

# SZÁZ ÉVES AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLET\*

Szabados B. László

az MTA doktora, tudományos tanácsadó,  
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont RMI Elméleti Osztály  
lbszab@rmki.kfki.hu

## Bevezetés

Éppen száz éve, a Porosz Tudományos Akadémia 1915. november 25-i ülésén ismertette *Albert Einstein* új, relativisztikus gravitációs téregyenleteit: megszületett az általános relativitáselmélet (Einstein, 1915). Az elmúlt száz év megmutatta, hogy ez az elmélet nemcsak a fizikában alapvető jelentőségű, hanem fontos asztrofizikai, sőt műszaki és hétköznapi *alkalmazásai* vannak, és átformálta a térről, időről és okságról alkotott képünket is.

E cikkkel tisztelgünk az emberi elme egyik legnagyobb intellektuális teljesítménye előtt, felidézve az elmélet megszületésének főbb állomásait, legfontosabb eredményeit és megállapításait, számba véve az elméletet alátámasztó kísérleti tényeket, és megemlíttve egy-egy műszaki, asztrofizikai, illetve kozmológiai alkalmazást. A tanulmány néhány nyitott kérdés ismertetésével, illetve az elmélet jelentőségével kapcsolatos néhány megjegyzéssel zárul.

\* *Perjés Zoltán* (1943–2004), *Károlyházy Frigyes* (1929–2012) és *Sebestyén Ákos* (1935–2013), a magyarországi nemzetközi színvonalú általános relativitáselméleti kutatások elindítójának, mentorának, illetve aktív művelőjének emlékére.

Az általános relativitáselmélet ma is számos nyitott kérdést tartalmazó és intenzív nemzetközi kutatások tárgyát képező diszciplína. Irodalma szó szerint is könyvtárnyi. Ez a cikk csupán szerény, nem technikai jellegű összefoglalás, amely egyes kérdések kiválasztását illetően még bevallottan szubjektív is.

Az érdeklődő olvasó jó összefoglalót talál a *Wikipedia* online enciklopédiában (URL<sub>1</sub>). Einstein publikációinak hasznos megjegyzésekkel kiegészített jegyzéke szintén elérhető a *Wikipediából* (URL<sub>2</sub>). Abraham Pais (2005) nagyszerű könyve Einstein életművének alapos és igényes tudománytörténeti összefoglalója. Néhány klasszikus cikk (nem teljes) magyar fordítása Einstein (1971) tanulmánykötetében is megtalálható, illetve Einstein 1905 és 1915 közötti „csodás évtizedéről”, a speciálistól az általános relativitáselméletig vezető útról *Lánczos Kornél* (1978) írt (itt-ott személyes hangú) könyvet.

## AZ ELMÉLET MEGSZÜLETÉSE

### *Előzmények*

Galilei relativitási elve értelmében bármely két, tehetetlenségi mozgást végző (inerciális) vonatkoztatási rendszer egyenértékű a természettör-

vények leírása szempontjából: a természeti jelenségek azonos módon játszódnak le bármely rendszerből megfigyelve, s a jelenségeket leíró természettörvények *alakja* bármely két rendszerben azonos. Egy adott fizikai mennyiség *értéke* az egyik vagy másik rendszerből mérve lehet különböző, de ezek egymásból a vonatkoztatási rendszerek *relatív* mozgását jellemző ún. *Galilei-transzformációval* egyértelműen meghatározhatók.

A XIX. század utolsó harmadában kidolgozott Maxwell-féle elektrodinamika azonban látszólag ellentmondott a relativitás Galilei-féle elvének. Az elektrodinamika által megjósolt elektromágneses hullámok látszólag kitüntetnek egy inerciarendszert, ti. azt, amelyben a hullám *minden irányban* fénysebességgel terjed. De ha ez így van, akkor *kísérletekkel* meg lehet határozni, hogy milyen sebességgel mozog a vonatkoztatási rendszerünk ahhoz a rendszerhez képest, amelyben a hullámterjedés izotrop.

A ténylegesen elvégzett (Michelson–Morley típusú) kísérletek azonban nem mutatták a fényterjedés semmiféle anizotrópiáját: elektromágneses jelenségek segítségével *sem* lehet semmilyen kitéüntetett vonatkoztatási rendszert meghatározni. Galilei elve a kísérletek tanulsága szerint érvényes az elektromágneses jelenségekre is. De ekkor Galilei és Newton mechanikájának kinematikai fogalmai és az elektrodinamika közötti nyilvánvaló ellentmondást fel kell oldani. Ezt tette meg Einstein az 1905-ben publikált speciális relativitáselméletében.

A speciális relativitáselmélet a maxwelli elektrodinamika mélyén rejlő kinematikai fogalmak és oksági viszonyok koherens elmélete. Legfőbb eleme az a felismerés, hogy az események egyidejűségének a fogalma nem *a priori* adott, hanem azt *definiálnunk kell*, s

az egyidejűség Einstein által adott fogalma, ezáltal pedig az erre épülő minden más fogalom (például két esemény térbeli távolsága vagy az események között eltelt idő) is függ a vonatkoztatási rendszertől.

E kinematikai fogalmakat *Hermann Minkowski* öntötte elegáns geometriai alakba a *téridő* fogalmának segítségével. A téridő az univerzumban lezajlott és majdan bekövetkező események halmaza, ami matematikailag egy négydimenziós euklideszi térhez hasonló. E téridőben (a Minkowski-téridőben) azonban két pont közötti „négyestávolság” négyzete nem egyszerűen a pontok Descartes-féle koordinátakülönbségeinek a négyzetösszege. Itt az időkoordináták különbségének a négyzetét *negatív* előjellel kell figyelembe venni. Ez a negatív előjel mély fizikai jelentéssel bír: az egymástól *zérus* négyestávolságra lévő események fényjelek segítségével összeköthetők; azok, amelyek között a távolságnégyzet *negatív*, valamilyen vonatkoztatási rendszerből nézve egyhelyű események (és így oksági viszonyban is lehetnek); míg amelyekre a távolságnégyzet *pozitív*, valamely vonatkoztatási rendszerből nézve egyidejű események, és egymással nem lehetnek oksági viszonyban. Ezzel a téridő minden pontjában egy *fénykúp* értelmeztünk, amely kifejezi a fény (illetve általánosabban a fizikai hatások) terjedési sebességének *véges* voltát, és meghatározza, hogy egy esemény mely más eseményekkel lehet oksági viszonyban. A téridő felbontása térre és időre függ a választott vonatkoztatási rendszertől, de maga a téridő, a négyestávolság vagy a fénykúpok rendszere nem.

#### *Az általános relativitás kérdése*

Newton első axiómája szerint vannak olyan vonatkoztatási rendszerek, amelyekből nézve a más objektumokkal kölcsönhatásban nem

lévő tömegpontok egyenes vonalú, egyenletes mozgást végeznek. Ezek az ún. *inerciarendszerek*,  $s$  a fizika (például a Maxwell-elmélet) mozgásegyenletei ilyen rendszerekben érvényesek a szokásos alakjukban. *Ernst Mach* vetette fel azt a kérdést, hogy mi tünteti ki az inerciarendszereket a többi vonatkoztatási rendszerhez képest. Szerinte e rendszerek azok, amelyekből nézve a Világegyetemet kitöltő anyag nagy átlagban egyenes vonalú, egyenletes mozgást végez.

De ha az inerciarendszerek valóban csak annyiban különböznek a többi vonatkoztatási rendszertől, hogy azokat az Univerzum anyageloszlásához illesztjük, akkor Einstein szerint valójában nincs is *elvi* különbség az inerciarendszerek és a tetszőlegesen mozgó vonatkoztatási rendszerek között. Ez utóbbiak ugyanolyan legitim rendszerek a természettörvények megfogalmazása szempontjából, mint az inerciálisak. Ez a Galilei-féle relativitási elv kiterjesztése tetszőlegesen mozgó rendszerekre (Einstein, 1916). A kérdés az, hogyan tudjuk megfogalmazni a természettörvényeinket tetszőlegesen mozgó vonatkoztatási rendszerekre.

Az egyenes vonalú, egyenletesen *gyorsuló* vonatkoztatási rendszerek vizsgálata vezette Einsteint arra a felismerésre, hogy az ún. gravitációs és tehetetlen tömeg szigorú arányossága miatt semmilyen mechanikai kísérlettel sem tudjuk megállapítani, hogy a vonatkoztatási rendszerünk inerciarendszer *homogén* gravitációs térben, vagy pedig egyenes vonalú, egyenletesen *gyorsuló* mozgást végző rendszer (Einstein, 1911). Ez a megkülönböztethetlenség további érv a Galilei-féle relativitási elv kiterjesztésének szükségessége mellett. Az egyenletesen gyorsuló vonatkoztatási rendszerekben fellépő *tehetetlenségi erők* és a *homogén* gravitációs erők mechanikai ki-

sérletekkel történő megkülönböztethetlenségét (gyenge ekvivalencia) emelte Einstein elv rangjára: az ilyen erők nemcsak mechanikai, de *semmilyen* kísérlettel sem különböztethetők meg egymástól. Ez az *ekvivalencia elve*.

A természettörvények általános, gyorsuló vonatkoztatási rendszerekben való megfogalmazásának igénye elvezetett egy új és talán még izgalmasabb kérdéshez: *mi a gravitáció relativisztikus elmélete?*

### *A gravitációs tér sajátosságai*

*Galileo Galilei* ejtési és *Eötvös Loránd* torziós ingával végzett kísérletei azt mutatják, hogy a testek gyorsítással szembeni ellenállását jellemző  $m_t$  *tehetetlen* és *Isaac Newton* gravitációs erőtvényében szereplő  $m_g$  *gravitációs* tömege a testek anyagi minőségétől függetlenül mindig szigorúan arányos egymással. Így megfelelő egységválasztással  $m_t = m_g$  elérhető. Ez az egyenlőség tehát nem *a priori* igazság, hanem *kísérleti tény*, és ez az ekvivalenciaelv alapja.

A gravitációs és tehetetlen tömeg egyenlősége a gravitáció univerzális jellegét mutatja: a gravitáció az anyagnak nem valamilyen specifikus töltéséhez csatolódik, mint például az elektromágneses tér, hanem az anyag egy kinematikai tulajdonságához, *anyagi minőségtől függetlenül*.

A gravitáció eme univerzalizása miatt a newtoni gravitációs erőter térerőssége a háromdimenziós tér bármely előre megadott pontjában megszüntethető egy megfelelően gyorsuló vonatkoztatási rendszerre való áttéréssel. A gravitációs térnek a fizikai jelentéssel bíró része tehát a potenciál  $\partial^2\Phi/\partial x^i\partial x^j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) *második* deriváltjaiból álló *tenzor*. Ez a mennyiség a testekben *nyíró* deformációt eredményez. Speciálisan, ez felel a Hold által

a Föld óceánjaiban keltett árapályjelenségért (ezért is nevezik ezt *árapályerőnek*). Eötvös torziós ingája is e tenzor bizonyos komponenseit méri. A gravitáció tehát *kvadrupól jellegű tenzorális* kölcsönhatásnak tűnik.

### A megoldás

A gravitáció newtoni elmélete nemrelativisztikus távolhatás, és az ekvivalenciaelv következtében ez két ok miatt sem tehető triviálisan relativisztikussá. Egyrészt Einstein már 1905-ben megmutatta, hogy a testek tehetetlen tömege (szorozva  $c^2$ -tel) függ a testek energiataralmától, és így a gravitáció forrása nem a testek nyugalmi, hanem a teljes energiája. De egy relativisztikus térelméletben a megfelelő energiasűrűség a szimmetrikus energia-impulzus *tenzornak* csak egy komponense. Így a gravitáció forrása az energia-impulzus tenzor, és nem csupán valamilyen tömegsűrűség. Ekkor azonban a gravitációt sem csupán egy  $\Phi$  skalárfüggvény írja le, hanem várhatóan az is csupán egy része egy bonyolultabb mennyiségnek.

Az ekvivalenciaelv miatt azonban a gravitációnak nem lehet speciális relativisztikus elmélete. Einstein az ekvivalenciaelvre alapozott gondolat kísérletében már 1911-ben kimutatta, hogy gravitációs térben a fénysugarak elhajlanak. De ha a gravitáció valóban befolyásolja a fénytérjedést, akkor a fényjelek története nem lehet oly módon eleve adott, mint a Minkowski-téridőben. *A gravitáció jelenléte nem egyeztethető össze a Minkowski-téridő sík, a priori adott geometriájával.* A téridő geometriája *görbült*.

Ez azt jelenti, hogy a négyestávolságot értelmező kifejezés csak *lokálisan* érvényes: két infinitezimálisan közeli pont távolságnégyzete a koordinátakülönbségek homogén kvadratikus kifejezése,  $ds^2 = g_{ab} \times dx^a \times dx^b$ , ahol

$g_{ab} = g_{ab}(x)$  ( $a, b = 0, \dots, 3$ ) az ún. metrikus tenzor. A geometria görbültségét az  $R^a{}_{bcd}$  görbületi tenzor jellemzi, amelynek az eltűnése esetén a távolságnégyzet infinitezimális kifejezése megfelelő koordináták választása mellett véges koordinátakülönbségű pontpárookra a Minkowski-téridőbeli négyestávolságot adja. Newtoni határesetben, azaz ha a gravitációs tér gyenge és statikus, akkor megfelelő koordinátákban  $g_{00} = -1 - 2\Phi/c^2$  valamilyen  $\Phi$  függvényre. E függvény kielégíti a newtoni gravitációelmélet téregyenletét, a Poisson-egyenletet, ha a  $g_{ab}$ -re vonatkozó téregyenletként  $R_{ab} - \frac{1}{2}Rg_{ab} = 8\pi Gc^{-4}T_{ab}$ -t választjuk. Itt  $R_{ab} := R^c{}_{acb}$  az ún. Ricci-tenzor,  $R$  ennek a metrika szerint képzett spurja,  $T_{ab}$  az anyag szimmetrikus energia-impulzus tenzora és  $G$  a Newton-féle gravitációs állandó. Ezek Einstein (1915) gravitációs téregyenletei.

A téregyenletek alapján Einstein korrekt módon származtatta a Merkúr perihéliumvándorlásának ismert értékét, megjósolta a fénysugarak elhajlását a Nap gravitációs terében, illetve a gravitációs vöröseltolódás jelenségét (gravitációs térben az órák *lassabban* járnak). Ez az elmélet három klasszikus kísérleti bizonyítéka.

Habár történetileg az általános relativitáselmélet abból az igényből nőtt ki, hogy a természettörvényeket fel tudjuk írni tetszőleges és nem csak az inerciális vonatkoztatási rendszerekhez illesztett koordinátákban is, a speciális és az általános relativitáselmélet közötti igazi különbség az, hogy a gravitációs jelenségekről is számot adó általános elméletben a téridő *görbült*, míg a speciálisban *sík*. A gravitáció nem más, mint a téridő görbültsége. A görbület trivialitása vagy nem trivialitása tehát *objektív*, független a használt vonatkoztatási rendszerektől.

A kérdésre, hogy hogyan kell a természet-törvényeket tetszőlegesen mozgó vonatkoztatási rendszerben megfogalmazni, a válasz az, hogy *a természettörvények vonatkoztatási rendszerektől független tartalommal bírnak*, azok négyestenzorokkal is megfogalmazhatók. Csupán azok *konkrét alakja* függ az aktuális vonatkoztatási rendszertől. Az egyik rendszerben megadott konkrét alakjukból egy másik rendszerbeni konkrét alakjuk a tenzorok transzformációs tulajdonságai alapján határozható meg.

## AZ ELMÉLET SAJÁTÓSÁGAI ÉS FEJLŐDÉSE

### *Az elmélet sajátosságai*

Az Einstein-féle *tisztán geometriai elméletben* a gravitáció maga a téridő görbütsége. Benne a  $g_{ab}$  metrikus tenzor kettős szerepet játszik, az a gravitációs tér *állapothatározója*, egyúttal a *téridő-geometriát* is definiálja (szemben például az elektrodinamikával, ahol a négyespotenciál mint az elektromágneses tér állapotahatározója független a téridő Minkowski-metrikájától). A metrika ezen kettős szerepének, azaz a fizikai folyamatoktól független geometriai háttér *hiányának* súlyos elvi következményei vannak. Az elméletben felbukkanó számos nehézségnek ez a gyökere (Ash-tekár – Geroch, 1974). Most ezeket vesszük számba.

*Szabadsági fokok:* Az elmélet óriási mértékszabadságot tartalmaz. Így annak ellenére, hogy a  $g_{ab}$ -nak tíz független komponense van, a gravitációs *fizikai szabadsági fokok* száma csupán pontonként kettő (mint az elektrodinamikában).

*A téregyenletek nemlinearitása:* Megmutatható, hogy a metrikus tenzor véges sok deriváltjából felépülő bármely *tenzoriális* kifejezés

a metrikának nemlineáris kifejezése. Így bármely gravitációs téregyenlet, amely *csak* a metrikából és annak deriváltjaiból épül föl, *szükségképpen nemlineáris*. Speciálisan, az Einstein-egyenletek erősen nemlineáris parciális differenciálegyenlet-rendszert alkotnak. E nemlinearítások következtében az elmélet számtalan *nemperturbatív* effektust eredményez.

*A gravitációs energiasűrűség hiánya:* Ugyancsak a nemdinamikai geometriai háttér hiányának a következménye, hogy az általános relativitáselméletben nincs jól definiált gravitációs energia-impulzus *sűrűség* (Misner et al., 1973). Bármely ilyen sűrűség jellegű mennyiség *lényegileg* a koordináta-rendszertől és/vagy vonatkoztatási rendszertől függő (például pszeudotenzoriális) kifejezés. *A gravitációs energia-impulzus szükségképpen nem lokalizálható.* Jól definiált gravitációs energia-impulzus csak a téridő *kiterjedt* tartományaihoz rendelhető. Továbbá, minden integrális energia-impulzus kifejezés nem háromdimenziós térfogati, hanem csupán *kétdimenziós zárt felületi integrál*. *A gravitációs energia-impulzus töltés jellegű kifejezés.*

*Kauzális patológiák:* Mivel a téregyenleteket nem egy metrikus geometriai háttéren, adott oksági viszonyok mellett kell megoldani, a megoldásokat a Minkowski-téridőben megszokotthoz képest nagyon eltérő oksági viszonyok is jellemezhetik. Például a Gödel-féle megoldásban a téridő minden pontján keresztül létezik *zárt, időszerű görbe*. Ez a lehető legdurvább kauzalitásértés (Penrose, 1972; Hawking – Ellis, 1973), mert ilyen görbék léte kauzális paradoxonokhoz („időutazás”) vezet: például előidézhetünk a saját múltunkban olyan katasztrófát, amely megakadályozza megszületésünket, ami által mégsem idézhetjük elő a katasztrófát. Egy ilyen paradoxon

feloldása csak úgy lehetséges, ha nem írhatunk elő a mozgásegyenleteinkhez minden, a lokális természettörvényeink által megengedett kezdőfeltételt („nincs szabad akarat”), hanem csupán olyat, amelynek az időfejlődése során a rendszer entrópiája nem változik.

*Az elmélet prediktivitása:* A fenti nehézségek motiválják azt a kérdést, hogy jól értjük-e az Einstein-egyenletek szerepét. A téridő egy megoldása az Einstein-egyenletek, vagy az csak az Einstein-egyenletekre vonatkozó *kezdeti-érték-probléma* megoldása? Ez utóbbiban ui. a fentihez hasonló kauzális patológiák nem fordulhatnak elő. Az Einstein-egyenletekre vonatkozó kezdetiérték-problémában azonban a kezdőadatok *nem feltétlenül* határozzák meg egyértelműen a teljes téridő geometriáját. A nehézségek oka itt is az, hogy az oksági viszonyok is a dinamika során „születnek”, és az időfejlődés nem egy adott oksági viszonyokkal bíró geometriai háttéren történik.

*Konformisan invariáns struktúrák:* A téridő görbültsége miatt a fénykúpok csupán a téridő kis tartományain olyan szerkezetűek, mint a Minkowski-téridőben. A fénykúpok ezen lokális rendszerét a metrikának csupán a *konform osztálya* határozza meg (Penrose, 1972; Hawking – Ellis, 1973). (A  $g_{ab}$  és  $g'_{ab}$  metrikák azonos konform osztályúak, ha van olyan  $\Omega^2$  pozitív függvény, amelyre  $g_{ab} = \Omega^2 g'_{ab}$ .) A metrika tehát természetes módon bomlik fel az oksági viszonyokat meghatározó *valamilyen*  $g'_{ab}$  és az  $\Omega^2$  (ún. konformis faktor) szorzatára. E felbontás fizikai jelentőségét az adja, hogy a fizika fundamentális, zérus nyugalmi tömegű részecskéket leíró téregyenletei (Maxwell-, Yang–Mills- és zérus tömegre a Dirac-egyenlet) invariánsak az  $\Omega^2$  konformis faktor megváltoztatásával szemben. Például a Higgs-bozon kivételével a részecskefizika standard modelljének *minden*

részecskéje ilyen! Hasonlóan, a *forrásmentes* Einstein-elmélet belső szabadsági fokainak a dinamikáját leíró egyenletek is invariánsak a konformis faktor megváltoztatására nézve, és csak az anyaghoz való *csatolásának módja* sérti ezt az invarianciát.

#### *További általános relativisztikus jelenségek*

Az elmélet a három klasszikus kísérleti bizonyíték mögötti effektusok mellett számos további, kísérletekkel is tesztelhető jóslattal bír. Ezek közül néhány:

*A próbatetek mozgásegyenletei:* Az anyag lokális energia-impulzusának megmaradásából következik, hogy pontszerű próbarészecskéek világvonala a téridőben *gyorsulásmentes görbe*, azaz Newton I. axiómája az Einstein-elméletből származtatható. Ha azonban a próbatestnek saját impulzusmomentuma is van, akkor a világvonala már nem gyorsulásmentes, és a gyorsulás a próbarészecske impulzusmomentumával és a téridő görbületi tenzorával lesz arányos. Ez az effektus a Gravity Probe B kísérlet alapja.

*Időkésés:* Bocsássunk ki radarjelet, amely a Nap mellett elhaladva visszaverődik egy másik bolygóról, majd visszatér a Földre. Most ismételjük meg a kísérletet úgy, hogy a radarjel ne a Nap közelében haladjon el. Az elmélet szerint a jel futási ideje gravitációs téren való áthaladáskor *hosszabb*, mint a másodikonban. Ez a Shapiro-féle időkésés-effektus.

*Extrém gravitációs lencsésés és az Einstein-gyűrűk:* A fény gravitációs forrás irányába történő elhajlása a gravitációs teret sok tekintetben a geometriai optika gyűjtőlencséhez teszi hasonlatossá. A geometriai optika számos jelensége (a kép elforgatása, nagyítása, torzítása, kausztikus felületek kialakulása, többszörös képek megjelenése stb.) megvalósul gravitációs térrel történő „lencsésés”



során is. A fényelhajlás extrém mértékű a fekete lyukak mint gravitációs források körül. Például egy fekete lyuk *mögötti* galaxis képe a fekete lyuk *körül*/kialakuló *gyűrű* (egy vagy több ún. Einstein-gyűrű) (Wambsgenass, 1998).

*Gravitációs hullámok:* Az elmélet lineáris (gyenge tér) közelítésében a metrikus tenzor a Minkowski-téridő metrikájának és egy kis perturbációnak az összege. E közelítésben az Einstein-egyenletek a perturbációra vonatkozó *hullámegyenletre* redukálódnak. Sejthető, hogy az elméletnek vannak gravitációs hullám-megoldásai. Ilyen hullámokat például nagy tömegek gyorsítása tud generálni. A kisugárzott gravitációs hullámok intenzitása azonban rendkívül kicsi. Például a sugárzási teljesítmény a Nap–Jupiter kettős rendszere is csupán kb. 40 watt (Penrose, 2004)!

*Elméleti jellegű, a megfigyelésekhez közvetlenül nem kapcsolódó, inkább az elmélet belső szerkezetére vonatkozó eredmények*

*A fény utolérhető!* A speciális relativitáselmélet szerint, ha egy forrásból fényjelet indítunk, akkor a forrásból a fényvel egyszerre induló egyetlen nemzérus tömegű részecske sem képes a fényt utolérni. A gravitációs lencsésítés következményeként az általános relativitáselmélet szerint ez mégis lehetséges. Ha ugyanis a forrásból induló, egymás közelében futó fényjelek fókuszálódnak, akkor a fényjelek története e fókuszpontokban elhagyja a fényemisszió mint esemény fénykúpját, és belép a fénykúp *belsejébe*. Így e történetek fókuszpont utáni szakaszai már véges tömegű részecskék segítségével is elérhetők. Hasonló fókuszalódás eredménye, hogy a speciális relativisztikus ún. ikerparadoxon problémájában már nem az ikerpár helyben maradó tagja öregszik jobban, ha a testvérrel történő talál-

kozás a fókuszpont után következik be (Penrose, 1972; Hawking – Ellis, 1973).

*Fekete lyukak és téridő-szingularitások:* Az Einstein-egyenletek Kerr-megoldása lokalizált, forgó forrás stacionárius gravitációs terét írja le. Ebben a forrás környezetében a gravitációs tér olyan erős, hogy az azt körülzáró egy bizonyos felületet átlépve minden részecske, beleértve a fotont is, már véges időn belül szükségképpen eléri a centrumot, ami (Penrose, illetve Hawking–Penrose szingularitástelelei [Penrose, 1972; Hawking – Ellis, 1973] miatt) a téridő-geometriának valódi, *fizikai* szingularitása. Ez a felület félig áteresztő hártvaként viselkedik: a külső tartományból részecskék léphetnek be a belső tartományba, de onnan semmi nem jöhet ki. Ez a felület az *eseményhorizont*, s az általa körülzárt tartomány a *fekete lyuk*. A horizontot megközelítő és a távoli megfigyelő számára fényjeleket kibocsátó minden részecske egyre nagyobb vöröseltolódásúnak és egyre kisebb luminozitásúnak látszik; és a horizont elérésének pillanatában a vöröseltolódás végtelenné, a luminozitás pedig nullává válik. Ezért *fekete* a fekete lyuk. E megoldás jelentősége az, hogy az általános relativitáselmélet egy, matematikailag még nem bizonyított sejtése szerint elég nagy tömegű anyag teljes gravitációs összeomlása során kialakuló aszimptotikus végállapot Kerr-megoldással írható le.

*A gravitáció stabilitása és a pozitív energia tételek:* A newtoni gravitációelméletben az anyag + gravitációs tér együttes rendszer teljes energiája tetszőlegesen nagy *negatív* értékűvé tehető az anyag egyre kisebb térrészbe zsúfolásával. Tehát látszólag tetszőlegesen nagy energia vonható ki egy gravitáló rendszerből a gravitációs kötési energia minden határon túli növelésével. Ez a newtoni gravitációelmélet által leírt rendszerek *lényegi instabilitá-*

sát mutatja. Az általános relativitáselmélet szerint azonban semmilyen anyagot nem zsúfolhatunk össze tetszőlegesen kis tartományba fekete lyuk kialakulása nélkül. Valóban, az általános relativitáselméletben bizonyítható, hogy reguláris anyageloszlások teljes energiája (még fekete lyukak jelenlétében is) mindig pozitív.

*A fekete lyukak termodinamikája és a Hawking-sugárzás:* Az anyag fekete lyukká történő teljes gravitációs összeomlása során óriási számú szabadsági fok, illetve az anyag mikroszkopikus állapotát jellemző információ tűnik el. Látszólag tehát fekete lyukak jelenlétében *sérül a termodinamika második főtétele*. E főtétel megtartása érdekében az anyag elvesző szabadsági fokainak kompenzálása-ként a fekete lyukakhoz entrópiát rendelünk. Ezzel lehetővé vált a termodinamika főtételeinek formális kiterjesztésére fekete lyukakat is tartalmazó rendszerekre. Hogy ehhez az entrópiához hőmérséklet is tartozik, és hogy ez az entrópia *fizikai* jelentéssel is bír, azt a Hawking-sugárzás megjósolt jelensége mutatja: a fekete lyukak a környezetükben a kvantumozott vákuumból termikus eloszlással részecskéket keltenek, s a spektrum hőmérsékletét a fekete lyuk paraméterei (például tömege) meghatározzák. A fekete lyukak tehát kvantumozottan sugároznak, azaz nem is teljesen feketék, s közben tömeget veszítenek. De a tömegük csökkenésével nő a hőmérsékletük, s az egyre gyorsabb ütemű „párolgásuk” robbanásban ér véget.

*Az általános relativitáselmélet a kísérletek fényében*

Szigorú értelemben az elmélet három klasszikus kísérleti bizonyítéka közül 1960 előtt valójában csak egy volt, a Merkúr perihéliumvándorlásának korrekt értelmezése (1% pontos-

sággal). A fényelhajlás mérését terhelő szisztematikus hibák miatt az eredmény később nem bizonyult meggyőzőnek, és a vöröseltolódás kísérleti kimutatására az 1960-as Pound–Rebka-kísérletig kellett várni (Will, 2014).

A hatvanas évekkel azonban olyan technológiai újdonságok jelentek meg (Mössbauer-effektus, lézer, mézer, interferométerek és atomórák, szupravezetők, radartechnika, műholdak stb.), amelyek új típusú kísérletek tervezését is lehetővé tették. Továbbá, már a 60-as évekre az általános relativitáselmélet alternatívájaként jó két tucat gravitációelmélet is megjelent, s felvetődött a kérdés, hogy ezek érvényességéről lehetne-e *kísérletileg* dönteni. A gravitációs kísérleteket két csoportba soroljuk: az elmélet(ek) kísérleti alapjait adók és az elmélet(ek) konkrét jóslatait tesztelők. A legfrissebb mérési eredményeket Clifford M. Will (2014) alapján idézzük.

*Az alapkísérletek: az Einstein-féle ekvivalenciaelv*

A modern gravitációelméleteknek ki kell elégíteniük a *szabadesés univerzalitásának* elvét, a *lokális Lorentz-invariancia* elvét és a *lokális pozícióinvariancia* elvét. E három kritérium együttese az *Einstein-féle ekvivalenciaelv*.

A szabadesés univerzalitásának elvét (vagy gyenge ekvivalenciaelvet) tesztelő kísérletek nagy része az Eötvös-kísérlet valamilyen finomítása, és célja az  $\eta(A,B)$ , ún. Eötvös-hányados nagy pontosságú mérése különböző (A és B) anyagokra az A és B anyag azonos gravitációs térben történő gyorsulása alapján. Például berilliumra és titánra  $\eta(\text{Be}, \text{Ti}) < 2,1 \times 10^{-13}$ . Az  $\eta$  faktor szétbontható a különböző elemi kölcsönhatások és azokon belül a különböző effektusok adta járulékok összegére. Így korlátok kaphatók arra, hogy milyen mértékben igaz a gyenge ekvivalenciaelv elektronra, protonra, neutronra, egyes



antirészecskékre, a gyenge vagy épp az elektromos vagy mágneses kötési energiára, a spin-pálya csatolásból eredő energiára stb.

A lokális Lorentz-invariancia követelménye szerint egyetlen *lokális, nemgravitációs* kísérlet sem mutathat ki kitüntetett irányt a téridőben; azaz a speciális relativitáselmélet *lokálisan* érvényesnek gondoljuk. Ez például a  $c$  fénysebesség irányoktól független állandóságát jelenti. Az erre vonatkozó kísérleti korlát  $\Delta c/c < 3,2 \times 10^{-16}$ .

A lokális pozícióinvariancia megköveteli, hogy bármely *lokális, nemgravitációs* kísérlet eredménye független legyen a kísérlet helyszínétől és idejétől. Ennek teljesülése *vöröseltolódás-mérésekkel* tesztelhető. (Bár Einstein a vöröseltolódást az elmélete jóslataként javasolta tesztelni, ez a jelenség valójában már a gyenge ekvivalenciaelv következménye, függetlenül a téregyenletektől. Így a vöröseltolódás mérésével a gyenge ekvivalenciaelv tesztelhető, *feltéve*, hogy a lokális Lorentz- és pozícióinvariancia követelménye teljesül. Megfordítva, a vöröseltolódás mérése a lokális [térbeli] pozícióinvariancia tesztelése, *ha* a gyenge ekvivalenciaelv és a lokális Lorentz-invariancia teljesül.) A Gravity Probe A kísérlet eredménye szerint a lokális (térbeli) pozícióinvariancia sérülésének mértéke kisebb mint 0,0002 (míg a Pound–Rebka-kísérlet által adott felső korlát 0,02). A lokális időbeni pozícióinvariancia tesztelése a nemgravitációs fizikai állandók időbeli változásának mérését jelenti: például az elektron és a proton tömegének arányára a változás kisebb mint  $3 \times 10^{-15}/\text{év}$ .

#### *További kísérletek*

A kísérletek második csoportjába az egyes elméletek speciális jóslatainak ellenőrzése tartozik. Technikai okok miatt ezt két alcsop-

portra bontják: a Naprendszerben, illetve az annál nagyobb (galaktikus vagy kozmológiai) skálán elvégezhető kísérletekre, mérésekre. A naprendszerbeli kísérletek során ugyanis (relativisztikus skálán) a sebességek és a tömegek kicsik, és a gravitációs tér gyenge. Ez az alapja az ún. PPN (paraméterezett poszt-newtoni) formalizmusnak, ami az egyes gravitációelméleteket a newtoni limeszhez adott korrekcióival parametrálja tíz dimenziótlan paraméter segítségével. Ebben az elméleti keretben az egyes alternatív elméletek is összehasonlíthatók. Az egyes kísérletek (például a Shapiro-féle időkésés, a fényelhajlás, a Merkúr perihéliumvándorlásának vagy épp a Gravity Probe B kísérletben a pörgettyű precessziójának a mérése) tekinthetők  $e$  paraméterek méréseinek. A mérési eredmények tipikusan  $10^{-4}$ - $10^{-9}$  pontossággal azonosak az Einstein-elméletnek megfelelő értékekkel.

Számottevő intenzitású gravitációs hullámok csak kataklizmaszerű asztrofizikai folyamatok (például szupernóva-robbanások, neutroncsillag-ütközések) során remélhetők. Ezek távolsága azonban olyan nagy, hogy a detektorainkban csak nagyon kis effektusokat okoznak. A gravitációs hullámokat elvben többféle alapelven működő detektorral (például piezokristályokban keltett térbeli feszültség, vagy egymás közelében szabadon mozgó részecskék relatív gyorsulásának mérésével) is lehet érzékelni. Legegyszerűbb egy adott szakasz gravitációs hullámok okozta távolságváltozásának mérése interferometriával. A most épülő gravitációshullám-detektorok is ezen az elven működnek. A kívánt mérési pontosság legalább  $10^{-18}$ . Mintha egy 1 km hosszú szakaszt akarnánk megmérni egy atommag átmérőjének a pontosságával...!

Habár gravitációs hullámok közvetlen detektálása még nem sikerült, ilyen hullámok

létére van közvetett bizonyítékunk. A PSR 1913+16 jelű pulzár egy olyan kettős rendszer egyik tagja, amelynek a pályaadatái (keringési idő, excentricitás stb.) nagyon pontosan mérhetőek. Az általános relativitáselmélet szerint azonban ez a kettős rendszer gravitációsan sugároz, a sugárzás által okozott folyamatos energiavesztés miatt a két objektum fokozatosan egyre közelebb kerül egymáshoz, és a sebességük egyre nő. A pulzár közel harminc éven keresztül történő folyamatos megfigyelése alapján a kettős pályaadatának változása 0,5% hibahatáron belül egyezik az általános relativitáselmélet sugárzási formulája alapján számolt értékkel (*Russell Hulse és Joseph Taylor*, 1993. évi fizikai Nobel-díj).

#### Alkalmazások

*A GPS-rendszerek:* működésük alapelve az, hogy a Föld felszínének bármely pontjából nézve a horizont fölött mindig van négy jeladó műhold, s az ezektől való távolság meghatározásával állapítjuk meg a helyzetünket (Ashby, 2003). A távolságot mikrohullámú jelek futási idejének meghatározásával mérik. Azonban a műholdak nagy sebessége és a magassággal gyengülő gravitációs tér miatt a műholdakon elhelyezett nagyon pontos atomórák a földi órákhoz képest *idődilatációt*, illetve *gravitációs kékeltolódást* szenvednek. Ez a Föld felszínén 15 méter pontosságú helymeghatározást várva a műholdak óráinak napi újraszinkronizálását teszi szükségessé. Az eltérés napi  $-7 \mu\text{s}$ , illetve  $46 \mu\text{s}$ . A sokkal nagyobb pontosságot igénylő katonai üzemmódban további korrekciók is szükségesek.

*Relativisztikus asztrofizika:* A csillagokban a fúziós energiatermelés leállása után kialakuló egyensúlyi állapot jellege a csillag tömegétől függ. Fehér törpecsillagokban az elektronok, míg neutroncsillagokban a neutronok

ultrarelativisztikus elfajulási nyomása tart egyensúlyt a gravitációs vonzással (*Subrahmanyan Chandrasekhar*, 1983. évi fizikai Nobel-díj). Ha azonban a neutroncsillag tömege legalább 2,5-3 naptömegnyi, akkor már a neutroncsillag-állapot sem stabil, és gravitációs összeomlás során *fekete lyuk* jön létre. Infravörös, keményröntgen- és gammatartománybeli megfigyelések mutatják, hogy a Tejútrendszer középpontjában is egy extrém nagy tömegű fekete lyuk (Sagittarius A\*) van. A lyuk tömege 4,3 millió naptömeg, sugara 44 millió km, ami majdnem a Merkúr pályájának a sugara! Tehát az általános relativitáselmélet által megjósolt fekete lyuk mint asztrofizikai objektum léte *tény*.

A fényelhajlás általános relativisztikus jelensége mint *eszköz* felhasználható az univerzum nem látható (ún. sötét) anyaga eloszlásának a feltérképezésére is. Ismerve e lencsézés törvényeit, meghatározható a fényelhajlást okozó tömeg eloszlása.

*Relativisztikus kozmológia:* *Edwin Hubble* megfigyelése, hogy a távoli galaxisok a távolságukkal arányos sebességgel távolodnak tőlünk, természetes módon értelmezhető az Einstein-egyenletek *Alekszandr Fridman* által adott homogén és izotrop kozmológiai megoldásában: az Univerzum *tágul*, és ez a tágulás mintegy 13,6 milliárd évvel ezelőtt kezdődött. A 2,726 K-es termikus, mikrohullámú kozmikus háttérsugárzás e táguló, 370 000 éves univerzum forró időszakának a maradványa (*Arno Penzias és Robert Wilson*, 1978. évi fizikai Nobel-díj). A háttérsugárzás hőmérséklet- és szögeloszlását egyre pontosabban a COBE (*John Mather és George Smoot*, 2006. évi Nobel-díj), WMAP és Planck űrszondák mérték, utóbbi mikrokelvin pontossággal. A mért anizotrópia ( $\Delta T/T$ ) nagyságrendje  $10^{-5}$ . De a háttérsugárzás nagyfokú

izotrópiája miatt nagy skálán a barionos anyagnak is hasonlóan kell eloszlania, mert egy erősen inhomogén anyageloszlás már eltorzítaná a háttérsugárzás izotrópiáját. A forró univerzum fenti, ún. ősrobbanásos modelle a megfigyelések tükrében tehát *tény*.

De mi az oka a háttérsugárzás eme hihetlen mértékű izotrópiájának és az anyag homogén eloszlásának? Valóban ilyen speciális kezdeti feltételekkel indult az Univerzum története, vagy ez csupán egy termalizációs folyamat eredménye? A standard kozmológiai modellben azonban az ősrobbanás utáni 370 000 év nem lehetett elég a termalizációra, mert az Univerzum sokkal nagyobb, mint amekkora távolságon belül az anyag ennyi idő alatt termalizálódhat. Ez az ún. horizont-probléma, amit az inflációs kozmológiai modellek az Univerzum nagyon korai szakaszában egy óriási mértékű tágulással (*infláció*) próbálnak magyarázni (egy hipotetikus és a részecskefizikai modellekbe nem illeszkedő mező feltételezésével). A másik lehetőség, hogy elfogadjuk: az Univerzum tágulása *valóban* egy ilyen kivételes (nek tűnő) állapotból indult. Roger Penrose (2004, 2010) érvelése szerint ugyanis, ha a nagyfokú homogenitás termalizáció eredménye volna, akkor a kezdeti állapot kisebb entrópiájú, azaz *még ennél is speciálisabb* kellett volna hogy legyen! A termikus állapot ugyanis az összes lehetséges makroállapot között a legvalószínűbb.

Einstein még Hubble megfigyelései előtt kereste a téregyenletei kozmológiai megoldásait. Az akkori elképzeléseknek megfelelően az Univerzumot statikus megoldással próbálta modellezni. Az Einstein-egyenleteknek azonban ilyen statikus kozmológiai megoldása nincs. Ezért Einstein kissé módosította a térgyenleteit, az egyenletek bal oldalához hozzáadva egy  $\Lambda_{gab}$  extra tagot, ahol  $\Lambda$  a koz-

mológiai állandó. Hubble megfigyelései, illetve a Fridman-megoldás nyomán a kozmológiai tag szükségtelennek tűnt. A távoli szupernóva-robbanások megfigyelt fényességének a vöröseltolódás függvényében történt elemzése azonban azt mutatta, hogy – a várakozásokkal ellentétben – az Univerzum tágulásának a sebessége *nő* (Saul Perlmutter, Adam Riess és Brian Schmidt, 2011. évi fizikai Nobel-díj). Ezt vagy egy furcsa tulajdonságú, például *negatív nyomású* anyag (ún. sötét energia), vagy az Einstein-egyenletekben mégiscsak jelenlevő,  $\Lambda = 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$  értékű kozmológiai állandó okozza. A kozmológiai állandó *pozitivitása* az alapja Penrose (2010) konformisan ciklikus kozmológiai modelljének is.

### Nyitott kérdések

Habár nem ismert az általános relativitáselmélettel nem kompatibilis jelenség vagy kísérleti tény, számos kérdés vár még válaszra. Ezek sokszor a fizika más ágaihoz való viszony kapcsán fogalmazódnak meg.

*Általános relativitáselmélet – termodinamika:* Ha egy nagy entrópiájú, de nagyon kis tömegű testet dobunk egy fekete lyukba, akkor a lyuk eseményhorizontjának felszíne nem nő annyival, mint amennyi kompenzálhatná a test külvilág számára elvesző entrópiáját. Ezt elkerülendő, Jacob Bekenstein lokalizált rendszerek entrópiájára abszolút felső korlát létét posztulálta a rendszer lineáris mérete és belső energiája segítségével. Kérdés azonban a korlát pontos matematikai alakja, és annak bizonyítása realiztikus fizikai rendszerekre. A gravitáció és a termodinamika egy további lehetséges kapcsolatára utal, hogy az Einstein-egyenletek termodinamikai megfontolásokból is származtathatók. A termodinamikai fogalmak és analógiák szisztematikus felbukkanása a gravitáció kapcsán jelen-

ti-e azt, hogy e két diszciplína között mélyebb kapcsolat van, hogy például a gravitáció csupán egy alapvetően *effektív*, termikus jelenség?

*Általános relativitáselmélet – elemi részek fizikája:* Ha a gravitáció az általános relativitáselmélet szellemének megfelelően valóban *nem* kölcsönhatás, hanem téridő-geometria, akkor mi lehet a gravitáció (univerzális) szerepe az elemi részek egy egyesített modelljében? Például az, hogy a konform-invarianciát sértő csatolásával (a Higgs-bozonhoz hasonló módon) tömeget generáljon, csak jóval nagyobb energiáskálán? Vagy a gravitáció inkább az alapvető töltött részecskék pontszerűségéből fakadó divergenciák természetes regularizátora?

*Általános relativitáselmélet - kvantumelmélet:* Pragmatikus szempontból (a jelenlegi gyorsítóenergiák mellett) a klasszikus tér- és időfogalmunk a kvantum folyamatok leírásában még kielégítőnek tűnik; mint ahogy olyan jelenségeket sem ismerünk, amelyek gravitációs környezetben a kvantumelmélet módosítását tennék szükségessé. Saját területén mindkét elmélet nagyszerűen „működik” a másik jelenségcsoporttól függetlenül. A két elmélet azonban strukturálisan és koncepcionálisan is nagyban különbözik egymástól, s e különbségek például erős külső gravitációs térben levő kvantumrendszerek leírása során már jelentkeznek. Például kérdés, hogy nagy tömegű kvantummechanikai rendszerek spontán lokalizációjában, a hullámfüggvény *objektív* redukációjában játszik-e szerepet a gravitáció. Itt a gravitáció a kvantummechanikai unitaritás objektív sérülését eredményezné. Erős külső gravitációs térben, például fekete lyuk környezetében már a mezők kvantumelméletének a *definiálása* is kérdéses. A Poincaré-szimmetria hiánya a kvantumtérelméletekben szükségképpen *kevert* állapotot

kat eredményez. Ennek speciális, *termikus* állapotot adó extrém formája a Hawking-sugárzás.

E példák alapján gondolhatjuk-e, hogy a gravitáció kvantumelméletben játszott szerepe a kvantum tiszta állapotok *dekoherálása*? Ma is vita tárgya, hogy a Hawking-sugárzásban fellelhetők-e olyan korrelációk, amelyek egy tiszta állapotú kvantum rendszer gravitációs összeomlása során kialakuló fekete lyuk környezetéből származnak, és amelyek segítségével a kezdeti tiszta állapot rekonstruálható, vagy az unitaritás valóban durván sérül a fenti folyamatban.

*A nagy rejtély, a kvantumgravitáció:* Ismert, hogy egy olyan elmélet, amelyben az anyagot kvantumosan, a gravitációt pedig klasszikus módon írjuk le, nem önkonzisztens. Tehát az Einstein-féle gravitációelmélet (és ezzel egy időben valószínűleg a jelenlegi kvantumelmélet is) módosítandó, és a kvantumgravitációs jelenségek tipikusan  $1,6 \times 10^{-33}$  cm hosszúság-,  $5,4 \times 10^{-44}$  s idő- és  $2,2 \times 10^{-5}$  g tömegskálán várhatók. Azonban két példát is ismerünk arra, hogy egy klasszikus elmélet hogyan viszonul a mélyben rejlő kvantumelmülethez: ahogy a Maxwell-féle klasszikus elektrodinamika viszonyul a kvantumelektrodinamikához, és ahogy a fenomenologikus termo- és hidrodinamika a (kvantum) statisztikus fizikához. Az előbbi esetben a gravitációt *alapvető* jelenségnek gondoljuk, és annak belső, fizikai szabadsági fokait „kvantáljuk”; míg az utóbbiban a gravitáció csupán egy *effektív* jelenségcsoport, például az akusztikához hasonlóan. Kérdés, hogy a gravitáció melyik csoportba tartozik.

A gravitáció egyetlen jól definiált kvantumelméletét sem sikerült eddig megalkotni. Egy ilyen kvantumelmélet bizonyosan nem definiálható perturbatív módon, mert az már

ismert módon *nem renormálható*. Az eddigi kvantumgravitációs próbálkozások sikertelenségének hátterében azonban nemcsak technikai nehézségek állnak, hanem az eddigi elhanyagolt koncepcionális problémák mind felbukkannak. Az egyik legismertebb az *idő problémája*: az idő mást jelent az általános relativitáselméletben és a szokásos kvantumelméletben, és míg az előbbiben a metrikus tartalommal bíró idő a dinamikában *születik*, addig a kvantumelmélet a dinamikához *igényli* külső, a priori adott metrikus idő létét. Az ilyen jellegű koncepcionális kérdések tisztázása nélkül nem látszik lehetségesnek a gravitáció kvantumelméletének megalkotása.

Ha a gravitáció csupán effektív jelenség, akkor az idő és tér csak makroszkopikus közelítő fogalmak, és tág tere nyílik a téridő mikroszkopikus szerkezetére vonatkozó spekulációknak. A különböző próbálkozások jó összefoglalója található Penrose (2004) művében.

#### *Jelentősége, tanulságai és filozófiai vonatkozásai*

Az általános relativitáselmélet egy tisztán elméleti jellegű problémából, a gravitációs jelenségek és a speciális relativitáselmélet kompatibilitásának igényéből született. A Merkúr perihéliumvándorlásának problémájától tekintve nem voltak olyan jelenségek, kísérletek, amelyek kényszerítettek volna az általános relativisztikus gravitációelmélet kidolgozására. Így a megoldás is tisztán elméleti jellegű, amelyben filozófiai elvek (elsősorban a pozitívizmus és Ernst Mach hatása) és kon-

cepcionális kérdések alapvető szerepet játszottak. Ennek következtében az eredmény sem mentes a mély filozófiai következményektől.

Az új elmélet gyökeresen átértelmezte a tér és idő jelentését, még a speciális elmülethez képest is. Az idő és a térbeli távolság nem csupán „relatív”, azaz megfigyelőfüggő, hanem azok egy *dinamikai változóból* épülnek föl a téregyenletek megoldása *után*. A térbeli távolság és az idő is dinamikai folyamatban *születik*. Lánosz Kornél (1978) szerint ezzel az eredménnyel Einstein el is szakadt a pozitívizmustól, és gondolkodásmódjára egyre inkább az univerzális elvekben való hit, egyfajta platonizmus lett jellemző.

Az általános relativitáselmélet megszületése történetének van tudománypolitikai tanulsága is: nemcsak azok a kutatások legitimek, amelyek célja még nem értett kísérleti tények, illetve jelenségcsoportok értelmezése, hanem azok a tisztán elméleti kutatások is, amelyek fizikai elméletek belső szerkezetére vonatkoznak, vagy az önmagukban „jól működő” elméletek fogalmi rendszerei közötti *inkompatibilitásokat* próbálják feloldani. Ilyen vizsgálat vezetett a sugárzást adó extra tag beillesztéséhez a Maxwell-elméletbe, és ilyenek a kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet fogalmi rendszereinek összebékítésére irányuló próbálkozások is. Ha van kutatói attitűd, amely Einstein szellemiségéhez közel áll, akkor ez bizonyosan.

**Kulcsszavak:** *általános relativitáselmélet, téridő, gravitáció, ekvivalenciaelv, Albert Einstein*

#### IRODALOM

- Ashtby, Neil (2003): Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*. 6, 1; DOI: 10.12942/lrr-2003-1 • <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1/>
- Ashtekar, Abhay – Geroch, Robert (1974): Quantum

Theory of Gravitation. *Reports on Progress in Physics*. 37, 10, 1211–1256.

- Einstein, Albert (1911): Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*. 35, 898–908. • <http://www.itp.kit.edu/~sahlmann/pdfs/propagation%20of%20light.pdf>



- Einstein, Albert (1915): *Die Feldgleichungen der Gravitation*. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. (Part 2), 844–847. • [http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get\\_file?pdfs/SPAW/1915/1915SPAW.....844E.pdf](http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/get_file?pdfs/SPAW/1915/1915SPAW.....844E.pdf)
- Einstein, Albert (1916): Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*. 49, 769–822. • [http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1916\\_49\\_769-822.pdf](http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1916_49_769-822.pdf)
- Einstein, Albert (1971): *Válogatott tanulmányok*. Gondolat, Budapest
- Hawking, Stephen W. – Ellis, George F. R. (1973): *The Large Scale Structure of Spacetime*. Cambridge University Press, Cambridge
- Lánczos Kornél (1978): *Einstein évtizede 1905-1915*. Gondolat, Budapest
- Misner, Charles – Thorne, K. P. – Wheeler, J. A. (1973): *Gravitation*. Freeman, San Francisco
- Pais, Abraham (2005): *The Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press, Oxford
- Penrose, Roger (1972): *Techniques of Differential Topology in Relativity*. SIAM, Philadelphia
- Penrose, Roger (2004): *Road to Reality*. Jonathan Cape, London
- Penrose, Roger (2010): *Cycles of Time*. The Bodley Head, London
- Wambsgenass, Joachim (1998): Gravitational Lensing in Astronomy. *Living Reviews in Relativity*. 1, 12, <http://www.livingreviews.org/lrr-1998-12>
- Will, Clifford M. (2014): The Confrontation between General Relativity and Experiments. *Living Reviews in Relativity*. 17, 4 • <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2014-4/>  
URL<sub>1</sub> [http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_relativity](http://en.wikipedia.org/wiki/General_relativity)  
URL<sub>2</sub> [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_scientific\\_publications\\_by\\_Albert\\_Einstein](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_scientific_publications_by_Albert_Einstein)

