

Fizikatörténet

Az általános relativitáselmélet története

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

v 1.5

A speciális relativitáselmélet határai

Mitől „speciális” a speciális relativitáselmélet?

Attól, hogy csak az inerciarendszerekkel foglalkozik: egyenes vonalú egyenletes mozgást vizsgál.

„Általános” relativitáselmélet: a gyorsuló mozgásokat is le kellene írni.

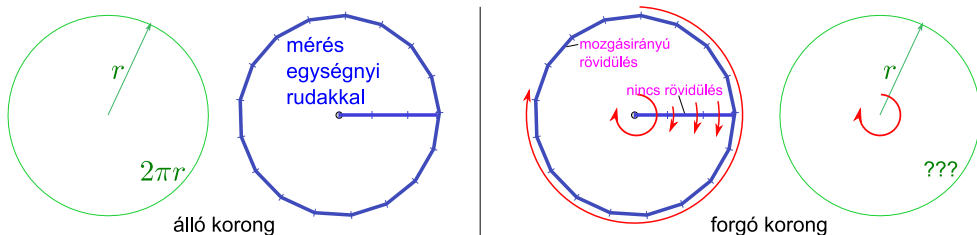
A speciális relativitáselmélet határai

Mitől „speciális” a speciális relativitáselmélet?

Attól, hogy csak az inerciarendszerekkel foglalkozik: egyenes vonalú egyenletes mozgást vizsgál.

„Általános” relativitáselmélet: a gyorsuló mozgásokat is le kellene írni.

Gondok a gyorsuló mozgással:



Az r sugarú forgó korong kerülete nem $2\pi r$?

Forgás: gyorsuló mozgás. Felborulnak a geometriai törvények??

A párhuzamossági axióma

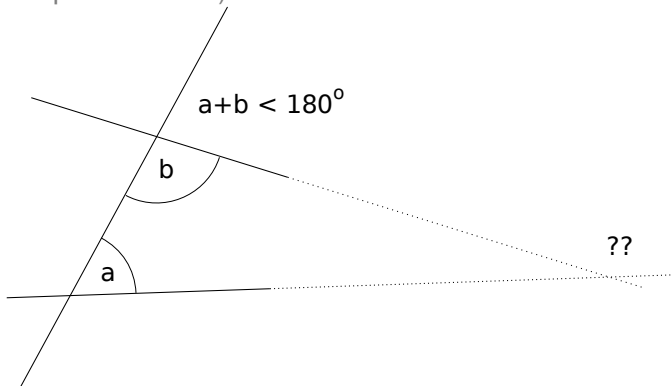
AFKT 5.2.6

AFKT 5.2.7

Eukleidész geometriája 2000 évig megingathatatlannak tűnt.

Egy bizonytalan pont, amit sokan vizsgálgattak: a „**párhuzamossági axióma**”.

(Pontosabban: az 5. posztulátum.)

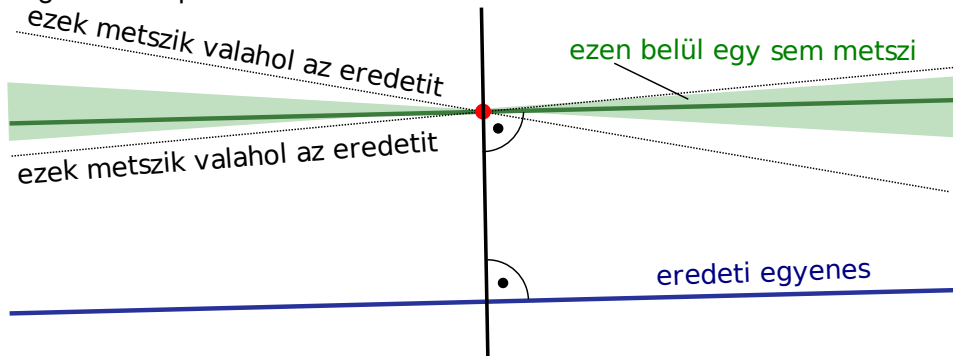


Baj ezzel: csak nagyon messzire elmenve ellenőrizhető.

Bolyai János (1800–1860) geometriája

Bolyai János, 1832: az első teljes geometria, mely nem-eukleidészi.

Az 5. posztulátum helyett: egy egyenessel egy rajta kívül fekvő ponton keresztül végtelen sok párhuzamos húzható.



Ez elég hihetetlen! De ezt feltételezve is ellentmondásmentes geometria építhető fel.
Nem lehet véges méretben ellenőrizni!

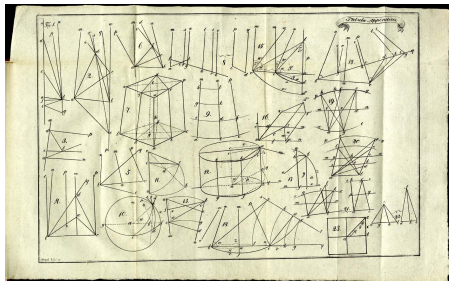
Bolyai János: Appendix

Bolyai János: csodagyerekként indult, de nem mehetett elméleti pályára, hanem hadmérnök lett.

Önszorgalomból foglalkozott matematikával, nem ideális körülmények között.

Legnagyobb eredménye: **teljes, nem-eukleidészi rendszer felépítése**.

Eredményeit csak egy nagyobb mű függelékében tudta kiadni: „**Appendix**”.



1820–23 közti eredmények, 1832-es kiadás.

Általános geometriai megközelítés: mi következne abból, ha nem lenne igaz az 5. posztulátum? Bolyai felveti, hogy ez fontos lehet a fizikai tér leírásában is.

Nem kapja meg a kellő elismerést nemzetközi szinten, csak utólag... :-)

Nem-eukleidészi geometriák

Bolyai, Lobacsevszkij, Gauss, Riemann, Poincaré: **ellentmondás-mentes geometriai rendszerek felépítése.**

Nem-eukleidészi geometriák

Bolyai, Lobacsevszkij, Gauss, Riemann, Poincaré: **ellentmondás-mentes geometriai rendszerek felépítése.**

Hogyan lehet ezt elképzelni? Gondolkozzunk általánosabban!

Ne rögzítsük mereven az „egyenes” és egyéb fogalmakat, csak azt feltételezzük róluk, amit az axiómák tényleg előírnak.

Egyik szemléltetés: **gömbült felületek geometriája.**

Nem-eukleidészi geometriák

Bolyai, Lobacsevszkij, Gauss, Riemann, Poincaré: **ellentmondás-mentes geometriai rendszerek felépítése.**

Hogyan lehet ezt elképzelni? Gondolkozzunk általánosabban!

Ne rögzítsük mereven az „egyenes” és egyéb fogalmakat, csak azt feltételezzük róluk, amit az axiómák tényleg előírnak.

Egyik szemléltetés: **gömbült felületek geometriája.**

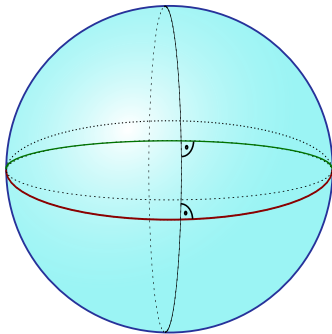
Gömbi geometria:

A Föld felszínén két pont közt húzható legrövidebb görbe nevezhető „egyenes”-nek, de ez kívülről nézve egy főkör.

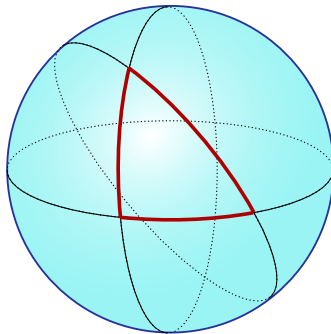
Ezek nyilván egész más törvényeknek tesznek eleget.

Pl. a gömb felszínén **nincs két párhuzamos „egyenes”.**

Gömbi geometria



nincs párhuzamos!



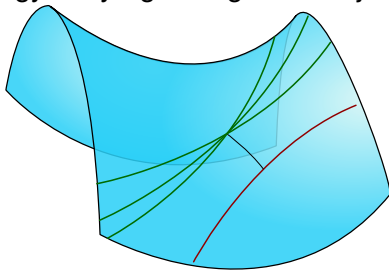
belső szögösszeg $> 180^{\circ}$

Ismerős a földmérésből, csillagászatból. (Gömbi trigonometria: középkori arab tudósok.)

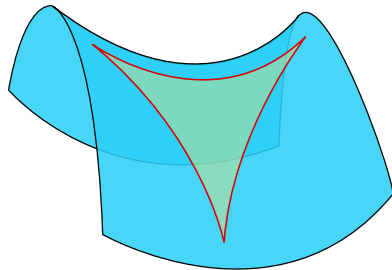
Lapos lények egy gömb felszínén ilyen geometriát találnának ki.

Hiperbolikus geometria

Például egy ló nyergének geometriája ilyen.



sok párhuzamos!



belső szögösszeg $< 180^{\circ}$

Itt egy egyeneshez egy külső ponton keresztül végtelen sok „párhuzamos” (azaz az egyenest nem metsző) egyenes húzható.

Általános geometriák



Az előzőekhez hasonlóan **általános görbült síkok és terek geometriája is leírható.**

Általános nem-eukleidészi geometriák: Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826–1866).

Olyan görbült terek és síkok geometriája, melyek helyről-helyre máshogyan görbülnek.

A gravitáció okának keresése

Newton gravitációs törvénye sikeres, de az okát nem tudja senki.

A gravitáció okának keresése

Newton gravitációs törvénye sikeres, de az okát nem tudja senki.

Amire Newton is felfigyelt: **a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége.**

Súlyos tömeg: ami azt méri, mennyire hat egy testre a gravitáció.

Tehetetlen tömeg: a gyorsítással szembeni ellenállást írja le.

$$\underline{F} = m_s \cdot \gamma M / r^2.$$

$$\underline{F} = m_t \cdot \underline{a}.$$

Newton: $m_s = m_t$. Megjegyzi, hogy ennek okát nem tudja megadni.

A gravitáció okának keresése

Newton gravitációs törvénye sikeres, de az okát nem tudja senki.

Amire Newton is felfigyelt: **a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége.**

Súlyos tömeg: ami azt méri, mennyire hat egy testre a gravitáció.

Tehetetlen tömeg: a gyorsítással szembeni ellenállást írja le.

$$\underline{F} = m_s \cdot \gamma M / r^2.$$

$$\underline{F} = m_t \cdot \underline{a}.$$

Newton: $m_s = m_t$. Megjegyzi, hogy ennek okát nem tudja megadni.

Göttingeni Egyetem, 1880-as évek: pályázat a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűség minél pontosabb mérésére.

Cél: Vagy cáfolni $m_s = m_t$ -t, vagy a lehető legtöbb tizedesjegyre igazolni.

Csillagászat, kozmológia

Csillagászati eredmények a 19. szd-ban:

- a bolygók keletkezésének első elméletei
- első csillagtávolság-mérések
- a Tejútrendszer kezdeti felmérése
- geológia: a Föld kora százmillió vagy milliárd években mérhető
-

Csillagászat, kozmológia

Csillagászati eredmények a 19. szd-ban:

- a bolygók keletkezésének első elméletei
- első csillagtávolság-mérések
- a Tejútrendszer kezdeti felmérése
- geológia: a Föld kora százmillió vagy milliárd években mérhető
-

Az egész Univerzumról való fizikai gondolkodás kezdetei: **Kozmológia**.

Ernst Mach (1838–1916)



- Nagy sebességű lövedékek, hangsebességnél gyorsabb mozgások tanulmányozása.
Mach-szám: sebesség/hangsebesség arány. („Ez a vadászgép képes 2,5 mach-hal repülni.”)
- Tudományfilozófiai kérdések tanulmányozása.

Mach: **a fizika nem a valóságról beszél csak a valósággal összhangban levő törvényszerűségeket, modelleket fedez fel.**

Pl. Newton-tv-ek, Hamiltoni mechanika: melyik igaz?
Mindegyik!

Mach-elv: az inerciarendszert az Univerzum anyaga jelöli ki, Newton II. törvénye a többi testtel való kölcsönhatás eredménye.

Nagy hatás Einsteinre.

Az általános relativitáselmélet alapötlete

Einstein ötlete: **A súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége nem véletlen, hanem abból fakad, hogy a gravitáció egy geometriai jellegű hatás.**

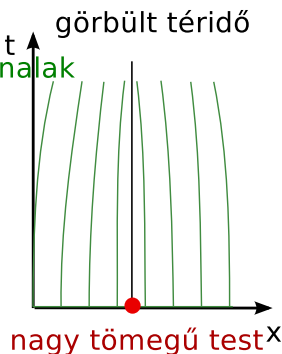
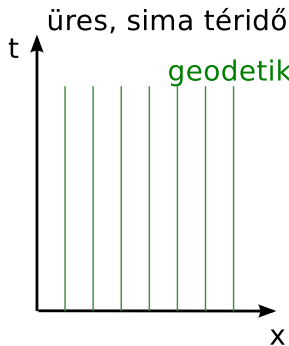
Alap: Eötvös Loránd méréssorozata!

A téridő görbültsége

Ha egy helyen görbül a tér, azért még nem fog elindulni az odatett, nyugvó kis részecske.

Einstein ötlete:

- a testek a téridőt görbítik meg
- a görbült téridőben a magukra hagyott testek „a lehető leg-egyenesesebb” vonalakon mozognak, de ez nem lesz egyenes!



Egy szemléltetés

Egy rugalmas, vízszintes lapon az elgurított kis golyó egyenesen megy.
Ha a közepét lenyomjuk (görbítjük a teret), az elgurított golyó pályája elgörbül.

(Vigyázat! Ez csak egy hasonlat, egy modell, nem pontos fizikai elmélet!)

Az általános relativitás elmélete

Einstein 1915: megadja, pontosan hogyan görbítik a testek a téridőt.

Az egyenletek rendkívül bonyolultak.

Az általános relativitás elmélete

Einstein 1915: megadja, pontosan hogyan görbítik a testek a téridőt.

Az egyenletek rendkívül bonyolultak.

1915-ben ismert tények, amiket az elmélet megmagyarázott:

- a gravitáció oka: a téridő görbültsége
- a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége
- a bolygópályák elfordulása: kis eltérések a bolygópályákban a newtoni elmélettől

Az általános relativitás elmélete

Einstein 1915: megadja, pontosan hogyan görbítik a testek a téridőt.

Az egyenletek rendkívül bonyolultak.

1915-ben ismert tények, amiket az elmélet megmagyarázott:

- a gravitáció oka: a téridő görbültsége
- a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége
- a bolygópályák elfordulása: kis eltérések a bolygópályákban a newtoni elmélettől

Következmények, melyeket csak utólag igazoltak:

- a fény gravitációs térben elhajlik
- erős gravitációs térben lassabban telik az idő
- gyorsan mozgó, nagy tömegű testek gravitációs hullámokat keltenek
- geodetikus precesszió és keret-sodródás

A fény gravitációs elhajlása

Einstein megjósolja. Más elmélet is ad ilyen eredményt, de nem ugyanebben a mértékben.

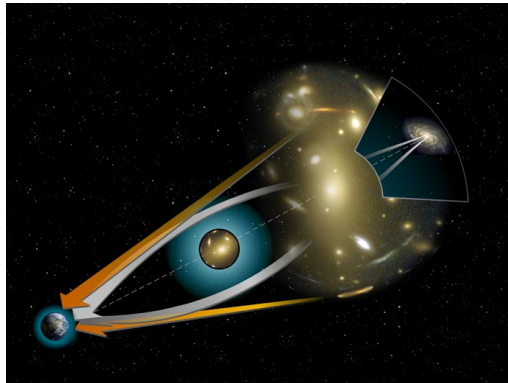
1919: Napfogyatkozáskor a Naphoz közel látszó csillagok képe az ált. rel. elmélet szerint tolódik el.

Galaxisok közt erősebb a hatás, csak erős távcső szükséges.

Distant Galaxy Lensed by Cluster Abell 2218 HST•WFPC2•ACS



ESA, NASA, J.-P. Kneib (Caltech/Observatoire Midi-Pyrénées) and R. Ellis (Caltech) STScI-PRC04-08



Gravitációs időlassulás és -késés

Az egyenletek szerint **gravitációs térben az idő lassabban telik.**

Kísérleti ellenőrzés:

- Erős gravitációjú csillagok fénye kicsit a vörös (alacsonyabb frekvencia) felé tolódik el.
- Magas épületben levő atomórák kicsit lassabban járnak.

Gravitációs időlassulás és -késés

Az egyenletek szerint **gravitációs térben az idő lassabban telik.**

Kísérleti ellenőrzés:

- Erős gravitációjú csillagok fénye kicsit a vörös (alacsonyabb frekvencia) felé tolódik el.
- Magas épületben levő atomórák kicsit lassabban járnak.

Gravitációs időkésés: Erős gravitációs téren keresztül utazó fény kicsit lassul.

Ellenőrzés: távoli űrszondák rádiójelei kicsit késnek, mikor egy bolygó mellett haladnak el.

Gravitációs hullámok

Az egyenleteknek vannak hullám megoldásai is.

Vigyázat: ezek a téridő szerkezetében levő hullámok!

Indirekt bizonyíték: szoros kettőscsillagok keringésideje fokozatosan csökken.

Ok: gravitációs hullámok energiát vonnak el.

A közvetlen kimérés bonyolult:

- Erős forráshoz nagy tömegű testeknek kell nagy gyorsulással mozogniuk.
- Nagyon kicsi, periodikus hosszváltozásokat okoz.

A gravitációs hullámok kimutatása: 2015.

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory.

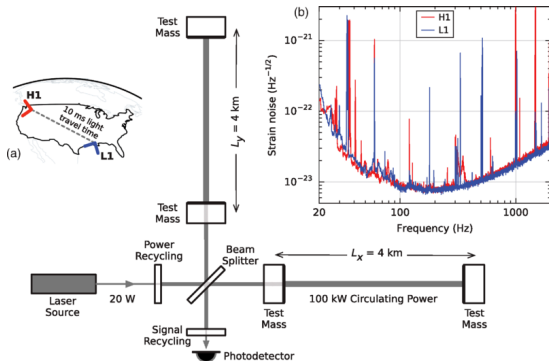
A Michelson-interferométer sokszoros továbbfejlesztése: több km távolságon 10^{-15} m nagyságrendű változások kimutatása.

Sok technikai probléma: precíz megépítés, precíz lézerek, zavarok kiszűrése, ...

Első sikeres észlelés: 2015.

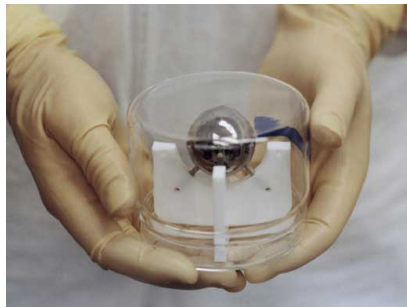
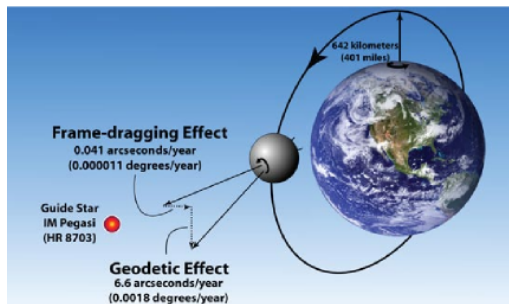
Azóta több hasonló berendezésből álló hálózat épült ki \Rightarrow a gravitációs hullámok irányát is mérni tudjuk.

Az egyik legperspektivikusabb csillagászati észlelési technika.



Geodetikus precesszió és keret-sodródás

- Ha sokszor körbepölyjünk a Földet, kicsit más irányba fog állni egy forgó gömb tengelye.
- A forgó Föld kicsit magával ragadja a téridőt, ami kis irányváltásokat okoz.



Gravity Probe-B (2004–2005): Kísérletsorozattal pontosan igazolva!

Extrém precíz mérés technika: 10 nm pontosságú, ping-pong labda méretű gömb, folyékony héliumban forgatva, ...

A fekete lyukak

Általános relativitáselmélet: elég nagy tömegsűrűség esetén a geodetikusok annyira begörbülnek, hogy a fénysebességgel sem juthatunk ki egy korlátos térrészből.

Ekkor abból a részből nem juthat ki információ!

A fekete lyukak

Általános relativitáselmélet: elég nagy tömegsűrűség esetén a geodetikusok annyira begörbülnek, hogy a fénysebességgel sem juthatunk ki egy korlátos térrészből.

Ekkor abból a részből nem juthat ki információ!

Egyszerűbben, de nem precízen:

Minden bolygónak van egy „szökési sebessége”, mely az attól való elszakadáshoz kell.
A Föld felszínén pl. ez 11,2 km/s.

Ha a szökési sebesség nagyobb lesz, mint c , semmi nem juthat onnan ki!

A fekete lyukak

Általános relativitáselmélet: elég nagy tömegsűrűség esetén a geodetikusok annyira begörbülnek, hogy a fénysebességgel sem juthatunk ki egy korlátos térrészből.

Ekkor abból a részből nem juthat ki információ!

Egyszerűbben, de nem precízen:

Minden bolygónak van egy „szökési sebessége”, mely az attól való elszakadáshoz kell.
A Föld felszínén pl. ez 11,2 km/s.

Ha a szökési sebesség nagyobb lesz, mint c , semmi nem juthat onnan ki!

Einstein előtt is felvetették ilyen testek létezését, de csak az ált. rel. elmélet tudta őket leírni.

Fekete lyukak és szingularitások

A fekete lyukak közelében **a téridő-görbület extrém értékeket vesz fel.**

A fekete lyukhoz közelítő megfigyelő esetén:

- kívülről nézve végtelenül belassul az idő
- végtelenhez tartó „szétszakító erők” (árapály-erők) lépnek fel
- ...

A végtelen mindig gyanús! Lehet, hogy valamilyen más folyamat ebbe beleszól.

Sok lehetséges hatás, pl. a fekete lyukak „párologása” vár tisztázásra még.

Ami biztos: **Nem lehet olyan űrhajót építeni, ami átrepül egy ilyen szingularitáson.**

Az Univerzum felfúvódása

Einstein:

- nem talált állandó állapotú megoldást egyenleteire
- pedig azt hitte: az Univerzum állandó állapotú

Az Univerzum felfűvódása

Einstein:

- nem talált állandó állapotú megoldást egyenleteire
- pedig azt hitte: az Univerzum állandó állapotú

Először teljesen mesterséges tagot vezetett be, hogy legyen állandó állapotú megoldás!

Később kiderült: az Univerzum tényleg nem állandó állapotú.

Az Univerzum felfűvódása

Einstein:

- nem talált állandó állapotú megoldást egyenleteire
- pedig azt hitte: az Univerzum állandó állapotú

Először teljesen mesterséges tagot vezetett be, hogy legyen állandó állapotú megoldás!

Később kiderült: az Univerzum tényleg nem állandó állapotú.

Az Univerzum tágulása mára biztossá vált, de a részletekben még várhatók meglepő felfedezések.

(Pl. lehet, hogy igen nagy távolságokon a gravitáció taszító hatásúvá válik.)

Az Univerzum felfúvódása

Einstein:

- nem talált állandó állapotú megoldást egyenleteire
- pedig azt hitte: az Univerzum állandó állapotú

Először teljesen mesterséges tagot vezetett be, hogy legyen állandó állapotú megoldás!

Később kiderült: az Univerzum tényleg nem állandó állapotú.

Az Univerzum tágulása mára biztossá vált, de a részletekben még várhatók meglepő felfedezések.

(Pl. lehet, hogy igen nagy távolságokon a gravitáció taszító hatásúvá válik.)

Ez az egyetlen terület, ahol úgy tűnik, az általános relativitáselmélet nem magyarázza meg az összes megfigyelést.

Összegzés

A konkrét fizikai eredményeken túl mutató tanulságok:

1. Egy logikailag jól felépített elmélet olyan dolgokat is jól mond meg előre, melyek meglepőek és az elmélet megalkotásának pillanatában nem ismertek.
2. Egy hétköznapi tapasztalatokkal látszólag ellentmondó, de következetes matematikai elmélet (nem-eukleidészi geometriák) lehet, hogy mégiscsak a valóságról szól.
3. Sok fogalom, melyet eleve adottnak veszünk, valójában mások függvénye: az anyag eloszlása határozza meg a tér és idő geometriáját.

Összegzés

A konkrét fizikai eredményeken túl mutató tanulságok:

1. Egy logikailag jól felépített elmélet olyan dolgokat is jól mond meg előre, melyek meglepőek és az elmélet megalkotásának pillanatában nem ismertek.
2. Egy hétköznapi tapasztalatokkal látszólag ellentmondó, de következetes matematikai elmélet (nem-eukleidészi geometriák) lehet, hogy mégiscsak a valóságról szól.
3. Sok fogalom, melyet eleve adottnak veszünk, valójában mások függvénye: az anyag eloszlása határozza meg a tér és idő geometriáját.

Einstein általános relativitáselmélete hihetetlenül sikeres! **Sok fizikust zavar is ez:**

- Az új és új megfigyelések jól leírhatók Einstein elméletével.
(Grav. hullámok, keretsodródás, ...)
- Eközben az ált. rel. elmélet nem „kompatibilis” a kvantummechanikával.
(Lásd később.)