeggel rendelkező testek is meggörbítik maguk körül a teret. Tehát a tömegvonzás nem más, mint a tér-idő görbülete. Ez a manapság már jól ismert állítás híressé tette általános relativitáselméletét, de később ez vezetett el annak korlátaihoz is, így a szuperhúrok szükségességéhez. Ezért ezt feltétlenül érdemes megjegyeznünk.

### ***A görbült térben lelassul az idő***

További fontos következményekre is rámutatott az általános relativitáselmélet. Már korábban is felmerült, hogy a tisztán energiából álló fényre szintén hat a gravitáció (tömeg-energia ekvivalencia miatt), de az új elmélet erre is analóg magyarázatot szolgáltatott.

A Nap közelében, egy távoli csillag felszínéről származó, mit sem sejtő fénysugár – ahogy addig is – a legkisebb energiájú pályát követve halad. Csakhogy a Nap kelte térgörbület hatására a legkisebb energiájú pálya számára már nem az egyenes, hanem a csillag felé görbült vonal. Ezt a hatást figyelembe véve a fáradhatatlan földi megfigyelő kiszámíthatja a csillag várható elmozdulását az égen, és ezt alkalmas időpontban kísérletileg ellenőrizheti is.

Einstein, a jóslatát igazoló csillagászati kísérletek után<sup>15</sup> jogosan söpörte be a világ fizikusainak elismerését. Immár világhírű tudósként újabb érdekességre hívta fel a figyelmet: a görbült téren áthaladó fénysugárnak több utat kell megtennie, mintha ugyanazt a távolságot az eredeti egyenes mentén tette volna meg. Így, ha összehasonlítjuk az adott távolság megtételéhez szükséges időt a görbült és az attól mentes térben, azt tapasztaljuk, hogy a görbülettől mentes téren gyorsabban ér át a fény, azaz megelőzve a görbült térben haladó társát, annak múltjába kerül. Megfordítva a dolgot: minél erősebben görbült a tér, annál tovább „tartja fogva” a rajta áthaladó fényt, így a „szabadulás után” a kevésbé torzult térrészen áthaladó társának a jövőjében köt ki. Tehát a gravitáció (és a gyorsulás ugyanúgy) lelassítja az időt!<sup>16</sup>

Az Einstein relativitáselméleteiben bemutatott világ a tudományos-fantasztikus irodalomban jártas olvasók számára nem is olyan idegen. A sok ismerős történet az iker-paradoxonról, a fekete lyukakról, a féregjáratokról és az időutazásról mind-mind ebben az elméletében gyökereznek. A felsorolt hatások laikusok számára azért tűnnek különlegesnek, mert a relativitáselméletben a megfigyelő mozgásával és tömegével aktív cselekvővé változtatja a tér-idő szerkezetét. Ennek következtében a tömegvonzás Newton által is megfigyelt hatásait már maga a tér-idő szerkezet deformációja közvetíti. A deformációhullámok haladási sebességére pedig ugyanazok a szabályok érvényesek, mint a fény haladására.

Az általános relativitás tehát sikerrel birkózott meg a gravitációs erő terjedésének problematikájával, és ezzel a newtoni mechanikára újabb vereséget mért. De nem ez volt az utolsó csapás.

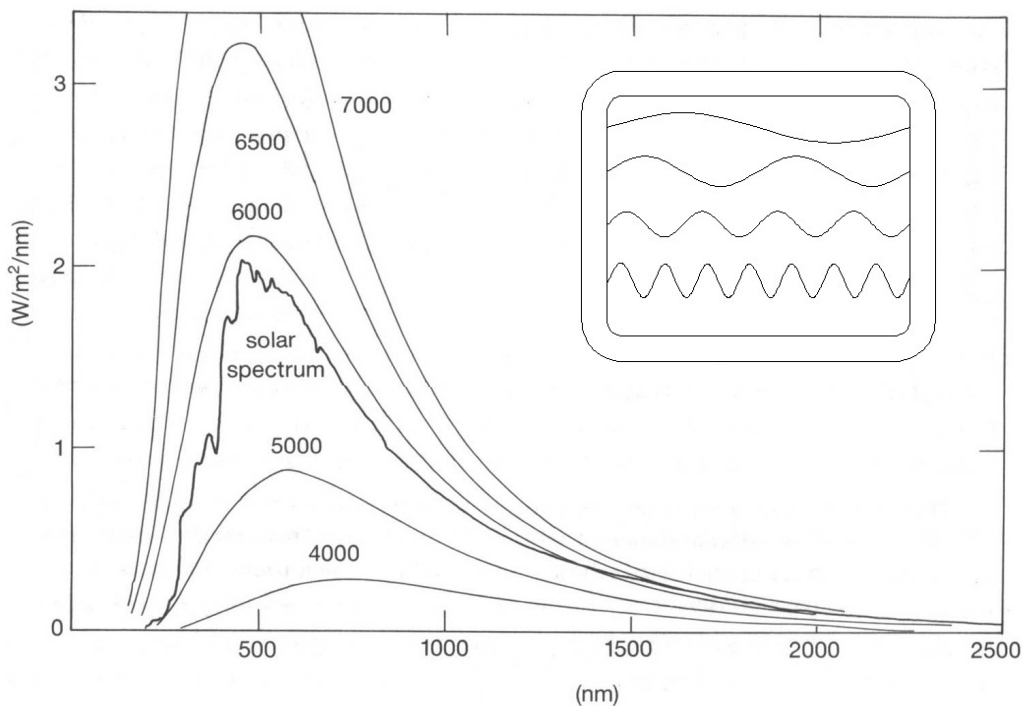
## A kvantummechanika születése

Bármennyire is radikálisnak tűnnek Einstein elképzelései a világegyetem felépítéséről, le sem tagadható, hogy alapvetően a klasszikus fizikából erednek. A közös alap, amelyből mindkét elmélet építkezik, az úgynevezett kauzalitás elve és a folytonosság feltételezése.

Tömören ez azt jelenti, hogy minden kölcsönhatást megelőz egy korábbi kiváltó esemény (ok-okozati viszony), és a kölcsönhatásokat tetszőleges mértékben lebontjuk kisebb események láncolatára. Azaz, ha ismernénk a világegyetem keletkezésének pontos mikéntjét – és kellő türelemmel is megáldott bennünket a sors –, akkor az univerzum összes létező részecskéjének kiszámíthatnánk jelenlegi helyzetét és mozgásparamétereit.

### *Az energiaadagok felfedezése*

Nem sokkal Einstein speciális relativitáselméletének megjelenése előtt egy másik érdekes, Maxwell 1862-es elmélete által generált paradoxon is feloldozást nyert.



3. ábra

### A SÜTŐBEN KELETKEZŐ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK ÉS A FEKETE TEST SUGÁRZÁSI KÉPE

A fizikusok között csak „fekete-test” sugárzási problémának nevezett talány a következő módon állt elő: egy tökéletes fekete (minden sugárzást elnyelő) zárt térben (pl.: a sütő belsejében) csak a zárt tér befoglaló méretére jellemző hullámhosszú

elektromágneses hullámok jöhetnek létre (lásd a 3. ábrát). Ilyen hullámokból azonban végtelen sok hozható létre, ahogy az adott méretbe írható egész ciklusok számát növelni kezdjük.

Maxwell klasszikus fizikára épülő elmélete szerint a sütő falai sehogyan sem tudnak különbséget tenni az egyes hullámok között, így mindnek – hullámhossztól függetlenül – ugyanakkora energiát adnak át. Ha összegezzük a végtelen sok egyre kisebb hullámhosszú összetevőnek átadott energiát, arra a képtelen eredményre jutunk, hogy függetlenül a sütő tényleges hőmérsékletétől, a benne létrejövő elektromágneses hullámok végtelen sok energiát fognak tartalmazni. Az eredmény nyilvánvalóan helytelen, de a newtoni mechanika szabályai szerint így kellene lennie.

Max Planck német fizikus az 1890-es évek második felében foglalkozni kezdett Maxwell elméletével, és beépítette azt saját lineáris oszcillátorokból álló klasszikus modelljébe. Ez idő tájt a fekete-testre jellemző, hullámhossztól függő valós sugárzási kép kialakulására két klasszikus elmélet is próbált magyarázatot adni. Az egyiket Wilhelm Wien 1896-ban alkotta meg. Ez a magas frekvencia-tartományban jól egyezett a megfigyelésekkel, de elméleti alapjai meglehetősen gyenge lábakon álltak. A másik Rayleigh-Jeans törvényként vált ismertté 1900 nyarán. Ennek elég szilárd elméleti kapcsolatai voltak, de csak alacsony frekvenciatartományban adott jó közelítést.

Max Planck 1900 októberének egy ihletett pillanatában a két ismert összefüggést tanulmányozva meglelte a matematikai megoldást a valóság leírására, de fogalma sem volt arról, milyen elmélet állhat az általa megadott (és később kísérletileg is ellenőrzött) képlet hátterében.<sup>17</sup> Planck ekkor Boltzmann egy korábbi munkájának segítségével új irányba indult, és két hónap alatt megtalálta a magyarázatot. Ezt 1900 decembérének közepén publikálta, amiért 1918-ban Nobel-díjat is kapott. Megoldása a következő volt: rájött, hogy a sütőben létrehozható különböző hullámhosszú elektromágneses hullámok kialakulásához – hullámhossztól függően – úgynevezett küszöbenergiára van szükség, azaz nem rendelkezhetnek tetszőlegesen kis energiával. Minél rövidebb hullámhosszú sugárzást szeretnénk létrehozni, a létrehozáshoz szükséges küszöbenergia annál nagyobb lesz, így a sütőben a végtelen sok elképzelhető sugárzás közül csak azok maradhatnak meg, melyek keletkezéséhez kisebb energia szükséges, mint a Maxwell egyenletekből rájuk jutó hányad. Tehát a valóságban a sütőben csak véges sok féle hullám alakul ki, és ezeknek a hullámoknak az energiája csak diszkrét értéket vehet fel (a küszöbenergiát vagy ennek többszörösét). A hullámokra jellemző küszöbenergia értékre Planck igen egyszerű összefüggést talált ( $E = h \cdot \nu$ ), ahol a sugárzás hullámhossza mellett megjelenő érték ( $h$ ) a Planck-féle állandó, az úgynevezett hatáskvantum (a legkisebb energiamennyiség, amely a természetben előfordulhat).<sup>18</sup>

Planck tisztában volt vele, ha helyes a diszkrét energiaszintekről alkotott elképzelése, akkor elemi szinten mér végzetes csapást a newtoni világméretre, mert a feltételezett folytonosság tézise nem tartható fent tovább. Épp ezért ő is szkeptikus volt. Nem úgy Niels Bohr (az első kvantum atom-modell megalkotója) és Erwin Schrödinger (a hullámmechanika kidolgozója), akik Planck nagyszerű meglátásának segítségével sikeresen forradalmasították az atomi méretek fizikáját, létrehozva ezzel a kvantummechanika különös világát.

A kezdeti lelkesedés közben a kvantummechanika kifejlesztői egy alapvető kérdéssel megfeledkeztek: vajon a természet miért részesíti előnyben a diszkrét energiaszinteket a folytonos változásokkal szemben?

Albert Einstein a speciális relativitáselméletének kidolgozása közben sokat gondolkodott Planck felfedezésén is. A hatáskvantum segítségével 1905-ben magyarázatot lelt Heinrich Hertz 1887-ben felfedezett fotoelektromos effektusára, és ezen keresztül rávilágított magára a hatáskvantum eredetére is.

Hertz rájött, hogy a fémekben az elektronok elektromágneses sugárzás hatására annyi energiához juthatnak, hogy kilépnek a felületből. A jelenség azonban csak bizonyos értéknél nagyobb frekvenciájú sugárzás esetén lép fel, függetlenül attól, hogy mekkora az intenzitás a határértéknél alacsonyabb frekvenciájú sugárzás esetén. Einstein feltételezte, hogy az elektromágneses hullámok másképp írhatók le, mint ahogy azt Maxwell elképzelte. Szerinte a hullámok helyett apró energiacsomagok – fotonok – áramlásaként kellene felfogni a sugárzást. Így, ha ezek a csomagok elegendő energiával rendelkeznek, akkor ki tudják lökni a felületről az elektronokat, ha viszont nincs elég energiájuk, akkor akármilyen sok is érkezik belőlük a fémfelületre, az elektronok nem szabadulhatnak ki a fémes kötés fogságából. Planck összefüggését felhasználva pontosan ki is számolta az egyes fotonok energiáját, így kísérletileg is ellenőrizhető jóságot adott a jelenségre (a magyarázatért Einsteint 1921-ben Nobel díjjal jutalmazták).

Einstein tehát megmutatta, hogy Planck felfedezése az elektromágneses hullámok sajátos diszkrét (darabos) természetét tárta fel, ezért nem lehetett igaz a vizsgált sugárzási jelenségeknél Newton folytonossági feltétele.<sup>19</sup>

A feltárt összefüggés nagyot lendített a kvantummechanika elméleti megalapozásán, de ahogy az lenni szokott, újabb problémát hozott a felszínre: miként lehet igaz egyszerre Maxwell hullámleírása és Einstein diszkrét fotonokból álló energiaáradata?

A probléma nem éppen új keletű, hiszen az 1700-as évek végén Newton és Huygens komoly vitát folytatott a fény természetéről. Akkor Thomas Young kétréses interferencia kísérletével igazolta a fény hullámtermészetét, így akkor Newton részecskeszemlélete vereséget szenvedett. Miért lenne ez most másképp?

Hertz fotoelektromos effektusa szerint a fény részecskékből áll, de a kétréses kísérlet szerint továbbra is hullám. Schrödinger egy huszárvágással felvetette, hogy a fotonok egyszerre részecskék és hullámok is (részecske-hullám kettősség), és attól függően, hogy milyen kísérletet készítünk elő, olyan viselkedést fogunk tapasztalni.

Louis De Broglie osztotta ezt a nézetet, sőt úgy gondolta, hogy a mikroszkopikus világban ez a szabály általános, és minden részecskére igaz. Állításainak alátámasztására kidolgozta az anyaghullámok elméletét. Az elmélet alapján 1927-ben Davisson és Germer sikeresen hozott létre elektronsugár interferenciát, azaz igazolták, hogy bizonyos körülmények között anyagi részecskék is viselkedhetnek jellemzően hullámként.<sup>20</sup> A részecske-hullám kettősség az 1920-as évek végére beépült a fizikusok világszemléletébe, hasonlóan a relativitáselmélet furcsaságaihoz.

Az elektron és nagyobb tömegű részecskék interferencia kísérletei után egyértelművé vált az anyag hullámtermészete, de felmerült a kérdés, hogy minek a hullámairól is van szó valójában?

Schrödinger első elképzelése szerint a hullámok „szétkent” részecskéket takarnak, de ez az elképzelés itt-ott mégiscsak sántított. Ugyanis, ha az elektron „szétkenhető” kisebb részekre (ez ahhoz kell, hogy önmagával interferálhasson a kísérleti eredményeknek megfelelően), akkor ezeket a kisebb részeket fel is fedezhetnénk (természetesen senki nem tudott még törtrész elektront, vagy más kis darab részecskét megfigyelni). Ekkor jött Max Born német fizikus, aki gyökeresen eltérő elképzelést javasolt. Szerinte az anyaghullámokat valószínűségi szemszögből kell megközelíteni. Azokon a helyeken, ahol Schrödinger hullámegyenlete nagy értéket ad, ott a részecske előfordulási valószínűsége magas, ahol pedig kis értékű, ott a valószínűség alacsony. Richard Feynmann tovább finomította Born elképzelését; szerinte a részecskék egyszerre bejárják az összes lehetséges pályát, de ezekhez a pályákhoz különböző valószínűségek rendelhetők.

Mi keresnivalója van a valószínűségnek a fizikában? A klasszikus elméleten nevelkedett fizikusok (köztük Einstein is) ijedten kapták fel a fejüket a hír hallatán, hiszen világképük utolsó bástyája, a kauzalitás elve forgott veszélyben. A viták kettéosztották a fizikus társadalmat. Einstein a klasszikus nézőpontot védelmezve kijelentette: „Isten az Univerzummal nem játszik kockajátékot”. De a kísérletek egyértelműen a kvantummechanika forradalmi elképzelését támasztották alá: az univerzum törvényei nem teszik lehetővé, hogy világunk jövőjét bizonyos valószínűségnél jobban megjósoljuk.

A klasszikus fizika kauzalitási elvének szerepét a kvantummechanikában Werner Heisenberg 1927-ben felfedezett határozatlansági elve vette át. Kutatásai során Heisenberg kimutatta, hogy Planck felfedezésének (a hatáskvantumnak) következtében a mikro-világban a részecskék sebessége és helyzete nem határozható meg egyszerre tetszőleges pontossággal. Ennek oka, hogy a vizsgálatra használt elektromágneses sugárzás meghatározott adagokban terjed. A megfigyelt részecske helyzetének pontos meghatározásához az alkalmazott hullám frekvenciáját növelni kell, de a magasabb frekvenciájú sugárzás energiája is nagyobb, így a részecske sebességének pontos megmérést lehetetlenné teszi.

Heisenberg bebizonyította, hogy a mérések pontosságával kapcsolatos jelenség a mikrovilágra általánosan jellemző, és kísérletileg is igazolható jelenségekhez vezet (kvantumos alagút effektus, kvantumos klausztrofóbia stb.)<sup>21</sup>

### **Elemi részecskecsaládok felfedezése**

Niels Bohr XX. század elején kifejtett áldásos munkája nyomán az anyag felépítésének teljesen új modellje alakult ki. Ennek kidolgozásához a kvantummechanika éppen megalkotott teljes fegyvertára szükségére volt, de az eredmények felülmúltak minden korábbi elképzelést. Az elméleti kutatásokkal párhuzamosan a kísérleti fizikusok kezei között a görögök által atomnak elkeresztelt alapvető építőelem további elemi részekre bomlott.

J. J. Thomson 1897-ben bebizonyította az elektron (negatív töltésű elemi részecs-

ke) létezését, majd Ernest Rutherford 1911-ben híres alfa-részecske (hélium ion) szórási kísérletével kimutatta egy pozitív töltésű részecskékből (protonokból) álló mag létezését. Ez a két felfedezés elegendő alapot szolgáltatott egy naprendszerhez hasonló atom-modell kialakításához.

Hamarosan azonban kiderült, hogy az atommag további részekre bontható. James Chadwick 1932-ben felfedezte, hogy az atommagban a pozitív töltésű részek mellett egy semleges részecske – a neutron – is megtalálható. Felfedezésével az atomfizikusok végre úgy érezhették, megtalálták az anyag legkisebb építőköveit.

Ez a kvantummechanika korai, rendkívül sikeres korszaka egészen 1968-ig tartott, amikor a Stanfordi Lineáris Gyorsítóban végzett kísérletek arra utaltak, hogy mind a proton, mind a neutron további belső szerkezettel rendelkeznek. A kísérletek tanúsága szerint mindkettőt három-három kisebb elemi részecske, úgynevezett kvark építi fel, és ezek a kvark-triplettek kétfajta: fel- és le típusú részecskékből állnak. A fizikusok várakozásait ismét felülmúlta a valóság. Az egyre nagyobb energiájú ütközéses kísérletekben további elemi részecskék is felbukkantak. Még az 1930-as évek elején Wolfgang Pauli megjósolta egy különös, de alapvető részecske, a neutrínó létezését. Ezt a részecskét 1950-es évek közepén találta meg Clyde Cowman és Frederic Reines. Szintén az 1930-as évek végén a kozmikus sugárzás hatásait tanulmányozva egy elektronhoz hasonló elemi részecskét sikerült kimutatni, ez volt az elektronnál 200-szor nehezebb müon.

A nagyenergiájú ütköztetők üzembe helyezése után a részecskefizikusok „vérszemet” kaptak. Felfedeztek további négyfajta kvarkot, két további neutrínó fajtát és a tau-részecskét. A helyzet tovább bonyolódott, mikor mindezek antirészecskéit is sikerült kimutatni. A fentiekén kívül – Einstein 1905-ös fotoelektromos effektust tárgyaló tanulmányának köszönhetően – a természetben előforduló kölcsönhatások közvetítő részecskéit (a bozonokat) is keresni kezdték.

A Maxwell-által egyesített elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéjét fotonnak, az urán atommag spontán elbomlásáért is felelős gyenge kölcsönhatás közvetítő részecskéit  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  bozonoknak, az atommag összetartásáért felelős erős kölcsönhatás közvetítő részecskéjét glüonnak nevezték el, és a kísérletek igazolták is a létezésüket. Egyedül a negyedik kölcsönhatás, a gravitáció közvetítő részecskéje (a graviton) állt ellen a kíváncsi kutatóknak mind a mai napig.

A tudósok a részecske-dömping hatására meglehetősen bajos helyzetbe kerültek. Szerették volna megismerni az atom belső szerkezetét, válaszként azonban hatalmas mennyiségű megmagyarázhatatlan új elemi részt kaptak. Természetesen megpróbálták rendet rakni az „állatkertben”, ezért a részecskék tulajdonságai alapján (ahogy annak idején Mengyelejev tette az atomokkal) csoportokat hoztak létre:

Fermionok	I. család	II. család	III. család
Leptonok	Elektron	Müon	Tau-részecske
	Elektron-neutrino	Müon-neutrino	Tau-neutrino
Kvarkok	Fel-kvark	Bájos-kvark	Top-kvark
	Le-kvark	Furcsa-kvark	Bottom-kvark

Ugyanílyen táblázat hozható létre a részecskék antirészecske párjainak is.

Megdöbbenőnek tűnhet, de a minket körülvevő anyag kizárólag az I. családból származik, az összes többi részecskét csak az ütköztetők nagyenergiás kísérleteiben és kozmikus sugárzásból sikerült kimutatni. Ennek legfőbb oka, hogy a II. család részecskéi nehezebbek az I. családnál, míg a III. családéi nehezebbek a II. családnál. Einstein óta tudjuk, hogy a tömeg maga is energia, így a II. és III. család részecskéinek a létezéséhez jóval nagyobb energiákra van szükség, mint az I. csaláéhoz.<sup>22</sup>

### ***Kvantum-térelméletek és a standard modell***

Amikor Heisenberg felfedezte a határozatlansági elvet, a fizika határozott fordulatot vett, és végleg szakított a klasszikus elképzelésekkel. A határozatlansági elv által kormányzott világegyetem szövege egyre közelebből és egyre rövidebb időtartamokon vizsgálva igencsak mozgalmas helyé válik, szemben Einstein sima tér-idő modelljével. A jelenség oka, hogy kis tartományokban felerősödik a „kvantum-fluktuációnak” nevezett jelenség. Ennek lényege, hogy akár az üres vákuum is kölcsönözhet energiát a semmiből, ha azt rövid időn belül kamatostól visszafizeti. Minél kisebb a tértartomány, és minél rövidebb a futamidő, annál nagyobb lehet az energiaingadozás mértéke. Ez az energia az  $E = mc^2$  egyenlőség fennállása miatt „virtuális” antianyag-anyag részecskék keletkezéseként és ismételt rekombinálódásaként (annihilációjaként) érzékeltethető a legkönnyebben. Ezt a mikroszkopikus szinten mindent kitöltő, vadul fortyogó tartományt a tudósok kvantumhabnak nevezték el.

Sok neves elméleti fizikus (Pauli, Dirac, Dyson, Feynman) az 1930-as és 40-es években megszállottan keresték a kvantumhab leírására alkalmas matematikai formalizmust. A Schrödinger által megalkotott hullámmechanikáról már korábban bebizonyosodott, hogy nem alkalmas a fortyogó vákuum leírására, mivel nem tartalmazza Einstein speciális relativitáselméletét, és ezzel a tömeg-energia ekvivalencia tételét sem. Az igazsághoz azonban hozzátartozik, hogy ezt maga Schrödinger is jól tudta, sőt ő maga próbálta elméletébe beilleszteni Einstein tér-idő leírását, de nem járt sikerrel.

A tudósok első lépésként megpróbálták az elektromágneses sugárzás és az anyag kölcsönhatásának leírásában figyelembe venni mind a speciális relativitás elvét, mind a kvantummechanikát. Így született meg az első relativisztikus kvantum-térelmélet, a kvantum-elektrodinamika. Legfontosabb tulajdonságait a következőképpen képzelhetjük el: a világegyetem háttérét alkotó szövedéket egy szemcsés szerkezetű mező alkotja (fotonok), amelyben a tér-idő fluktuáló energiája vég nélkül csúszkál az anyagra jellemző kvantummezők között (a kvantummezőket a részecskék tömegeként és mozgásaként kell elképzelnünk).

A kvantum-elektrodinamika a valóság bámulatosan pontos leírásával örvendeztette meg létrehozóit, ezért ennek mintájára az 1970-es évekre kidolgozásra került a kvantum-kromodinamika (az erős kölcsönhatás leírására), és a kvantum-elektrogyenge elmélet (a gyenge kölcsönhatás leírására). Az utóbbi elnevezés a fizika egy igen jelentős mérföldkövét rejti.

Az elmélet megalkotása közben Sheldon Glashow, Abdus Salan és Steven Weinberg rájött, hogy a gyenge- és az elektromágneses kölcsönhatás természetes egységet alkotnak, holott a minket körülvevő világban teljesen eltérő módon jelennek meg. Az egység igen magas hőmérsékleten jelenik csak meg (ősrobbanás utáni néhány tizedmásodpercben), de ebben a nagyenergiás állapotban a két erő teljesen megkülön-

böztethetetlen. A szétválás egy különös, „szimmetria sértésnek” nevezett folyamat során történik meg. A kutatók tehát azért adták elméletüknek az elektroyenge elnevezést, mert ez magában hordozza a gyenge kölcsönhatás eredetének a magyarázatát is. Felfedezésükért – az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítéséért – mindhárman Nobel-díjat kaptak.

Napjainkra a három elmélet jóslatait kielégítő pontossággal ellenőrizték. A három kvantum-térelméletet és a részecskecsaládok leírását összefoglaló néven a nemgravitációs erők standard modelljének nevezik.

A standard modell látványos sikerei ellenére mégis nagy hiányosságokkal küzd. Először is 19 olyan paramétere van, amit mérésekkel kellett meghatározni (részecskecsaládok tulajdonságainak és a kölcsönhatások egymáshoz viszonyított erősségének számszerű értékei), ráadásul ezek mért értékeire, valamint a családok számára semmilyen magyarázatot sem ad. Másrészt a gravitációs kölcsönhatás leírását egyáltalán nem tartalmazza, így az általános relativitás elmélet nem képezi a standard modell részét.<sup>23</sup>

## **Egy új elmélet szükségessége**

A standard modell hiányosságai és a gravitációs erő kvantum leírásának szükségessége egy új egyesített elmélet létrehozására sarkallta a tudósokat. Einstein élete utolsó éveiben kizárólag erre a problémára koncentrált, de sok más tudóshoz hasonlóan nem járt sikerrel. Kudarcanak oka a kvantum és a relativisztikus leírás között tátongó hatalmas szakadék volt.

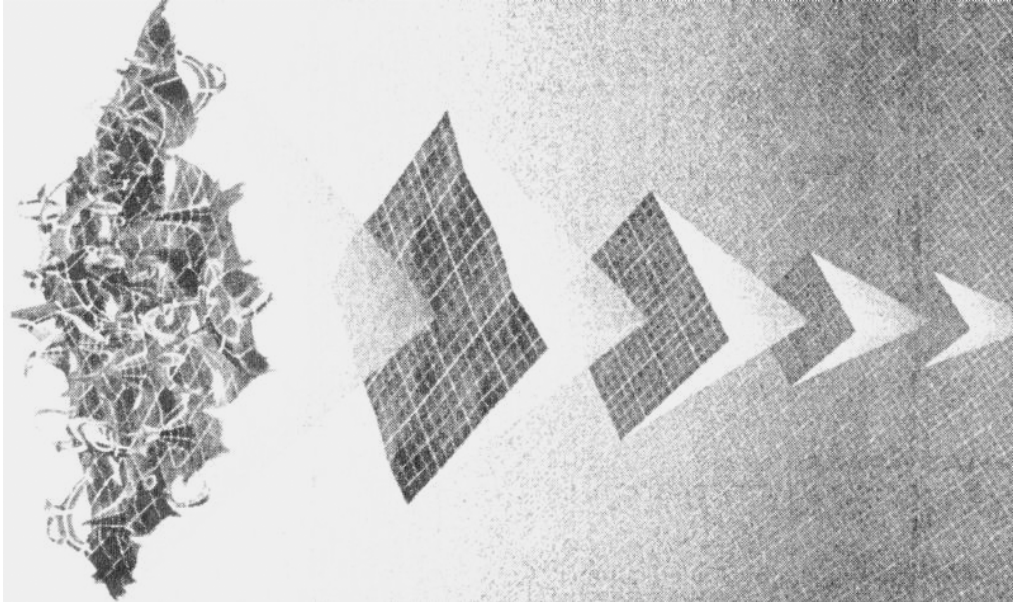
### *Az általános relativitáselmélet és a kvantummechanika kibékíthetetlen konfliktusa*

A kvantummechanika elvei minden kétséget kizáróan érvényesülnek a mikrovilágban, ugyanakkor az általános relativitáselmélet jóslatait is sikerült igen nagy pontossággal igazolni. Laikus szemlélő meg lehet elégedve a fizika mai állapotával, hiszen minden mérettartományban képesek vagyunk jóslatokat tenni a világegyetem működésével kapcsolatosan. A probléma azonban oly jelentős és olyan mélyen gyökeres, hogy mindenképpen foglalkoznunk kell vele, ugyanis mindkét elmélet magában hordozza saját bukásának forrását.

Az általános relativitáselmélettel kapcsolatos gondokra még maga Einstein hívta fel a figyelmet. Összefoglaló néven ma már csak „fekete-lyuk” problémaként emlegetjük ezt a jelenséget. Einstein jól látta, hogy a görbült téridőről alkotott elképzelése nem tiltja olyan nagy torzulások létrejöttét, amelyek örökre csapdába ejthetik magát a fényt is (innen a „fekete” jelző). Ezek létrejöttének módját a csillagok fizikájával foglalkozó tudósok is levezették, sőt sok paraméterét is sikerült meghatározniuk. Ma már a megfigyelésekből azt is biztosan állíthatjuk, hogy ezek a néha hihetetlenül nagy tömegű (akár több millió csillag tömegével bíró) objektumok valóban léteznek a világegyetemben. A baj az, hogy az úgynevezett „eseményhorizonton” belül – ahonnan a fény már nem szabadulhat – az általános relativitás fizikája semmit sem mondhat az anyag további sorsáról, mert ebben a tartományban a tér görbülete végtelenül nagyra nő. Tehát van olyan hely az ismert univerzumban, ahol az elmélet már eleve nem alkalmazható.

Na és! – vonhatnánk meg a vállunk, hiszen a fekete lyukak meglehetősen ritka

jelenségeknek számítanak. Ha csak ennyi lenne a gond, valószínűleg a tudósok nagy része nem aludna nyugtalanul. Ha azonban a kvantummechanika irányából közelítünk, akkor sokkal súlyosabb következményekhez jutunk. Korábban már megpróbáltuk vizsgálni a tér-idő parányi tartományainak viselkedését és megállapítottuk, hogy azt fortyogó kvantumhab tölti ki. A standard modell összefüggései azonban nélkülözik a gravitációs kölcsönhatást – nem véletlenül – hiszen, ha kvantumhabban keletkező virtuális részecskepárok gravitációs hatásait is figyelembe vennénk, igen különös effektust figyelhetnénk meg.



4. ábra  
A KVANTUMHAB

Mindkét elmélet közös vonása, hogy a kölcsönhatásokban résztvevő részecskéket pontszerűnek tekinti. Ha a gravitációs mező erősségét a tömeggel rendelkező részecskék felé közelítve követjük, azt tapasztaljuk, hogy egy bizonyos (roppant kicsi ún. Planck távolság –  $10^{-33}$  cm) távolság alatt a részecskék a tér-időt – a fekete lyukakhoz hasonlóan – maguk köré görbítik. Ezek az ultramikroszkopikus térszakadások S. W. Hawking „párolgó szingularitás” elmélete alapján szinte azonnal energiává sugárzódnak szét, hogy aztán az energiából ismét virtuális részecskék keletkezzenek, amelyek ismét összeroppantják maguk körül a teret és az időt, és így tovább a végtelenségig. Ez az igazi – gravitációval is kiegészített – kvantumhab egy olyan mérettartomány, ahol gyakorlatilag nincs értelme térről és időről, energiáról és anyagról beszélni, hiszen egy olyan területre számúzi a részecskéket, ahol nem értelmezhető sem a relativitás elmélete, sem a kvantummechanika. Mivel az egész világmindenséget ennek a kvantumhabnak kellene kitöltenie, kijelenthetjük, hogy a jelenlegi fizika nem képes leírni az univerzum alapvető működését. Felmerülhet bennünk a jogos kérdés: nem valamelyik elmélet hibája eredményezi a furcsa jóslatot a Planck mérettartomány esztelen viselkedésére?

Ez sokkal valószínűbb, de ha hibás valamelyik elmélet, akkor mégis melyik, hi-

szen mindkettő rendkívül sok bizonyítékkal alátámasztható. A válasz megtalálásához további elmélyült vizsgálatokra van szükség.<sup>24</sup>

### ***A kölcsönhatások és a szimmetriaelvek kapcsolata***

A gravitációs erő az eddig megkísérelt leírások szerint láthatóan kilóg a többi erő közül. A gravitáció különös viselkedésére az a magyarázat, hogy azt az általános relativitáselmélet értelmében közvetlenül a tér-idő görbületéből származtatjuk. Ahhoz, hogy az egyesítéshez szükséges esetleges hasonlóságokat mégis meglegljük, meg kell értenünk, hogy a természetben előforduló kölcsönhatások milyen okokból léteznek.

Korábban már láthattuk, hogy a gravitációs erő megjelenésének magyarázatához Einsteinnek feltételeznie kellett: minden megfigyelő egyenrangúnak tekinthető függetlenül attól, hogy milyen mozgást végez (a gyorsuló megfigyelők is hivatkozhatnak arra, hogy nyugalomban vannak egy gravitációs mezőben). A megfigyelők egyenrangúságának kiterjesztett elve egy szimmetria-tulajdonságot jelenít meg, az összes viszonyítási rendszer egyenértékűségének szimmetriáját.

A nemgravitációs kölcsönhatások szintén szimmetria elveket követnek, bár kissé bonyolultabbakat, mint a gravitáció. Az erős kölcsönhatás az atommagon belül található kvarkok és a hatását közvetítő glüonok közötti kapcsolatot írja le. A kvarkok három féle – erős kölcsönhatásra jellemző – töltéssel (színnel) rendelkezhetnek: piros, kék és zöld (kvantum-színdinamika). Ezek a színek mondják meg, hogy mely kvarkok és miképpen kapcsolódhatnak össze. Az erős kölcsönhatás vizsgálata során kiderült, hogy a kvarkok egy különös szimmetriának engedelmessé válnak. A piros-piros, kék-kék, zöld-zöld töltésű kölcsönhatások teljesen azonosan működnek. A piros-zöld, zöld-kék, kék-piros kapcsolatok ugyanilyen furcsa „forgatási” szimmetriának engedelmessé válnak, sőt az egész rendszer érzéketlen a színek egyidejű megváltozására. Az egész folyamat hasonlatos a gömb forgás-szimmetriájához, azaz függetlenül attól, hogy miként forgatjuk a kezünk között, a gömb mindenholnán nézve ugyanazt a képet mutatja. Az erős kölcsönhatás megismert tulajdonságát „mértékszimmetriának” nevezték el. Hasonlóan az erős kölcsönhatáshoz, az egyesített elektro-gyenge kölcsönhatás is speciális szimmetria-tulajdonságokat követ.

Herman Weyl, Chen-Ning Yang és Robert Mills az 1950-es években napvilágot látott munkáikban bebizonyították, hogy az erős kölcsönhatás magának a mértékszimmetriának a következménye, mint ahogy a gravitáció a viszonyítási rendszerek egyenrangúságának szimmetriájából származik.

Yang és Mills véleménye szerint az univerzumban látható kölcsönhatások változatlanóságát, az ezekhez tartozó töltések változásait kompenzálni képes erők biztosítják. Tehát a megfigyelt kölcsönhatások (elektro-gyenge, erős, gravitációs) azért léteznek, mert csak így biztosítható, hogy a világegyetem minden pontja egyenrangú legyen. Ha viszont az egyenrangúság szimmetria-feltételei hozzák létre a megfigyelt erőket, akkor mégis létezik egy közös elv arra, hogy egyesíthető a természet négy alapvető kölcsönhatása.<sup>25</sup>

### ***A spin és a szuperszimmetria***

Láthattuk, hogy a természet szimmetriája (a világegyetem bármely részében ugyanazok a törvények érvényesek) igen nagy jelentőséggel bír a tapasztalt kölcsönhatások

magyarázatában. De honnan tudjuk, hogy csak annyiféle szimmetria létezik, mint amit felfedeztünk? Sidney Coleman és Jeffrey Mandula fizikusok kimutatták, hogy ha a jelenleginél több szimmetria létezne a fizikában, akkor a világegyetem egyáltalán nem hasonlítana a jelenleg megfigyelt alakjára. Munkájuknak azonban volt egy gyenge pontja: nem vették figyelembe a részecskék fontos tulajdonságát, a spint.

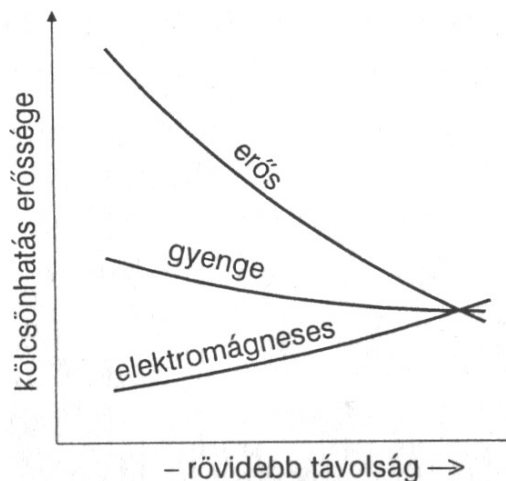
Bohr atommodelljében az elektron úgy keringett az atommag körül, akár a Föld a Nap körül. Azonban az elektront a kvantummechanika pont részecskéként kezeli, ezért a saját tengely körüli forgása nem igazán értelmezhető. George Uhlenbeck és Samuel Goudsmith 1925-ben rájött, hogy az atomok fényelnyelésével és kibocsátásával kapcsolatos rejtélyes kísérleti eredmények megmagyarázhatók, ha mégis feltételezik, hogy az elektron meghatározott módon pörög a tengelye körül. Ez a pörgés (spin) azonban, ahogy a kvantumos furcsaságokhoz szoktatott elménkkal jól sejtjük, nem hasonlítható a Föld tengely körüli forgásához. Inkább egy kvantumos örvénylésre hasonlít, és ugyanolyan rögzített tulajdonsága az elektronnak, mint a töltése, azaz az univerzum összes elektrona rögzített és megváltoztathatatlan módon azonos sebességgel pörög. Ha az elektron nem pörögne, akkor nem is lenne többé elektron. A későbbi vizsgálatok azt is kimutatták, hogy a spin minden létező részecskére jellemző tulajdonság. Az anyagi részecskék (fermionok) kivétel nélkül  $1/2$ -es spinnel, a nemgravitációs kölcsönhatást közvetítő részecskék 1-es spinnel, míg a gravitációt közvetítő graviton 2-es spinnel kell, hogy rendelkezzenek.

Ugyancsak 1925-ben Wolfgang Pauli korszakalkotó felfedezést tett. Rájött egy, az összes  $1/2$ -es spinű részecskére érvényes kizáró szabály létezésére. A róla elnevezett kizárási elv kimondja, hogy nem létezhet két azonos állapotú részecske egy helyen. Az elv kulcsfontosságú volt az atom elektronszerkezetének megismerésében, valamint megmagyarázta, miért nem omlanak össze az anyagrészecskék a kölcsönhatást közvetítő részecskékkel való találkozáskor. Ha a Pauli-elv nem működne a természetben, akkor a kvarkok nem kapcsolódhatnának különálló protonokká és neutronokká, és ezek nem alkothatnának önálló atomokat az elektronokkal. A Pauli-elv tehát kellő mértékben hangsúlyozta a spin fontosságát, de a fizikusokat a különleges kvantum pörgés gondolkodóba ejtette: talán létezik egy újfajta, a spint is magába foglaló szuperszimmetria elv? A válaszra 1971-ig kellett várni, ekkorra született meg a matematikai leírása a spin szimmetriáját is magába foglaló elméletnek. Ez az elmélet azonban részecskék újabb áradatát jósolta, úgynevezett szuperpartner részecskék létezését, melyek spinje fél egységgel kisebb a megfigyelt standard modellbeli párjánál. A probléma rögtön adódott: miért nem figyelt meg eddig senki egyetlen szuperpartner részecskét sem?

Erre a kérdésre senki sem tudja a választ, mégis a fizikusok hajlamosak hinni benne, hogy a feltételezett szuperszimmetria létezik. Erre több igen nyomós okuk is van: először is nehezen lenne magyarázható, hogy a természet miért pont a spin szimmetriáját sértené meg. Másrészt a standard modell is jelentősen egyszerűsíthető lenne a szuperszimmetria bevezetésével. Harmadrészt pedig elvégezhető lenne a három nemgravitációs erő egyesítése.

Itt érdemes megállni egy szóra. A fizikusok régóta arról álmodoznak, hogy az egész világegyetem működését egyetlen „mesteregyenletből” vezethessék le. Innen származik a vágyuk, hogy a megfigyelt kölcsönhatásokat közös tőből eredeztessék. A gravitációs erő beépítésén kívül rendkívül fontos, hogy az erős kölcsönhatás is összeegyeztethető legyen az egységes modellel.

Ha a természet követi a szuperszimmetriát, akkor a nagy egyesítés elméletileg elvégezhető. Az elképzelés a következő: a különbség, ami miatt a három nemgravitációs erő különbözőnek látszik, abból adódik, hogy a részecskék az őket körülvevő „kvantumpárával” másképp lépnek kölcsönhatásba. A kvantumpára azért keletkezik, mert a különféle töltésekkel rendelkező részecskéket körülveszi az azt közvetítő mező. Ennek a mezőnek a térerőssége a részecske felé közeledve a kvantumos fluktuációknak köszönhetően egyre erősebbé válik, így minden részecskét beborít egy virtuális részecske-antirészecske köd. A térerősség változása a részecske felületéhez közeledve nem csak abból származik, hogy közelebb kerültünk a részecskéhez, hanem abból is, hogy a kvantumpára egyre kevésbé árnyékolja le a részecske valódi terét. A kvantumos hatások tehát a részecskéhez közeledve megváltoztatják annak töltésből származó térerősségét.



5. ábra  
A NEMGRAVITÁCIÓS  
KÖLCSÖNHATÁSOK EGYESÍTÉSE

Frank Wilczek és David Politzer 1973-ban azzal az elképesztő eredménnyel állt elő, hogy amíg az elektromágneses kölcsönhatásban résztvevő részecskék térerejét a kvantumpára jelenség gyengíti, addig az erős és a gyenge kölcsönhatás hasonló részecskéinek térerejét növelik, azaz a részecskékhöz közelítve a gyenge- és az erős kölcsönhatás térereje csökken, míg az elektromágnesesé növekszik. Áttörve tehát a kvantumos ködön, egy bizonyos távolság után mindhárom kölcsönhatás egyformán erősnek (de nem pont egyformának) tűnik. Ez a távolság roppant kicsi ( $10^{-29}$  cm), az ősrobbanás utáni  $10^{-39}$  secundumnak megfelelő méretnél állhatott csak elő a természetben. Az univerzum ekkor  $10^{28}$  Kelvin hőmérsékletű lehetett.

1991-ben a CERN kísérleti eredményeit extrapolálva az idejüket nem sajnáló fizikusok azt az eredményt kapták, hogy ha a szuperszimmetrikus partnereket is figyelembe vesszük a kvantumpára kialakulásánál, akkor a három nemgravitációs erő egy adott távolságon pontosan meg fog egyezni. Tehát bizonyítékot találtak rá, hogy a szuperszimmetria segítségével a hön áhított egyesítés elérhető, azaz létezik olyan környezet – bár roppant nagy energiák mellett –, ahol a három erő egymástól nem különböztethető meg.<sup>26</sup>

### Magasabb dimenziók és a supergravitáció

A nemgravitációs erők és a gravitáció egyesítési kísérletei rendre kudarcot vallottak az Einstein által megalkotott három tér- és egy idődimenziót tartalmazó univerzum modellben. Nem sokkal az általános relativitáselmélet megjelenése után – 1919-ben – egy ismeretlen lengyel matematikus, Theodor Kaluza, igencsak furcsa ötlettel állt elő a probléma megoldására.

Kaluza egyszerűen megkérdőjelezte a nyilvánvalót: azt állította, hogy az univerzum három térdimenzió helyett négyet tartalmaz. Ezelős ötletét arra a megfigyelésre alapozta, hogy a négy tér és egy időbeli dimenzióban felírt elektromágnesességet leíró

Maxwell egyenletek formailag azonossá váltak Einstein gravitációs leírásával. Azaz Kaluza rájött, hogy mindkét kölcsönhatást a tér-idő szerkezet deformációi okozzák. A gravitáció a megszokott három dimenzió görbületével, míg az elektromágneses kölcsönhatás a titokzatos „negyedik” térdimenzió fodrozódásával jellemezhető.

No, de miért nem látjuk ezt a rejtett dimenziót? – kérdezték Kaluza kortársai jogosan. A lengyel matematikus nem szűkölködött a különös ötletekben, így rögvest felvetette, hogy biztosan azért nem látjuk a plusz dimenziót, mert az fel van tekeredve! Meglepő állítását a svéd Oskar Klein fejlesztette tökélyre, aki megmutatta, hogy az univerzum szövete egyaránt tartalmazhat kiterjedt és felcsavarodott dimenziókat.

Egy egyszerű példán keresztül követhetjük a két matematikus egyedülálló gondolatait: képzeljünk el egy hosszú locsolócsövet, amit egy szakadékon áthúzva távolról vizsgálunk. Ha kellő messzeségből tekintünk a csőre, szemünk képtelen érzékelni annak vastagságát, így azt hihetjük, hogy egy kiterjedés nélküli egydimenziós vonalat látunk. Ha szert teszünk egy messzelátóra, máris jobban szemügyre vehetjük a vonalat, és feltárlhat előttünk a cső felülete. Így megfelelő eszközzel egy újabb dimenziót fedezhetünk fel. Klein 1926-ban a kvantummechanika épülő eszköztárát felhasználva kimutatta, hogy a felcsavarodott dimenziók önmaguktól egészen parányi méretűre (Planck hosszúságúra –  $10^{-33}$  cm) húzódnak össze. Ez a tartomány pedig – még a legkorszerűbb műszereink számára is – az észlelhetőség határain messze túl van.

A Kaluza-Klein elmélet gyönyörűsége még Einsteint is magával ragadta egy időre, de amikor a fellelkesült tudósok megpróbálták az elektron leírására is alkalmazni a képleteket, kiküszöbölhetetlen ellentmondásra bukkantak a mért adatokkal szemben. A fizikusok figyelme éppen ekkor fordult Dirac hihetetlenül sikeres kvantumtér elmélete felé, így az extra-dimenziókkal kapcsolatos „spekulációk” hamarosan feledésbe merültek.

Egészen az 1970-es évek végéig tartott, amíg a kvantummechanika művelői a standard modell fontos kérdéseit tisztázták. Ekkor ismét megérett az idő rá, hogy nekiruszkodjanak a lehetetlennek: egyesítsék az általános relativitás elméletét a kvantummechanikával.

Kaluza és Klein feltekeredett dimenziókról alkotott tézisei ismét előkerültek, de az első megjelenés óta roppant sokat fejlődött a fizika. Megjelent az erős- és gyenge kölcsönhatás, valamint még számtalan olyan összefüggés, amit szintén be kellett építeni az elméletbe. A fizikusok az újabb erőkhöz újabb felcsavarodott dimenziókat rendeltek, egészen addig, míg a kölcsönhatásokat leíró egyenletek nem közeledtek egymáshoz. Végül a négy alapvető erő egyesített leírásához igénybe vették a szuperszimmetriát, és nem kevesebb, mint 11 (!) dimenziót. Ezt az elméletet a szuperszimmetria alkalmazására utalva szupergravitációs elméletnek nevezték el. Bár az elmélettel kapcsolatos kutatások roppant ígéretesnek tűntek, a kísérleti eredményeknek ellentmondó jóslatok származtak belőle. A legnagyobb akadályt az univerzum megfigyelt „királis aszimmetriájának” elméletbe építése jelentette.

Kiralitásnak röviden a tükrözési asszimmetriát nevezik. Ezt a hatást az 1950-es évek közepén mutatták ki a kísérleti fizikusok, és gyakorlatilag arra utal, hogy léteznek olyan (gyenge kölcsönhatástól függő) fizikai folyamatok, amelyeknek tükrben megfigyelt párjai a valóságban nem mehetnének végbe, azaz a világegyetemben a bal és jobb oldal nem cserélhető fel tetszőlegesen. Ez az a korábban már említett úgynevezett „szimmetria-sértés”, ami felelős az elektromágneses- és a gyenge kölcsönhatások különböző megjelenésért.<sup>27</sup>

Az 1980-as évek elejére nyilvánvalóvá vált, hogy hiába a fizikusok elszántsága, a magasabb dimenziós szupergravitációs elmélet képtelen arra, hogy megvalósítsa a gravitáció standard modellbe illesztését. Ugyan az egyesített elmélet darabjai jól láthatóan körvonalazódtak, mégis hiányzott egy kulcsfontosságú elem, mely a kölcsönhatásokat a kvantummechanika oldaláról konzisztens módon összetartaná. Ekkor lépett színre a problémák feloldozásának minden ígérését magában hordozó próféta: a húrelmélet.

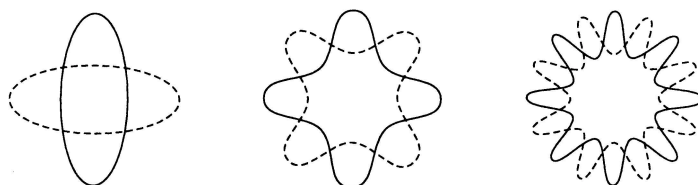
### *Az erős kölcsönhatás leírása Euler elfeledett egyenletével*

Gabriele Veneziano 1968-ban a CERN munkatársaként az erős kölcsönhatás megfigyelt tulajdonságainak értelmezésén töprengett. Egy fárasztó könyvtári munkával töltött nap végén megdöbbentő meglátása támadt. Az egyik régi matematika könyvet lapozgatva észrevette, hogy a XVIII. században élt neves matematikus – Leonard Euler – majd kétszáz évvel ezelőtt, pusztán matematikai okokból levezetett képlete (a béta-függvény) egy csapásra megmagyarázza az erős kölcsönhatás számos tulajdonságát.

Veneziano megfigyelése intenzív kutatásra ösztökélte a részecskefizikusokat. Számos eleddig megmagyarázatlan reakció megértéséhez segítséget nyújtott Euler függvénye, de bizonyos értelemben nem volt több, mint egy bemagolt képlet. Úgy tűnt, a béta-függvény működik, de senki sem értette, hogyan. A tanácstalanságnak 1970-ben Yoichiro Nambu, Holger Nielsen és Leonard Susskind vetett véget. Érdekesítő tanulmányukban megmutatták, hogy az Euler-féle béta-függvény mögött egy eddig ismeretlen fizikai háttér áll. Rájöttek, hogy amennyiben az elemi részecskéket pontok helyett egydimenziós rezgő húrokkal modellezzük, akkor kölcsönhatásaikat pontosan az Euler-féle béta-függvény írja le.

Az apró elemi hurok különböző rezgései különböző energiaszinteket képviselnek. Az egyes energiaállapotok pedig más-más részecske-tulajdonságoknak feleltethetőek meg. Minél összetettebb rezgéseket végez egy húr, annál nagyobb energiára van szükség a létrehozásához (akár egy végein megfogott kötélen esetén, egyre több hullám létrehozásához, egyre intenzívebb karmozgatásra van szükség). A különféle energiájú húrállapotok különféle részecskék tulajdonságait hordozzák, így ezek végtelen serege állítható elő egyetlen elemi húr segítségével.

A húrelmélet azonnal megfogta a kutatókat matematikai esztétikumával, de korai alakjának jóslatai hamar ellentétbe kerültek az egyre pontosabb szubatomos megfigyelésekkel. Mint már láthattuk, a húrelmélettel egy időben fejlesztették ki a kvantumkronodinamikát, szintén az erős kölcsönhatás leírására. Ennek a pontszerű részecskékkel operáló elméletnek jóslatai bámulatos egyezést mutattak a kísérletekkel, így a húrelméletet a legtöbben hamarosan elvetették. Természetesen, mint mindig, most is volt néhány elhivatott tudós, aki úgy érezte, a húrelmélet mögött valami alapvető összefüggés húzódik meg.



6. ábra

### EGYSZERŰ HÚRREZGÉSEK

A húrelmélet egyik fő gondjának pont a gazdagsága bizonyult. Túlságosan is sok részecskét lehetett előállítani a titokzatos kis hurok rezgési mintázataiként. Ugyan az elméleti leírás tartalmazta az erős kölcsönhatás közvetítésére alkalmas részecskéket (glüonokat), de számtalan olyat is szolgáltatott, melyre a kísérleti megfigyelések egyáltalán nem utaltak. John Schwarz 1974-ben merész ötlettel erénnyé kovácsolta a húrelmélet bőségét. A közvetítő részecskék rezgési mintázatait tanulmányozva váratlan felfedezést tett. Az egyik húrmintázat éppen megfelelt a gravitáció feltételezett közvetítő részecskéjének, a gravitonnak.

Bár ezt a részecskét soha senki nem figyelte még meg, mégis könnyen megjósolhatóak bizonyos tulajdonságai. Schwarz és kollégája, Scherk pontosan ezeket a tulajdonságokat találta meg. Kijelentették, hogy a húrelmélet azért bizonyult elégtelennek az erős kölcsönhatás leírására, mert annál sokkal többet rejt magában. Nem csupán az erős kölcsönhatásra képes magyarázatot adni, hanem a gravitációt is magába foglalja. Így ez lehet az első olyan kvantumelmélet, mely sikerrel egyesítheti mind a négy kölcsönhatást, azaz áthidalhatja az ellentmondásokat a relativitáselmélet és a kvantummechanika között.<sup>28</sup>

### ***Egyesítés a húrelmélet segítségével***

Schwarz bejelentését a fizikusok közössége nem fogadta osztatlan lelkesedéssel. Mivel a húrelmélet az erős kölcsönhatás leírásakor kudarcot vallott, sokak számára haszontalan elfoglaltságnak tűnt még bonyolultabb célra való felhasználása. A szkeptikusok véleményét megerősíteni látszott a kezdeti húrelméletek néhány furcsa sajátossága. Leginkább az a tény hatott riasztóan a kutatókra, hogy „mindössze” 26 dimenzió kellett ahhoz, hogy a parányi hurok rezgései valódi részecskék tulajdonságait jelenítsék meg. Ezen kívül a részecskék kölcsönhatásainak vizsgálatakor számos „szubtilis” ellentmondás lépett fel (végtelen mennyiségek jelentek meg), melyek kiküszöbölésére tett kísérletek rendre kudarcot vallottak.

A veszett ügyet továbbra is támogatva Michael Green és John Schwarz tízévi megfeszített munka után 1984-ben hatalmas áttörést ért el. Cikkükben bebizonyították, hogy a húrelméletet kikezdő ellentmondások elkerülhetőek. Sőt, továbbmentek, számításaikban megmutatták, hogy korai előrejelzésüknek megfelelően a húrelmélet valóban képes arra, hogy leírja mind a négy kölcsönhatást és az anyag egészét. Mindehhez azt a kedvező fejleményt szolgáltatották, hogy a kezdeti 26 helyett elegendő csak 10 dimenzió (a szupergravitációs elméletnél 11-re volt szükség).

Az idő megérett a változásra, hiszen ekkorra a pontszerű részecskékkel operáló elméletek sorra vereséget szenvedtek a nagy egyesítéssel szemben. Kutatók ezrei vetették magukat a húrelmélet rejtelmes világába, és a befektetett óriási munka hamarosan értékes eredményekre vezetett. Az elemi részecskék világának legjobb leírását a mai napig a korábban tárgyalt standard modell tartalmazza. Ez az elmélet azonban túl rugalmas (túl sok a kísérletektől függő bemenő paramétere) ahhoz, hogy a részecskecsaládok és kölcsönhatások tulajdonságaira bármilyen magyarázatot adjon. A Green által felvázolt forradalmasított húrelmélet gyökeresen különbözik ettől. Egységes és rugalmatlan elméleti felépítményének semmilyen kezdeti értékre nincs szüksége (egyetlen egy paramétert kivéve) és mégis azonos építőelemből képes előállítani az összes anyagi- és a kölcsönhatásokat közvetítő részecskét (a gravitonnal együtt).

Rendkívüli hatékonyságának oka, hogy mindössze egyetlen húr típus végtelen sokféle rezgésmintázatának kombinációiból előállítható az univerzumban megfigyelt összes részecske tulajdonsága. A fundamentális húr összes megengedett rezgését megkeresve tulajdonképpen az elemi részecskék megfigyelhető tulajdonságai (tömeg, töltések, spin stb.) magyarázhatóak meg, így a húrelmélet egyedüli módon képes arra, hogy bizonyítsa az anyag és az erők közös eredetét, azaz képes megvalósítani a hön áhított „végső egyesítést”.

Apró szépséghiba, hogy egyetlen bemenő paraméterre azért mégiscsak szükség van. Ez a paraméter adja meg, hogy a mindenséget kitöltő elemi hurok mennyire feszesek. A hétköznapi hurok leírásához is szükséges jellemző a feszeség. A cipőnket összetartó műanyag szálak feltétlenül lazábbak, mint a hegedű húrjai. De mindkettőnél jóval fesze-  
sebb a zongora húrja, nem is beszélve egy kábelhíd tömegét tartó sodrony feszeségéről. Az egyetlen dolog, amire a húrelméletnek szüksége van, az az elemi húr feszesége. Ennek erőssége határozza meg, hogy az egyes rezgési mintázatok keltéséhez mekkora energiákra van szükség.

Scherk és Schwarz még 1974-ben – mikor a gravitonra jellemző mintázatot felfe-  
dezték – közvetett úton megjósolták a hurokban ébredő feszültséget. Számításuk szerint a rezgések által közvetített kölcsönhatás erőssége fordítottan arányos a húr feszültségével. Mivel a gravitációs kölcsönhatás roppant gyenge, ezért az őt közvetítő húr feszültségére kolosszális érték:  $10^{39}$  tonna adódott. A roppant nagy értéknek számos igen jelentős következménye van a hurokra nézve. Első és legfontosabb, hogy a hurok – mivel nincsenek kikötve semmihez sem – egészen apró méretű gyűrűvé ugranak össze. Számítások szerint jellemző méretük alig haladja meg a  $10^{-33}$  cm-t (Planck hosszúságot), így érthető, hogy műszereinkkel miért észleljük pontszerűnek őket. A második következmény a vibráló hurok energiájára ad utalást. Az igen erősen megfeszített húr nagyon nehéz rezgésbe hozni, így a bonyolultabb rezgésminták létrehozásához elképesztően nagy energiákra van szükség.

A húr energiája tehát két változótól – a rezgések erősségétől és a feszültségtől – függ. Azt hihetnénk, hogy a húr egyre finomabb pengetésével annak energiája csökkenthető, de az itt jellemző apró méreteken a kvantummechanika törvényei már közbeszólnak. Hasonlóan a Planck tökéletes „fekete test” modelljében keletkező elektromágneses hullámokhoz, a hurok energiája sem vehet fel tetszőleges értéket. A húr „megpendítéséhez” minimális energiára van szükség. Az adott húr – akár egy elektromágneses hullám – ennek a legkisebb energiának csak egész számú többszörösével rendelkezhet. A minimális energia egyértelműen a húr feszültségével arányos, mivel a feszültség igen nagy, a hurok minimális energiája is óriási. Tömegegységekre átszámolva ez az energia a proton tömegének  $10^{19}$ -szeresének adódik (Planck-tömeg). A vibráló hurok tömege tehát a Planck-tömeg egész számszorosa lehet.

A fenti eredmény elrettentő az elemi részecskék világában, hiszen a Planck-tömeg egy közönséges porszem tömegével vetekszik. Felmerül a kérdés: Mi köze a huroknak a természetben megfigyelhető valóságos részecskékhez? A válasz ismét a kvantummechanika furcsaságai között keresendő: a részecskék világát irányító határozatlansági elv kimondja, hogy tökéletes nyugalom nem létezik. Minden anyagi jelenség, megfelelő közelségből nézve úgynevezett kvantumos remegésben szenved, mert ha nem lenne így, megsértené Heisenberg törvényét (meghatározható lenne a helyzete és a sebességállapota egyszerre). A kvantumos remegés a húrelméletben is meg kell, hogy jelenjen. Szerencsére, mert így az óriási energiájú (Planck-tömegű) részecskék mellett „beszivároghatnak” a világban megfigyelt alkotóelemek is.

Még az 1970-es évek elején tették azt a megállapítást a matematikai feladványokat kedvelő húrelméleti kutatók, hogy az eddig tárgyalt szándékosan keltett rezgések és a kvantum vibrációk majdhogynem kioltják egymást. A húr kvantum „nyüzsgéséhez” tartozó energia a számítások szerint negatív, míg a rezgési mintázatokhoz tartozó energiák pozitívnak adódnak. Nagyságrendileg a két energia azonos, így hatalmas tömegű részecskék helyett, a legkisebb energiájú hurok tömege éppen a valós részecskék tömegtartományába esik. Vizsgálataiban Scherk és Schwarcz is azt találta, hogy a gravitációs kölcsönhatást közvetítő részecskét jelképező rezgési mintázat esetén a két energia pontosan kioltja egymást. Tehát a graviton nyugalmi tömegére így éppen az elmélettől elvárt nulla érték adódik (csak a nyugalmi tömeggel nem rendelkező részecskék közvetíthetnek fénysebességgel kölcsönhatásokat – pl.: a foton).

De hogyan oldják meg a hurok az általános relativitáselmélet és kvantummechanika között fennálló kibékíthetetlen ellentétet? Vagy másképp megfogalmazva: mi történik a Planck mérettartományban jelentkező fortyogó kvantumhabbal, ha a részecskéket parányi hurokkal helyettesítjük? A válasz meglepően egyszerű!

Tekintettel arra, hogy a hurok jellemző hossza éppen a problémák határát jelentő Planck-hossz, ezért az ijesztő kvantum fluktuációk – melyek a pontszerű részecskékhez egyre jobban közeledve erősödtek egészen a végtelenségig – egyszerűen korlátok közé szorulnak. Ennek oka, hogy a fluktuációk során keletkező virtuális részecskepárok és a kölcsönhatásokat közvetítő részecskék szintén Planck-hosszúságú hurokból állnak. Gyakorlatilag a húrelméletben nincs is értelme húrméretnél kisebb mérettartományban vizsgálni a tér-idő szerkezetét, mivel ott nem létezhetnek hurok, azaz nem létezhet sem energia, sem anyag (később majd látjuk, hogy még maga a tér-idő sem).

Tehát kijelenthetjük, hogy a kvantum- és az általános relativitáselmélet szembenállása tisztán annak a következménye, hogy a részecskéket belső szerkezet nélküli pontoknak tekintik. A húrelmélet úgy egyesíti a két elméletet, hogy egyik érvényességét sem korlátozza. A részecskék hűrként való kezelése magától feloldja az eddig fennálló gondokat, mert egyszerűen nem engedi meg annak a tértartománynak a létezését, ahol a kvantum fluktuációk csödbe vinnék az egyébként jól működő elméleteket.<sup>29</sup>

### ***A superhurok és a superhúrelmélet***

Az elsőként 1968-ban kifejlesztett húrelmélet a természet szimmetria-tulajdonságait is magában foglalta a szuperszimmetria kivételével (melyet akkor még nem is ismertek). Ezt az elméletet „bozonikus húrelméletnek” nevezték, mivel ebben az összes húrrezgési mintázatnak a közvetítő részecskékre jellemző egész számú spinje volt. Tehát az úgynevezett feles spinű (fermionos) mintázatok teljesen hiányoztak belőle. Ez az első húrelmélet komoly fejtörést okozott, mert amellet, hogy a feles spinű részecskéket mellőzte (elektron, kvarkok stb.) egy olyan részecskét is tartalmazott, amely tömegének négyzetére negatív szám adódott (tachion). Hamar nyilvánvalóvá vált, hogy minden érdekessége ellenére ebből az elméletből valami lényeges dolog hiányzik.

1977-ben Ferdinando Gliozzi, Scherk és David Olive a frissen felfedezett szuperszimmetriát is magába foglaló húrelméletet alkotott meg (még azelőtt, hogy a standard modell elkészült volna). Ebben meglepő módon minden egész spinű rezgési mintázat párjaként megjelent egy feles spinű mintázat is (a szuperszimmetria hatásaként), sőt ráadásként a tachion is „eltűnt” a lehetséges rezgési mintázatok közül. Az új super-

szimmetriát is tartalmazó elméletet szuperhúrelméletnek keresztelték el. Ez az elmélet már magába foglalta a gravitációs és a többi kölcsönhatás leírását, valamint a szuper-szimmetriát is, ezzel képessé vált az univerzum felépítésének mély magyarázatára. 1984-ben, mikor a húrelmélet alkalmazása előtt álló legfőbb matematikai akadályokat leküzdötték, a szuperhúrelmélet hamar a „mindenség elméletévé” lépett elő. Azonban, ahogyan az lenni szokott, az öröm nem tartott sokáig.

A korábban oly üdvözítő szuperszimmetria 1985-re komoly problémák forrásává vált. A gondok gerincét az képezte, hogy a központi szerepet betöltő szimmetria-elv ötféle különböző módon is beépíthető volt az elméletbe. Mindegyik elmélet képes volt előállítani az elemi részecskék családjait, de az egész és feles spinű párok keletkezésének részletei és az előálló összefüggések számos tulajdonsága lényegesen különbözött.<sup>30</sup> A szkeptikus hangok ismét erőre kaptak, és viccelődve hajtogatták: tegyük fel, hogy a húrelmélet a mindenség elmélete, de mégis melyik változata írja le a mi világunkat? És vajon kik élnek a többi négyben?

### *A feltekeredett dimenziók alakja*

Mint azt korábban láttuk, először 1919-ben Kaluza fejében merült fel a feltekeredett térdimenziók ötlete. Gondolatai évtizedekkel később a szupergravitációs elméletben teljesedtek ki. Ebben az egyesítési kísérletben már tíz térbeli és egy időbeli dimenzió szükségességéig jutottak az elméleti szakemberek. A korai húrelmélet megalkotásakor a fizikusok már nem idegenkedtek a „rejtett” dimenzióktól, de a kapott 26 dimenzió még a radikális elmék számára is túlzásnak tűnt. Az első húrelméleti forradalom után már a szuperhúrok vizsgálatához is elegendőnek látszott 9 térbeli és egy időbeli dimenzió, amit könnyebben megemésztett a tudóstársadalom. De miért van szükség pontosan kilenc térdimenzióra? A válasz nem túl egyszerű, de a kvantummechanika valószínűségi szemléletét segítségül hívva talán megsejthetünk valamit a háttérben működő összefüggésekből.

A három tér- és egy idő-dimenziót tartalmazó húrelmélet – a pontszerű részecskékre kidolgozott elméletekhez hasonlóan – a Planck-hosszhoz közeledve negatív és végtelen valószínűségű eredményeket is megad bizonyos részecskék előfordulására. Azt a hétköznapi intuíciónkkal is érezzük, hogy a nullánál kisebb és a 100%-nál nagyobb valószínűségek semmiképp nem vezethetnek jó eredményre. Nos, a fizikusok is így gondolják ezt, ezért komoly erőfeszítéseket tettek a hiba kiküszöbölésére. A kiút a magasabb dimenziók felé vezetett. A Kaluza-féle feltekeredett dimenziók az apró húrok számára további lehetőségeket biztosítanak rezgések végzésére. A szabadságfokok növekedésével párhuzamosan a helytelen valószínűségű eredmények egyre ritkábban fordulnak elő, míg 8 térdimenzió felett végleg eltűnnek. Tehát a magyarázat: azért van szükség legalább 9 tér- és egy idődimenzióra a húrelméletben, mert ennél kevesebb dimenzió esetén értelmetlen eredmények születhetnek a felírt egyenletekből. Ha valahogy megemésztettük a többletdimenziók térhódítását, további kérdés merülhet fel bennünk: azon kívül, hogy léteznek, milyen más érzékelhető hatásuk van a világunkra?

A feltekeredett dimenziók számos korábbi elméletben (pl.: szupergravitáció) is felmerültek, de szerkezetük egyikben sem volt közvetlen hatással a részecskék tulajdonságaira. A húrelmélet ezzel szemben a lehető legszorosabban köti össze az univerzum ultramikroszkópikus szerkezetét a megfigyelhető részecskék tulajdonságaival. Tekintettel arra, hogy a Planck-hosszúságú húrok elérnek a feltekeredett dimenziókban, rezgési

mintázataik nagymértékben függenek attól, milyen lehetőségük adódik a mozgásra a műszereink számára elérhetetlen tértartományban. A folyamat ahhoz hasonlítható, ahogy egy nyílt tengeri hullám a vízpartra érkezik. Ameddig távol van a parttól, semmi nem korlátozza a szabályos hullámmozgását, de a tengerfenék alakja és a parti sziklák elhelyezkedése hamarosan egészen más mintázatokra kényszeríti az egyszerű rezgőmozgását.

Tehát, ha a húrok az összes dimenzióban rezeghetnek, akkor a szűkös extradimenziók felcsavarodásának és egymáshoz való kapcsolódásának módja szoros korlátok közé kényszeríti a lehetséges rezgési mintázataikat. Tudományosan szólva: az extradimenzionális geometria határozza meg a részecskék kiterjedt dimenziókban megfigyelhető olyan alapvető fizikai jellemzőit, mint a tömeg és a különböző töltések.

A fenti eszmefuttatás alapján a húrelmélet legfontosabb mondanivalója számunkra az, hogy az univerzum megértésének kulcsa az extradimenziók geometriai felépítésében van elrejtve. Természetesen az elmélet még fényévekre van a konkrét jóslatoktól, de a standard modelltől eltérően potenciálisan magában hordozza a részecskecsaládok számának és a részecskék tulajdonságainak magyarázatát.

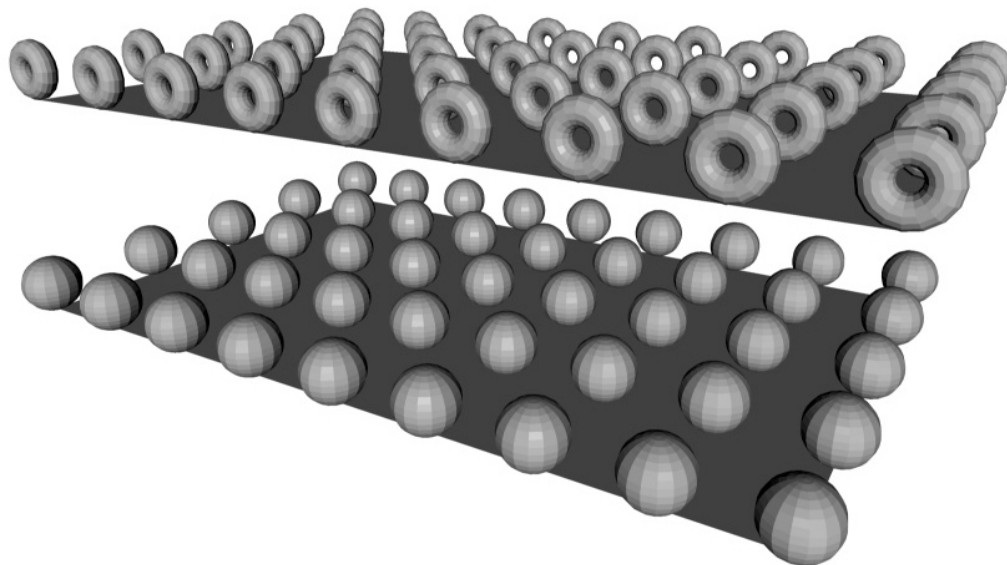
A húrelmélet „vallatói” szinte kezük között érezhetik a fizika Szent Grálját, de az ígéretes háttér ellenére a „végső elmélethez” vezető út igencsak rögsnek mutatkozik. Láthattuk, hogy a részecskecsaládok felépülésének megértéséhez „csupán” arra lenne szüksége a húrelméletnek, hogy megállapítsuk, hogyan is néznek ki a feltekeredett dimenziók. A legegyszerűbb az lenne, ha egyszerűen szemügyre vennénk őket. Sajnos, a jelenlegi műszaki háttér csak galaxis méretű gyorsítók segítségével volna képes érzékelni a Planck-hosszak világát. A nyers erőről tehát egy ideig még le kell mondanunk. Marad a jóval nehezebb, de kisebb energiákat igénylő út, az elméleti kutatás.

Kiváló képességű matematikusok segítségével a fizikusok levezették, hogy a húr-egyenletek meglehetősen korlátozzák a feltekeredett dimenziók lehetséges alakjait. 1984-ben Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger és Edward Witten bizonyították, hogy az összes lehetséges formáció közül csak egy speciális osztály elégítheti ki a húrelmélet feltekeredett dimenzióinak feltételeit. Ezeket az alakzatokat korábbi felfedezőikről Calabi-Yau tereknek nevezték el. Hat dimenziós Calabi-Yau terek szerencsére csak véges számban képezhetők, így a kutatóknak végtelen sokaság helyett „alig” néhány ezer tízezer forma között kell megelégnük a mi univerzumunkat pontosan leíró extradimenzionális geometriát. A feladat nem lett sokkal egyszerűbb, de a hűrfizikusok a véges számú változatra tekintve biztosak lehetnek benne, hogy előbb-utóbb megleglik a helyes eredményt. Edward Witten csapata a véletlenszerű válogatás helyett megpróbálta feltárni azokat az összefüggéseket, amelyek befolyásolják a kialakuló részecskecsaládok számát.

Kimerítő számítások után Wittenék arra a meglepő eredményre jutottak, hogy a felcsavarodott Calabi-Yau terek tartalmazhatnak különböző dimenziószámú lyukakat. Minden egyes lyuk „körül” alacsony energiájú húrrezgéseket fedeztek fel, melyek részecskecsaládok „keletkezési helyeinek” bizonyultak. A standard elmélet létrejöttékor már láthattuk, hogy a kísérleti fizikusok csupán három részecskecsaládot fedeztek fel a nagyenergiás ütköztetőkből. Witten kutatásai alapján arra hívta fel a figyelmet, hogy a keresett Calabi-Yau alakzat nagy valószínűséggel három lyukat fog tartalmazni.

Witten további értékes eredménnyel is szolgált. Rájött, hogy a Calabi-Yau terek lyukai nem csak a részecskecsaládok számára hatnak, hanem arra is, hogy a keletkező részecskéknek milyen tulajdonságai lesznek. A hatást felettébb bonyolult szemléltetni,

de közelítőleg arról van szó, hogy a speciális tereket átszövő lyukak legtöbbször el is metszik egymást. A parányi húrok, mikor áthaladnak ezeken az összetett metszésvonalakon, jellegzetes rezgési mintázatokba rendeződnek. Pontosan olyanokba, melyek a megfigyelt részecskék tulajdonságait (tömeg, töltések, spin) adják vissza. Talán most már érthető, hogy miért van fényévekre a húrelmélet a pontos jóslatoktól.



7. ábra

#### A FELTEKEREDETT DIMENZIÓK LEHETSÉGES ALAKJAIBÓL KETTŐ

Egyrészt a lehetséges Calabi-Yau alakzatok számát továbbra is szűkíteni kellene az előrejelzésekhez, de ha meg is találnánk a megfelelő teret, a számítások elképesztő bonyolultsága továbbra is csak közelítő eredmények meghatározását tenné lehetővé. Az igazsághoz hozzátartozik, hogy pont a közelítő eljárás (pertubációelmélet) fosztja meg a fizikusokat attól, hogy válasszanak a lehetséges Calabi-Yau alakzatok közül. A számítások szemszögéből ugyanis minden lehetséges formáció azonosnak tűnik. Talán, ha a matematikusok meglelik a módját, miként hidalhatják át a pertubációs számítás egyszerűségeit, automatikusan előáll az az egyetlen Calabi Yau alakzat, amely az univerzum feltekeredett dimenzióinak szerepét játszhatja. Ez legalábbis az optimista húrelmélet-kutatók forгатókönyve.<sup>31</sup>

#### A húrelmélet második forradalma

Az egyesített elmélet utáni kutatása során Einstein gyakran feltette magának a kérdést: teremthette volna másképp Isten a világegyetemet? Azaz a logikai egyszerűség szükségességére hagy-e bármilyen szabadságot?

Einstein gondolataival megalapozta a fizikusok körében ma már általánosan elfogadott nézetet, miszerint ha létezik a „végső elmélet”, azt arról lehet majd a legkönnyebben felismerni, hogy nem lehet más módon. A végső elmélet tehát kimondja majd, hogy

a dolgok azért olyanok, amilyenek érzékeljük őket, mert nem lehetnek másmilyenek. A tudósok abban is egyetérteni látszanak, hogy semmi sem biztosítja – a hiten kívül –, hogy a világegyetem valóban egy ilyen merev konstrukció, mégis a tudományos célok legmagasztosabbika az egységes elmélet megtalálása.

Hosszas küzdelem után az 1980-as évek végére a szuperhúrelmélet szakmai berkekben ismét elvesztette a varázsát. A közvélemény elismerte, hogy az univerzum egységes tárgyalásához egészen közel kerültek a húrelmélet kutatói, de a döntő lépést mégsem tudták megtenni a cél felé. A sikertelenségnek két fontos oka volt. Az egyik, hogy a szuperhúrelméletnek nem egy, hanem öt különböző alakját is sikerült felírni, attól függően, hogy a szuperszimmetriát milyen módon építették az elméletbe. A másik lényeges probléma az lett, hogy az 1980-as évek végére kiderült: a húrelmélet felírt egyenletei nem egészen egyértelműek (mint a  $0 * x = 0$  egyenlet), azaz túl sokféle megoldásuk lehet, így a megértéshez szükséges Calabi-Yau alakzat megtalálása távolba tűnő ábrándnak bizonyult.

### ***A perturbációs számítás hibái***

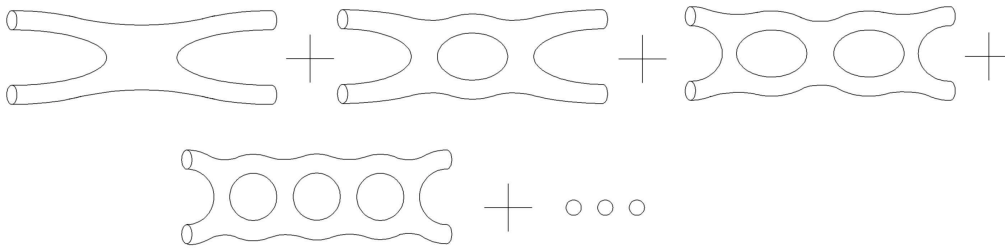
Az 1990-es évek elejére kiderült, hogy ha a közelítő számításokat nem lehet valahogy megkerülni, akkor a húrelmélet sok más próbálkozáshoz hasonlóan kudarcra van ítélve. Ahhoz, hogy igazán beelássunk a húrelmélet szívébe, meg kell ismerkednünk a közelítő számítások korlátaival.

Mit is jelent a perturbációs számítás? E mögött a körülményes név mögött egy igen egyszerű elv húzódik meg, melyet a hétköznapi gyakorlatban is sokat használunk. Tegyük fel, hogy autónkkal egy hosszabb túrára indulunk vidéki rokonainkhoz. Kedves vendéglátóink jelzik felénk, hogy a tiszteletünkre készített ünnepi ebédet pontban délben találják fel. Az illendőség azt diktálja, hogy pontosan érkezzünk. No, de mikor induljunk el otthonról? Egy ilyen feladat megoldása alapvetően a perturbációs számítás felségterülete.

Először is, tapasztalatunk alapján kalkulálunk egy átlagos menetsebességet. Ez alapján kapunk egy durva közelítést arra nézve, hogy mennyi ideig fog tartani az utazás. Ha azonban pontosabb adatra vagyunk kíváncsiak, a kezdeti értéket egyre finomabb részletekkel kell kiegészítenünk. Például, hogy mikorra készül el a család a tervezett induláshoz képest, meg kell-e állni üzemanyagért, mely útvonalon hátráltathat bennünket a forgalom. Esetleg azzal is számolnunk kell, hogy az év bizonyos szakaszában az időjárás is megváltoztathatja kezdeti becslésünket. Minél több apró részletet veszünk figyelembe, annál pontosabb eredményhez juthatunk. De megkaphatjuk-e valaha is a tényleges menetidőnket? Ehhez ismernünk kéne előre az összes befolyásoló tényezőt, ami általában messze meghaladja lehetőségeinket. Nincs ez másképp a húrelmélet esetében sem.

A húrelméletben a fizikai folyamatok a rezgő húrok közötti kölcsönhatásokból épülnek fel. A kölcsönhatások a zárt húrok ütközésével, egyesülésével és ismételt szétválásával kapcsolatosak. A húrelmélet kutatói megmutatták, miként lehet pontos matematikai értelemmel feltölteni két húr egymásra való hatását. Ha nem létezne kvantummechanika, akkor itt véget is érne a feladat. De a határozatlansági elv által keltett mikroszkopikus „nyüzsgés” húr-antihúr párok (az utóbbiak az antirészecskék tulajdonságait hordozzák) pillanatszerű keletkezését és gyors pusztulását okozza. Az ilyen kvantumozásból keletkezett húr-pároknak – melyek csak kölcsönenergiából élnek – rövidesen vissza kell kombinálódniuk egyetlen húrrá. A „virtuális húr-párok” névre keresztelt

jelenség létezése megfoghatatlanul rövid, mégis rajtahagyja ujjlenyomatát az eredeti húr kölcsönhatáson.



8. ábra  
VIRTUÁLIS HÚRPÁROK KELETKEZÉSE

A 8. ábra alapján röviden a folyamat a következőképp zajlik: a két, eredetileg kölcsönható húr pályája időben egy-egy „világlemezt” rajzol ki (két dimenzióban csőfelület). A világlemezek először egymásba olvadnak, majd egészen kis idő elteltével a kvantum fluktuációk következtében virtuális húrpár keletkezik (újabb csőpár), mely rövidesen újra egyesül. Végül energia kibocsátása mellett a közös húr ismét szétesik két különálló húrra.

A történetnek azonban még mindig nincs vége. A hurok kölcsönhatásakor a végső szétválás előtt ugyanis nem csak egyszer keletkezhets virtuális húrpár, hanem akárhányszor. Ezeknek az eseményeknek az előfordulási valószínűsége annál kisebb, minél több virtuális húrpár keletkezik, de sosem nulla. Ennek következtében – hasonlóan az utazás menetidejének problémájához – a húrkatatók a kölcsönhatás leírásakor kénytelenek a perturbációs számításra hagyatkozni. Azaz megbecsülik az eredményt nulla virtuális húrpár keletkezésével, majd egyre több húrpár keletkezését figyelembe véve, finomításal próbálják megjósolni a valódi kölcsönhatás lefolyását. Vajon biztosak lehetnek a kutatók az eredmény pontosságában? Az attól függ – mondhatjuk, ha az utazási idő becslésének folyamatára gondolunk.

A húrelmélet szakértőinek sikerült megállapítani egy olyan tényezőt, mely kapcsolatban van a virtuális hurok keletkezésének valószínűségével. A „húrcsatolási állandónak” keresztelt mennyiség azt mutatja meg, mennyire könnyen kapcsolódnak a valódi hurokhoz a virtuálisak. Minél kisebb a húrcsatolási állandó értéke, annál kisebb a valószínűsége annak, hogy a virtuális hurok kitörhetne a létezésbe, azaz egyre kisebb hatással járulnak hozzá a valódi kölcsönhatáshoz az egyre több virtuális húrpárt tartalmazó folyamatok. Tehát abban az esetben, ha a húrcsatolási állandó megfelelően kicsi (kisebb, mint 1) akkor alkalmazható a perturbációs számítás, de ha 1 vagy annál nagyobb értéket vesz fel, a közelítő eljárás biztosan téves eredményre vezet.

Jelenleg senki sem tudja, hogy az univerzumban mekkora lehet a húrcsatolási állandó tényleges értéke, így a húrelméleti kutatók mind az ötféle elméletnek csak egy kis részében, a gyengén csatolt tartományban tudnak vizsgálni. Ameddig a számítások nem szabadíthatók meg a fenti közelítésektől, a húrelmélet nem több, mint tetszetős gondolatok összessége, mert belátható időn belül semmilyen eszközzel sem lehet pontos eredményt felmutatni az erősen csatolt tartományról, azaz lehetetlen eldönteni, hogy a világegyetem melyik lehetőséget részesíti előnyben.<sup>32</sup>

A húrelmélet újabb mély válságba süllyedt. Sok korábban fellelkesült kutató nyilatkozott a húrelméletről úgy az 1990-es évek elején, hogy az elmélet bonyolult matematikai formalizmusán sosem sikerül majd felülkerekedni, így pusztán időpocsékolás és kár vele foglalkozni. Ebbe az állóvízbe villámként csapott be 1995 márciusában Edward Witten éves húrelméleti konferencián tartott előadása. A húrfizika nagyjainak részvételével megtartott eseményen Witten felvázolta azt a stratégiát, mellyel a perturbációs számítás az erősen csatolt tartományban megkerülhető.

Witten forradalmi munkájában egy új, lényeges jelenségre, a húrelmélet dualitásaira hívta fel a figyelmet. A dualitás fogalmát a fizikában akkor szokás használni, ha két jelenség csak matematikai leírásában különbözik egymástól. Ilyenkor közelebbről megvizsgálva az egyenleteket kiderül, hogy ugyanarról a fizikai folyamatról van szó kétféle megközelítésben. Witten azt találta, hogy az öt különbözőnek hitt elmélet igen szoros kapcsolatban áll egymással. Méghozzá a kapcsolatot közöttük pont az a húrcsatolási állandó jelenti, amely korlátozza a perturbációs számítás érvényességét. Hihetetlenül nehéz számítások árán a szuperszimmetria segítségével Witten bebizonyította, hogy az egyes elméletek (rendre: I., IIA, IIB, heterotikus-O, heterotikus-E) erősen csatolt tartományai megegyeznek egy másik elmélet gyengén csatolt tartományával (erős-gyenge dualitás). Így az eddig a gyengén csatolt húrelméleti eredmények segítségével – a szuperszimmetria fennállása esetén – egy csapásra rálátást nyerhetünk az egész húrvilágra és még annál is többre.<sup>33</sup>

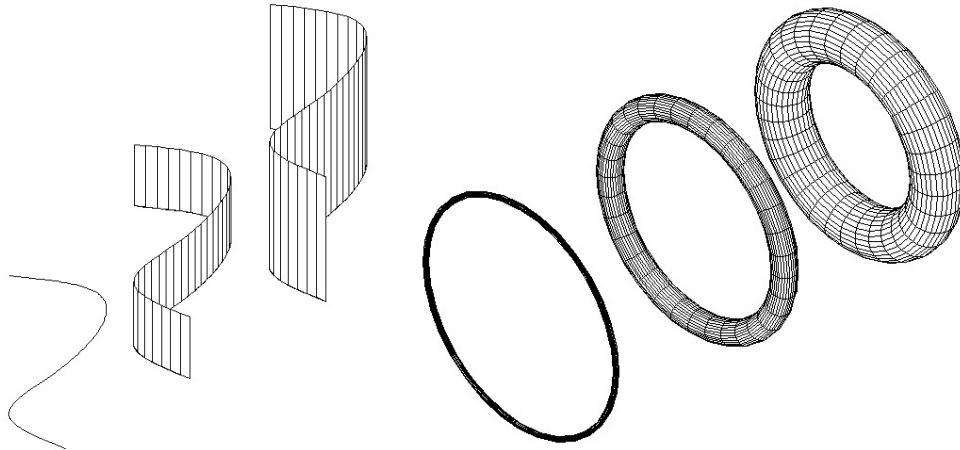
***A húrelméletek egyesítése: az M-elmélet***

A második húrelméleti forradalom bejelentése után lázas kutatómunka kezdődött, hogy felderítsék az ismét eggyé kovácsolódott húrelmélet tulajdonságait. A fizikusok, Witten útmutatásait követve párokba próbálták rendezni az öt elméletet, és közben különös dolgokra lettek figyelmesek. A húrcsatolási állandón keresztül az I. típus a heterotikus-O elmélettel kapcsolódott, ellenben a IIB elmélet önmagával bizonyult duálisnak. A sikereken felbuzdulva Witten és csapata nekiesett a IIA, és heterotikus-E elmélet dualitásának bizonyításába, és egészen elképesztő eredményre jutottak.

A húrokat a bonyolult vizsgálatok során némileg egyszerűsítették, mivel kis energiákon úgy viselkednek, akár a pontszerű részecskék. Csodák csodájára kiderült, hogy a IIA típusú húrelméletről kiindulva, a húrcsatolási állandót egy fölé növelve a korábban felfedezett 11 dimenziós szupergravitációs elmélet kapható vissza. A szupergravitációs elméletből visszafelé számolva viszont el lehet jutni a heterotikus-E elmülethez (vagy akár az I-es és heterotikus-O elmülethez is). Tehát a 11 dimenziós szupergravitációs elmélet a húrelmélet erősen csatolt tartományának alacsony energiás közelítése.

Az eredmény olyan nagy meglepetést okozott, hogy sokan egyszerűen nem hitték el. A kételkedők meggyőzésére azonban Witten megmutatta, hogy a véletlen felismerés mögött valami sokkal mélyebb, az univerzum működését alapvetően befolyásoló összefüggés rejtőzik. A 10 dimenziót igénylő szuperhúrelméletekbe beolvashatóvá válik a szupergravitációs elmélet, amennyiben egy újabb dimenziót tételezünk fel. Witten rájött, hogy azért tűnt különbözőnek az ötféle húrelmélet, mert a gyengén csatolt tartomány perturbációs közelítése során egy fontos dimenzió elsikkadt. A plusz térdimenziót éppen

a csatolási állandó rejtette el a fizikusok szeme elől. A 9. ábrát követve látható, miképpen vezet egy újabb dimenzió megjelenéséhez a húrcsatolási állandó növekedése.



9. ábra

#### A HÚRCSATOLÁSI ÁLLANDÓ NÖVEKEDÉSÉNEK HATÁSÁRA MEMBRÁNOK KELETKEZNEK A HÚROKBÓL

Így a húrok helyett (melyek a kis csatolási állandó mellett jó közelítésnek bizonyultak) nagy húrcsatolási állandók esetén kétdimenziós felületek, úgynevezett membránok keletkeznek. Witten kutatásai szerint az egydimenziós húrok csak közelítések voltak, ezért tűnt különbözőnek az öt húrelmélet. Ahogy a dimenziószámot eggyel megnöveljük, egy egységes elmülethez, és magasabb dimenziószámú rezgő alakzatokhoz, azaz egy sosem látott új fizikához érkezünk.

A fent vázolt membránokkal kiegészített, immár összefüggő képet mutató (a szupergravitációt határesetként tartalmazó) 11 dimenziós elméletet Witten ideiglenesen M-elméletnek nevezte el. Ennek az elméletnek a körvonalai látszódnak ugyan, de még senki sem tudja, mit is jelent igazán. Egy azonban biztos, olyan mély összefüggések rajzolódtak ki az M-elméleten keresztül, ami arra utal, hogy jó jelölt lehet az áhított „mindenség elmélete” címre.<sup>34</sup>

#### **A membránok világa**

Az M-elmélet felfedezése hatalmas elméleti siker, és mindenképpen fontos mérföldkő a fizika területén, de feltehetjük a kérdést: megold-e bármit is a húrelmélet eddig megoldatlan problémáiból?

Igen is, meg nem is. Figyelemre méltó mélységekbe sikerült betekintenünk a dualitás-hálózat segítségével, de továbbra is sok a kérdés. A dualitás segít a nagy húrcsatolási állandók leküzdésében, de az elmélet továbbra is a közelítő perturbációs számításokra van utalva. Így a húrelméletek igazi alakja még mindig homályba vész, ugyanúgy, ahogy a valóságnak megfelelő Calabi-Yau tér kiválasztására és a kiterjedt dimenziók számának magyarázatára is még várnunk kell. Amit viszont nyertünk, az egy konzisztens logikai struktúra, mely utat mutat a világegyetem mély megismerése felé.

Az M-elmélet határán sorakoznak az eddig felfedezett húrelméletek és a szupergra-

vitáció, de az elmélet magját olyan rész képezi, ahová jelenlegi közelítő módszereinkkel csak igen nehezen juthatunk el. Az biztos, hogy az M-elméletben a részecskék tulajdonságait hordozó vibráló elemek többdimenziós felületekként jelennek meg. Ezek a 11 dimenziós tér-időben lebegő membránok változatos dimenziószámúak lehetnek egytől kilencig. Az egydimenziósak a húrok, a kétdimenziósak a membránok, az e fölöttiek pedig p-bránok nevezik (ahol a p a dimenzió számot jelöli).

Tehát akármi is legyen az M-elmélet, azt már tudjuk róla, hogy különböző dimenziószámú kiterjedt objektumokat tartalmaz. Vannak azonban ezek közül – a húrelméletek paramétertartományában – különlegesek is. A legfontosabbak mind közül bizonyára az egy-bránok, azaz a húrok. Ezek kiemelkedő szerepe könnyen megérthető, ha megpróbáljuk kiszámítani, hogy mekkora energiákra van szükség ahhoz, hogy egytől különböző dimenziószámú felületeket hozzunk létre. Az M-elmélet kutatói kimutatták, hogy az egy dimenziótól különböző dimenziószámú p-bránok tömege fordítottan arányos a húrcsatolási állandó értékével, azaz az összes kiterjedt objektum a felírt húrelméletek közelében borzasztóan nehéznek adódik (a Planck-tömegnél nagyságrendekkel nehezebbnek). Így az elemi részecskék fizikájánál ezeknek jelenleg nem sok hasznát fogjuk venni (de másutt igen).

Az M-elmélet viszont túlmutat a húrelméleteken. A határesetek közelében a legkisebb energiájú p-bránok húrként jelennek meg (vagy azzá tekerednek fel), de az elmélet szívében léteznie kell egy olyan paraméter tartománynak, ahol a p-bránok is könnyebbé válnak, és beleszólnak a hétköznapi részecskék tulajdonságainak alakításába is. Ennek a tartománynak a feltárásáig még nagyon hosszú utat kell megtennie a kutatóknak.<sup>35</sup>

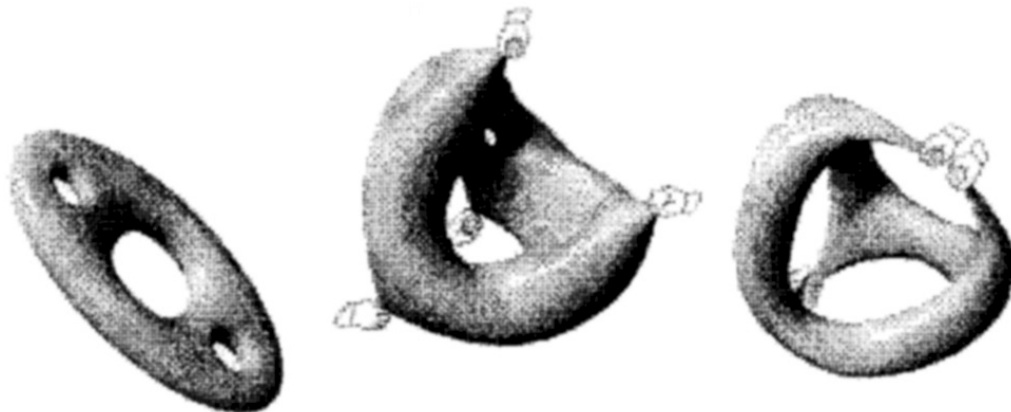
### *Hogyan birkózik meg az M-elmélet a fekete lyukakkal?*

Azt már korábban láttuk, hogyan lesz úrrá a húrelmélet a mikroszkopikus tartományt kitöltő kvantumhab veszélyes fluktuációin. Van azonban még néhány olyan tartomány, ahol a korábbi elméletek érvényességüket veszítik.

Ezek közül a leghíresebb a fekete lyuk rémisztő szingularitása. Itt az általános relativitás elmélete kudarcot vall, ha az eseményhorizonton belüli történéseket próbáljuk megmagyarázni segítségével. Az M-elmélet sajátos módon nyújt segítséget a probléma feloldozásában. A korábban tárgyalt Calabi-Yau tereknek van egy speciális tulajdonsága, amit orbifold-transzformációnak neveznek. Ennek során egy adott Calabi-Yau tér szakítás nélkül átvihető egy másikba, miközben a fizikai törvények sehol sem sérülnek meg. Az orbifold-transzformáció segítségével kimutatható, hogy a Calabi-Yau terek közül sok különböző megjelenése ellenére is ugyanazt a fizikát testesíti meg (hasonlóan a húrok dualitásának elvéhez). Andrew Strominger 1995-ben kimutatta, hogy az a fekete lyukak keletkezésekor zajló folyamat, ami a relativitáselmélet sima háromdimenziós terét elszakította, a Calabi-Yau alakzatba tekeredett extradimenziós tér-időt „mindössze” orbifold-transzformációra kényszeríti. Azaz a fekete lyuk eseményhorizontján nem lép fel végtelen tértorzulás, így nem alakul ki valódi szingularitás. Mindettől függetlenül a hatalmas koncentrált tömeg átszakíthatná a teret, de az M-elmélet arra is megadja a választ, hogy miért nem történik ez meg.

A fekete lyuk anyaga az elmélet szerint parányi húrokból áll. Ezekből a parányi húrokból igen sok préselődik egy igen kis tértartományba, ezért a részecskék gravitációs

mezejének energiája összeadódik, és egy olyan igen nagy energiát képviselő három-bránt hoz létre, mely gyakorlatilag beburkolja a fekete lyuk eseményhorizontját (akár a narancsot a csomagolóanyag). Ezen a három-bránon esnek csapdába az egydimenziós anyagi húrok, és többé nem is tudnak elszabadulni. A véges kiterjedésű nagyenergiájú objektum jótékonyan megóvja a Calabi-Yau teret attól, hogy a csapdába ejtett anyag nulla méretű kis ponttá (szingularitássá) húzza össze.



10. ábra  
AZ ORBIFOLD-TRANSZFORMÁCIÓ

Az S. W. Hawking által felfedezett fekete lyuk „sugárzás” is könnyen magyarázható az M-elmélet keretei között, ha figyelembe vesszük, hogy a fekete lyukat beburkoló három-brán felületén a kvantumos „nyüzsgés” továbbra is meghatározó. A fluktuációk következtében a felület közelében rengeteg virtuális húrpár jön létre, amelyek egyik fele kijuthat a térbe, a másik pedig negatív energiájával csökkenti a brán összenergiáját. Ha a brán kis tömegű, mérete is kicsi, akkor a felületének kvantumos hullámzása nagyobb, gyorsabban sugárzódik szét az energiája. A nagy tömegű fekete lyukak ellenben hatalmas három-bránt hoznak létre, melyen a kvantumos fluktuációk is kisebb mértékűek. Az M-elmélet tehát egyezésben áll Hawking elismert munkájával is.<sup>36</sup>

Végezetül még egy fontos dolgot szeretnék megmutatni az M-elmélet végtelen tárházából. A kvantumhab problematikájánál zárójelben megjegyeztük, hogy a Planck-hossz alatt egyszerűen nem beszélhetünk a tér és az idő létezéséről.

Ehhez a megállapításhoz szintén a húrelmélet összefüggései vezettek el, méghozzá a graviton tulajdonságainak a megértése. Említettük, hogy a Dirac által kidolgozott kvantumelektrodinamika szerint az elektromágneses vákuumot fotonokból álló diszkrét mező tölti ki. A húrelmélet ezen csupán annyit módosít, hogy a fotonok nem pontszerű részecskék, hanem vibráló húrok, de a lényeg ugyanaz marad. A húrelméletben a gravitációs mező hasonlóképp áll elő, mint az elektromos mező az iménti szemléletben. A gravitációs erő legkisebb adagja a graviton (2-es spinű rezgési mintázat), így a gravitációs mezőt ennek a speciális mintázatú húrnak a sokasága alkotja. A gravitációs mező azonban a téridő szövedékének görbüléseként nyilvánul meg, tehát a téridő szövedéke nem más, mint graviton rezgési mintázatú húrok rendezett tömege. Nem egyszerű ezt elképzelnünk, de ha a húrelmélet igaz, akkor az egész világegyetem egyetlen briliáns szimfónia, ahol a teret és az időt annak köszönhetjük, hogy „szférák zenéjére” a húrok szigorú-

an rendezett mintázatok mentén egyszerre járják táncukat. Ebből következően ha olyan mérettartományban vizsgáljuk a világegyetemet, ahol a „rendezett mintázat” nem figyelhető meg (a húr hosszával összemérhető távolságokon), egyszerűen nincs értelme sem térről, sem időről beszélni, hiszen maga a rendezett mintázat hozza létre a teret.<sup>37</sup>

## Összefoglaló gondolatok

Tekintsünk vissza a fizika XX. századi történetében tett lenyűgöző kalandozásunkra. Láthattuk, hogy a század elejére megérett a helyzet arra, hogy a lezártak hitt newtoni világkép alapvető axiómáit megkérdőjelezzék a tudósok. Az évszázad első éveinek elméleti és kísérleti felfedezései két teljesen egyedülálló elmélet kialakulásához vezettek. A relativitás elve megmutatta, hogy a Newton által elképzelt térszemlélet csalóka, és a megfigyelők szimmetriájának feltételei egy négydimenziós rugalmas tér-idő szerkezet létezését követelik meg. A részecskefizikusok az anyag mikroszkopikus tulajdonságait kutatva azt találták, hogy a Newton által feltételezett szigorú folytonosságot sem „támogatja” az anyagi világ. Továbbá az is világossá vált, hogy a részecskék világát nem a szigorú ok-okozati összefüggések, hanem valószínűségi összefüggések irányítják.

Mind a relativitás, mind a kvantummechanika óriási sikereket ért el, de a tudósok nem akartak elődeik hibáiba esni, ezért kutatni kezdték az elméletek érvényességének határait. Hamarosan felfedezték, hogy a megalkotott elméletek bizonyos körülmények között ellentmondanak egymásnak, azaz valami még mindig nincs rendben a modern fizikával. A megoldás keresése a fizika leggyümölcsözőbb korszakát eredményezte. Részint a szerencse, részint a kitartó munka eredményeképpen a század 70-es éveire felmerült, hogy a problémák feloldozásához a newtoni fizika utolsó nyomait, a pontszerű részecske közelítést is át kell adni a múltnak. A húrelmélet tehát szinte mindenben szakított a XIX. századi világgéppel. Figyelembe veszi a relativitás elvét, egyesíteni igyekszik a természet minden kölcsönhatását, szakít a folytonossággal és a determinisztikus világgéppel, letesz a kiterjedés nélküli részecskék létezéséről, és eddig ismeretlen feltekeredett dimenziókat vezet be. Ennek a sok új elemnek a beépítése teszi annyira megnyerővé a húrelméletet, de ez is a fő problémája. A részletesség ára a számítások bonyolultságának növekedése. A húrfizikusok sokáig el is vesztek a közelítő számítások útvesztőiben, míg nem a XX. század végére a világegyetem szimmetriatulajdonságainak felismerése segítségével megnyílt az út egy eddig ismeretlen tartomány: az M-elmélet felé.

A húrelmélet tehát nem a fizika fejlődésének a végét hozta el, mint ahogy annyian remélték, hanem valami teljesen új, eddig ismeretlen dolog előtt nyitotta meg az utat. A tudósok ismét hatalmasat léptek előre a világ megismerésében, mégis sokan úgy érzik az M-elmélet hasonló változások előszelét hordozza, mint amilyet annak idején a relativitás elmélet hozott a newtoni fizikában. Ki tudja, hány új, egyre részletesebb képet mutató ablakot lehet nyitni még a valóságra. Lehet, hogy végtelen sokat, de legyen bármilyen különös is az a hely, amelyre a tudósok bukkannak, ne feledjük, ez a világ nem más, mint az univerzum, ahol mi is élünk.

## Jegyzetek

*A tanulmányban szereplő ábrákat a tanulmány szerzője készítette.*

- <sup>1</sup> Maxwell: az elektromágneses tér. In: Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete (Gondolat, Budapest, 1986) 325-327. o.
- <sup>2</sup> A fény sebességét először Ole Christensen Roemer dán csillagász mérte meg 1676-ben a Jupiter holdjainak segítségével, de földi körülmények között először csak 1849-ben tette meg Fizeau ugyanezt. W. Weber és R. Kohlrausch 1855-

- ben mérések alapján is felfedezte a Maxwell – egyenletekből következő összefüggést: az elektromos és a mágneses egységtöltések viszonya a fény vákuumban mért sebességével egyező. In: Simonyi Károly i. m. 332. o.
- 3 A főszereplők: Lorentz, Einstein, Poincare . Uo. 381. o.
  - 4 Mozgás a téridőben. In: Brian Greene: Az elegáns univerzum (Akkord, Budapest, 2003) 53-56. o.
  - 5 A fény olyan nyugalmi tömeg nélküli részecske, mely csak térben mozog időben nem, tehát nem öregszik.
  - 6 Fizikus szaknyelven szólva: a fény sebessége azért állandó, mert az univerzum tér-idő szerkezete invariáns a Lorentz transzformációra.
  - 7 Távolság és időmérés In: Simonyi Károly i. m. 386. o.
  - 8 Az energia-impulzus négyesvektor. In: Taylor – Wheeler: Tér-idő fizika (Gondolat, Budapest, 1974) 182. o.
  - 9 A tömeg-energia ekvivalencia. In: Simonyi Károly i. m. 389. o.
  - 10 A jól ismert képlet szerint  $F = \gamma^*(m_1*m_2)/r^2$  számítható a testek között ébredő gravitációs erő. Ez a képlet valóban nem tartalmaz utalást arra, hogy időben miként zajlik a két test közötti erőhatás felépülése.
  - 11 Eötvös Lóránd. In: Simonyi Károly i. m. 396. o.
  - 12 Eukleidész görög matematikus által megalkotott alapvető geometriai axiómarendszer. A „sík” (nem görbült) háromdimenziós tér ennek a szabályrendszerét követi.
  - 13 Einstein a téridőről. In: Simonyi Károly i. m. 396. o.
  - 14 A görbült terek geometriája Gauss, Bolyai és Lobacsevszkij XIX. századi matematikusok nevével fémjelzett axiómákon alapulnak. Lásd még: Einstein almája: L. Mlodinow: Eukleidész ablaka (Akkord, Budapest, 2003) 193. o.
  - 15 Sir Arthur Eddington csillagász szervezte expedíció, az 1919-es nyugat-afrikai napfogyatkozás alkalmával kísérletileg is igazolta Einstein jóslatát. In: Brian Greene i. m. 76. o.
  - 16 Uo. 75. o.
  - 17 Feketesugárzás a klasszikus fizikában. In: Simonyi Károly i. m. 401. o.
  - 18 Az energiakvantum megjelenik. Uo. 406. o. és  
Max Planck: Válogatott tanulmányok (Gondolat, Budapest, 1965) 62-76. o.
  - 19 Energiaadagok a századfordulón. In: Brian Greene i. m. 94. o.
  - 20 A hullámmechanika. In: Simonyi Károly i. m. 419. o.
  - 21 Kvantumos furcsaság. In: Brian Greene i. m. 106. o.
  - 22 Mit tudunk az anyagról? Uo. 18. o.
  - 23 Kvantumtérelméletek. Uo. 113. o. és  
Horváth Dezső: A Standard Modell. = Természet Világa 2000/III. különkiadás 4-9. o.
  - 24 Általános relativitás vagy kvantummechanika? In: Brian Greene i. m. 119. o.
  - 25 Fizikai törvények természete. Uo. 153. o.
  - 26 A spin. Uo. 156-163. o. és  
S. W. Hawking: Az idő rövid története (Maecenas, Budapest, 1995) 76-79. o.
  - 27 Egyesítés több dimenzióban. In: Brian Greene i. m. 175-178. o.
  - 28 A húrelmélet története. Uo. 128. o.
  - 29 Egyesítés a húrelméleten keresztül. Uo. 133. o.
  - 30 Szuperszimmetria a húrelméletben. Uo. 163. oldal  
Michael B. Green: Szuperhúrok. = Scientific American 1986/11. 24-36. o.
  - 31 Milyenek a felcsavarodott dimenziók? In: Brian Greene i. m. 183. o. és  
Húrelmélet – J. C. Wheeler: Kozmikus katasztrófák (Alexandra, Budapest, 2000) 344-350. o.
  - 32 A közelítő módszer. In: Brian Greene i. m. 248. o.
  - 33 Dualitás. Uo. 256. o.
  - 34 Feldereng az M-elmélet. Uo. 265. o.
  - 35 A kiterjesztések demokráciája. Uo. 270. o.  
Szép új brán világ. In: S. W. Hawking: A világegyetem dióhéjban (Akkord, Budapest, 2002) 173-200. o.
  - 36 Fekete lyukak a húrelmélet szerint. In: Brian Greene i. m. 75-296. o.
  - 37 Mi a tér és az idő? Uo. 326. o.