

## TANULMÁNY

# A TÉRIDŐ MINT HOLOGRAM 1.

Lévay Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Intézet, Elméleti Fizika Tanszék, Budapest

E-mail: levay.peter@ttk.bme.hu

*Az utóbbi évek kutatásai során felmerült az a lehetőség, hogy az eddig alapvetőnek tekintett téridőstruktúrákat kvantum-információelméleti fogalmakból származtassuk. A cikk kísérletet tesz arra, hogy a történeti előzmények bemutatása után a hazai kutatás egyik eredményének ismertetésével feltárja bizonyos téridőstruktúrák kvantum-információelméleti eredetét. A három részből álló cikksorozat első részében*

*ismeretterjesztő szinten áttekintjük a klasszikus és kvantumtérelméletek fogalmait és szimmetriáit, különös tekintettel a konform térelméletekre. Az első részt a holografikus elv és a vákuum-összefonódottság elemi tárgyalásával zárjuk.*

„Latrokként tér és idő keresztjére vagyunk verve mi, emberek.”  
Simone Weil

## 1. Tér és idő. „It from Qubit”

A tér és az idő fogalmainak értelmezése elválaszthatatlan a világ fizikai jelenségeitől. Voltak napóráink, homokóráink, kakukkos óráink, majd atomóráink. Ezek szerkezete tükrözi azt, ahogy akkoriban a világról gondolkodtunk. Nemrég a métert a Föld egyik délkörének negyvenmilli-

omod részeként adták meg. Aztán később bizonyos fajta atomok által kibocsátott fény hullámhosszának többszöröseként. Az értelmezések változása elválaszthatatlan a világról alkotott magyarázataink fejlődésétől.

Eltelt egy óra. Ezalatt Nap körüli pályáján a Föld nagyjából százezer kilométer távolságot tett meg. Ha valaki kijelentené, hogy a pálya százezer kilométert kitevő

hossza valószínűleg egy kvantum-információelméleti fogalommal áll kapcsolatban, ugyancsak meghökken-  
nénk. Azért, mert sokak számára a kvantuminformáció  
fogalma semmit sem jelent. De egyébként miért is ne  
állhatna fenn egy ilyen meghökkentő kapcsolat? Elvégre  
a méternek egy földi délkör hosszával való összekapcso-  
lása a Lapos Föld Társaság tagjainak is megrázkódtatás  
okozott volna. Többek között azért, mert számukra már  
a délkör fogalma is értelmezhetetlen lett volna. De most  
a viccet félretéve: valóban van értelme annak, hogy egy  
tér-időtartomány méretét egy információelméleti meny-  
nyiséggel kapcsoljuk össze? Vagy még általánosabban:  
van értelme az Univerzum tér-időszerkezetét informá-  
cióból eredeztetni?

Poétikus és szimbolikus értelemben nyilván van. Ve-  
gyük például az alábbi idézetet: „Kezdetben volt az Ige,  
és az Ige Istennél volt, és az Ige Isten volt. Ő kezdetben  
Istennél volt. Minden általa lett, és nélküle semmi sem  
lett, ami létrejött” [1]. Vagy máshol azt olvashatjuk: „Hit  
által érthetjük meg, hogy a világ Isten beszéde által te-  
remtetett, hogy a mi látható, a láthatatlanból állott elő”  
[2]. Itt az „ige” vagy a „beszéd” szót szakrális értelemben  
vett információnak, a „látható” testet pedig az Univer-  
zum szövetének felfogva már készen is vagyunk. Nincsen  
új a Nap alatt!

De ez csak képes beszéd. A szimbólumok és a költői ké-  
pek nem segítenek bennünket hozzá ahhoz, hogy válaszol-  
junk az alábbi kérdésre: Hogyan is lett az ige testté? Ennek  
a kérdésnek a boncolgatásában lehet, hogy nemcsak a hit,  
hanem a modern fizika is illetékes? Úgy tűnik: igen.

Sőt, elképzelhető, hogy a válasz keresése során meg-  
lepő új összefüggésekre is bukkanunk? Valóban: az el-  
múlt két évtizedben kiderült, hogy a kérdésre adott vá-  
laszok mindegyike automatikusan összekapcsolódik egy  
a gravitációval és a tér-idővel kapcsolatos új vélekedéssel.  
Eszert a gravitáció: kvantuminformáció. A tér-idő pe-  
dig egy hologram. Ezen cikk célja az, hogy a fenti monda-  
tok értelmét, a hazai kutatás egyik eredményének bemu-  
tatásán keresztül, az Olvasó számára feltárjuk.

Az „It from bit” kifejezés John Wheelertől ered, aki  
az Univerzum („It”) információelméleti alapokon („Bit”)  
vett megértésének lehetőségét először felvetette [3]. Az-  
óta teret hódított az az elképzelés, hogy az Univerzum  
tér-időszerkezete kvantum eredetű. Így lett az informá-  
cióból kvantuminformáció, s a bitből „qubit”, azaz kvan-  
tumbit.



Lévay Péter okleveles fizikus az MTA doktora. 1986-ban végzett az ELTE-n. Munkáját a BME Kvantumelméleti Kutatócsoportjában és a bristoli HH Wills Physics Laboratoryban kezdte, majd a BME Fizikai Intézete Elméleti Fizika Tanszékének tudományos főmunkatársaként folytatta. Jelenleg is itt tanít és kutatómunkát végez. Kutatási területe a kvantumelmélet geometriai vonatkozásainak vizsgálata.

## 2. Erőterek

Erőterek vesznek körül bennünket. Okostelefonjaink  
elektromágneses erőterbe ágyazva biztosítják azt, hogy  
akár az utcán gyalogolva, bármilyen információhoz hoz-  
záférjünk. Eközben vigyáznunk kell, nehogy orra buk-  
junk. Mert közben testünkre egy másik erőter is hat. A  
gravitációs erőter. Az elektromágneses erőter elméletét  
már több mint 150 éve ismerjük. Ez a Maxwell-féle elekt-  
rodinamika. A gravitációs erőter modern elmélete, Ein-  
stein általános relativitáselmélete is már több mint száz  
éves. Mindkettő egy klasszikus térelmélet.

A térelméletek főszereplői az erőterek. Változásuk  
törvényszerűségeit a téregyenletek rögzítik: a Maxwell-  
illetve Einstein-egyenletek. Einstein térelmélete azonban  
alapvetően különbözik Maxwellétől. Einsteinnél a gravi-  
tációs erőter fogalma összekapcsolódik a tér-idő geomet-  
riájával. Ahogy egy túlsúlyos ember alatt behorpad az  
ágy, és az ágy szélén lévő almák az ágy görbületét követve  
az ember mellé gurulnak, úgy csoportosulnak a Naprend-  
szerbe tévedt égitestek a túlsúlyos Nap mellé. A behorpadt  
ágyfelület szerepét itt a tér-idő szövege veszi át. S ahogy az  
ágyon az almák sem azért gurulnak emberünkhöz, mert  
ő vonzza azokat, a gravitációs erő is csak illúzió. Az erő  
newtoni fogalmán alapuló megértést a tér-idő horpadási  
geometriáján alapuló einsteini megértés váltja fel.

Persze az ágyas hasonlattal a tér behorpadását köny-  
nyű elképzelni. Csakhogy most a tér-időről van szó! Fel-  
merül tehát itt az a kérdés is, hogy hogyan „horpad be  
az idő”? Mivel időérzékelő szervünk nincs, erről a horpa-  
dásról csak közvetve, az óráink (lehetnek biológiai órák  
is) segítségével szerezhethünk tudomást. Ezek az órák pe-  
dig azt mutatják, hogy a hegyvidéken gyorsabban telik  
az idő, mint a síkságon. A katonaidő gyorsabban múlik  
a felső ágyon, mint az alsón. 12000 km magasságban  
csak napi 46 milliomod másodpercről van szó, de ez a  
GPS-rendszer esetén már hűsbavágó fontosságú. Ha ezt  
a GPS-műholdakon gyorsabban múló időt nem vennénk  
figyelembe, akkor egy használhatatlanul pontatlan hely-  
meghatározó rendszert kapnánk [4]. Egy évtizede gyer-  
mekeim a virtuális térnek a földfelszín pontjaival való  
összekapcsolásán alapuló mobiltelefonos pokémonvadá-  
szatot játszottak. Ha ennél a GPS-alapú játéknál az alko-  
tók az időhorpadást nem vették volna figyelembe, akkor  
a pokémonokat a srácok nem a megfelelő helyen találták  
volna.

Összefoglalva: Einstein szerint a tér és az idő anyag  
nélkül nem képzelhető el. Úgy, ahogy a mosoly sem kép-  
zelhető el mosolyra görbülő ajkak nélkül. Ha nem lenne  
anyag, akkor a tér-idő sem görbülne: lapos lenne. Ahol  
anyag, ott geometria. „Ubi materia, ibi geometria” – mon-  
daná Kepler [5].

## 3. Kvantumtérelmélet

Hétköznapi reakcióinkat az a beidegződés motiválja,  
hogy a megszokott világunk makroszkopikus és (ebből

kifolyólag) klasszikus. *Makroszkopikus*: azaz világunk első közelítésben az emberi méretekkel összevethető (vagy annál is nagyobb) objektumokból áll. Égitestekből, hegyekből, emberekből, állatokból és növényekből. *Klasszikus*: azaz világunk egyes jelenségeinek megértéséhez az iskolában megtanult klasszikus mechanikai, illetve termodinamikai mennyiségek (sebesség, energia, erő, gyorsulás, perdület, hőmérséklet, nyomás) használatára nagyon hasznos. Olyannyira, hogy még átvitt értelemben is beszélünk szembenálló politikai *erőkről*. Az alternatív gyógyítók arról próbálják meggyőzni pácienseiket, hogy kézzel fogható gyógykezeléseik során *bioenergiát* közölnek. Freud pedig az ösztönként egy fortyogó kazánhoz hasonlította, melyben a *nyomás* néha a kritikus értékhez közelít.

De az elmúlt száz év során azt is megtanultuk, hogy a háttérben ott van egy titokzatos világ, amely mikroszkopikus és kvantum. Mikroszkopikus: egy világ, ahol az emberi méreteknél jóval kisebb objektumok is léteznek, baktériumok, vírusok, molekulák, atomok, elemi részecskék. A kvantum kifejezés pedig arról tudósít, hogy a molekuláris szinttől lefelé a megszokott klasszikus mechanikai fogalmakkal történő megértés alapvető nehézségekbe ütközik. Például az atomba zárt elektronok energiája nem folytonosan, hanem csak ugrásszerűen változhat. Vagy: míg egy piruettozó műkorcsolyázó perdülete folytonosan változhat, addig az elektron perdülete csak két lehetséges értéket vehet fel. Azt mondjuk, hogy a kvantumvilágban az említett fizikai mennyiségek kvantáltak.

Naiv módon azt gondolhatnánk, hogy a kvantumvilág a megszokott klasszikus világunk valamifajta bosszantó deviációja. A kvantum jelenségekhez történő ezen hozzáállás kezdetben meglepően jól működött. A recept az alábbi volt: végy egy klasszikus rendszert, például egy rugón rezgő golyót. Ennek kvantumverzióját, például egy kristályban rezgő molekulát, az úgynevezett kvantummechanika törvényeinek alkalmazásával érthetjük meg. Szokatlanok ezek a „kvantálási” szabályok? Sebj, hiszen működnek! Az eredmény: a klasszikus rendszereinket „megkvantálhatjuk”, s így ezek kvantum megfelelőit kapjuk.

Kvantumtérelmélet alatt egy klasszikus térelmélet kvantált változatát értjük. Klasszikus térelmélet alatt a fizikusok nem feltétlenül csak olyanokat értenek, mint Maxwell és Einstein csodálatos elméletei, melyeknek közvetlen köze van a valósághoz. Ezek „játéktérelméletek” is lehetnek. Tanulmányozásuk a fizikusok számára idealizált gyakorlóteret jelent azon eljárások működésének megértéséhez, melyek segítségével egy klasszikus térelméletet kvantumköntösbe öltöztethetünk.

A kvantumtérelméletek prototípusa a Maxwell-elmélet kvantálásával létrejött elmélet. Ez a kvantumelektrodinamika. Ez bámulatosan jól működik. Számos kísérlettel igazolt elmélet – gyakorlati alkalmazások tömkelegével. Einstein elméletének kvantálása azonban katasztrófa. Nem működik.

Node, miért is bánkódunk ezen? Mi szükségünk van egy ilyen kvantumgravitációs elméletre? A nagy tömegű Nap és a Föld között a gravitációs erőter igen erős. Ugyanakkor a mikroszkopikusan kis tömegű objektumok világában a gravitáció gyakorlatilag elhanyagolható. Vannak egyáltalán olyan objektumok, melyek mikroszkopikusak, ugyanakkor igen erősen gravitálnak? Igen, vannak.

Ilyenek például a kihúnyt nagyméretű csillagok parányi méretre történő összeroskadásával keletkező fekete lyukak. Vagy egy másik példa. A táguló Univerzum kezdetben mikroszkopikus méretű volt, ugyanakkor a tágulásának fizikájába a gravitáció döntő módon beleszólt. Tehát: a fekete lyukak fizikájával és az Univerzum születésével kapcsolatos kérdések megválaszolásához igenis szükség van egy kvantumgravitációs elméletre. Ha pedig ennek megalkotása a szokásos módon nem megy, akkor más trükkök után kell kutatnunk.

## 4. A holografikus elv

Ha egy lábasban főtt tojást készítünk, a víz hőmérséklete alapvető fontosságú. Csak arra kell figyelniünk, hogy a víz felforrjon, és aztán kivárjuk a tojás megfőzéséhez szükséges időtartamot. A hőmérséklet makroszkopikus állapotjelző. Igen ám, de tudjuk, hogy a hó mozgás. Valójában a lábasban elképesztő mennyiségű vízmolekula nyüzsög, és ahogy a hőmérséklet nő, teszik ezt egyre hevesebben. A hőmérséklet a molekulák átlagos mozgási energiájával kapcsolatos. Azonban az egyes molekulák különböző sebességekkel és helyzetekkel rendelkezhetnek. Ezek a sebességek és helyzetek a víz mikroállapotait írják le. Nyilván csillagászati szám adja azoknak a mikroszkopikus lehetőségeknek a számát, melyek ugyanazt a víz-hőmérsékletet eredményezik. Ezeknek a lehetőségeknek a számbavétele a tojáskészítés szempontjából értelmetlen. Ráadásul ez a megkülönböztetés egy földi halandó számára keresztülvihetetlen. Tudatlanságunk a részletek iránt egy evolúciós huzalozásból fakad: érzékelésünk (átvitt értelemben) „életlen”. Túlélésünk záloga ugyanis az volt, hogy az információözből a létfontosságú adatokat időben kihalászhatjuk. És ami nem fontos, azt mint lényegtelen részletet elhanyagoljuk.

Térelméleteket „kvantálni” nyilván nem létfontosságú. Hiszen a térelméletek kvantálásában rejlő titkok feltárásához elkerülhetetlen megengedniünk magunknak azt a luxust, hogy a mikroszkopikus részleteket illetően is tájékozódunk. Ha nem kvantálunk, akkor ezekkel a részletekkel nem kell bajlódniunk. Ezért aztán a klasszikus Maxwell-elmélet a kvantált változat mikroállapotainak természetét illetően semmiféle utalást nem tartalmaz.

A klasszikus Einstein-féle elmélet viszont meglepő módon igen, tartalmaz! Ezen kvantumgravitációs mikroállapotok természetére történő utalások a fekete lyukak fizikájából származó hátsó ajtón settenkedtek be. Jacob Bekenstein [6] és Stephen Hawking [7] munkássága nyomán ugyanis kiderült, hogy a fekete lyukak makrosz-

kopikus termodinamikai rendszerek, melyek entrópiával jellemezhetők. Az entrópia pedig a rejtett mikroállapotok számának logaritmusával arányos mennyiség. Kiderült, hogy a fekete lyukak esetén az entrópia nem a lyukat jellemző téridőtartomány térfogatával, hanem csak az azt határoló felület nagyságával arányos. Tehát a gravitáció kvantált elmélete – bármiféle fán teremjen is az – a felületekkel kapcsolatos rejtett mikroállapotok elmélete. A gravitáció holografikus.

A fenti gondolatok mentén Gerardus 't Hoft javaslatát felhasználva Leonard Susskind publikációjával [8] 1994-ben megszületett a holografikus elv. Eszerint: „a háromdimenziós hétköznapi világunk galaxisokkal, csillagokkal, bolygókkal, sziklákkal és emberekkel valójában egy hologram, a valóságnak egy olyan képe, mely egy távoli felületen van kódolva.” A holografikus elv első matematikailag is precíz megfogalmazása a húrelmélet keretében látott napvilágot. Ez a Juan Maldacena nevével fémjelzett AdS/CFT megfelelés [9]. A következőkben szép lassan tisztázzuk majd, mit is takarnak ezek a fogalmak. Első lépésként egy kis kitérőt teszünk a szimmetriák világába.

## 5. Szimmetria

Egy objektum szimmetrikus, ha azt valamilyen transzformációnak alávetve változatlan marad. Az objektum lehet egy tárgy vagy egy matematikai kifejezés. A legfontosabb szimmetriák a téridő-szimmetriák: eltolások, tükrözések, forgatások térben és időben.

Például, ha a szobánkban lévő (minden egyéb megkülönböztető jegyet nélkülöző) négyzet alakú asztal távollétünkben valaki 90 fokkal elforgatja (az asztal közepén átmenő képzeletbeli függőleges tengely körül), akkor hazatérve ebből a transzformációból semmit sem veszünk észre. Azt mondjuk, hogy a 90 fokos forgatás az asztal egy szimmetriája.

A téridő-szimmetriákkal bíró térelméletekben a transzformálható objektum nem egy asztal. Az itt szereplő objektum matematikai jellegű: az elméletet meghatározó úgynevezett hatásfunkcionál. Ha egy transzformáció ezt békén hagyja, akkor azt mondjuk, hogy ez a transzformáció az elmélet egy szimmetriáját adja. Nyilván a szimmetriák ezen megközelítése a hétköznapi szimmetriafogalomtól igen távol esik. De a fizikusok már csak ilyenek. Megigéztetjéi annak a Galileo Galileitől származó ideának, hogy a természet nagy könyve a matematika nyelvén íródott, s így a szimmetria lényegének megértése matematikai absztrakciók alkalmazása nélkül keresztülvihetetlen.

A szimmetriáknak a kvantumelmélettel összecsengő absztrakt alapokra helyezésében Wigner Jenő jeleskedett. Megmutatta, hogy a téridő-szimmetriáknak a kvantumelméletben különböző ábrázolásai lehetnek. Ezek különféle térelméleteknek felelnek meg. Ez igen szép, azonban (megint ez a fránya kvantálás) az nem biztos, hogy a vizsgált klasszikus térelmélet szimmetriáit a kvantumos változatban matematikailag korrekt mó-

don meg is tudjuk jeleníteni. Ha ez nem megy, akkor azt mondjuk, hogy a szimmetria anomáliával rendelkezik. Az anomáliák eltüntetése lehet egy fontos elméletépítő feltétel. De jelenlétük sem teljesen nem kívánatos. Hiszen az anomáliákkal kapcsolatos matematikai kifejezések igen fontos fizikai üzeneteket hordozhatnak. Például bizonyos kvantumtérelméletek esetén az anomália lehet egyszerűen csak egy szám, mely egy adott makroállapotot realizáló rejtett mikroállapotok számával, azaz az entrópiával kapcsolatos. Melyek ezek a „bizonyos” kvantumtérelméletek?

## 6. Konform térelméletek

Hány veréb fér el a Lánchídon? Egy, de az állati nagy! Miért nevetünk ezen? Mert lelki szemeink előtt megjelenik a Lánchíd, amint rajta kuksol egy óriási veréb. Nyilván a mi világunk nem ilyen. Zoomolás során egyre másképp kezd kinézni. Azt mondjuk, hogy a skálaválasztásra érzékeny.

Az olyan kvantumtérelméleteket, melyekben a téridő-szimmetriák mellett a skálaszimmetria is szerepel, konform térelméleteknek (CFT, conformal field theory) nevezzük. Itt nagyíthatunk, kicsinyíthetünk, a világ objektumai minden hosszskálán természetesnek tűnnek. Egy CFT-s világban a verebes vicc nem lenne ütős. Ennek ellenére a CFT-eket a fizikusok imádják tanulmányozni.

Ennek sok különféle oka van. A skálaszimmetriát is tartalmazó úgynevezett konform szimmetria egyszerűbbé teszi a számolásokat. Mivel kellemes tulajdonságúak, viccesen komfort-térelméleteknek is hívhatnánk őket. Ezekben a kvantumtérelméletekben nagyon sok fontos mennyiséget viszonylag egyszerűen ki lehet számolni. Ha egy CFT-ben a skálaszimmetria kvantumszinten megsérül, akkor azt mondjuk, hogy az illető elmélet skálaanomáliával rendelkezik. A CFT-k esetén az anomáliákkal kapcsolatos matematikai mennyiségek meghatározhatók. Ezen mennyiségek viselkedéséből pedig nagyon fontos tanulságokat vonhatunk le.

Melyek ezek a fontos tanulságok? Hamarosan látni fogjuk, hogy a CFT-k speciális szerkezetű téridő-geometriákat kódolnak. Valahogy úgy, ahogy a hologramok háromdimenziós képeket. Az anomáliák a kódolás mechanizmusáról tudósítanak. Hogyan?

Ha egy holografikus képet kódoló lemezre ránézünk, akkor azon semmi olyan nincs, ami a szem számára érdekes lehet. Csak összevisszaságot látunk, krikszkrakszokat, karcolásokat. A lemezképből csak a lézerfény alkalmazása csalogatja elő a háromdimenziós képet – például egy híresség arcát. Hasonló szellemben tekinthetjük a CD-lejátszók őst, a lemezjátszót is. Ezek fekete korong alakú lemezekből csalogatták elő a hangot. A korongok felszínén koncentrikus köröket, mikrobarázdákat láthattunk. Azonban akárhogy meresztgettük is a szemünket, a barázdák vizsgálatából még nem jöhettünk rá arra, hogy a korong Beethoven V. szimfóniáját kódolja a Bécsi Filharmónikusok előadásában.

Ezen analógia mentén haladva a továbbiakban kiderül majd, hogy a CFT-kre érdemes úgy gondolni, mint olyan absztrakt teóriákra, melyek más mennyiségekkel együtt az anomáliák szerkezetébe bizonyos fajta téridők szimfóniáját kódolják. A további feladatunk az, hogy bepillantást kapjunk a kódolás pontosabb mechanizmusába.

Ehhez idézzük fel azt a tényt, hogy a holografikus kép három térdimenziós. A képet kódoló lemez csak két térdimenziós. A holográfia tehát olyan objektumok között létesít kapcsolatot, melyek eggyel különböző dimenziókban élnek. Világunk négy téridő-dimenziós. Ebből három tér- és egy idődimenzió jellegű. A holográfia ötlete szerint tehát négy téridő-dimenziós világunk objektumait egy három téridő-dimenziós „világ” objektumai kódolják. A matematika segítségével azonban bármilyen dimenziós téridőket tanulmányozhatunk. A holográfia ötletét magasabb dimenziókra is általánosíthatjuk. Ekkor a holografikus megfelelés során egy  $D + 1$  téridő-dimenziós világot egy  $D$  dimenziós világ kódol.

A továbbiakban „világ” alatt mindig a  $D + 1$  dimenziós világot fogjuk érteni. A  $D$  dimenziós világra mint a „CFT-s világ”-ra fogunk hivatkozni. Tegyük fel, hogy ennek a  $D + 1$  dimenziós világnak a fizikai törvényeit egy  $D$  dimenziós „lapos” CFT-s világ írja le. Feltevéseink szerint az ilyen téridők laposak, ezért mivel a téridő görbülete a gravitációs erőter jelenlétére utal, a CFT-s világ gravitációmentes. Ha most a CFT-kre úgy gondolunk, mint téridő-szimfóniákat kódoló holografikus lemezekre, akkor mindjárt igen furcsán kell hogy érezzük magunkat. Ha a fenti CFT-k ugyanis gravitációmentes elméletek, akkor hogyan várhatjuk el tőlük azt, hogy a lemezek „lejátásával” majd olyan  $D + 1$  dimenziós univerzumok bukkanjanak elő, ahol már a téridőt görbítő gravitáció az úr?

Ráadásul a verebes vicc kapcsán érezzük, hogy a  $D$  dimenziós lapos CFT-k igen speciálisak. Ezért nem kódolhatnak akármilyen  $D + 1$  dimenziós téridőket. Ezek a téridők tehát valószínűleg igen speciális modelluniverzumokat írnak majd le.

A holografikus megfelelésről fokozatosan kialakuló képünk tehát meglehetősen különös. Sovány vigaszként szolgálhat az, hogy első ránézésre a mikrobarázda és a zenei hang kapcsolata is szokatlan. Vagy a kétdimenziós lemezke és a megjelenő háromdimenziós kép közötti holografikus kapcsolat is az. De ha ismerjük a lemezjátszó működési elvét, akkor már a zene és a hanglemez közötti összefüggés is könnyebben emészthető lesz. Ahhoz tehát, hogy haladást érnünk el, tisztáznunk kell a speciális modelluniverzumok „zenéje” és a CFT-s hanglemezek közötti kapcsolatot. Ehhez a legegyszerűbbnek tűnő CFT-s hanglemezre kell „meghallgatnunk”: a vákuum zenéjét.

## 7. Vákuum-összefonódottság

Egy kissrácóromban olvasott, kamaszokról szóló könyvben találtam az alábbi mondatot: „Ez a nap üres volt. Akár

a fizikában a vákuum.” Ennek alapján akkortájt a vákuumnál unalmasabb állapotot, el sem tudtam képzelni. A vákuumban nincs „semmi”, ehhez képest minden ami van, az „valami”. Később a semmiből történő teremtés gondolata azt a képet alakította ki bennem, hogy a vákuum valamiféle alapállapot, amiből minden, ami van, létrejön. Egy CFT vákuumállapota az elmélet alapállapota. Ez a fentiekre rímel is. Azonban a CFT-s vákuum – nevével ellentétben – nem éppen unalmas állapot. Kvantumosan összefonódott állapot. Ismét egy fontos fogalom, melyről egy kicsit többet kell beszélnünk.

Minden makrovilágbeli mesterkedésünk lokális. Egy tóban pancsoló kisgyermek a tükörsima vizet csak a gyermek közvetlen közelében borzolja fel. A felborzolás csak a gyermek egy kis környezetében történik, azaz lokális. Erről a felborzolt állapotról a tó átellenes végén lévő nagymama azonnal nem szerezhet tudomást. A mobillal átküldött szelfi a nagyanyót maximum fénysebességgel érheti el. A borzolás hullámai pedig, mire a tó túloldalára érnek, szinte teljesen elenyésznek. Ennek ellenére akár szelfivel felturbózva, akár hagyományos módon, a borzolással történő üzengetés véges sebességgel, de azért kivitelezhető.

Az üzengetni vágyó nagyit és unokáját jellemző állapot titkos összefonó szálak létén alapul. Nagyit és unoka bizonyos helyzetekben hasonlóan reagálnak. Mintha előzetesen összebeszéltek volna. Ha az unoka már beszélni is tud, az összebeszélés is benne van a pakliban. De valószínűbb, hogy ezen szálak eredete rejtett (genetikai) paraméterekkel kapcsolatos. A téridőbeli események közötti kapcsolatokat az események közötti korrelációknak nevezik. Nagyit és unoka viselkedése között tehát olyan korrelációk vannak, melyek fennállását rejtett paraméterek segítségével értelmezhetjük.

A kvantumos összefonódottság korrelációs szálai azonban nem ilyenek. A CFT-s vákuumállapot térben és időben kiterjedt állapot. Az első furcsa tulajdonsága az, hogy a vákuum egyik helyen történő lokális bökdösésével egy másik igen távoli helyen elvileg bármilyen állapot létrehozható [10]. A másik elképesztő furcsaság az, hogy a CFT-s vákuumállapotba kódolt titkos szálak lokális rejtett paraméterekkel nem értelmezhetők [11]. Itt tehát bizonyos korrelációkról az előzetes összebeszéléshez vagy genetikai programozáshoz hasonló dolgok sem adhatnak számot.

A harmadik, bennünket érdeklő tulajdonság matematikai jellegű: az összefonás mértéke lokális tartományokra a skálaanomáliák erősségével és a tartomány méretével arányos. Például páratlan térdimenziós gömb alakú tartományok esetén az összefonás mértéke tartalmaz egy „univerzális” viselkedésű tagot. Ez a gömb sugarának logaritmusával arányos. A harmadik tulajdonság meglehetősen vadul hangzik. Mivel számunkra most ez a tulajdonság a legfontosabb, bontsuk ki ezt kicsit részletesebben!

A harmadik tulajdonság azt mondja, hogy ez az összefonódottságnak nevezett, a józan észnek fittyet hányó módon viselkedő valami számszerűsíthető. Más szóval,

valamiféle természetes mértékkel rendelkezik. És ez a mérték egy lokalizált tartományban lévő CFT-s mikroállapotok számával arányos, hiszen korábban már megbeszéltük, hogy a skálaanomáliák ezekről a mikroállapotokról tudósítanak. De mi méri az összefonódottságot? Az úgynevezett összefonódottsági entrópia. Ezt a mennyiséget eredetileg Neumann János vezette be, ezért von Neumann-entrópiának is nevezik.

Pilinszky János írja az egyik versében azt, hogy „mi repesztjük ketté azt, ami egy és oszthatatlan”. Valóban. De a világ megismerésére egyelőre nincs jobb módszerünk. Életünk során megfigyeléseket végzünk, s ennek során a világnak egy elszigeteltnek tűnő részét vesszük szemügyre. Felhasítjuk a világot vizsgálendő objektumra és környezetre. Persze az objektum és a környezet szétválasztása nem mindig üdvözítő. Főleg akkor, ha ezek egymással kvantumosan összefonódtak.

A CFT-s vákuumnál ez a szétszakítás teljességgel lehetetlen. Ezt a von Neumann-entrópia matematikai viselkedése kerek pereg megmutatja. Ha a vizsgált téridőtartomány egy rögzített időpontbeli tetszőleges dimenziós gömb, akkor a gömb határától kicsit innen és kicsit azon túl lévő kvantum mikroállapotok mindig maximálisan összefonódtak lesznek. A harmadik tulajdonság azt mutatja, hogy a gömb alakú tartomány összefonódottsági entrópiája a gömb sugarával és a skálaanomáliák erősségével kapcsolatos.

Az entrópia szóval azonban ebben a cikkben már találkozunk. Hol is? A fekete lyukak entrópiájánál és a ho-

lografikus elvnel. Lehet, hogy a fekete lyukak entrópiája igazából összefonódottsági entrópia? Ami azt méri, hogy a világ elkerülhetetlen kettérepesztése során mennyi információ marad előlünk elzárva? Sőt, esetleg az is lehet, hogy tetszőleges téridőtartományokhoz is rendelhetünk összefonódottsági entrópiát? Mi van, ha a téridő szövetét valamilyen értelemben az összefonódottság tartja össze?

## Irodalom

1. János evangéliuma, Jn 1,1–3 (revideált új fordítás)
2. A zsidókhöz írt levél, Zsid 11,3 (Károli Gáspár fordításának 1908-as revíziója)
3. Wheeler J. A. (1990): Information, Physics, Quantum: The Search for Links. In: *Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics*, Tokyo, 1989.
4. A műholdak nagy sebessége miatt az idő ugyanakkor lassabban is telik. Ez napi 7 milliomed másodpercet jelent. A GPS rendszerben ezt a két egymással versengő effektust kell figyelembe venni.
5. Kepler J. (1601): De fundamentis astrologiae certioribus. Thesis XX: “Ubi materia, ibi geometria”
6. Bekenstein J. D. (1973): Black holes and entropy. *Physical Review D* 7, 2333–2346.
7. Hawking S. W. (1975): Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics*, 43, 199–220.
8. Susskind L. (1995): The world as a hologram. arXiv:hep-th/9409089, *Journal of Mathematical Physics*, 36, 6377–6396.
9. Maldacena J. (1998): The large N limit of superconformal field theories and supergravity. arXiv:hep-th/9711200, *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2, 231–252.
10. Reeh H., Schlieder S. (1961): Eine Bemerkung zur Unitäräquivalenz von Lorentzinvarianten Feldern. *Nuovo Cimento*, 22, 1051–1068.
11. Bell J. S. (1964): On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox. *Physics*, 1, 195–200.