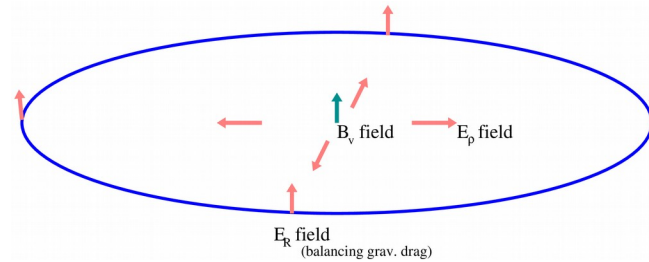
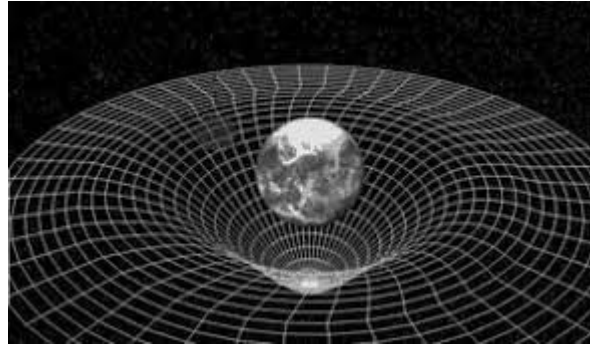


# Görbült téridő laboratóriumban?



László András

Wigner Fizikai Kutatóközpont, RMI NFO

Atomoktól a Csillagokig

2022.02.10

*Korábbi kapcsolódó:*

*Atomcsill 2014.09.18 (DGy), Atomcsill 2014.09.11 (Cserti J)*

*Fizikai Szemle 2020 május 159-162 (LA, ZZ)*

- „Képleteink illusztráció jellegűek.”
- Egy képlet nem önmagában fontos: egy egész történetet mesél el.

## Fizikai modellezés:

- A fizika kísérleti tudomány: természetről kísérleti úton próbálunk meg infókat gyűjteni.
- Ezekben valami törvényszerűségeket próbálunk meglátni.  
(pl Newton második „törvényszerűsége”)

## Fizikai modellezés:

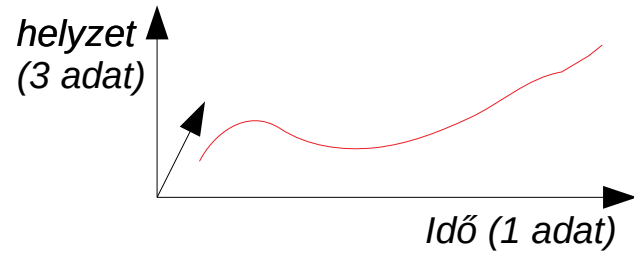
- A fizika kísérleti tudomány: természetről kísérleti úton próbálunk meg infókat gyűjteni.
- Ezekben valami törvényszerűségeket próbálunk meglátni.  
(pl Newton második „törvényszerűsége”)
- Pár törvényszerűségeből matematikai modellt próbálunk állítani.
- A modellek célja: jóslatokat adjanak újabb kísérletek eredményére.  
Ezeket megnézzük, hogy ülnek-e.

## Fizikai modellezés:

- A fizika kísérleti tudomány: természetről kísérleti úton próbálunk meg infókat gyűjteni.
- Ezekben valami törvényszerűségeket próbálunk meglátni.  
(pl Newton második „törvényszerűsége”)
- Pár törvényszerűségekől matematikai modellt próbálunk állítani.
- A modellek célja: jóslatokat adjanak újabb kísérletek eredményére.  
Ezeket megnézzük, hogy ülnek-e.
- Ha nem: javított modellre hajtunk. Fontos: a modell nem maga a valóság.  
fizika  $\neq$  matek. A fizikát nem lehet „levezetni”. Matematikai modellt lehet rá állítani.

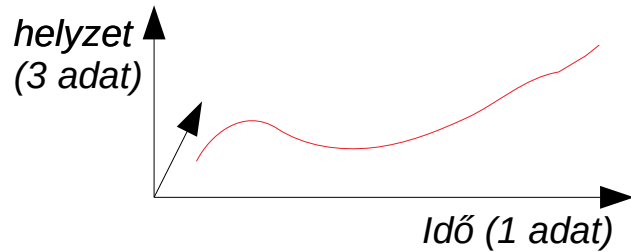
## A téridő fogalma:

- Az út–idő diagram absztrakciója.



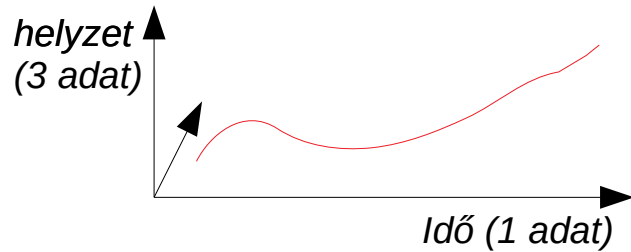
- Erre mondjuk, hogy a „a téridő 4 dimenziós”.

- Az út–idő diagram absztrakciója.



- Erre mondjuk, hogy a „a téridő 4 dimenziós”.
- valami–idő diagramban értelmes a „valami”-nek a pillanatnyi változási gyorsasága.  
PI  $x(t)$  -nek  $\dot{x}(t)$  ,  $\dot{x}(t)$  -nek  $\ddot{x}(t)$  .

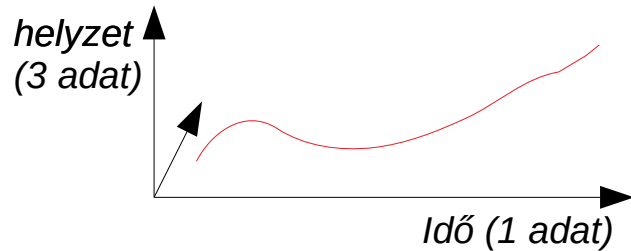
- Az út–idő diagram absztrakciója.



- Erre mondjuk, hogy a „a tér idő 4 dimenziós”.
- valami–idő diagramban értelmes a „valami”-nek a pillanatnyi változási gyorsasága.  
 Pl  $x(t)$ -nek  $\dot{x}(t)$  ,  $\dot{x}(t)$ -nek  $\ddot{x}(t)$  .
- Mozgásegyenlet: úgymond  $F = m a$  . De pontosan mit jelent ez?

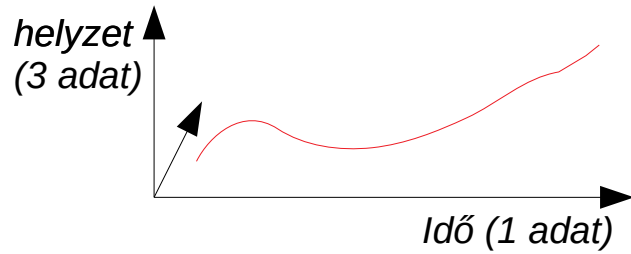


- Az út–idő diagram absztrakciója.

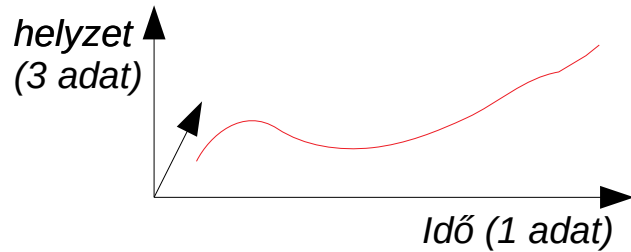


- Erre mondjuk, hogy a „a tériidő 4 dimenziós”.
- valami–idő diagramban értelmes a „valami”-nek a pillanatnyi változási gyorsasága.  
 Pl  $x(t)$ -nek  $\dot{x}(t)$  ,  $\dot{x}(t)$ -nek  $\ddot{x}(t)$  .
- Mozgásegyenlet: úgymond  $F = m a$  . De pontosan mit jelent ez?

$$\ddot{x}(t) = \frac{1}{m} F(t, x(t), \dot{x}(t)) \quad \leftarrow \text{Matekból tudható: jósolni lehet vele!}$$

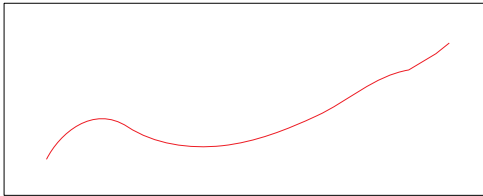


- A teret és időt szívünk joga együtt könyvelni, és „téridőnek” hívni.
- A fizikában előforduló mozgásegyenletek szerkezete arra utal, hogy ennél mélyebb a kapcsolat.



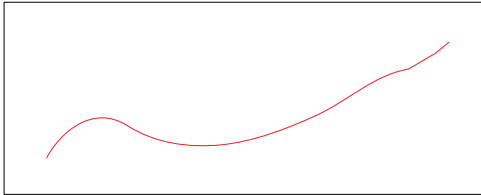
- A teret és időt szívünk joga együtt könyvelni, és „téridőnek” hívni.
- A fizikában előforduló mozgásegyenletek szerkezete arra utal, hogy ennél mélyebb a kapcsolat.
- A mozgásegyenletek szerkezete átláthatóbb lesz, ha következők szerint könyvelünk.

- A téridő a lehetséges történések halmaza:



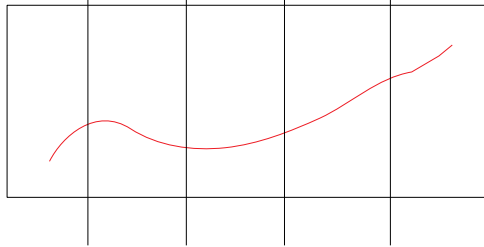
- A benne haladó vonalak a történetek.

- A téridő a lehetséges történések halmaza:



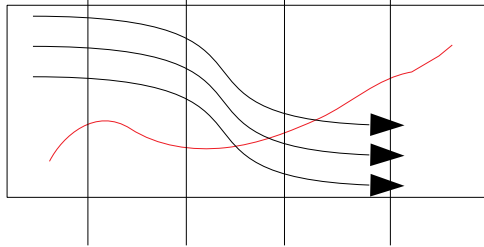
- A benne haladó vonalak a történetek.
- Négy paraméterrel lehet megcímezni egy-egy pontját (ez csak könyveléstechnika).
- Van benne eltolás. Erre mondjuk, hogy a téridő egy négydimenziós sík.

- A téridő a lehetséges történések halmaza:

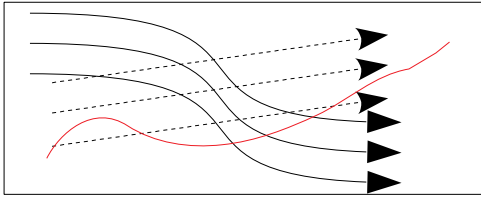


- A benne haladó vonalak a történetek.
- Négy paraméterrel lehet megcímezni egy-egy pontját (ez csak könyveléstechnika).
- Van benne eltolás. Erre mondjuk, hogy a téridő egy négydimenziós sík.
- Newtoni (klasszikus) téridő: van benne eleve elrendelt időszeletelés.

- A téridő a lehetséges történések halmaza:



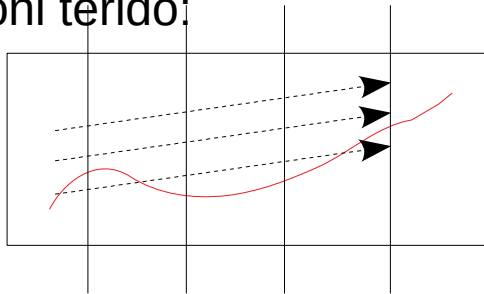
- A benne haladó vonalak a történetek.
- Négy paraméterrel lehet megcímezni egy-egy pontját (ez csak könyveléstechnika).
- Van benne eltolás. Erre mondjuk, hogy a téridő egy négydimenziós sík.
- Newtoni (klasszikus) téridő: van benne eleve elrendelt időszeletelés.
- Egy megfigyelő egy „közeg”, amely a testén megtapasztalja a történéseket.  
Mint egy szenzorokkal telepakolt vonat.



- Egy másik megfigyelő máshogy tapasztalja meg a vele érintkező dolgokat.  
(Egy szenzorokkal telepakolt másik vonat.)
- Erre szokás mondani, hogy nincs abszolút tér.  
Megfigyelő szerint megtapasztalt tér-élmény van.
- Inerciális megfigyelő: jóban van az eltolással.

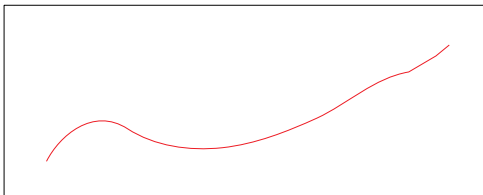


- Newtoni téridő:



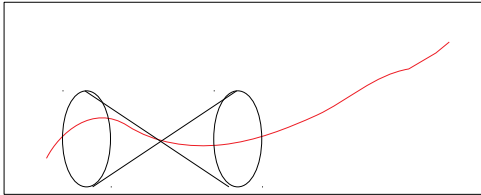
- Modellünk szerint: a téridőpontok a lehetséges történések, a vonalak a történetek.
- Egy megfigyelő ilyen történetekből álló közeg.  
(Nincs abszolút tér, egy megfigyelő története adják a teret.)
- Newtoni téridő: VAN abszolút időszeletelés, mindenütt érvényes óra. Megengedhető abszolút megfigyelő („éter”), egy mindent átható közeg. PI amelyben a fény minden irányban ugyanúgy terjed. Vagy ilyesmi.

- Relativisztikus téridő:



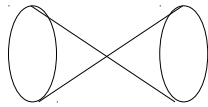
- Ugyanez, csak nincs abszolút időszelvényezés.

- Relativisztikus téridő:



- Ugyanez, csak nincs abszolút időszelvényezés.
- Van viszont abszolút fénykúp.  
Michelson-Morley kísérlet (1887),  
vákuum Maxwell-egyenletek szerint is ez van (Poincaré, 1905),  
modern tapasztalat szerint is anyag nem tud fénysebességnél gyorsabban terjedni.
- Fényterjedés nem tüntet ki valami spéci közeget (megfigyelőt), nem kell „éter”.

- matekból:



$$g(\vec{a}, \vec{b})$$

(számszorzó erejéig egyértelmű)

$$g(\mu \vec{a}, \vec{b}) = \mu g(\vec{a}, \vec{b})$$

$$g(\vec{a}, \nu \vec{b}) = g(\vec{a}, \nu \vec{b})$$

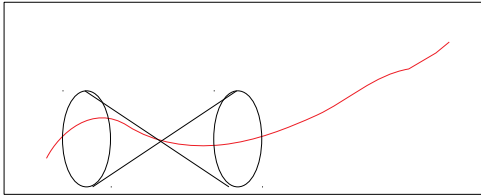
$$g(\vec{a} + \vec{a}', \vec{b}) = g(\vec{a}, \vec{b}) + g(\vec{a}', \vec{b})$$

$$g(\vec{a}, \vec{b} + \vec{b}') = g(\vec{a}, \vec{b}) + g(\vec{a}, \vec{b}')$$

$$g(\vec{b}, \vec{a}) = g(\vec{a}, \vec{b})$$

A fénykúp a  $g(\vec{a}, \vec{a})$  nullhelyei.

- Relativisztikus téridő:



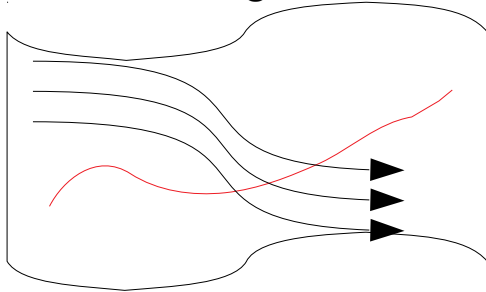
- Relativisztikus fizika: kb ugyanaz mint a klasszikus, kicsit mások a játékszabályok.
- Megfigyelő stb nélkül is lehet gondolni rá:
  - kísérleti tapasztalatok szerint minden anyagi „dolgok” terjedését valami hullámegyenlet-szerűség kormányozza.
  - hullámegyenlet-szerűség matekjából => van hozzá egy fénykúp.
  - a tapasztalat szerint ez a fénykúp minden anyagi fajtára ugyanaz.A relativitáselmélet az anyag terjedésének tulajdonságairól szól...  
A megfigyelő, időszeletelés stb kicsit mellékszál.

- Rengeteg kísérleti bizonyíték, és gyakorlati alkalmazás.



## Általános relativisztikus téridő:

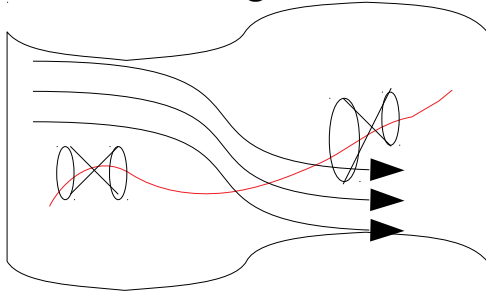
- A téridő a lehetséges történések halmaza:



- A benne haladó vonalak a történetek.
- Négy paraméterrel lehet megcímezni egy-egy pontját könyveléstechnikailag.
- NINCS benne eltolás. Erre mondjuk, hogy a téridő egy négydimenziós, de nem sík.
- Egy megfigyelő egy „közeg”, amely a testén megtapasztalja a történéseket.  
Mint egy szenzorokkal telepakolt vonat.

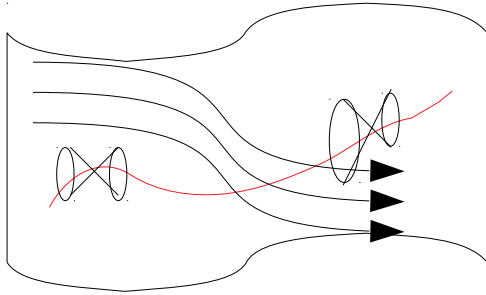
## Általános relativisztikus téridő:

- A téridő a lehetséges történések halmaza:



- A benne haladó vonalak a történetek.
- Négy paraméterrel lehet megcímezni egy-egy pontját könyveléstechnikailag.
- NINCS benne eltolás. Erre mondjuk, hogy a téridő egy négydimenziós, de nem sík.
- Egy megfigyelő egy „közeg”, amely a testén megtapasztalja a történéseket.  
Mint egy szenzorokkal telepakolt vonat.
- Pontról pontra dülöngélő fénykúp, úgymond „fénykúp mező”.  $g(\vec{a}, \vec{b})$  is dülöngél. 24  
Ez is az anyag terjedésének tulajdonságairól szól.





- Ráutaló magatartás:

- newtoni klasszikus gravitációelmélet elég jó (égi mechanika, ágyugolyó stb).

- gyenge ekv elv: tehetetlen tömeg = súlyos tömeg (Eötvös kísérletek, 1908).

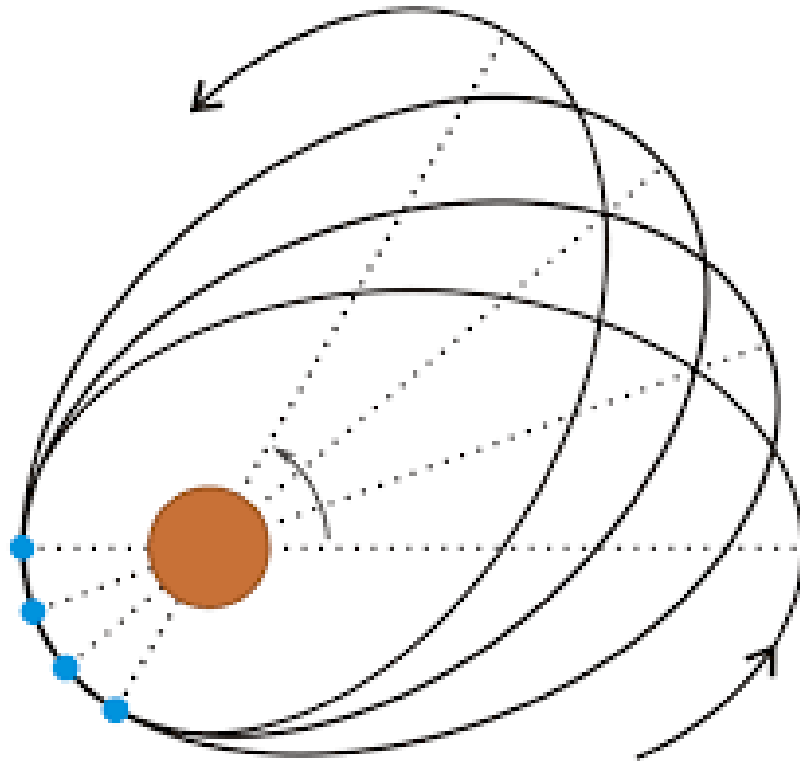
- mi van, ha a gravitáció pont olyan mint egy tehetetlenségi erő? (erős ekv elv)

- a specrel elég jó, határesetben a specrelt vissza kéne adni.

- a fenti patkolása a specrelnek elég jó: nevezetes áltrel kísérletekből.

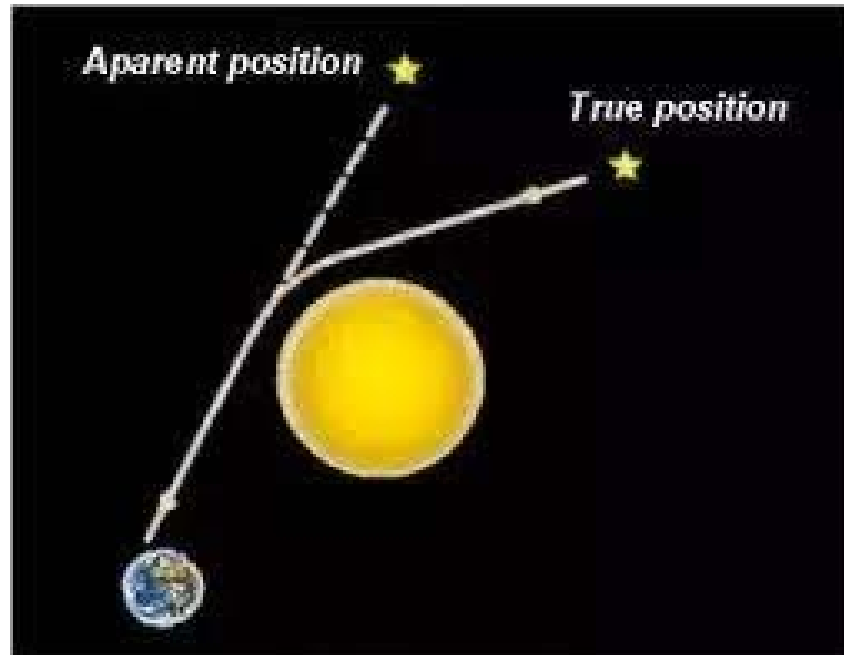
## Nevezetes áttrel kísérletek:

- A Merkúr perihélium elfordulása (Newcomb, 1882-):



áttrelben is megmarad a pálya síkja, de nem záródik ellipszisként

- Fényelhajlás a Nap mellett (Eddington, 1919):

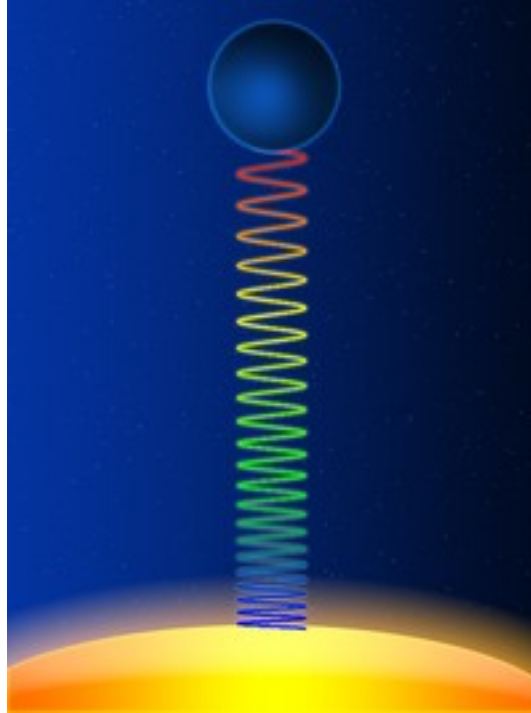


specrel + kézzel előírt tömegvonzás barkács modell is ad erre jóslatot:

$E = p c$  , majd  $m = E / c^2$  -nyi tömeget newtoni gravitációsan vonz a Nap

ez 2-es faktoral eltér az áltrel által jósolttól.

- Gravitációs vöröseltolódás (Pound-Rebka, 1959):



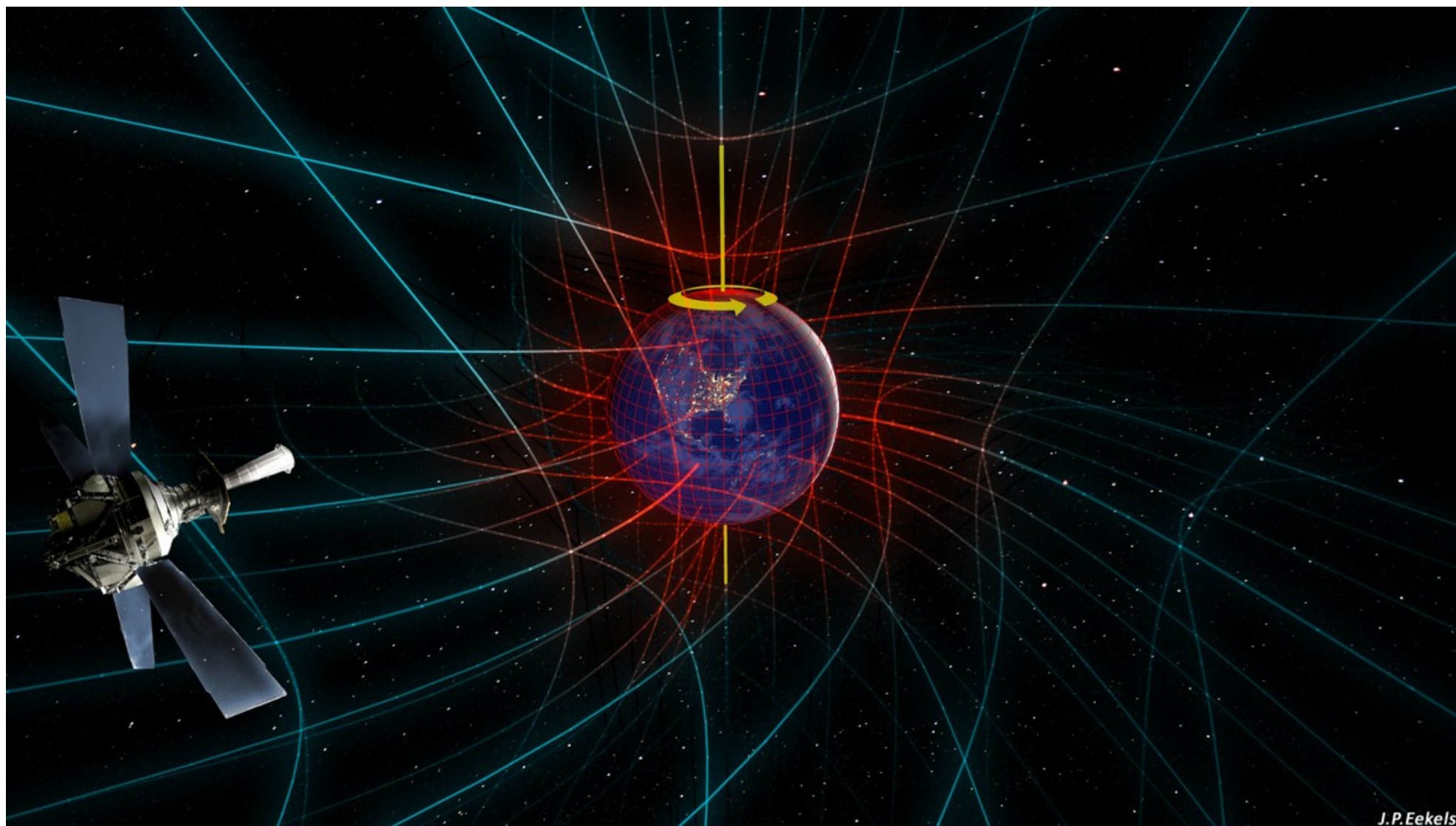
megerősíti Gravity Probe A műholdkísérlet (1976), Haefele-Keating repülős (1971)

ma már a napi gyakorlat része: GPS. Földön  $10^{-9}$  nagyságrendű.

Az áltrel gyakorlati alkalmazása:

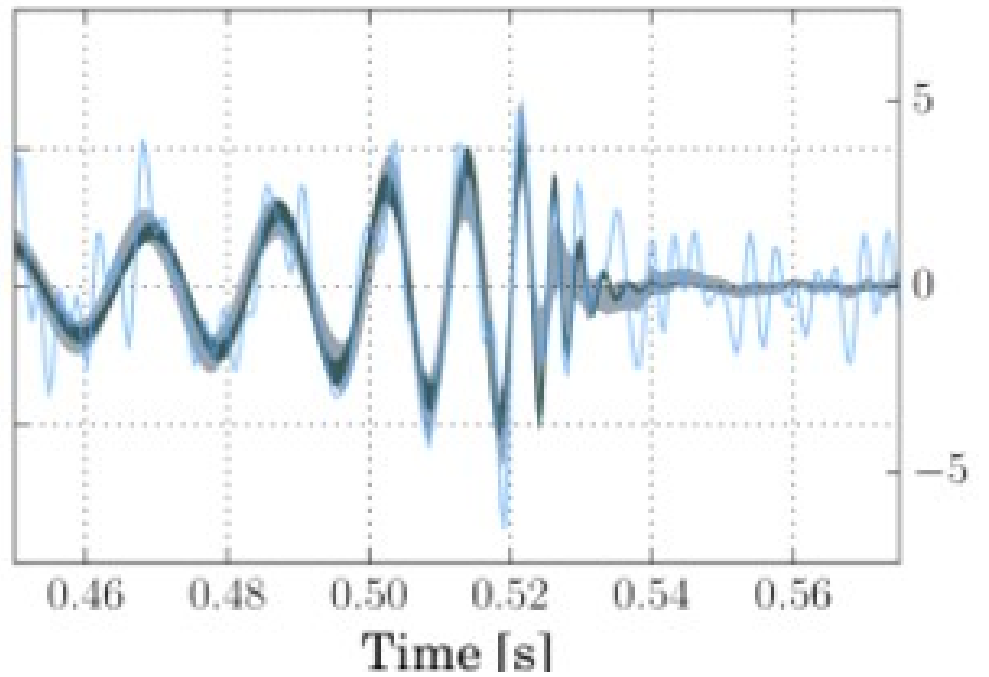
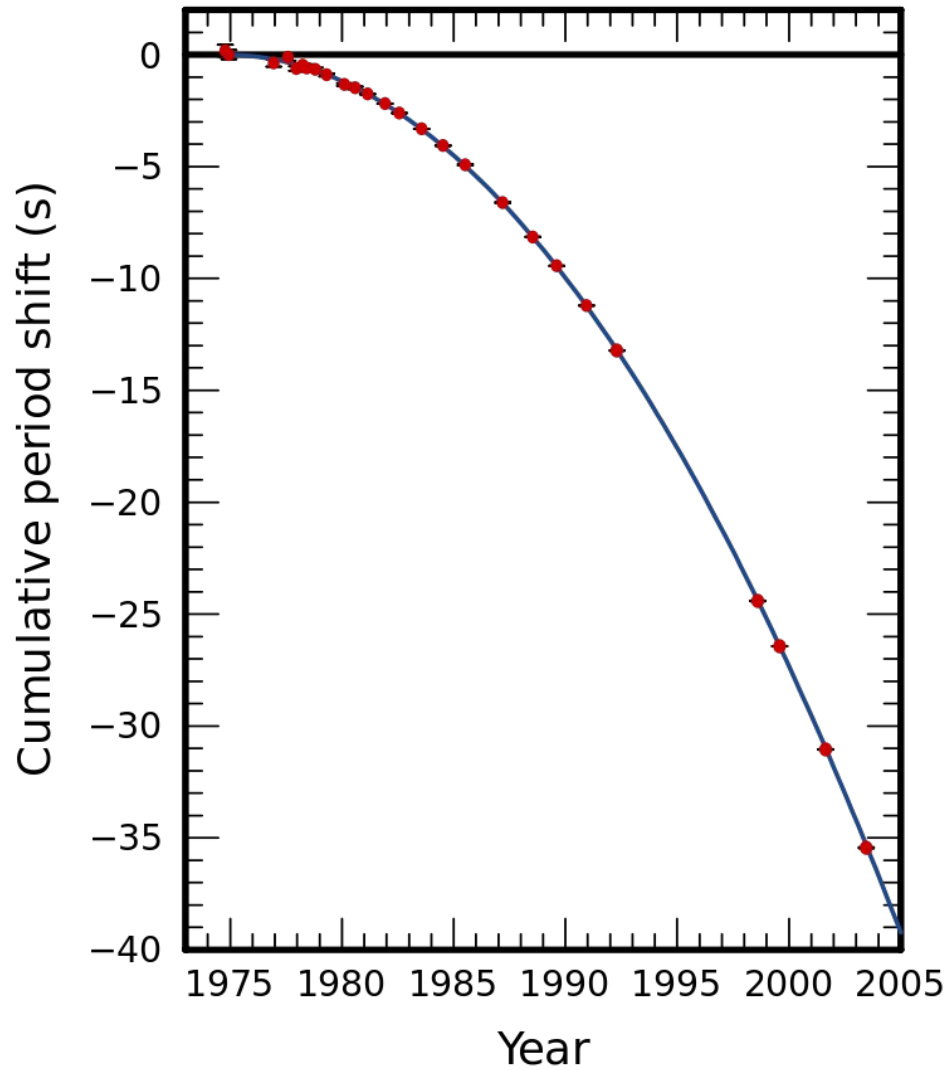


- Pörgettyűk eltekedése a gravitációs mezőben (Gravity Probe B, 2004):



J.P.Eekels

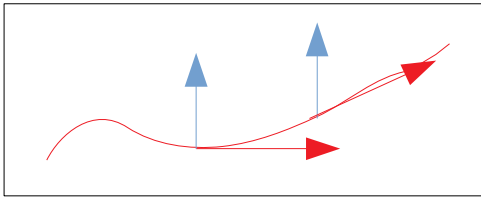
- Gravhullámok (Hulse-Taylor 1975-1993 , LIGO-VIRGO 2017 ):



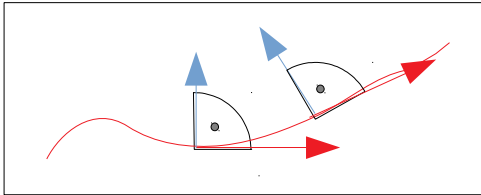
# Pörgettyűk viselkedése a relativitáselméletben

- Newtoni mechanikában: perdület az eredeti irányát megőrizni igyekszik.

Ezzel irányítják a repülőgépeket.



- Spec / áltrel: perdület a pálya téridőbeli irányára merőlegességét megőrizni igyekszik.



( a fénykúp diktálta geometriában merőleges:  $g(\vec{a}, \vec{b})=0$  )

Ezért a perdület „dülöngélhet”, miközben utaztatom.

=> specrelben forog a perdület iránya, ha gyorsulva utaztatom (Thomas-precesszió)

=> áltrelben még pluszban foroghat, mert görbült a geometria (Gravity Probe B)



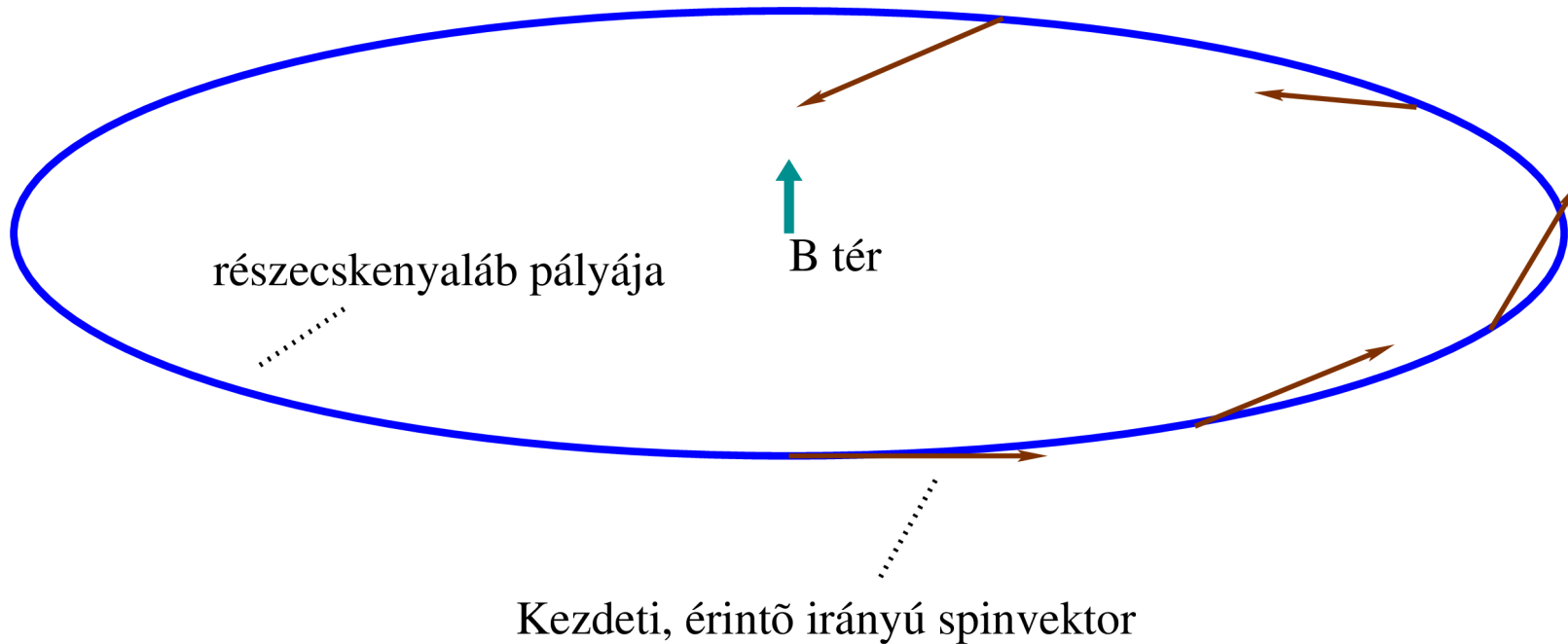
## Pörgettyűk viselkedése a relativitáselméletben

- Ha elektromágnesesen töltött a részecske, akkor:
  - elektromágneses terek befolyásolják a röppályáját
  - a perdületével arányos ún. mágneses nyomatéka lehet  
(ez azt jellemzi, hogy a mágneses tér mennyire tekeri el a perdület irányát)  
arányosságot egy részecskére jellemző  $g$  dimenziótlan faktorra lehet jellemezni.
  - a perdületével arányos ún. elektromos nyomatéka is lehet  
(ez azt jellemzi, hogy az elektromos tér mennyire tekeri el a perdület irányát)  
arányosságot egy részecskére jellemző  $d$  dimenziótlan faktorra lehet jellemezni.

a kinematikai hatások (Thomas-precesszió) és

az elektromágneses terek közvetlen forgatónyomatéka is tekeri a szegény perdületet

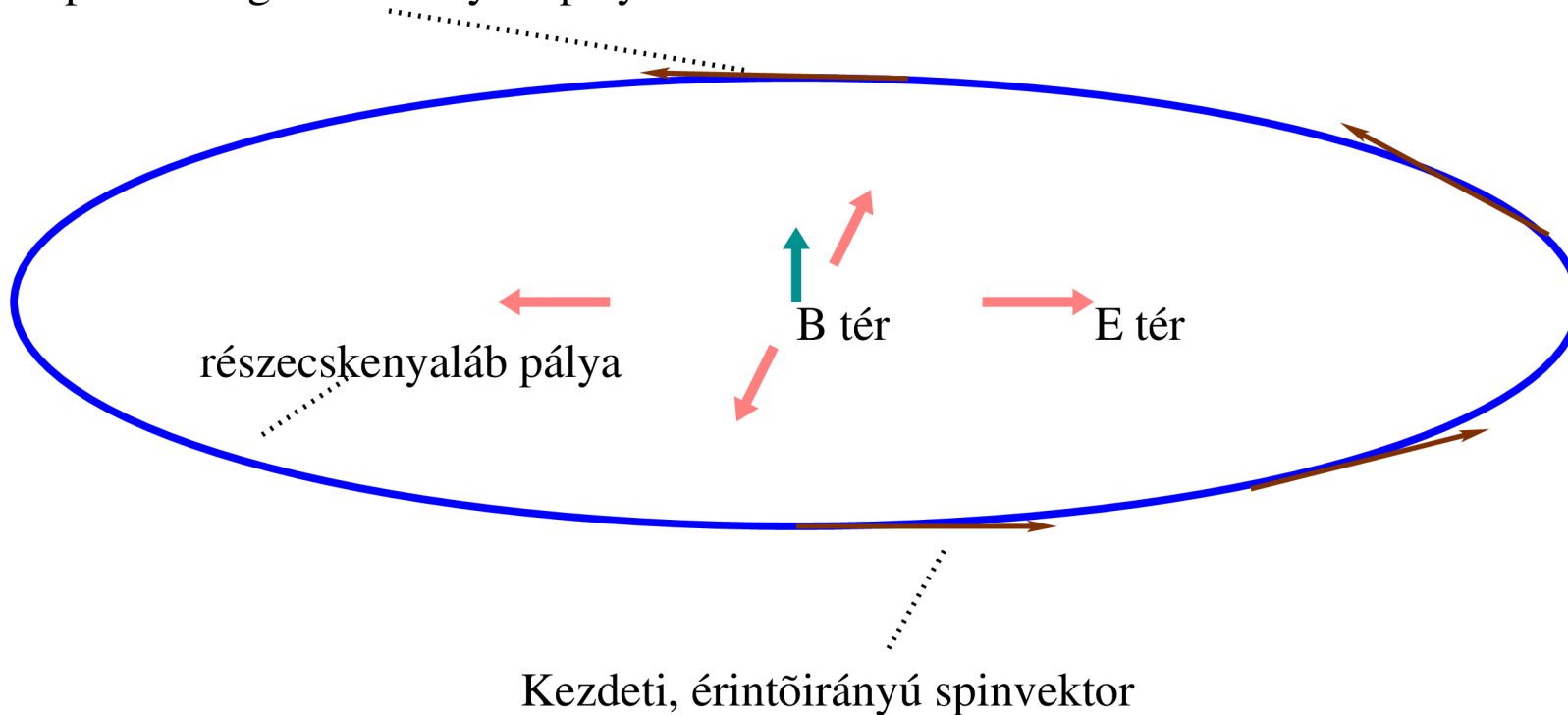
homogén mágneses térben a spin a pálya síkjában forog, ezzel a szögsebességgel:  $(g/2-1)B\frac{q}{m}$



részecskefizikusokat ez a kísérlet nagyon érdekli,  $g-2$  kísérlet (Fermilab)  
mert ez a részecskék belső szerkezetéről ad infót.

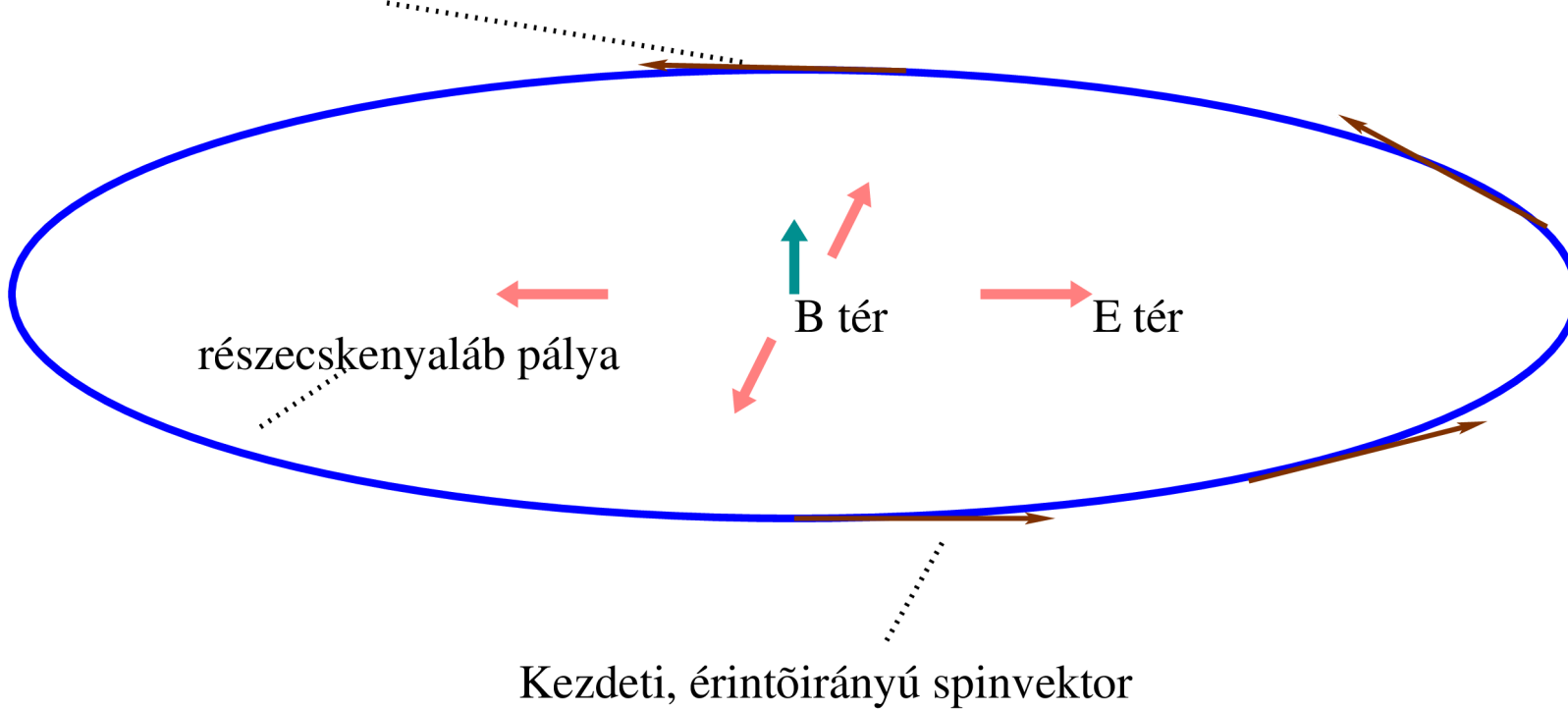
Hasonló trükkel lehet az elektromos megfelelőjét is mérni:

Befagyasztott spinû gyûrûkben a mágn. precessziót elektromos térrel kompenzálják:  
a spin mindig érintõirányú a pályára



- Ha lenne elektromos dipólnyomaték, az kiforgatná a spint a pálya síkjából.  
részecskefizikusokat ez a kísérlet nagyon érdekli  
(mert ez is a részecskék belső szerkezetéről ad infót)

Befagyasztott spinû gyûrûkben a mágn. precessziót elektromos térrel kompenzálják:  
a spin mindig érintõirányú a pályára



Kiderül: van áltrekorrekció, a Föld gravitációs tere is kitekeri a spint a pálya síkjából!

(László, Zimborás 2018) Végülis  $\frac{g}{c}$  szög / idő mértékegységű...

Kiderül: van áltrel korrekció, a Föld gravitációs tere is kitekeri a spint a pálya síkjából.

$$(g/2-1) \frac{v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad \frac{g}{c}$$

Poén: ha nem áltrelben, hanem specrel + barkács gravitációval számolnánk,

$$(g/2) \frac{v/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad \frac{g}{c}$$

(azaz kb 2-es faktor hiányozna, mint a fényelhajlásnál)

Érdekes jelenség, relativisztikus sebességeknél laboratóriumi tesztje az áltreinek.

Már tervezik az EDM kísérleteket, ez is egy mellékeredménye lesz.

Olyan 2025 után kezd épülni vszleg. (CPEDM)