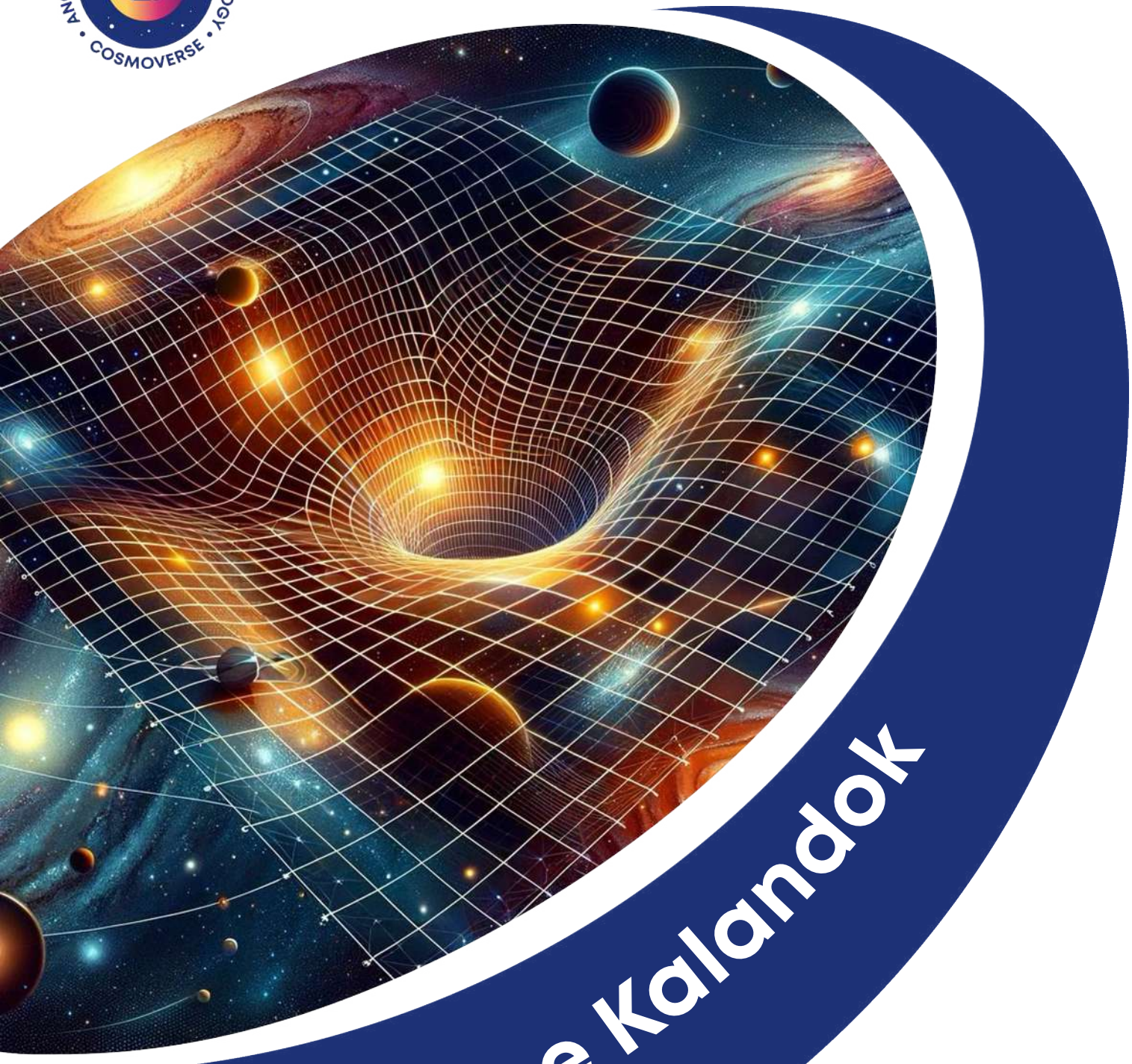


# CosmoVerse Kalandok

## A gravitáció geometriája

cost
EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE & TECHNOLOGY

Funded by the European Union

# A tanterem

## Bevezetés: Newton gravitációja

**Tanár :**

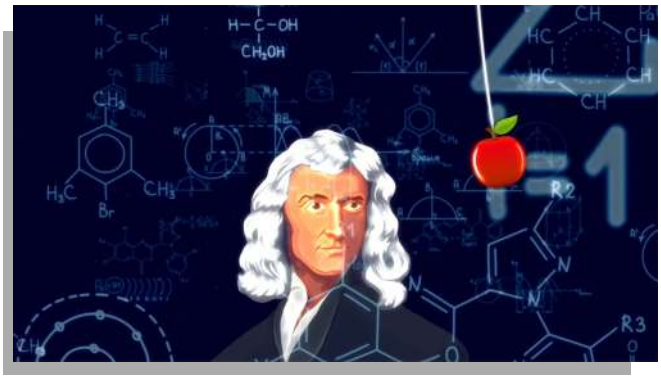
(Beleharap egy almába) Jó reggelt, ifjú felfedezők! Készen álltok egy újabb CosmoVerse Kalandra?

**Diák 1 :**

Hát persze! Mi a mai témánk?

**Tanár :**

Nos, hadd adjak egy tippet. A mai témát először egy olyan tudós tárgyalta, akinek a leeső almákat figyelve támadt egy ötlete. Kitalálja valamelyikőtök, hogy ki volt ez a tudós és mit fedezett fel?



1.ábra: Sir Isaac Newton ábrázolása. Forrás: klonusk.

**Diák 2 :**

Sir Isaac Newton volt az! Ő fedezte fel a gravitációt.

**Tanár :**

Remek, így igaz! Ma a gravitációról fogunk beszélni. De előtte nézzük meg ezt a videót!

(A Tanár lejátssza az alábbi **videót**, amiben egy bowlinggolyó és egy nagy toll esik le vákuum-

**Tanár :**

Mielőtt elkezdjük, mit tippeltek, melyik fog előbb földet érni?

**Diák 3 :**

Értelemszerűen a bowlinggolyó esne le először, mert az nehezebb.

**Tanár :**

Na nézzük!

1. videó: Részlet a BBC "Human Universe" c. dokumentumfilmjéből.

(A diákok csodálkozva nézik, ahogy a toll és a golyó egyszerre esik le.)

**Diák 3 :**

Azta, pontosan egyszerre estek le!

**Tanár :**

Így van! Vákuumban nincs légellenállás. De a kérdés az, hogy miért esik le a toll és a golyó? Newton azt mondaná, hogy van egy erő, ami lehúzza őket, ami...?

**Diák 2 :**

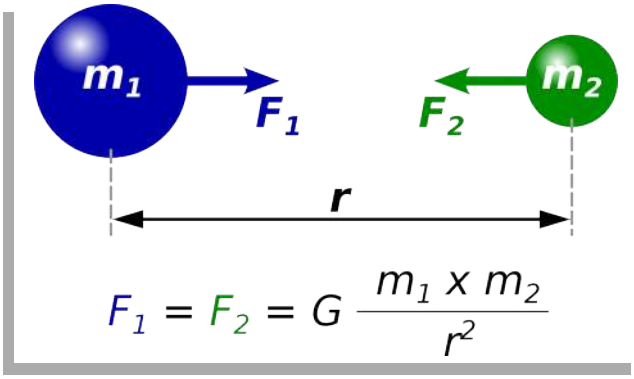
A gravitáció?

**Tanár :**

Pontosan! Newton megmutatta, hogy minden tömeg vonzza a többi tömeget. Ennek az erőnek az nagysága a tárgyak tömegétől és a köztük lévő távolságtól függően változik. Minden úgy történik, ahogy Newton mondta, a Föld kering a Nap körül, a Hold kering a Föld körül, és maga a Világegyetem is a newtoni gravitáció szerint működik. (ld. 2. ábra)

**Diák 3 :**

De a Nap és a Föld közötti távolság kb. 150 millió kilométer, még ekkora távolságon is hat ez az erő?




2. ábra: Newton egyetemes gravitációs törvényének működése. Az erő arányos a két tömeg szorzatával és fordítottan arányos a pontszerű tömegek közötti távolság (r) négyzetével. Forrás: Chris H. Hardy.

**Tanár :**

Kiváló kérdés, és pontosan ezt a kérdést kezdték el vizsgálni a tudósok, hogy hogyan működik a gravitációs erő olyan hatalmas távolságokon, mint a Föld és a Nap közötti? Itt kerül a képbe egy fiatal hivatalnok, aki egy svájci szabadalmi hivatalban dolgozott, Albert Einstein. Az ő forradalmi szemléletmódját egy egyszerű megfigyelés ihlette.

3. ábra: Einsten és Newton gravitációs elméleteinek szembenállása. Forrás: klonusk.

**Diák 1 :**

Egy másik zuhanó alma?

**Tanár :**

(Kuncog) Nem egészen. Éppen egy embert figyelt, aki egy épület ablakait pucolta, és azon tűnődött, mi történne, ha az illető leesne. Bár számunkra furcsának tűnhet, Einstein ezt úgy írja le, mint „életem legboldogabb gondolata”. Ez a gondolat vezette őt a fizika egyik legmeghatározóbb ötletéhez.

**Diák 4 :**

Egy zuhanó ember? Annak nem lenne túl boldog vége.

**Tanár :**

Igaz, de Einstein másképp gondolta ezt. Ahelyett, hogy a becsapódásra koncentrált volna, elképzelte, mit érezhet az ablakmosó, miközben zuhan. Most képzeld magad az ablakmosó helyébe. Mit gondolsz, te mit éreznél, miközben zuhansz?

4. ábra: Einstein legvidámabb gondolatkísérlete egy zuhanó emberről, amely elvezette őt az általános relativitáselméletéhez. Forrás: klonusk.

**Diák 2 :**

Félelmet? A szél zúgását? És talán azt, ahogy a gravitáció húz lefelé!

**Tanár :**

Mivel zuhansz, a gravitáció lenne az egyetlen rád ható erő. Nincs talaj, ami a lábadat nyomná, nincs szék, ami megtámasztana, nem éreznéd a súlyodat. A levegő ellenállását elhanyagolva, szabadesésben lennél.

**Diák 3 :**

Oh, éppen úgy, mint a bowlinggolyó és a toll a videóból! Azok is szabadesésben voltak, ugye?

**Tanár :**

Pontosan! Szabadesésben minden súlytalannak érződik. Einstein felismerte, hogy egy épületről való lezuhanás érzése megkülönböztethetetlen a mélyűrben való lebegéstől. De ahhoz, hogy ezt teljesen felfogjuk, ki kell merészkednünk az osztálytermünkből.

**Diák 1 :**

Egy újabb kalandra indulunk Kvarkkal?

**Tanár :**

Így van! Menjünk fel a Képzelet Űrhajójának fedélzetére kozmikus barátunkkal, Kvarkkal, és fedezzük fel ezt a lenyűgöző koncepciót!

# A Képzelet Űrhajója

## A gravitáció érzékelése

**Kvark :**

Üdv a fedélzeten, fiatal felfedezők! Készen álltok egy újabb kozmikus kalandra?

**Diák 1 :**

Bármikor! Mi a mai terv, Kvark?

**Kvark :**

Ma olyan módon fogjuk megtapasztalni a gravitációt, ahogyan még soha nem éreztétek. Öveket becsatolni!

(A diákok sietve megkeresik a helyüket, és az űrhajó emelkedni kezd. Ahogy elérik az űrt, a diákok elkezdenek lebegni az űrhajó belsejében.)

**Diák 2 :**

Ez hihetetlen! Lebegünk, olyan mintha úsznánk, de nincs víz körülöttünk!

**Kvark :**

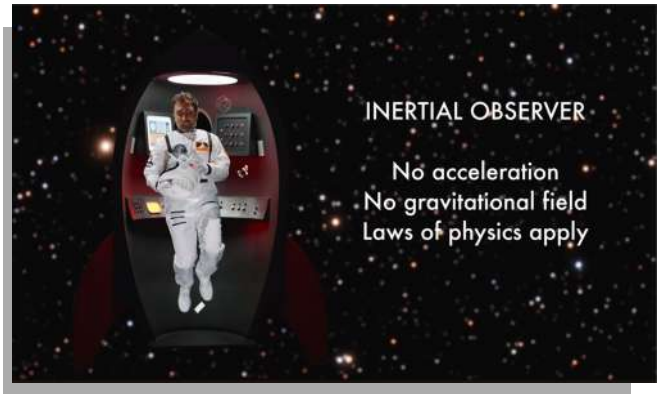
Ez azért van, mert az űrhajónk állandó sebességgel halad, így nem érzel semmilyen erőt vagy súlyt. Emlékszel Newton első törvényére?

**Diák 3 :**

Igen, minden test nyugalomban van, vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez, ha nem hat rá valamilyen külső erő.

**Kvark :**

Helyes! Jelenleg te egy tökéletes példája vagy az inerciális megfigyelőnek. Az összes itt lévő objektum hozzád képest mozdulatlan. Nem gyorsulsz, nem vagy gravitációs mezőben, és a fizika minden törvénye úgy működik, ahogyan azt elvárnád.




5. ábra: Az inerciális megfigyelő egy olyan képzeletbeli megfigyelő, aki nem gyorsul az inerciarendszerhez képest. Forrás: Veritasium (A kép szövege: INERCIÁLIS MEGFIGYELŐ, nincs gyorsulás, nincs gravitációs tér, a fizika törvényei működnek)

**Diák 4 :**

Tehát ez azt jelenti, hogy nincs olyan kísérlet, amivel meg tudnánk különböztetni az inerciális vonatkoztatási rendszerünket bármelyik másiktól.

**Kvark :**

Pontosan! Most pedig egy pillanatra húzzuk le a redőnyt az ablakon!

(Az űrhajó zuhanni kezd a Föld felé)

**Kvark :**

Éreztek most bármi különbséget?

**Student 4 :**

Ugyanúgy érzem magam, lebegek.

**Kvark :**

Érdekes, nem igaz? De most húzzuk fel a redőnyt!

**Student 1 :**

Egyenesen a Föld felé tartunk! De miért nem érzem ezt?

**Kvark :**

Szabadesésben vagyunk. Az egész űrhajó, minket is beleértve, ugyanolyan sebességgel mozog. Nincs ellenünk ható erő, ezért nem érzünk semmit.

**Student 4 :**

Ó, pont mint az ablakpucoló Einstein gondolatkísérletében!

**Kvark :**

Pontosan! Az érzés azonos, akár a mélyűrben lebegsz, akár a Föld felé zuhansz. Minden relatív.

**Student 2 :**

Ez az egész a perspektíváról és a vonatkoztatási rendszerekről szól.

**Kvark :**

Most pedig menjünk egy kicsit még mélyebbre!

(Kvark ismét lehúzza a redőnyöket, majd bekapcsolja az űrhajó motorját, és felfelé gyorsít 9.8 m/s$^2$-tel)

**Student 3 :**

Azta! Nehéznek érzem magam, mintha a padlóra nyomnának. Leszálltunk a Földre?

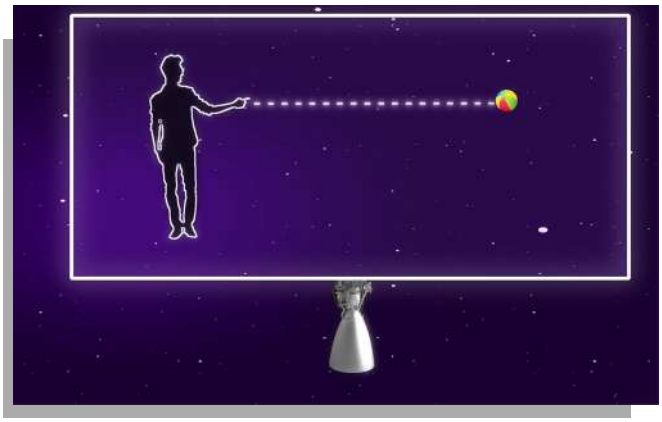
6. ábra: szabadesés a Földön = szabad mozgás az űrben. Gravitáció a Földön = 9.8 m/s$^2$ gyorsulás az űrben; tehát a gyorsulás okozza a gravitációt. Forrás: klonusk.

**Kvark :**

Nem! Most felfele gyorsulunk 9.8 m/s$^2$-tel, ami éppen 1 g, vagyis a földi gravitációs gyorsulás értéke.

**Diák 2 :**

Ó, ezért érezzük úgy, mintha a Földön lennénk. Nem tudnám megmondani a különbséget.



7. ábra: Szabadeséskor, ha eldobsz egy labdát, az egyenes vonalban fog repülni. Forrás: klonusk.

**Kvark :**

Pontosan, tehát megtanultuk, hogy (szabadesés a Földön = szabad mozgás az űrben) és (gravitáció a Földön = 9.8 m/s$^2$ gyorsulás az űrben), és ezt Einstein ekvivalenciaelvének nevezik. Állítsuk le a motort, hogy újra lebeghessünk! Most ezt a labdát a középpont felé fogom dobni, figyeljétek meg a pályáját!

**Diák 2 :**

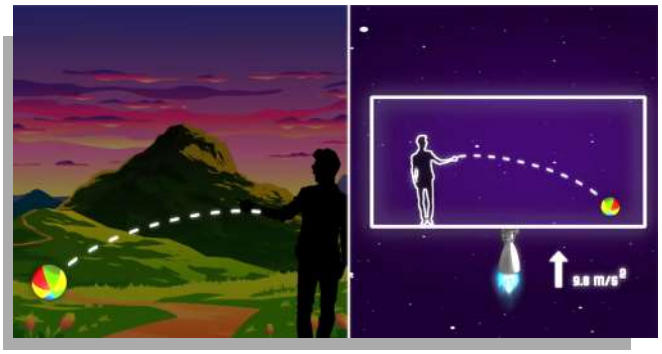
Egy egyenes vonalon mozog.

**Kvark :**

Most indítsuk be a motort, gyorsítsunk felfelé 9.8m/s$^2$-tel, és dobjuk el újra a labdát!

**Diák 4 :**

Most a labda egy görbe pályán leesik a padlóra; ugyanúgy viselkedik, mintha a Földön lennénk!



8. ábra: Eldobott labda egy 9.8 m/s$^2$-tel gyorsuló űrhajóban = Eldobott labda a Földön. Forrás: klonusk.

**Kvark :**

Pontosan! De mi lenne, ha ez a labda egy fénysugár lenne? Vajon a fény elhajlik? Einstein szerint igen.

**Diák 2 :**

De a fény két pont között mindig a legrövidebb úton halad, nem?

**Kvark :**

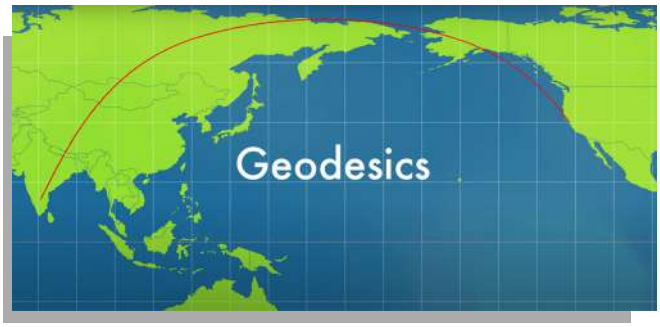
Helyes, Einstein azt állította, hogy a legrövidebb út nem mindig egyenes. Gondoljunk csak a Föld felszínére. Két pont között a legrövidebb út egy görbe, nem pedig egyenes, mert a Föld felszíne görbült.

**Diák 1 :**

Mint a repülők útvonalai a Földön!

**Kvark :**

Bingo! Ezeket az útvonalakat „geodetikusonak” hívjuk. Egy másik példa, ha a Föld egyik helyéről egyenesen az Északi-sarkra megyünk. Mi úgy gondoljuk, hogy egyenes vonalban haladunk, de egy külső szemlélő számára úgy tűnik, hogy az útvonalunk görbe.



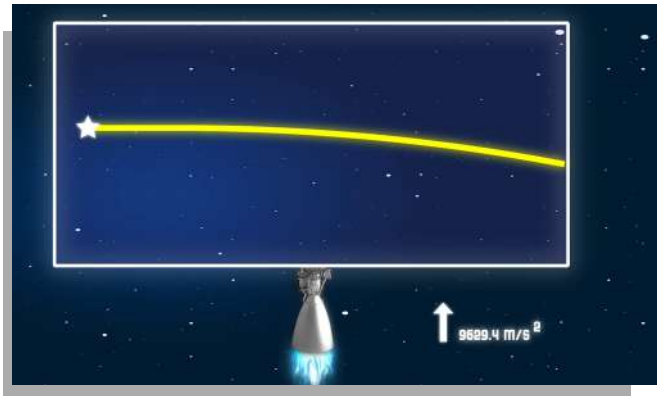

9. ábra: A geodetikusokat úgy lehet elképzelni, mint a „lehető legegyenesebb” útvonalakat az adott térben. A Föld kerek, így a legrövidebb útvonal a felszínén szintén görbült lesz. A repülőgépek ezeket az útvonalakat követik a repülési távolság minimalizálása érdekében. Forrás: Veritasium.

**Diák 4 :**

Einstein elképzelése tehát az volt, hogy a tömeg és az energia jelenléte valahogyan görbíti magát a teret?

**Kvark :**

Pontosan, ami az 1915-ben publikált, úttörő általános relativitáselméletéhez vezetett.



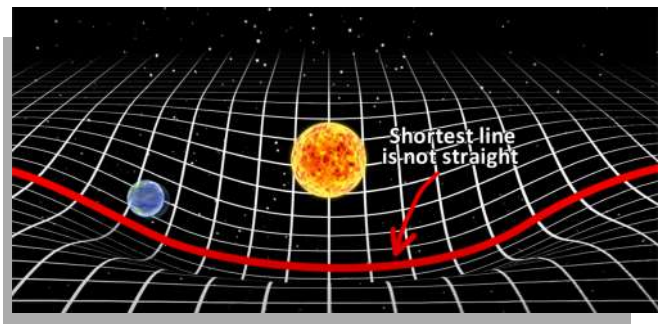

10. ábra: Minél nagyobb a gravitációs gyorsulás, annál erősebb a téridő görbülete körülötte, ami a fény erőteljesebb elhajlását eredményezi. Forrás: klonusk

**Diák 1 :**

Igen, de még ha el is hajlik a fény, akkor sem láthatjuk mindössze 9.8m/s$^2$-es gyorsulásnál.

**Kvark :**

Így van, növeljük tehát a gyorsulást, hogy megfigyelhessük a fény elhajlását!




11. ábra: A téridő görbületének szemléltetése nagy tömegű objektumok körül. A piros vonal a geodetikust jelképezi: egy olyan pályát, ami megmutatja, hogy a legrövidebb távolság két pont között nem egyenes vonal, hanem a gravitáció által meghatározott görbe. Forrás: Arvin Ash.

**Diák 3 :**

Azta, Einsteinnek tényleg igaza volt! De hogy bizonyították ezt be akkoriban?

**Kvark :**

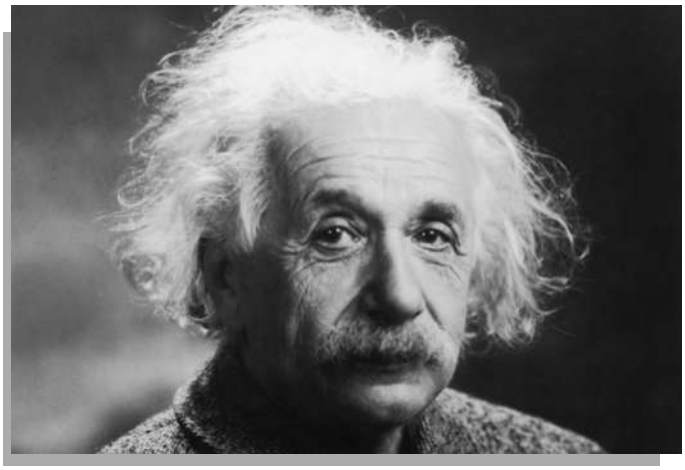
Fantasztikus kérdés! Hogy a lehető legjobban megértsük, ismerjük meg az elmélet mögött álló zsenit. Ismerkedjünk meg Albert Einstein professzorral!

# Ismerj meg egy tudóst!

## Az általános és a speciális relativitáselmélet

**Kvark :**

Diákok, ismerjétek meg a tudóst, aki átformálta az Univerzumról alkotott képünket. Íme a legendás Albert Einstein!



12. ábra: Albert Einstein. Forrás: Library of Congress.

**Einstein :**

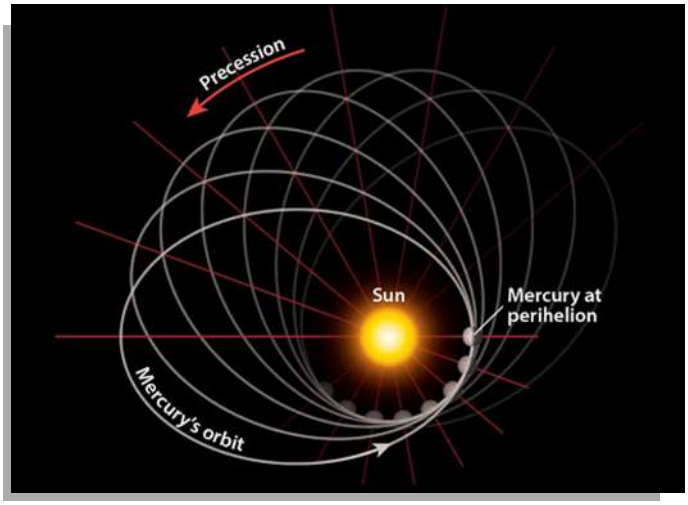
Guten Tag, fiatal felfedezők! Örülök, hogy veletek tölthetem ezt a kozmikus pillanatot.

**Diák 1 :**

Megtiszteltetés, uram! Kvark mesélt nekünk a relativitáselmélettel kapcsolatos úttörő munkájáról és arról, hogy maga a tér hogyan görbül. De kíváncsiak vagyunk, hogyan sikerült egy ilyen radikális elképzelést bizonyítani az Ön idejében?

**Einstein :**

Ah, egy kíváncsi elme! Ahhoz, hogy az elméletemet elfogadják, olyan előrejelzést kellett tennie, amely ellenőrizhető és megkülönböztethető más magyarázatoktól. A kulcs a Merkúr különös pályájában volt.




13. ábra: A Merkúr pályamozgásának eltúlzott művészi ábrázolása. Ezt tekinthetjük Albert Einstein 1915-ös általános relativitáselméletének első diadalának.

**Diák 2 :**

Ó! Ez az a bolygó, amelyik nem zárt ellipszispályán kering a Nap körül?

**Einstein :**

Pontosan! A Merkúr pályája precesszál, ami azt jelenti, hogy elliptikus pályája sosem zárul tökéletesen. Ehelyett a pályájának a Naptól legtávolabbi pontja minden egyes keringés során kissé előrébb kerül. Ez az anomália zavarba ejtette a tudósokat, mivel Newton egyenletei nem tudták ezt megmagyarázni. Amikor azonban alkalmaztam a görbült térről szóló elméletemet, az pontosan megjósolta a Merkúr megfigyelt precesszióját!

**Diák 3 :**

Ez biztosan egy „Heuréka!” pillanat volt!

**Einstein :**

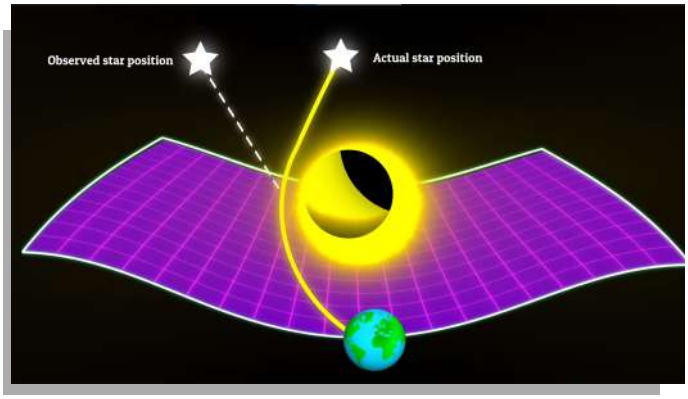
Valóban! Egy pillanatra elképzeltem, hogy én vagyok az egyetlen lélek, aki megértette ezt a kozmikus táncot. De bár a Merkúr diadalmas volt, sok társam továbbra is szkeptikus maradt.

**Diák 1 :**

Hogyan győzte meg őket?

**Einstein :**

A legmeggyőzőbb bizonyítékot egy 1919-es napfogyatkozás során kaptam, majdnem négy évvel azután, hogy publikáltam az elméletemet. Egy angol csillagász, Arthur Eddington egy csapatot vezetett, amely a Nap közelében lévő csillagokat fényképezte le a napfogyatkozás alatt. Az elméletem azt jósolta, hogy a Nap közelében elhaladó csillagfény a Nap gravitációja által létrehozott térgörbület miatt elhajlik.




14. ábra: Illusztráció a gravitációs lencsehatásról, amikor a Nap gravitációja a csillagok fényét elhajlítja, és a csillagot a Földről nézve az égbolton máshol látjuk. A hatás igazolja a téridő görbületét, amelyet az általános relativitáselmélet jósolt meg. Forrás: klonusk.

**Kvark :**

És ha Einsteinnek igaza volt, akkor ezeknek a csillagoknak a megfigyelt helyzete eltérne a Nap hatása nélkül várható helyzetüktől.

**Einstein :**

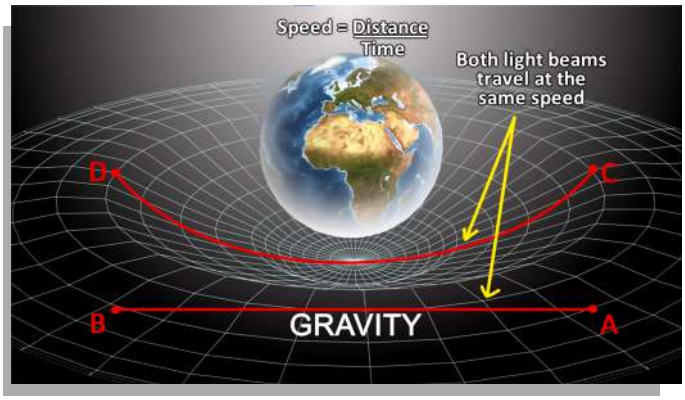
Ez az, Kvark! Amikor Eddington csapata elemezte a fényképeket, a csillagfény pontosan úgy hajlott el, ahogyan azt én megjósoltam. Ez a kísérlet határozott megerősítése volt az elméletemnek, és örökre megváltoztatta a fizika irányát.

**Diák 1 :**

Értem a tér görbületét, de gyakran hivatkozunk a „téridő” kifejezésre, nem csak a térre. Hogyan kerül az idő a képbe?

**Einstein :**

Kiváló kérdés. Ahhoz, hogy erre válaszolhassunk, egy kicsit vissza kell lépnünk az időben, és meg kell ismerkednünk az első elméletemmel: az 1905-ben megjelent speciális relativitáselmélettel. Az elmélet lényege, hogy a fény sebessége állandó marad, függetlenül a nézőpontunktól vagy a vonatkoztatási rendszertől. Tehát akár gyorsulunk, akár nyugalomban vagyunk, a fény mindig ugyanolyan sebességgel halad.




15. ábra: A gravitáció hatása alatt álló fény által megtett távolság (D – C) nagyobb, mint a nem görbült térben terjedő fény által megtett távolság (B – A). Ahhoz, hogy a fény sebessége állandó maradjon, magának az időnek lassabban kell tellenie a görbült térben az nem görbült térben mért időhöz képest. Forrás: Arvin Ash.

**Diák 3 :**

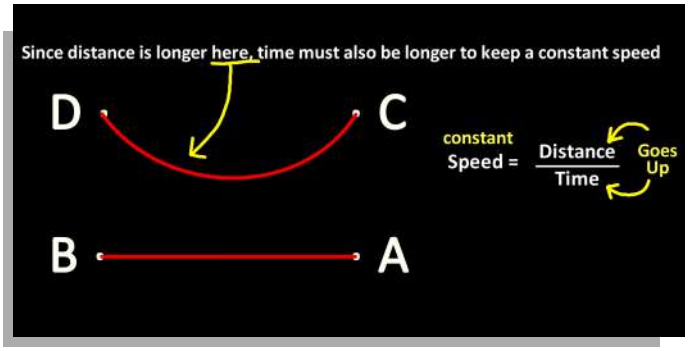
De Einstein professzor, hogyan kapcsolódik ez a gravitációhoz és az időhöz?

**Einstein :**

Gondoljunk csak bele: A sebesség egyenlő a távolság és az idő hányadosával, amit v=s/t alakban szoktunk kifejezni. Gravitációs mező jelenlétében a fény útja a tér görbülete miatt hosszabb lesz. Ha azt akarjuk, hogy a fény sebessége változatlan maradjon, akkor még valamit meg kell változtatnunk – és ez a valami az idő. Az idő lassabban telik egy gravitációs mezőben az üres térhez képest.

**Diák 1 :**

Tehát azt mondja, hogy az idő ugyanúgy meggörbül, mint a tér?




16. ábra: Mivel a D – C távolság hosszabb, az időnek lassabban kell tellenie ahhoz, hogy ugyanakkora sebességet kapjunk. Forrás: Arvin Ash.

**Einstein :**

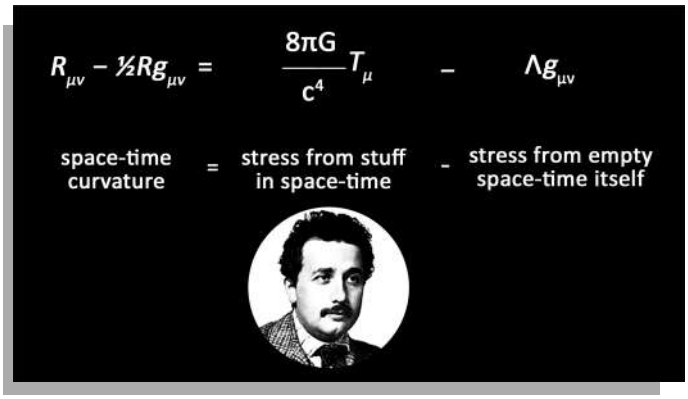
Pontosan! A tér görbülete a gravitációs mező közelében befolyásolja az időt, biztosítva, hogy a fény sebessége mindkét környezetben állandó maradjon. Ezt az egymásba fonódó szövetet nevezzük téridőnek.

**Kvark :**

Egy példa: a Földön az órák valamivel lassabban járnak, mint a Nemzetközi Űrállomáson. Ezt a hatást már igazoltuk is különböző kísérletekkel. Ez a jelenség még a GPS műholdaknak a földi órákkal való szinkronizálásában is döntő fontosságú. Ha nem vennénk figyelembe ezt a hatást, akkor a GPS-alkalmazások rossz helyet mutatnának.

**Diák 4 :**

Nahát! Ez a Csillagok között c. filmre emlékeztet. Volt egy bolygó egy fekete lyuk közelében, ahol egy óra a bolygón hét évnek felelt meg a Földön. Ez is az ön elméletein alapult?




17. ábra: Einstein általános relativitáselméletének mezőegyenletei, amelyek leírják, hogy az anyag és az energia, valamint a kozmológiai állandó (az üres téridő hatása) hogyan határozza meg a téridő görbületét. Forrás: Arvin Ash.

**Einstein :**

Nem láttam a filmet, de úgy tűnik, hogy a Csillagok között c. film nagyszerűen illusztrálta az intenzív gravitációs mezők okozta időtágulás hatásait.

**Kvark :**

Úgy tűnik, kozmikus utazásunk még több rejtélyt tartogat. Köszönjük, Einstein professzor, hogy ma felvilágosított minket.

**Einstein :**

Nagy örömmel tettem! Mindig kérdezz, mindig csodálkozz. Az Univerzum tele van rejtélyekkel, amelyek arra várnak, hogy felfedjük őket.

# Labor

## 1. kísérlet: Szabadon eső vizespalack

### Cél :

A szabadesés tárgyakra gyakorolt hatásának bemutatása és Einstein elméletének megértése, miszerint szabadesésben a tárgyak már nem ugyanúgy „érzik” a gravitációt.

### Előkészületek : 5 perc

### Kísérlet ideje : 5 perc

### Szükséges anyagok :

- Szorosan záródó kupakkal ellátott műanyag palack
- Egy tű vagy egy kis szög, amivel lyukakat lehet ütni a palackba.
- Víz a palack megtöltéséhez
- Műanyaglap a csöpögő víz felfogására

### Bemutatás és megbeszélés :

### Tanár :

dben diákok, tegyük próbára a tudásunkat! Elég sokat tanultunk a szabadesésről és arról, hogyan viselkednek a tárgyak a gravitáció hatására. Lássuk Einstein elméletét a gyakorlatban!

(Egy vízzel teli palackot tart a kezében, amelyen lyukak vannak, amikből víz spriccel ki.)

18. ábra: A vízzel teli lyukas palack. Forrás: giftofcuriosity.com.

### Tanár :

Ahogy láthatjátok, a gravitáció miatt kifolyik a víz a palack lyukaiból. Einstein elmélete szerint azonban a tárgyak szabadesés közben már nem ugyanúgy „érzik” a gravitációt.

### Tanár 2 :

Tehát, ha leejted, a víz nem fog kispriccelni, mert szabadesésben lesz?

### Tanár :

Pontosan! Készen álltok? Számoljatok vissza háromtól!

### Tanár :

Három, kettől, egy...

(A tanár elejti a palackot, és ahogy azt előre megjósolták, a víz nem spriccel tovább, miközben a palack szabadesésben van.)

**Diák 3 :**

Azta! Ez elképesztő volt!

**Diák 4 :**

Tehát a palackban lévő víz a súlytalansághoz hasonló állapotban volt, amikor zuhant?

**Tanár :**

Pontosan. Ez Einstein gravitációról alkotott képének a lényege.

# Labor

## 2. kísérlet: Gravitáció a téridő-gumilepedőn

### Cél :

Az Einstein általános relativitáselmélete által leírt görbült téridő fogalmának szemléltetése és annak megértése, hogy a tömeggel rendelkező objektumok hogyan hatnak a körülöttük lévő térre.

### Előkészületek : 10 perc

### Kísérlet ideje : 15 perc

### Szükséges anyagok :

- Nagyméretű, nyújtható gumilepedő
- Egy keret vagy állvány a lepedő nyújtásához és rögzítéséhez (opcionális)
- Egy nehéz labda (pl. fém- vagy gumilabda)
- Kisebb labdák (pl. üveggolyók vagy pingponglabdák)

### Bemutatás és megbeszélés :

#### Tanár :

Most pedig értsük meg a különbséget Newton gravitációja és Einstein gravitációja között. Newton rögzített teret és időt képzelt el, ahol a gravitáció egy titokzatos erő volt, amely a tárgyak között hatott, még akkor is, ha azok nem értek össze. Ebben a modellben a gravitáció a rögzített tér és idő birodalmában működött, anélkül, hogy befolyásolta volna azokat.

19. ábra: Egy kis golyó pályára állítása a központi égitest körül. Forrás: NASA/JPL-Caltech | **+ Nagyobb méretben**

#### Diák 2 :

Igen, Einstein azt állította, hogy a gravitáció nem csak egy tárgyak közötti erő. Ehelyett a tér és a tömeggel rendelkező tárgyak közötti kölcsönhatásból ered.

#### Tanár :

Kiváló! Röviden, ahogyan John Wheeler később 14 szóban összefoglalta az elméletet: „A téridő megmondja az anyagnak, hogyan mozogjon; az anyag megmondja a téridőnek, hogyan görbüljön”.

#### Diák 1 :

Tehát a bolygók pályáját az határozza meg, hogyan görbül körülöttük a tér?

**Tanár :**

Így van! Vegyünk elő egy gumilepedőt, és nyújtsuk ki. Így nézne ki a tér, ha minden tömeget és energiát eltávolítanánk. Most nézzük meg, hogy mi történik, ha egy nehéz golyót helyezek a közepébe!

**Diák 4 :**

Egy kis bemélyedést.

**Tanár :**

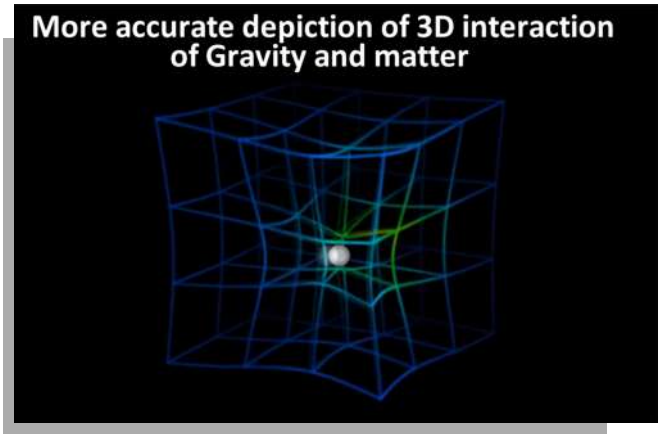
Pontosan. Ez a nehéz gömb egy égitestet, például a Napot jelképezi. Hatalmas tömege meggörbíti a teret. Most gurítsuk ezeket a kisebb golyókat a központi gömb köré!

**Diák 3 :**

Hűha, olyan, mintha a kisebb golyók a központi gömb körül keringenének, utánozva a bolygókat a Nap által meggörbített térben.

**Tanár :**

Így igaz! A kisebb golyó követi a nehezebb tárgy által létrehozott görbét. De ne feledjük, hogy ez az analógia két dimenzióban, vagyis síkban van, csak a könnyebb szemléltetés kedvéért. A tényleges kölcsönhatás három dimenzióban történik. A valódi világegyetem nem egy sík lap; minden irányban hatalmas kiterjedésű.




20. ábra: A gravitáció és az anyag kölcsönhatásának pontosabb ábrázolása 3D-ben. Forrás: lucasvb.tumblr.com

**Diák 3 :**

Köszönjük! Ez a két demonstráció segített összekapcsolni az elméletet a gyakorlattal.

**Tanár :**

Nagyszerű! Mai CosmoVerse kalandunkban tehát láttuk, hogy a gravitáció nem csupán egy titokzatos módon távolról ható erő, hanem az Univerzum – a téridő – szövetének görbülete. Tanúi voltunk Einstein zseniális látásmódjának. Ahogy visszatérünk a mindennapi életünkbe, vigyük tovább a csodálkozás és a kíváncsiság érzését, amely ma is vezérelte felfedezéseinket, mindig szem előtt tartva a kozmosz mélységes rejtélyeit, amelyek csak a felfedezésükre várnak!

# Kozmikus könyvtár (angol nyelvű anyagok)

## Videók :

Why Gravity is NOT a Force
General Relativity Explained simply & visually
If light has no mass, why is it affected by gravity? General Relativity Theory
Einstein's Special Relativity Theory | Does Time really Slow down
Brian Greene Explains That Whole General Relativity Thing
How Does Gravity Affect Light?
Base for Special Relativity theory | Why is the speed of light constant
Special Relativity: Crash Course Physics #42
Brian Cox visits the world's biggest vacuum | Human Universe - BBC
Gravity Visualized

## Interaktív anyagok :

Modeling the Orbits of Planets
General Relativity explained like you've never seen before
A toolkit for teaching general relativity: II. Geodesics
Space-time concept
Relativity Simulator
Special Relativity: Time dilation

## Honlapok és cikkek :

Einstein Online
General Relativity
The Space Doctor's Big Idea

## Dokumentumfilmek :

What Inside Albert Einstein Mind The Theory of General Relativity Documentary
General Relativity, National Geographic
Einstein's Big Idea, PBS NOVA
Einstein's Universe: Understand Theory of General Relativity

## Játékok :

General Theory of Relativity
General Relativity Theory of Gravitation
Relativity flash cards quiz

## Kvízek :

Relativity 101

# Szótár

**Kozmológiai konstans:** Einstein által az általános relativitáselméletéhez hozzáadott tag, amely lehetővé tenne egy statikus, nem táguló Világegyetemet; ma már tudjuk, hogy a sötét energiához van köze.
**Ekvivalenciaelv:** Az általános relativitáselmélet egyik alapelve, amely szerint egy tömeggel rendelkező testen (mint például a Földön) állva helyileg tapasztalt gravitációs erő megegyezik a gyorsuló vonatkoztatási rendszerben lévő megfigyelő által tapasztalt fiktív erővel.
**Szabadesés:** Egy olyan test mozgása, amelyre csak a gravitáció hat.
**Általános relativitáselmélet:** Az Albert Einstein által kidolgozott gravitációelmélet, amely a gravitációt nem erőként, hanem a téridő görbületének következményeként írja le, amelyet a tömeg eloszlása okoz.
**Geodetikus:** A legrövidebb út két pont között egy görbült térben vagy téridőben.
**Gravitációs tér:** Az a térrész egy test körül, ahol más testekre az gravitációs vonzóerővel hat.
**Gravitációs lencsézés:** Az a jelenség, amikor egy távoli objektumból érkező fény a forrás és a megfigyelő közötti nagy tömegű objektum körül elhajlik, hasonlóan egy lencséhez.
**Inerciális megfigyelő:** Egy olyan megfigyelő, aki nem gyorsul, és úgy látja, hogy a fizika törvényei a megszokott módon működnek.
**Fény meghajlása:** Az a jelenség, amikor a fénysugarak egy nagy tömegű tárgy közelében elhaladva a téridő görbülete miatt elhajlanak; ezt Einstein általános relativitáselmélete jósolja meg.
**Newton gravitációs törvénye:** Isaac Newton elmélete, amely szerint minden tömeg minden más tömeget vonz, mégpedig a tömegük szorzatával arányosan és a köztük lévő távolság négyzetével fordítottan arányosan.
**Merkúr precessziója:** A Merkúr pályájának fokozatos elmozdulása az általános relativitáselmélet által megjósolt módon, ami az elmélet korai bizonyítéka volt.
**Kvantummechanika:** A fizika egyik alapvető elmélete, amely a természet fizikai tulajdonságainak leírását adja az atomok és szubatomi részecskék szintjén.
**Téridő:** A tér és az idő dimenzióit egyesítő négydimenziós kontinuum. A relativitáselmélet szerint a tömeg és az energia jelenléte „eltorzítja” a téridőt, és ez a görbület az, amit gravitációként érzékelünk.
**Fénysebesség:** Az állandó sebesség, amellyel a fény vákuumban halad, körülbelül 299,792,458 méter másodpercenként.
**Időtágulás:** Két megfigyelő által mért időkülönbség, ami a köztük lévő relatív sebességből vagy a helyük közötti gravitációs potenciál különbségéből adódik.
**Féreglyuk:** Egy hipotetikus híd vagy alagút a téridőben, amely az Univerzum rendkívül távoli pontjait kötheti össze.

This article/publication is based upon work from COST Action CA21136 – “Addressing observational tensions in cosmology with systematics and fundamental physics (CosmoVerse)”, supported by COST (European Cooperation in Science and Technology)

COST (European Cooperation in Science and Technology) is a funding agency for research and innovation networks. Our Actions help connect research initiatives across Europe and enable scientists to grow their ideas by sharing them with their peers. This boosts their research, career and innovation.

**www.cost.eu**

ANOMALIES & TENSIONS IN COSMOLOGY
COSMOVERSE