

Foucault-ingakísérletek Szombathelyen 1880-2014

Kovács József

*ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris
Kutatóközpont, Szombathely, HUNGARY*

Bevezetés

A Föld forgását elsőként demonstráló híres kísérletet – egy 2 és egy 11 méter hosszúságú ingával januárban és februárban végzett előzetes próba után – Jean Bernard Léon Foucault mutatta be 1851. márciusában a párizsi Panthéonban egy 67 méter hosszúságú huzalon függő 28 kg-os ingatesttel. [1] Még ugyanebben az évben, szintén Párizsban és szintén egy inga segítségével, de némileg eltérő módon Auguste Bravais is bizonyította bolygónk forgását. [2] Bravais azt vette észre, hogy a balra, illetve jobbra forgó kúpinga periódusai kicsit eltérnek egymástól. [3] A következő sikeres kísérlet a szupravezetés felfedezéseért 1913-ban fizikai Nobel-díjjal kitüntetett holland Heike Kamerlingh Onnes nevéhez fűződik, aki 1879-es doktori értekezésében foglalkozott a témával. [4]

Ehhez az illusztris, ám rövid sorhoz csatlakozott 1880-ban a szombathelyi Kunc Adolf és a herényi Gothard Jenő, akik a szombathelyi székesegyházban – a világon tulajdonképpen harmadikként – körülbelül ezer ember előtt szintén elvégezték az ingakísérletet. Magyarország egyik legnagyobb templomában azóta többször is bemutatásra került a híres kísérlet, ebből három az elsőhöz hasonló nagy publicitás mellett zajlott, kettő pedig kisebb körnek szólt, de mindegyik esetben az az ingatest játszotta a főszerepet, amelyet még Gothard Jenő esztergált 1880-ban.

A cikkben röviden áttekintjük a négy nagy szombathelyi ingakísérletet, illetve összefoglaljuk a Foucault-inga fizikájával kapcsolatos legfontosabb tudnivalókat.

Ingakísérletek Szombathelyen

1880. augusztus 25.

1880. augusztus 21. és 27. között Szombathelyen tartotta XXI. Nagygyűlését a Magyar Orvosok és Természetvizsgálók Egyesülete. Az esemény rendezési jogának elnyerésében nagy szerepet játszott a szombathelyi premontrei főgimnázium igazgatója, Kunc Adolf, akinek eredményes oktatásszervező és fejlesztő tevékenységét is elismerték ezzel.

Az összejövetel kétségtelen fénypontját a Foucault-féle ingakísérlet megismétlése jelentette 1880. augusztus 25-én, amelyet Kunc volt gimnáziumi tanítványával, a közben Bécsben gépészmérnöki oklevelet szerzett herényi Gothard Jenővel készített elő és mutatott be. Gothard nem csak az inga felfüggesztő szerkezetét alkotta

meg, de a műhelyében gömb alakúra esztergálta a budapesti Ganz-gyárban külön erre a célra öntetett, mintegy 30 kg tömegű és gyerekfej méretű ingatestet is. Az esztergályozás után a testet higanyban úsztatta, hogy meghatározhassa, a középponttól melyik irányban helyezkedik el a súlypont, mivel ennek feltétlenül a felfüggesztési vonalban a középpont alá kellett esni. Az ingatestet a szombathelyi székesegyházban egy 1,2 mm átmérőjű, majdnem 30 méter hosszúságú huzal tartotta, amelyet a főhajóban függesztettek fel. Gothard a jelenség szemléltetésére egy kremaklitronnak elnevezett szerkezetet is épített, amelynek segítségével a lengési sík elfordulását gyorsabban – bár kevésbé látványosan – lehetett demonstrálni, mint a hosszú ingával. A kísérlet magyarázatát és részletes leírását Kunc Adolf 1882-es cikkében olvashatjuk. [5]

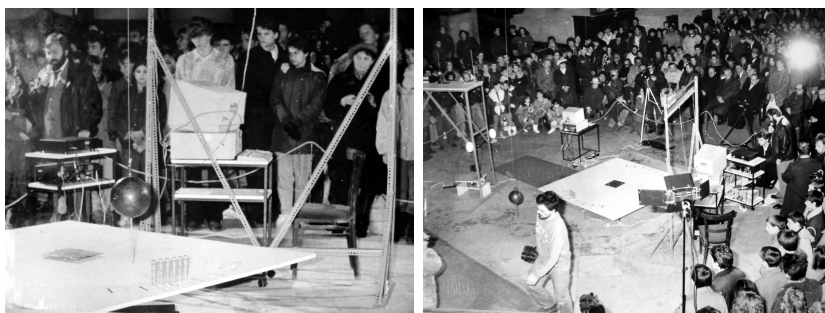


1. ábra. Korabeli rajz az 1880-as ingakísérletről a szombathelyi székesegyházban, illetve a Gothard által készített szemléltető eszköz, a kremaklitron képe. [5]

1991. november 28-29.

A szombathelyi Berzsenyi Dániel Tanárképző Főiskola (BDTF) számos helyi intézménnyel, például az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriummal (GAO) karöltve 1991. november 28-29-én Konkoly István megyéspüspök védnöksége alatt Kunc Adolf-emléknapokat rendezett Szombathelyen a kiváló tudós-tanár, közéleti személyiség és főpap születésének másfélszázados évfordulójának tiszteletére.

Az emlékülés alkalmából került sor, eredeti eszközökkel és az eredeti helyszínen, Kunc Adolf és Gothard Jenő emlékeztető 1880-as Foucault-féle ingakísérletének megismétlésére, amelynek során a BDTF Fizika Tanszékének munkatársai Molnár László és Almási István vezetésével modern műszerekkel méréseket is végeztek.



2. ábra. Az 1991-es kísérletben az inga lengési síkjának elfordulását lézeres berendezéssel és mágneses elven működő eszközökkel mérték a BDTF oktatói. (Fotó: Kaczmarski Zoltán és Simon Zoltán)

A lengési sík elfordulásának kimutatásához az abszolút és óránkénti elfordulás meghatározására is alkalmas számítógépes mérést fejlesztettek. Az egyik mágneses (Hall-szonda), a másik optikai (lézer-fotoérzékelő) elven működött. A mérések részletes leírását az eseményről kiadott emlékkönyvben találhatjuk. [6], [7]

2010. október 19-21.

A jeles esemény 130. évfordulójának tiszteletére az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és a Szombathelyi Székesegyházért Közhasznú Alapítvány szervezésében 2010. október 19. és 21. között ismét lengett a korabeli ingatest a székesegyházban, tisztelegve ezzel a híres elődök nagyszerű teljesítménye előtt.



3. ábra. A zsúfolásig megtelt székesegyházban városi és egyetemi vezetők indították útjára az ingát 2010. október 19-én. (Fotó: nyugat.hu)

Az inga indítására zsúfolásig megtelt a székesegyház. A meghívottakat és az érdeklődőket a város polgármestere és a premontrei rend kormányzó perjele köszöntötték, majd a szervezésben résztvevő felsőoktatási intézmények vezetőivel együtt elindították az ingát. A bizonyosságra – az első bábu elütésére – várva az egybeültek három rövid, a tudománytörténeti előzményekhez, az inga fizikájához és az irodalmi vonatkozásokhoz kapcsolódó előadást hallgathattak meg.

A közel 30 kg tömegű ingatest közben méltóságteljesen lengett a 29 méter hosszú acélszálon és ütötte el sorban egymás után a körben elhelyezett bábukat, ismételt bizonyítva, hogy a Föld valóban forog.

A kísérletet a három nap során körülbelül **10 ezer látogató** tekintette meg!

2014. május 15-16.

Az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet és a Vas Megyei TIT Egyesület által vezetett *Ég és Föld vonzásában – a természet titkai* című TÁMOP 4.2.3.-12/1/KONV-2012-0018 pályázat keretében 2014. május 15-16-án került megrendezésre a **"New challenges in astro- and environmental informatics in the Big Data era"** című konferencia Szombathelyen, a szakterületen működő jeles külföldi és magyar kutatók részvételével.

A konferencia nyitóeseményeként 2014. május 15-én 9 órakor a szombathelyi székesegyházban ismét elindult a Foucault-inga, ami két napig folyamatosan lengve demonstrálta a látogatóknak a Föld forgását.



4. ábra. A székesegyházban összegyűlt érdeklődők, köztük a Big Data konferencia külföldi és magyar résztvevői az ingaindításra várnak 2014. május 15-én reggel. Az indítás előtt készült képen jól látszik, hogy az inga kitérített helyzetében egy vékony fonállal volt kikötve, amelyet az indításhoz el kellett égetni. Erre azért volt szükség, hogy a hosszú szál véletlenül se csavarodjon meg, befolyásolva ezzel az inga mozgását. (Fotó: Kovács Balázs)

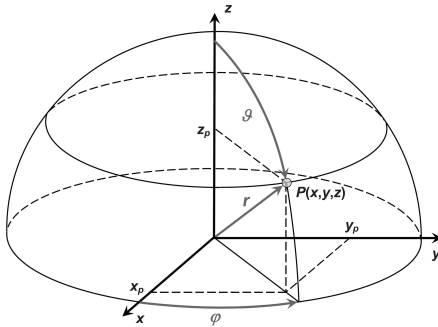
A Foucault-inga fizikája

A következőkben [8] alapján nagyon röviden – szinte csak felsorolásszerűen – összefoglaljuk a Foucault-inga mozgásának megértéséhez szükséges legfontosabb fizikai tudnivalókat.

Vonatkoztatási rendszer

Bármely test (*tömegpont*) – például a Foucault-inga – helyzete, illetve annak megváltozása (*mozgás*) csak más testekhez viszonyítva értelmezhető. A mozgás tanulmányozása során tehát definiálnunk kell egy *vonatkoztatási rendszert*, amihez képest a vizsgált test pillanatnyi helyzetét megadjuk. A testek mozgásának leírásával a *kinematika* foglalkozik.

A vonatkoztatási rendszerhez képest rögzített helyzetű pontok, vonalak, felületek rendszere a *koordináta-rendszer*, ami a vizsgált testek vonatkoztatási rendszerhez viszonyított helyzetének számszerű jellemzésére szolgál. Ilyen például a térbeli derékszögű vagy Descartes-féle koordináta-rendszer, vagy a térbeli polárkoordináta-rendszer (5. ábra). A test vonatkoztatási rendszerhez képesti helyzetét a rendszer *kezdőpontjából* (O) a pontszerűnek tekintett testhez (P) mutató $\mathbf{r}$ *helyvektorral* jellemezzük.



5. ábra. A térbeli Descartes-féle koordináta-rendszerben a test helyzetének jellemzésére az (x, y, z) koordinátákat, míg a térbeli polárkoordináta-rendszerben az (r, φ, ϑ) koordinátákat használjuk.

A tehetetlenség törvénye

A testek mozgásának tanulmányozásakor általában nem elégszünk meg annak megválaszolásával, hogy az más testekhez viszonyítva hogyan történik, hanem az okra is kíváncsiak vagyunk, azaz arra, hogy a vizsgált test mozgásában más testeknek mi a szerepe. Ezzel a kérdéssel a *dinamika* foglalkozik.

A *Newton-féle első axióma*, más néven a *tehetetlenség törvénye* kimondja, hogy minden test nyugalomban marad vagy egyenes vonalú egyenletes mozgást végez, míg más testek hatásai ezen állapot megváltoztatására nem kényszerítik. A testek

azonban a mozgásállapot megváltoztatására irányuló hatásnak ellenszegülnek, ez a tulajdonság a *tehetetlenség*.

Az olyan vonatkoztatási rendszerek, amelyekben érvényes az első axióma, az *inerciarendszerek*. Sok mechanikai jelenség leírása szempontjából a Földhöz rögzített vonatkoztatási rendszerek inerciarendszernek tekinthetők.

A dinamika alaptörvénye

Ha egy testnek egy inerciarendszerhez viszonyított $\mathbf{v}$ sebessége megváltozik, azt mindig más test(ek) hatásának tulajdonítjuk. Ez a hatás az *erő*. A *gyorsulás* azt mutatja meg, hogy milyen ütemben változik a sebesség:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

Amint már említettük, a testek ellenállnak a mozgásállapotuk (sebességük) megváltoztatására irányuló hatásnak. Az ellenállás mértékét jellemző, a test tehetetlenségét kifejező fizikai mennyiség a (*tehetetlen*) *tömeg*. Azt, hogy a testre erő hat, sebességének megváltozásából, a gyorsulásából ismerjük fel: $\mathbf{a} = f(\mathbf{F})$.

Az előzőeket foglalja össze a *Newton-féle második axióma*, azaz a *dinamika alaptörvénye*:

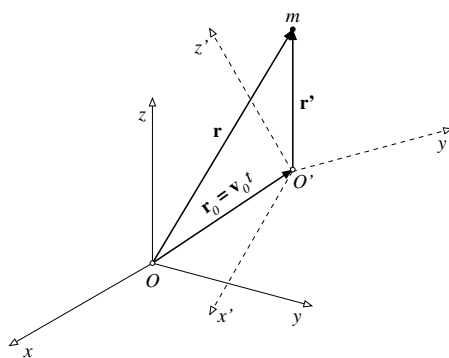
$$\mathbf{F} = m\mathbf{a},$$

azaz egy testre ható erők eredője egyenlő a test (tehetetlen) tömegének és gyorsulásának szorzatával. Természetesen az ok-okozati viszonyokat is figyelembe véve ezt inkább az $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$ alakban kellene felírni.

A Galilei-féle relativitási elv

A *Galilei-féle relativitási elv* azt mondja ki, hogy az egymáshoz képest egyenesvonalú egyenletes mozgást végző vonatkoztatási rendszerek a mechanikai jelenségek leírása szempontjából teljesen egyenértékűek. Könnyen kimutatható, hogy az egymáshoz képest egyenesvonalú egyenletes mozgást végző K és K' vonatkoztatási rendszerben (6. ábra) a test gyorsulása ugyanaz:

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{a} = \mathbf{a}' = \frac{d^2\mathbf{r}'}{dt^2}.$$



6. ábra. Az egymáshoz képest egyenesvonalú egyenletes mozgást végző K és K' vonatkoztatási rendszerben a test gyorsulása ugyanaz.

Mivel a testre ható erők csak a többi testhez viszonyított helyzetől, sebességétől és az időtől függhetnek, az előbbiek alapján a K és K' vonatkoztatási rendszerben ugyanúgy néz ki a dinamika alapegyenlete, ez pedig azt jelenti, hogy a K és K' mechanikai jelenségek alapján nem különböztethető meg!

Jó példa lehet erre a vasútállomáson egymás mellett álló, de ellentétes irányú vonatok esete. Ha az egyik szerelvény – lassan – elindul, nem tudjuk megmondani, hogy a mi vonatunk indult-e el vagy a mellettünk álló. Biztosak csak akkor lehetünk a dolgunkban, ha az állomásépületet is látjuk.

A tehetetlenségi erő

Láttuk tehát, hogy egymáshoz képest egyenesvonalú egyenletes mozgást végző vonatkoztatási rendszerek egyenértékűek a mechanikai jelenségek leírása szempontjából. Egymáshoz képest gyorsuló vonatkoztatási rendszerekre azonban ez már nem igaz!

Képzeljük el a következő kísérletet. Egy kocsira szerelt asztal mellett egy megfigyelő ül, előtte az asztalon egy golyó van. A golyó és az asztal közötti súrlódás elhanyagolható. Legyen a K vonatkoztatási rendszerünk a teremhez rögzítve (és ezt tekintjük most inerciarendszernek), a K' pedig az asztalhoz. Az asztalt mozgassuk $\mathbf{a}_0$ gyorsulással az ábrán jelzett irányban egyenes vonalban (7. ábra (a) panel). Hogyan értelmezi a K -ban és a K' -ben helyet foglaló megfigyelő a bekövetkező jelenséget?

A K -ban helyet foglaló megfigyelő azt fogja mondani, hogy a golyóra ható erők eredője zérus, ezért az nyugalomban van, a kocsin helyet foglaló ember közeledik a golyó felé. Ezzel szemben a K' -ben helyet foglaló megfigyelő szerint a golyó $-\mathbf{a}_0$ gyorsulással mozog felé, ő pedig ehhez igyekszik valami erőhatást párosítani.

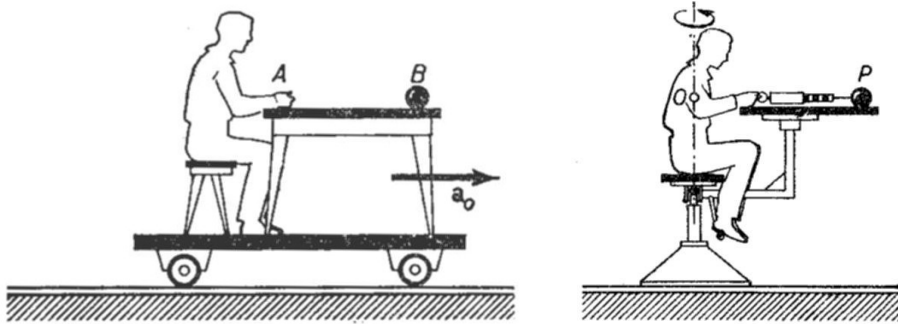
Ha a dinamika alaptörvényét a K' rendszerben is érvényesnek akarjuk tekinteni, akkor azt kell mondanunk, hogy ebben a rendszerben, tehát az inerciarendszerhez képest $\mathbf{a}_0$ gyorsulással mozgó rendszerben az inerciarendszerben is fellépő erőkhöz még a nem valódi

$$\mathbf{F}_{\text{teh}} = -m\mathbf{a}_0$$

tehetetlenségi erőt is hozzá kell adnunk.

A centrifugális erő

Legyen továbbra is a K rendszerünk az előadóteremhez rögzített inerciarendszer, a K' pedig a K -hoz képest állandó ω szögsebességgel forgó rendszer, például az ábrán látható asztallal kombinált forgó zsámoly. A zsámolyon helyet foglaló megfigyelő egy dinamométeren keresztül tartja r sugarú körpályán az m tömegű P golyót. Azt tapasztalja, hogy az erőmérő $m\omega^2 r$ nagyságú erőt jelez.



(a) Egyenesvonalú gyorsuló mozgást végző koordináta-rendszerben a tehetetlenségi erő a gyorsulás irányával ellentétes.

(b) Forgó rendszerben a sugárirányban kifelé mutató tehetetlenségi erő a centrifugális erő.

7. ábra. Gyorsuló mozgást végző koordináta-rendszerekben a dinamika alaptörvénye csak akkor lesz változatlan formában érvényes, ha a valódi erők mellett ún. tehetetlenségi erőket is figyelembe veszünk. [8]

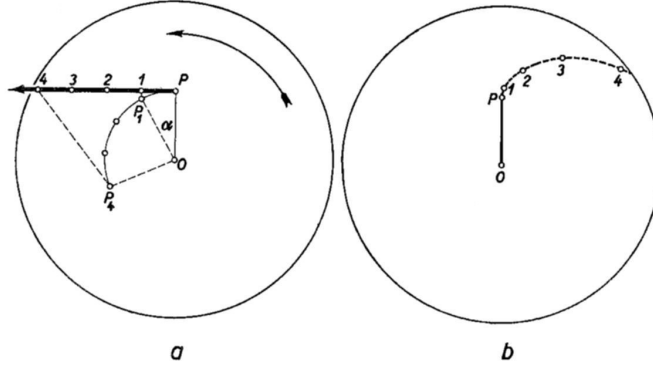
A K -ban nyugvó megfigyelő azt mondja, hogy a golyó egyenletes körmozgást végez az r sugarú körpályán, az ehhez szükséges $\mathbf{F}_{cp} = -m\omega^2\mathbf{r}$ centripetális erőt az erőmérő megnyúlt rugója fejti ki. Ezzel szemben a K' -ben nyugvó megfigyelő (a zsámolyon forgó személy) a golyót nyugalomban látja, de érzi az izmai által kifejtett $-m\omega^2r$ erőt, ezért az a következtetése, hogy a golyóra egy $-m\omega^2r$ nagyságú, de kifelé mutató erőnek is kell hatnia. A forgó rendszerbeli megfigyelő által érzékelt kifelé mutató erő a centrifugális erő:

$$\mathbf{F}_{cf} = m\omega^2\mathbf{r}.$$

A Coriolis-erő

Tegyük fel, hogy a zsámolyon ülő megfigyelő az ábrának megfelelően a P pontban elengedi a bekormozott, s így a pályájának felrajzolására alkalmas golyót.

A K -ban nyugvó megfigyelő azt mondja, hogy az elengedés után a golyóra már nem hat erő (a súrlódás elhanyagolható), így az a $v_P = r\omega$ érintő irányú sebességét megtartva fog mozogni a $P-1-2-3-4$ egyenes mentén (lásd 8. ábra (a) része). A K' -ben helyet foglaló megfigyelő ezzel szemben azt tapasztalja, hogy az elengedett golyó sugárirányban kifelé indul el, amit ő a centrifugális erő hatásának tulajdonít. Gyorsan észreveszi azonban, hogy a golyó eltér oldalirányban, és a $P-1-2-3-4$ görbe mentén (lásd 8. ábra (b) része) mozog. Ebből viszont azt a következtetést vonja le, hogy a forgó rendszerben a centrifugális erőn kívül másik tehetetlenségi erő is hat. Ez a *Coriolis-erő*, melynek iránya merőleges a



8. ábra. Forgó rendszerben a centrifugális erőn kívül egy másik tehetetlenségi erő is fellép, ami a testet a mozgásirányához képest oldalra téríti el. [8]

test sebességére és a forgástengelyre is:

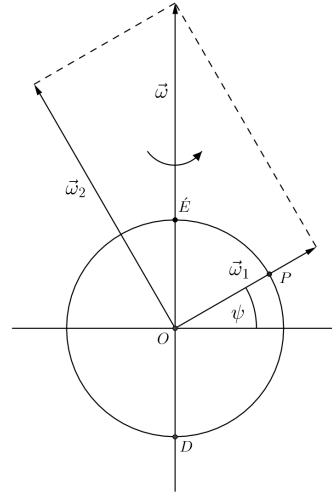
$$\mathbf{F}_{\text{Cor}} = 2m\mathbf{v} \times \vec{\omega}.$$

A Föld mint forgó vonatkoztatási rendszer

Eddig a Földet inerciarendszernek tekintettük, de bolygónk forog a tengelye körül a nagyon távoli galaxisok által definiált inerciarendszerhez képest. A forgás szögsebessége $\omega = 2\pi/86\,164 \text{ s} = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Kérdés, hogy vannak-e olyan jelenségek, amelyeket a forgó Földön nyugvó megfigyelő csak a tehetetlenségi erők bevezetésével tud értelmezni, közvetett módon igazolva azt, hogy egy forgó rendszerben van.

A centrifugális erő felelős a Föld lapultságáért, illetve a súly helytől való függéséért, ezekre a jelenségekre most bővebben nem térünk ki.

A Coriolis-erő hatásának vizsgálatához az $\vec{\omega}$ -t bontsuk fel két komponensre: $\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2$. A ψ földrajzi szélességű P pontban $\vec{\omega}_1$ merőleges a felszínre, $\vec{\omega}_2$ pedig párhuzamos vele. A 9. ábra alapján $\omega_1 = \omega \sin \psi$ és $\omega_2 = \omega \cos \psi$, a Coriolis-erő megfelelő komponensei pedig



9. ábra. A Coriolis-erő hatását célszerű az $\vec{\omega}$ vektor komponensei szerint tanulmányozni.

$$\mathbf{F}_{C1} = 2m\mathbf{v} \times \vec{\omega}_1 \text{ és } \mathbf{F}_{C2} = 2m\mathbf{v} \times \vec{\omega}_2.$$

A Coriolis-erő C2 komponensének hatásai

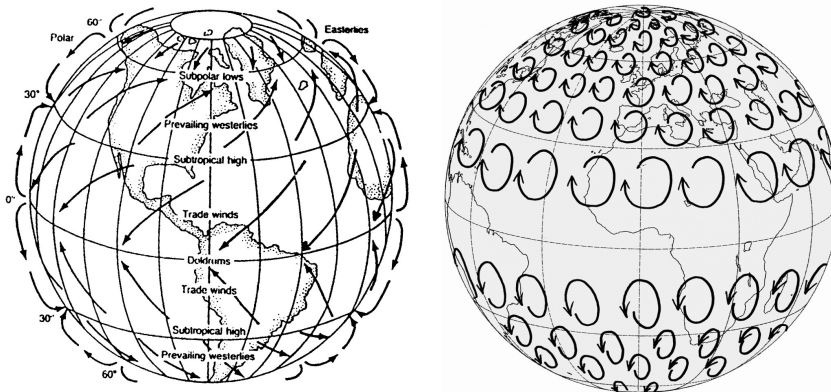
Az $\mathbf{F}_{C2} = 2m\mathbf{v} \times \vec{\omega}_2$ komponens egy függőlegesen eső testnél kelet felé mutató erőt jelent mindkét féltekén, így ez a komponens okozza például a szabadon eső testek kelet felé való eltérülését. Magyarországon 100 méter esési magasságnál ez az eltérés körülbelül 1,5 cm. Inerciarendszerből nézve az történik, hogy a Földdel együtt forgó test megtartja az elejtés előtt meglévő, kelet felé mutató, a talpponti sebességnél nagyobb sebességkomponensét is, ezért a talpponttól keletre fog földet érni.

Kelet-nyugati irányban mozgó test esetén az $\mathbf{F}_{C2}$ függőlegesen lefele mutat, így a nyugat (kelet) felé mozgó testek látszólagos súlynövekedést (súlycsökkenést) szenvednek. Ez az *Eötvös-effektus*. Magyarországon egy 70 kg tömegű és 1 m/s sebességgel mozgó testnél (ember) értéke körülbelül 0,01 N.

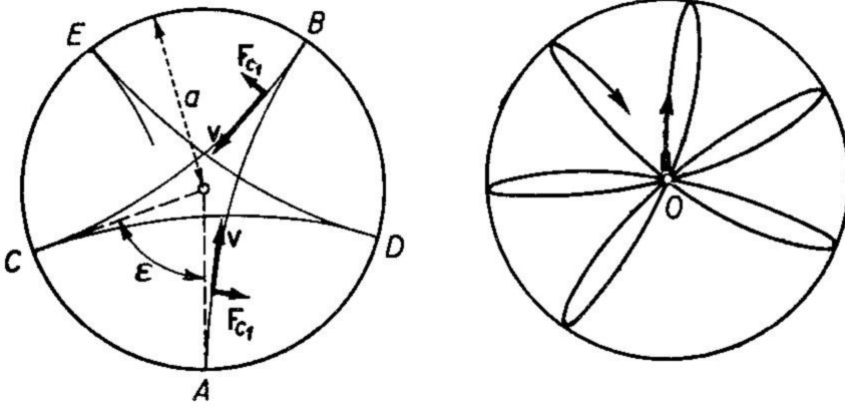
A Coriolis-erő C1 komponensének hatásai

Az $\mathbf{F}_{C1} = 2m\mathbf{v} \times \vec{\omega}_1$ komponens az északi (déli) féltekén vízszintes síkban mozgó testnél a sebességre merőlegesen jobbra (balra) irányuló erőt jelent. Ez a komponens felelős például

- a lövedékek jobbra (balra) történő eltéréséért az északi (déli) féltekén,
- az áramló levegő eltérítéséért, az északkeleti és délkeleti passzátszelek kialakulásáért,
- a ciklonok keletkezéséért és a két féltekén eltérő forgásirányukért,
- valamint az **inga lengési síkjának elfordulásáért!**



10. ábra. A Coriolis-erő felelős a földi légkör nagyléptékű mozgásainak, például a passzátszeleknek és a ciklonoknak egyes tulajdonságaiért, előbbiek esetében a mozgás, utóbbiak esetében a forgás irányáért.



11. ábra. A Coriolis-erő okozza az inga lengési síkjának elfordulását is. Ha az ingát kitérített helyzetből indítjuk, a baloldalon látható nyomot rajzolja, ha pedig egyensúlyi helyzetből lökjük ki, akkor a jobboldali nyomot kapjuk. [8]

A Foucault-féle ingakísérlet

A ψ földrajzi szélességű helyen a lengési sík a Földhöz képest $\omega_1 = \omega \sin \psi$ szögsebességgel forog, az északi féltéken észak-kelet-déli irányban:

$$\omega_1 = \omega \sin \psi \approx 2\pi \sin \psi \text{ nap}^{-1} = 15^\circ \sin \psi \text{ óra}^{-1}.$$

Magyarországon $\psi \approx 47,5^\circ$ ($\sin \psi \approx 0,74$), $\omega_1 \approx 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \approx 11^\circ \text{ óra}^{-1}$, tehát az inga lengési síkja óránként 11° -kal fordul el. Egy 28,8 m hosszú, $a = 2,5$ m amplitúdójú, $T \approx 10,8$ s lengésidejű inga esetében a lengési sík egy lengés alatti elfordulása $\varepsilon = aT\omega \sin \psi \approx 1,3$ mm. A lengési sík teljes körbefordulási ideje Magyarországon $24 \text{ óra} / \sin \psi \approx 33 \text{ óra}$. A sarkokon a körbefordulási idő 24 óra, az egyenlítőn a hatás nem jelentkezik.

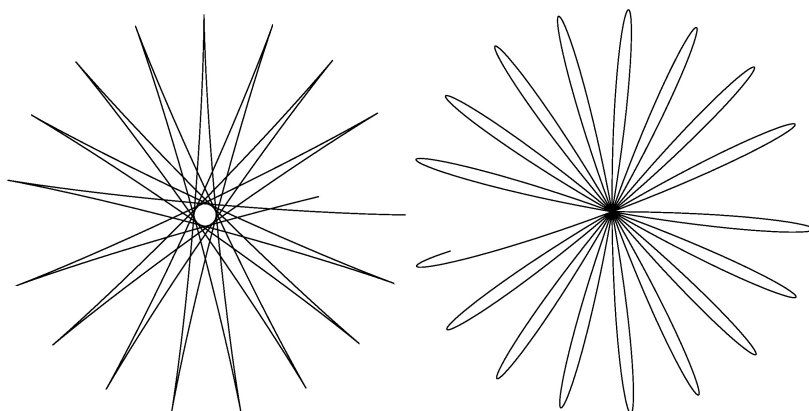
Az inga térbeli mozgásának a vízszintes (x, y) síkra eső vetületét leíró differenciálegyenletek a következők:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} - 2\omega_1 \frac{dy}{dt} + \Omega^2 x = 0,$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\omega_1 \frac{dx}{dt} + \Omega^2 y = 0,$$

ahol $\Omega^2 = g/l$, g a gravitációs gyorsulás az adott helyen, l pedig az inga hossza.

Ha az inga mozgását a távoli galaxisok által definiált inerciarendszerhez képest vizsgáljuk, akkor azt mondhatjuk, hogy az inga lengési síkja nem változik, a Föld fordul el alatta $\omega \sin \psi$ szögsebességgel.



12. ábra. A Foucault-inga mozgásegyenleteit numerikusan integrálva felrajzoltathatjuk az ingatest által leírt pálya vízszintes síkra eső vetületét, az inga nyomát, amint a mozgás során a lengési síkja elfordul. A baloldali nyomot akkor kapjuk, ha az inga kitérített helyzetből indul, a jobboldalit pedig akkor, ha egyensúlyi helyzetében lökjük meg. Azért, hogy a lengési sík egyébként lassú elfordulását érzékelhessük, az integrálás során a Föld szögsebességét a valódi hatszázszorosának választottuk.

Hivatkozások

- [1] Foucault, J.B.L.: Démonstration physique du mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule, *C. R. Acad. Sci. (Paris)* **32** 135-8 (1851)
- [2] Bravais, A.: Sur l'influence qu'exerce la rotation de la Terre sur le mouvement d'un pendule à oscillations coniques, *C. R. Acad. Sci. (Paris)* **33** 195-7 (1851)
- [3] Barenboim, G. & Oteo, J.A.: One pendulum to run them all, *European Journal of Physics, Volume 34, Issue 4, article id. 1049* (2013)
- [4] Schulz-DuBois, E.O.: Foucault Pendulum Experiment by Kamerlingh Onnes and Degenerate Perturbation Theory, *Am. J. Phys.* **38**, 173 (1970)
- [5] Kunc Adolf: Ingakísérlet, in *A Magyar Orvosok és Természetvizsgálók 1880. aug. 21-től aug. 27-ig Szombathelyen tartott XXI. nagygyűlésének történeti vázlatja és munkálatai*, Budapest, 1882, 76. o.
- [6] Gál László és Molnár László: A Foucault-inga mozgásának vizsgálata optikai érzékeléssel, in *Emlékkönyv Kunc Adolf premontrei prépost születésének 150. évfordulója alkalmából*, Szombathely, 1993, 121. o.
- [7] Almási István és Soós Sándor: A Foucault-inga mozgásának vizsgálata Hall-szenzorok segítségével, in *Emlékkönyv Kunc Adolf premontrei prépost születésének 150. évfordulója alkalmából*, Szombathely, 1993, 133. o.
- [8] Budó, Á.: Kísérleti fizika I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978