

Fizikatörténet

Az általános relativitáselmélet története

Horváth András
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

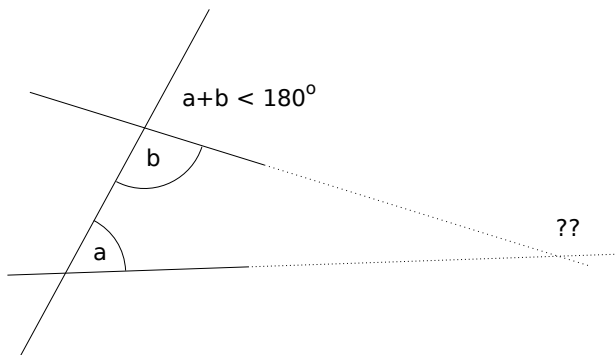
v 1.0

A párhuzamossági axióma

AFKT 5.2.6

AFKT 5.2.7

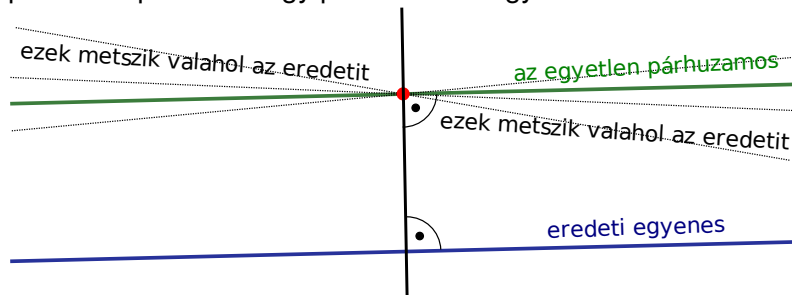
Euklidesz geometriája 2000 évig megingathatatlanak tűnt.
Egy bizonytalan pont, amit sokan vizsgálgattak: a “**párhuzamossági axióma**”. (Pontosabban: az 5. posztulátum.)



Baj ezzel: csak nagyon messzire elmenve ellenőrizhető.

Egyszerűbb alak

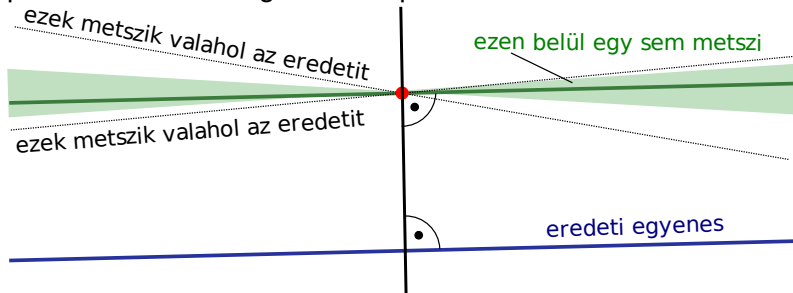
Az előzővel egyenértékű alak: egy egyenessel egy rajta kívül fekvő ponton át pontosan egy párhuzamos egyenes húzható.



Ez sem ellenőrizhető kis méretekben.

Bolyai János (1800–1860) geometriája

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

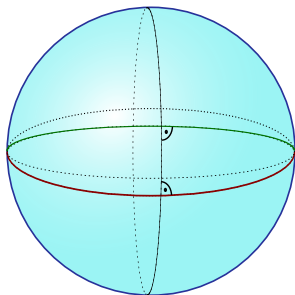
Nem-euklideszi geometriák

Az 1800-as években sokan kezdtek el ezzel foglalkozni, pl. Lobacsvszkij, Gauss, Riemann, Poincaré.
Hogy lehet ezeket elképzelni?

Ne rögzítsük mereven az “egyenes” és egyéb fogalmakat, csak azt feltételezzük róluk, amit az axiómák tényleg előírnak.
Egyik szemléltetés: **görbült felületek geometriája.**

Pl. 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 párhuzamos egyenes.**

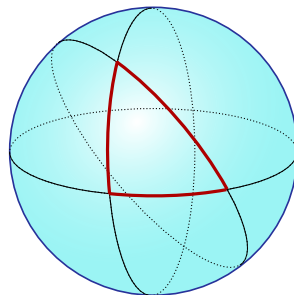
Gömbi geometria



nincs párhuzamos!

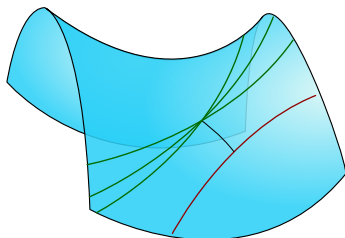
Ismerős a földmérésből.

Lapos lények egy gömb felszínén ilyen geometriát találnának ki.

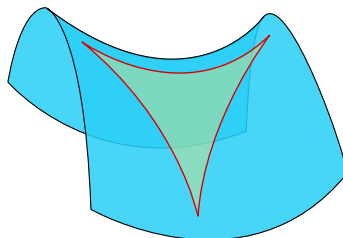


belső szögösszeg $> 180^{\circ}$

Hiperbolikus geometria



sok párhuzamos!



belső szögösszeg $< 180^{\circ}$

Például egy ló nyergének geometriája ilyen.

Általános geometriák

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

Általános geometriák

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

Kérdés: van-e ennek köze a valósághoz?

Közvetlen mérések: a tér euklideszinek tűnik.

Friedrich Riemann ötlete: **a tér geometriáját az anyag határozza meg?**

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.

Különlegesség: **a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége.**

$\underline{F} = m \cdot \gamma M/r^2$: itt m a testek gravitációra való érzékenységét írja le: **súlyos tömeg.**

$\underline{F} = m \cdot \underline{a}$: itt m a gyorsítással szembeni ellenállást írja le: **tehetetlen tömeg.**

Nincs semmi ok, miért azonos ez a kettő!

Newton észreveszi, tudja, hogy fontos, de okát adni nem tudja.

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

Nyertes: **Eötvös Lóránd** és munkatársai.

A súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége

Eötvös Lóránd és társai: 1908-ra 9 tizedesjegy pontossággal igazolták.

Speciális gravitációs mérés technika kifejlesztése:

- normál testek gravitációjának mérése
- súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűségének vizsgálata
- kis gravitációs változások mérése: geofizika, olajkutató

Az 1910-es évekre mindenki elfogadja, hogy a súlyos és tehetetlen tömeg egyenértékűsége természeti törvény.

Kozmológia

Csillagászati eredmények a 19.szdz-ban:

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

Kozmológia

Csillagászati eredmények a 19.szdz-ban:

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

Az egész Univerzumról való fizikai gondolkodás kezdetei.

Ernst Mach: Az inerciarendszert az Univerzum anyageloszlása határozza meg.

Olbers-paradoxon: Egy végtelen és mindenütt egyforma felépítésű Univerzumban nem lenne sötét az éjszaka!

Ernst Mach (1838–1916)

- Nagy sebességű lövedékek, hangsebességnél gyorsabb mozgások tanulmányozása.
- Tudományfilozófiai kérdések tanulmányozása.

Szerinte a fizika nem a valóságról beszél csak a valósággal összhangban levő törvényszerűségeket fedez fel. (Pl. Newton-tv-ek, Hamiltoni mechanika: melyik igaz? Mindegyik!)

Mach-elv: az inerciarendszert az Univerzum anyaga jelöli ki, Newton II.tv.-e a többi testtel való kölcsönhatás eredménye. Nagy hatás Einsteinre.

Alapötlet

A. Einstein ötlete:

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

Alapötlet

A. Einstein ötlete:

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

Gondolakísérlet: Egy zárt kabinban vagyunk. Az elejtett testek lefelé esnek azonos gyorsulással. Nem tudjuk eldönteni, melyik eset áll fenn:

- A kabin áll a talajon, és a Föld gravitációja hat.
- A kabin egy mindentől távol levő űrhajóban van, de az gyorsul.

Röviden: **a gravitáció megkülönböztethetetlen a gyorsulástól.**

Alap: Eötvös Lóránd mérésorozata!

A téridő görbültsége

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

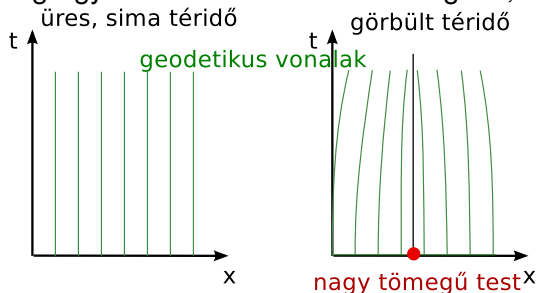
Einstein ötlete: **a testek a téridőt görbítik meg.**

A 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.**

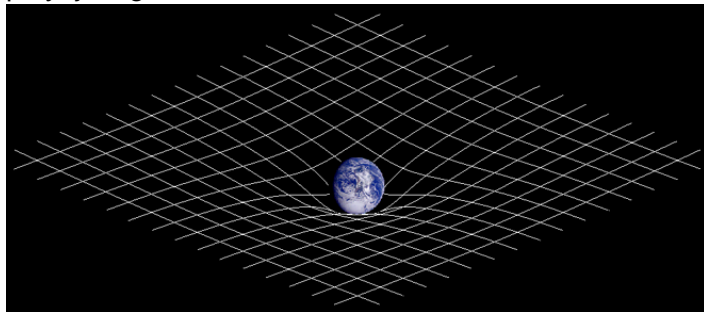
A görbült téridőben a magukra hagyott testek “a lehető leg-egyenesebb” vonalakon mozognak, de ez nem lesz egyenes!



Egy szemléltetés

Egy rugalmas, vízszintes lapon az elgurított kis golyó egyenesen megy.

Ha a közepét lenyomjuk (görbítjük a teret), az elgurított golyó pályája elgörbül.



Az általános relativitás elmélete

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

Az egyenletek rendkívül bonyolultak.

Az általános relativitás elmélete

A. 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

Ezen kívül sok, meglepő következmény is fellépett, melyeket utólag ellenőriztek.

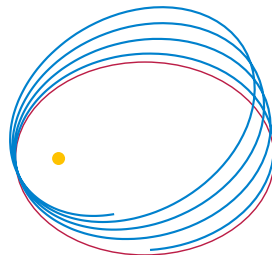
A bolygópályák elfordulása

Ált. rel.: A Kepler-törvény kis korrekcióra szorul: egyetlen vonzó centrum esetén is lassan elfordul az ellipszis pálya.

(Az ábra eltúlzott!)

A hatás igen kicsi: A Merkúr esetén $43''$ /évszázad.

Kimérése nehéz: a többi bolygó ennél nagyobb pályatorzulásokat ad, ez csak erre rakódik rá.



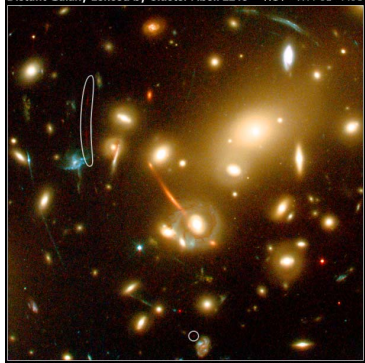
Hasonló hatások a pontos műhold-pályaszámításnál jelentősek lehetnek, ma pl. a GPS-műholdak esetén alkalmazni kell az ált. rel. elméletet.

A fény gravitációs elhajlása

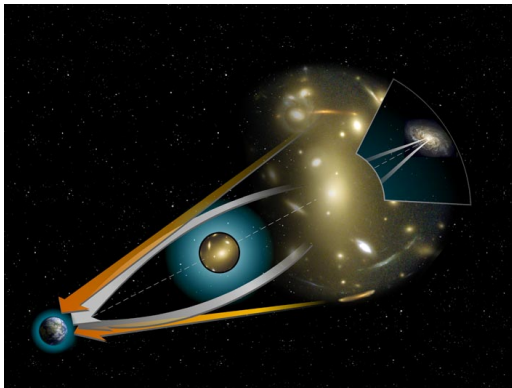
Első kísérleti bizonyíték: 1919. Napfogyatkozáskor a Naphoz közeli csillagok kicsit más helyen látszottak.

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-PRC04-06



Gravitációs időlassulás és -késés

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

Kísérleti ellenőrzés:

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

Gravitációs időlassulás és -késés

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

Kísérleti ellenőrzés:

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

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 tér szerkezetében levő hullámok! Kimutatásuk nehéz, még nem is sikerült.

Közvetett bizonyíték közeli kettőscsillagok pályaelemzéséből.

Geodetikus precesszió és keret-sodródás

Nehezen érthető hatások:

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

Kísérletsorozattal pontosan igazolva!

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.)

A fekete lyukak

Az ált. rel. egyenletei szerint elég nagy tömegsűrűség esetén a geodetikusok annyira begörbülnek, hogy a fénykúpok nem jutnak ki egy korlátos térrészből.

Ekkor abból a részből nem juthat ki információ!

A fekete lyukak

Az ált. rel. egyenletei szerint elég nagy tömegsűrűség esetén a geodetikusok annyira begörbülnek, hogy a fénykúpok nem jutnak ki egy korlátos térrészből.

Ekkor abból a részből nem juthat ki információ!

Egyszerűbben, de pongyolán:

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

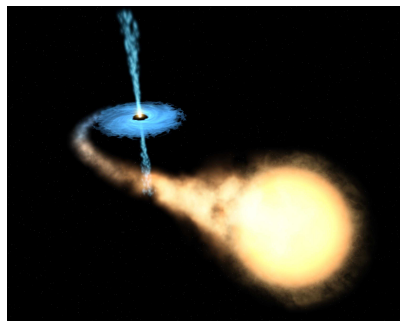
Ha a szökési sebesség nagyobb lesz, mint c , semmi nem juthat onnan ki!

A fekete lyukak

A fekete lyukak észlelése

Közvetlenül nem láthatók. Gravitációjuk érzékelhető:

- Bizonyos kettős csillagok egyik komponense nem látszik, pedig a pályaadatok szerint nagy tömegű: csak fekete lyuk lehet.
- A fekete lyuk felé hulló anyag jellegzetes sugárzást bocsát ki, amit sok helyről észlelünk.



Fantáziarajz:

Fekete lyukak és szingularitások

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

A fekete lyukhoz közelítő megfigyelő esetén

- kívülről nézve megáll az idő
- végtelenhez tartó árapályerők lépnek fel
- ...

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

Sok lehetséges hatás, pl. a fekete lyukak “párolgása” vár tisztázásra még.

Tanulságok

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-euklideszi 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.