

A CORIOLIS-ERŐ ÉS A MODERN KÖRNYEZETFIZIKA: A LEFOLYÓTÓL A CIKLONOKIG

Tél Tamás
ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék

Gyakran halljuk a kérdést: minek alapján lehet eldönteni egy ablak nélküli fürdőszobában, hogy az északi vagy a déli félgömbön vagyunk-e. A válasz a lefolyóban áramló víz forgásiránya, melyet a Coriolis-erő határoz meg. De ha ilyen jelentős a Coriolis-erő, akkor miért állíthatjuk mégis, hogy ugyanez a fürdőszoba (sőt minden földi laboratórium) jó közelítéssel inerciarendszer? És hogyan van ez összhangban azzal a ténnyel, hogy a ciklonok, hurrikánok (és ezernyi más légköri és óceáni jelenség) kialakulásában meghatározó fontosságú a Coriolis-hatás? Ezekre a kérdésekre keressük a választ a cikkben.

A Coriolis-erő

A Coriolis-erő az egyenletes ω szögsebességgel forgó koordináta-rendszerekben ható fiktív (tehetetlenségi) erő [1], melynek fellépése abból adódik, hogy a forgó rendszerben v sebességgel mozgó m tömegű test extra gyorsulásnak van kitéve, mintha rá még egy erő hatna – forgásten-gelyre merőleges síkban történő mozgás esetén –, a

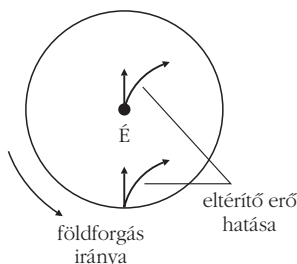
$$F_c = 2 m v \omega \quad (1)$$

nagyságú Coriolis-erő. Ez az erő tehát *csak mozgó testekre hat*. Iránya *a sebességre merőleges*, ezért eltérítő erő. A testen munkát nem is képes végezni!

Az óramutatóval ellentétes forgás, pozitív szögsebesség esetén a Coriolis-erő mindig a sebességtől jobbra mutat (1. ábra), nagysága *független* a test sebességének irányától. A földi mozgásokat ennek megfelelően az északi félgömbön mindig jobbra, a délin balra téríti el.

A Coriolis-erő általános levezetése helyett egy konkrét példán mutatjuk be fellépésének szükségességét. Tekintsünk egy álló testet, melyet egy ω szögsebességgel pozitív irányban forgó körhintából figyelünk. Itt azt látjuk, hogy állandó v sebességgel körpályán mozog. Ha rá csak az $m v \omega^2 = m v \omega$ centripetális erő hatna a forgó rendszerben, akkor egyre távolabb kellene kerülnie. Ahhoz, hogy körpályán maradjon, hatnia kell tehát rá *még egy* tehetetlenségi erőnek. Ennek akkorának kell lennie, hogy az eredő a befelé mutató $m v \omega$ centripetális erőt adja. A hiányzó

1. ábra. A Coriolis-erő hatására történő eltérülés a Föld északi félgömbjén, egy kilencedik osztályos földrajz-könyv [2] ábrája szerint.



erő nagysága így éppen $2 m v \omega$, s ez a Coriolis-erő. Ez a fiktív erő nevét első részletes leírójáról *Gaspard Gustav de Coriolis*-ről (1792–1843) kapta (akinek fő cikke 1835-ban született). A forgó Földön lezajló jelenségekre gyakorolt hatására *Foucault* kísérlete (1851) hívta fel a figyelmet, aki levezette, hogy a Coriolis-erő következtében az inga lengési síkjának lassan el kell fordulnia. Kísérletével megmutatta, hogy a mért és a számolt érték megegyezik, s ezzel elsőként szolgált bizonyítékkal a Föld forgására [1].

Mekkora az eltérülés?

Könnyen meghatározható, hogy mennyit térül el eredeti irányától az ω szögsebességű forgás következtében az egyenletes U sebességgel mozgó test, L út megtétele után (2. ábra). Kis eltérülést feltételezve, az eltelt idő $t = L/U$. Gyorsulása az eredeti irányra merőlegesen $a_c = 2 U \omega$, ezért az eltérülés

$$D = \frac{a_c}{2} t^2 = \frac{\omega L^2}{U}, \quad (2)$$

amelyből

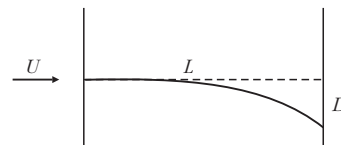
$$\frac{D}{L} = \frac{\omega L}{U}. \quad (3)$$

A D eltérülésnek a teljes L elmozduláshoz viszonyított arányát tehát az $\omega L/U$ hányados adja. Annak ellenére, hogy a Coriolis-gyorsulás a sebességgel nő, az eltérülés fordítottan arányos a sebességgel, ugyanis gyorsabb mozgás esetén a Coriolis-erő rövidebb ideig hat!

Mennyire inerciarendszer egy földi laboratórium?

A Föld ω_f forgási szögsebessége 1 fordulat (2π radián) per nap, azaz 86400 másodperc, s ezzel $\omega_f = 7,3 \cdot 10^{-5}$ 1/s. A vízszintes síkban történő mozgások szempontjából a Föld forgási szögsebessége vektorának a helyi függőleges irányba mutató komponense határozza meg a Coriolis-erőt. Ez a φ szélességi körön ($\varphi = 0$ jelenti az Egyenlítőt, $\varphi = \pi/2$ az Északi Sarkot) $\omega_f = \omega_f \sin \varphi$, s így a Coriolis-erő vízszintes összetevőjének nagysága $F_c = 2 m v \omega_f$. A közepes szélességeken, mint hazánkban is számolhatunk $\varphi = \pi/4$ -gyel, azaz $\omega_f = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/s.

2. ábra. Az U sebességű test D eltérülése L út megtétele után pozitív forgásirányú rendszerben.



Inerciarendszerben semmilyen eltérést nem tapasztalnánk. Egy földi laboratórium akkor tekinthető jó közelítéssel inerciarendszernek, ha benne az eltérés kicsi. A

$$\frac{D}{L} = \frac{\omega_f L}{U} \quad (4)$$

relatív eltérés tehát az a mérőszám, amely megadja, hogy mekkora hibát követünk el, ha inerciarendszernek tekintjük a laboratóriumot. Közepes földrajzi szélességen $L = 10$ m méretű mérőasztalt és $U = 1$ m/s tipikus sebességeket feltételezve,

$$\frac{D}{L} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s} \frac{10 \text{ m}}{1 \text{ m/s}} = 5 \cdot 10^{-4},$$

azaz 0,05% relatív hibát követünk csak el, ha a Coriolis-erőt elhanyagoljuk!

A függőleges irányú mozgások szempontjából a Föld forgási szögsebesség-vektorának a helyi vízszintes irányba mutató $\omega_v = \omega_f \cos \varphi$ vetülete a lényeges. Az $F_c = 2m v \omega_v$ felfelé mutató Coriolis-erő a keletre haladó testeket *emeli*, súlyukat csökkenti [3]. Ez az úgynevezett Eötvös-hatás [1]. Ez a hatás például a kalapácsvetés 80 m-es hosszát mintegy 5 cm-rel befolyásolja [4]. Az Eötvös-hatás erősségét a $2U\omega_v$ Coriolis-gyorsulás és a g gravitációs gyorsulás $2U\omega_v/g$ hányadosa határozza meg. Laboratóriumi értéke a fenti adatokkal 10^{-3} . A szoba tehát valóban igen jó közelítéssel inerciarendszer.

Mi a helyzet a lefolyóval?

A lefolyó körüli legszimmetrikusabb áramlás az, melyben minden folyadékrezecske egyenesen, a középpont felé mozog. Nyomáskülönbség vagy külső erő hatására a részecskék általában örvénylő mozgást is végeznek. Ha ez az örvénylés egyedül a Coriolis-erő következménye, akkor az eredetileg a középpont felé induló részecskék az északi féltekén jobbra eltérülnek, és az óramutató járásával ellentétes, pozitív körforgású örvény jön létre, olyan, amit (egészen más összefüggésben) a *4.b ábrán* látunk majd. A déli féltekén fordított a helyzet. Ahhoz azonban, hogy a Coriolis-erő lényeges legyen egy földi laboratóriumban, minden más hatást ki kell küszöbölünk, legalább ezrelék pontosságig. Ezt általában nem tudjuk biztosítani, hiszen a fürdőkád vagy kézmosó kagyló nem hengersizmetrikus geometriája eleve ennél nagyobb nyomási erőket hoz létre, a dugó kihúzásakor keltett áramlás hatásáról nem is beszélve. A hétköznapi tapasztalat ezért *nem* mutatja a lefolyók kitüntetett örvénylési irányát az egyes féltekéken: mindkét irányú forgás előfordulhat egyetlen fürdőszobán belül is. (Érdemes megjegyezni, hogy magán az Egyenlítőn nem is várható kitüntetett irány, mert ott a vízszintes síkbeli mozgásokra nem hat Coriolis-erő, hiszen a Föld szögsebességének helyi függőleges komponense: $\omega_f = \omega_f \sin 0 = 0$).

Gondosan megtervezett kísérletekben azonban elérhető, hogy minden zavaró hatást kiküszöböljenek. Az első *A. Perrot* végezte [5] nyolc évvel Foucault után, 1859-ben Párizsban. Hatalmas henger alakú tartályt használt, kis-

1. táblázat

A relatív eltérés függése a megtett L távolságtól, $U = 10$ m/s sebesség mellett, közepes szélességeken, $\varphi = \pi/4$. (A vizek mozgására jellemző $U = 1$ m/s sebességekkel a D/L értékek rendre 10-szer nagyobbak adódnak.)

| L (km) | D/L (%) |
|----------|-----------|
| 1 | 0,5 |
| 10 | 5 |
| 100 | 50 |
| 1000 | 500 |

méretű kifolyóval az alján, s a vizet egy teljes napig hagyta megnyugodni. A dugó hirtelen kihúzása után valóban pozitív irányú örvénylés jött létre. A kísérletet a hatvanas években is megismételték Bostonban: *A.H. Shapiro* 6 m átmérőjű, körülbelül 15 cm magas tartályt használt, s az áramlásról filmfelvételt is készített.

Egy jól érzékelhető effektus: a falklandi céltévesztés

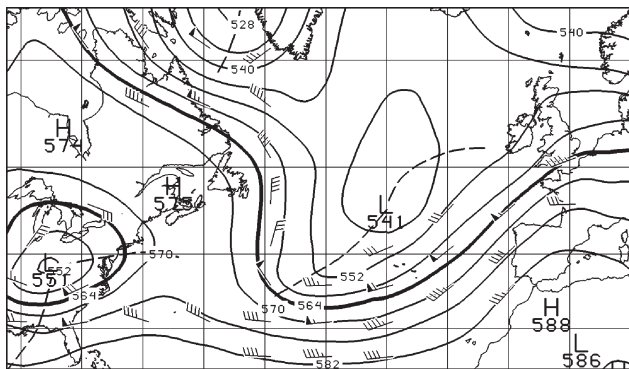
1915-ben, az első világháború idején a Falkland-szigetek térségében (déli szélesség 50. fok) tengeri ütközetre került sor a német és angol hadihajók között. Az angolok nagy távolságból (több 10 km) igen pontosan céloztak, de ennek ellenére mintegy 100 méterrel eltévesztették a célt. A lövedékek a megcélzott hajók bal oldalán csapódtak a vízbe. Ez a Coriolis-erő következménye – gondolhatjuk –, mely a déli féltekén balra téríti el a mozgó testeket. Igen ám, de a hajók célzóműveibe addigra már beépítették a Coriolis-hatást kompenzáló berendezést. A baj csak az volt, hogy ezt az Anglia (északi szélesség 50. fok) körüli csatákra tervezték. A hiba így a déli féltekén a Coriolis-eltérés kétszerese lett!

A nagy folyók aszimmetrikus partmosása

Történelmi példánk sugallja, hogy a Coriolis-hatás jelentősége függ attól, hogy mekkora távolságra terjed ki az a mozgás, melyet vizsgálunk. A 10 km-es skálán a Coriolis-erő egy jól megfigyelhető békés következménye, hogy az északi félgömb nagy kanyarulatokat leíró folyói, mint például a Volga, a jobb partot erősebben mossák, mint a bal oldalt. Ez a különbség az élesen kanyargó folyókon, ahol a kanyarulatok átlagos görbületi sugara kisebb 10 km-nél, még nem érzékelhető.

A Coriolis-hatás távolságfüggő!

A (4) kifejezés világosan mutatja a Coriolis-erő sajátos tulajdonságát: a hatására bekövetkezett relatív eltérés $n\theta$ a távolsággal (közel állandó sebességek mellett). Az *1. táblázat* a relatív eltérés értékeit adja meg egyre nagyobb L távolságokon, a légköri mozgásokra jellemző 10 m/s sebességre.



3. ábra. Meteorológiai térkép az USA keleti partja, az Atlanti-óceán és Nyugat-Európa térségéről körülbelül 5 km-es magasságban, 2006. május 15-én. A sima vonalak állandó nyomású görbék, izobárok jelölnek, a kis zászlós szakaszok a szélvektorok (a zászlók száma arányos a szél erősséggel, rúdjuk az áramlás irányába mutat). Jól látszik, hogy a szél iránya párhuzamos az izobárokkal, azaz merőleges a nyomási gradiensen. Az L jelű tartományok alacsony nyomású képződmények, ciklonok. [weather.noaa.gov/pub/fax.PPAA51.gif]

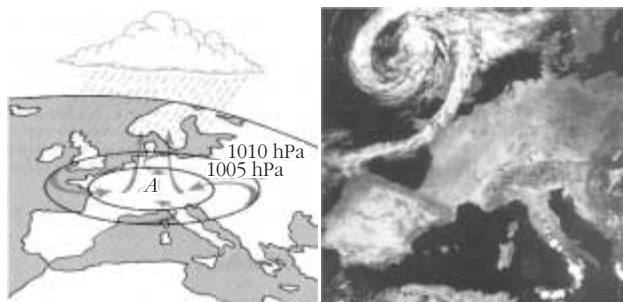
A táblázatból jól látszik, hogy a laboratórium 10 méteres kiterjedésével szemben, a 10 km-es távolságon az eltérülés már semmiképpen sem hanyagolható el, az ennél nagyobb távolságokon pedig már összemérhető vagy nagyobb, mint az egyenes menti elmozdulás. (Megjegyezzük, hogy a (4) összefüggés levezetésekor feltételeztük, hogy az eltérülés kicsi, ezért az eredmény $L > 10$ km esetén már korrekcióra szorul. Jelen formája is jól mutatja azonban a nagyságrendi viszonyokat.) A táblázat eredményei egyben azt is jelzik, hogy egy megyéni kiterjedésű, vagy annál nagyobb tartomány már egyáltalán nem tekinthető inerciarendszernek! A táblázat utolsó sora egyértelműen mutatja, hogy a több száz km-es földi távolságokon a vízszintes síkbeli mozgásokban a Coriolis-erő minden más erőnél fontosabbá válik.

A szél és a víz nem arra mozog, amerre a nyomás hajtja!

A nagy kiterjedésű, vízszintes síkban zajló áramlásokban a viszkózus, a centrifugális stb. erők mind elhanyagolhatók a Coriolis-erő mellett.¹ Közéltőleg időfüggetlen, illetve lassan változó áramlás ezért csak úgy alakulhat ki, ha a nyomáskülönbségből adódó erő a Coriolis-erőt egyensúlyozza. Mivel a sebesség ennek irányára merőleges, a levegő az állandó nyomású görbékkel, az izobárokkal párhuzamosan áramlik. Ez ellentmond annak a hétköznapi (laboratóriumi skálájú) megfigyelésnek, miszerint a folyadékreszek (pl. egy csőben) az alacsonyabb nyomású

¹ A környezeti áramlásokban a forgatottság jellemzésére az $Ro = U/(2\omega_e L)$ Rossby-számot használják, mely akkor kicsi, ha a forgás lényeges. Vegyük észre, hogy a (4) relatív eltérülés a Rossby-számmal fordítottan arányos $D/L = 1/(2Ro)$. A laboratóriumi mozgások Rossby-száma tehát nagy. A nagyskálájú környezeti áramlásokban a Rossby-szám tipikus értéke viszont 10^{-1} – 10^{-2} körüli, a táblázattal összhangban. Az a tény, hogy a Rossby-szám független a sűrűségtől, jelzi, hogy a Coriolis-hatás vízben és levegőben egyaránt fontos.

A függőleges mozgás szempontjából a Rossby-szám megfelelője a $g/(2U\omega_e)$ hányados. Ez azonban nem függ a lineáris mérettől, ezért a Coriolis-erő függőleges komponense (100 km/h-s sebességéig) mindig elhanyagolható a súly mellett.



4. ábra. Ciklonok. a) Sematikus kép a ciklonra jellemző körkörös áramlásról [3]-ból. b) Műholdfelvétel egy Anglia felett elhelyezkedő ciklon alacsony szintű felhőzetéről. Ezen jól látszik az, amit a lefolyó kapcsán vártunk: a középpont felé haladó áramlás jobbra eltérül [European Space Agency].

hely felé mozognak. *A szél nem arrafelé fúj, amerre a nyomáskülönbség hajtja, hanem arra merőlegesen!* Jól megfigyelhető ez a meteorológiai térképen (3. ábra), ahol a szélirányok valóban közel párhuzamosak az izobárokkal.

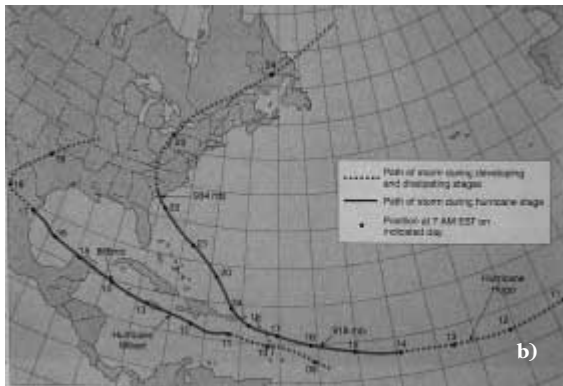
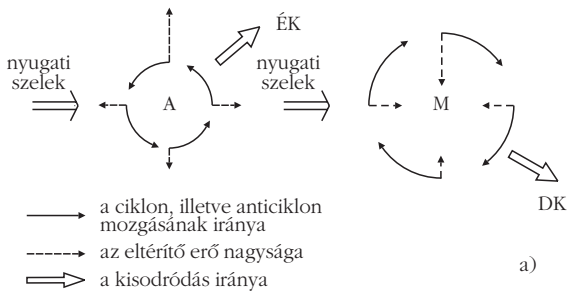
A ciklonok olyan légköri képződmények, melyek magja alacsony nyomású, s körülötte az izobárok körkörösén helyezkednek el. Az alacsony központi nyomás miatt középen feláramlás, a talaj közelében pedig lassú összeáramlás figyelhető meg (4.a ábra). Az elrendezés tehát egy fejjel lefelé álló lefolyóhoz hasonló. Az, amit a konyhai lefolyóban hiába kerestünk, annál tízmilliószor nagyobb méretben (a ciklonok átlagos sugara 1000 km, szemben a lefolyó 10 cm-es örvényével) *kivétel nélkül mindig* megvalósul: az örvénylés az északi féltekén az óramutató járásával ellentétes (4.b ábra). Mivel a Coriolis-erő dominál, az összeáramlás meglehetősen gyenge. Ennek a „lefolyónak” a megjelenésekor rendszerint mégsem az áramlási képével törődünk, hanem az általa hordozott időjárási helyzettel, hiszen a feláramlás nedves levegőt szállít, melyből sok csapadék képződhet.

A nagy tavak és az óceánok áramlásaiban is fellép egy hasonló eltérés a naivan várt irányhoz képest. A 19. század végén a híres sarkkutató, F. Nansen figyelte meg az északi szélességeken, hogy a jéghegyek mozgása a szél irányától szisztematikusan jobbra tér el. A részletes vizsgálat a Coriolis-hatás alapján kimutatta, hogy a szélnyírás által megmozgatott felső vízréteg *nem abba az irányba áramlik, amelybe a szél fúj, hanem arra merőlegesen!* Ez a jelenség hatalmas víztömegek megmozgatásáért felelős, s a környezeti hidrodinamika egyik alapigazsága.

A Coriolis-hatás függése a földrajzi szélességtől

A Föld gömb alakjának fontos következménye, hogy az ω_e függőleges szögsebesség-komponens függ a földrajzi szélességtől. Ennek következtében az adott sebességű testre ható Coriolis-erő vízszintes összetevője a sarkok felé közeledve nő.

A mérsékelt égövünkben a ciklonokat és anticiklonokat az uralkodó nyugati szél lassan kelet felé sodorja. Pályájuk azonban nem egyenes. Az örvény északi és déli oldalán az áramlási sebesség közel azonos nagyságú és ellentétes irányú, az északi oldalon azonban nagyobb az



5. ábra. Ciklonok kisodródása. A Coriolis-erő földrajzi szélességtől való függése miatt a ciklonokra ható eredő Coriolis-erő nem nulla, hanem az északi féltekén északi irányú. a) A mérsékelt égövben a nyugati szél által hordozott mérsékeltövi ciklonok (a rajz bal oldala) ezért ÉK-re mozdulnak el, az anticiklonok (jobb oldal) pedig DK-re [2]. b) A trópusi ciklonokat, a hurrikánokat a passzát szelek nyugat felé sodorják, de később ezért északra kanyarodnak. A képen a Gilbert-hurrikán (1988. szeptember 10–22., alsó görbe) és a Hugo-hurrikán (1989. szeptember 8–20., felső görbe) pályája látható [www.uuc.edu/.../hurricane_gil_hugo_track.jpg].

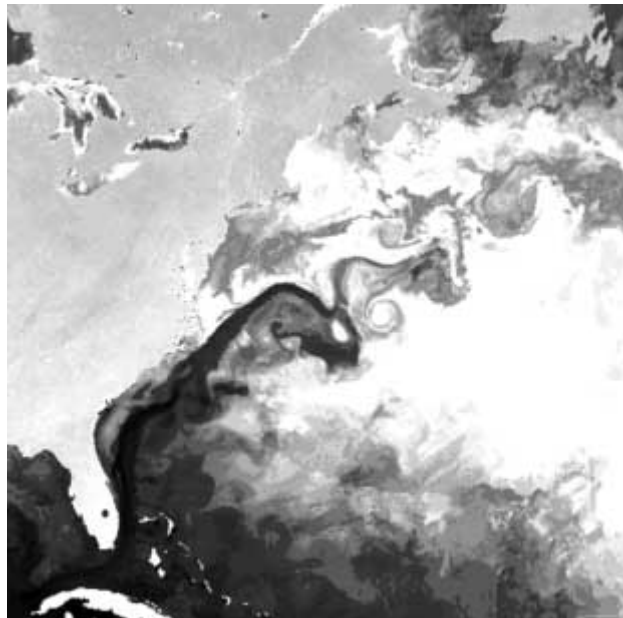
ω_j szögsebesség és ezáltal a Coriolis-erő. A ciklonokban ezért északra, az anticiklonokban pedig délre mutat az *eredő* Coriolis-erő (5.a ábra), s ennek megfelelően sodródási irányuk ÉK, illetve DK.

A hurrikánok, tájfunok a meleg trópusi vidékeken keletkeznek, gyűjtőnevük ezért trópusi ciklon. (A trópusi nem egyenlítőit jelent, hiszen ott, mint láttuk, a vízszintes síkban nem hat a Coriolis-erő, ezért egyenlítői ciklonok *nem* létezhetnek.) A trópusi ciklonok a 15 fok körüli szélességen alakulnak ki, ezért őket az ott uralkodó passzát szelek nyugat felé sodorják. Az eredő Coriolis-erő ugyanolyan jellegű, mint mérsékeltövi társaikban, de a jóval gyorsabb szelek (200 km/h) miatt jóval nagyobb. Az tehát, hogy az Atlanti-óceán déli medencéjében keletkező hurrikánok nem egyszerűen áthaladnak Közép-Amerikán, hanem következetesen az USA partjai felé kanyarodnak el (5.b ábra), a Coriolis-hatás földrajzi szélességtől való függésének bizonyítéka!

Légköri hullámok, tengeráramlatok

A Coriolis-erő földrajzi szélességtől való függése a környezeti hidrodinamika számos további jelenségéért is felelős, melyek közül csak a legfontosabbakat említjük.

– A ciklonok és anticiklonok között a meteorológiai térképeken kígyózó, meanderező áramlás figyelhető meg (hullámzó vastag vonal a 3. ábrán). Ez egy lassú hullám, úgynevezett Rossby- vagy *planetáris hullám*, melynek



6. ábra. A Golf-áramlat műholdképen. Az árnyalatok különböző hőmérsékleteket jelölnek. Jól látszik a Florida keleti partjai mentén északra húzódó sötét (igen meleg) áramlat, mely miután elhagyja az USA partvonalát, meanderező alakot vesz fel [www.oceanwanderers.com/eastcoast.JPG].

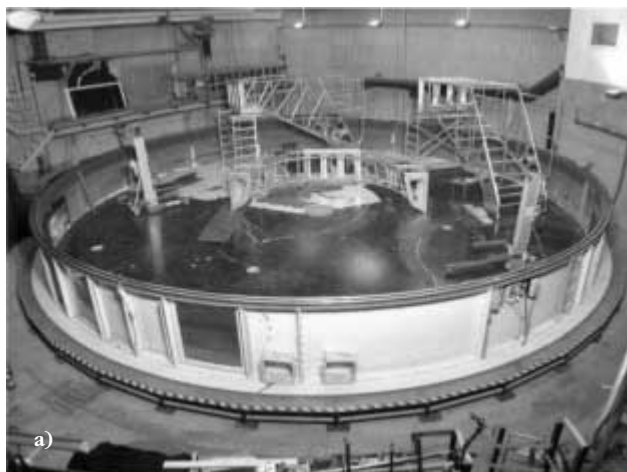
tipikus hullámhossza a közepes szélességeken több ezer kilométer, periódusideje néhány nap. A planetáris hullámok mérsékeltövi időjárásunk legfőbb alakítói! Ezek határozzák meg, hogy mennyi idő alatt halad át felettünk egy ciklon vagy anticiklon, vagyis mennyire állandó egy-egy időjárási helyzet.

– Az óceáni áramlások alapvetően aszimmetrikusak: az erős óceáni áramlatok kivétel nélkül a medencék *nyugati pereme* mentén folynak, s mindössze száz kilométer szélességűek. A Golf-áramlat (6. ábra) például olyan gyorsan folyik, mint a Duna (sebessége 5 km/h), 100 km széles, és vízhozama több 10 000 000 m³/s, nagyobb az összes földi folyó együttes vízhozamánál.

– Sem a planetáris hullámok, sem az erős tengeráramlatok (sőt általában semmilyen környezeti áramlás) nem periodikus. A rendszerben jelen levő *nemlinearitások* miatt *instabilitásoknak* vannak kitéve [5, 6], kaotikus és turbulens jellegű hordoznak. A ciklonok szinte véletlenszerűen születnek, az áramlások állandóan változtatják meanderező alakjukat. Ezért nehéz az időjárást is és az éghajlatra oly nagy hatással levő tengeráramlások jellegét is pontosan előre jelezni.

Záró gondolatok

Mint utóbbi példáink mutatják, a hagyományosan a földrajz témakörébe sorolt áramlási jelenségeknek tisztán fizikai okai vannak. A Coriolis-erő által szabályozott földi áramlások energiája ráadásul felülmúlja több millió atomrobbantás energiáját is. Mindez számos megoldatlan tudományos problémát rejt magában, melyek vizsgálata egyre környezettudatosabb világunkban a modern fizikai kutatás része. Ez nem az egyetlen példa arra, hogy *klasszikus fizika is lehet modern fizika*.



7. ábra. A Coriolis-platform. a) Kísélet előkészítése közben. b) Forgó állapotban (a kísérletet végzők a platformon dolgoznak) [www.coriolis-legi.com/coriolis-turntable.htm].

Az elméleti kutatások mellett széleskörű kísérleti vizsgálatok is folynak, melyekbe hazánkban az ELTE Kármán Laboratóriuma kapcsolódott be [6]. Nagyon kevesen tudják, hogy létezik egy a témánkkal kapcsolatos európai nagyberendezés, a Grenoble-ban található *Coriolis-platform*. Ez egy 14 m átmérőjű henger, mely körülbelül 1,5 m magasan tölthető fel folyadékkal, s maximális fordulatszáma 3/perc (7. ábra). A platformon valóság-hű domborzati modellek is kialakíthatók. Modern műszerei révén a berendezés alkalmas az árapályerőművek modellezésétől kezdve a ciklonképződésen és a légköri turbulencián keresztül a Jupiter légkörében megjelenő áramlási mintázatokig számos környezeti jelenség pontos kísérleti vizsgálatára.

Végül egy kérdés. Ha a gimnáziumok kilencedik osztálya számára írt földrajz-könyv [2] vállalkozhat a Coriolis-erő, sőt azzal kapcsolatban olyan bonyolult jelenség elmagyarázására is, mint a ciklonok kisodródása (5.a ábra), bölcsen tesszük-e, hogy a Coriolis-erőt a középiskolai fizika oktatásban sehol sem említjük?



A szerző köszönetét fejezi ki Gyüre Baláznak, Jánosi Imrének és Szabó Gábornak a forgó rendszerek dinamikájával kapcsolatos értékes eszmecseréjéért.

Irodalom

1. BUDÓ ÁGOSTON: *Mechanika* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
2. NEMERKÉNYI ANTAL, SÁRFALVI BÉLA: *Általános természetföldrajz a gimnáziumok 9. évfolyama számára* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
3. HORVÁTHY PÉTER: *Merre esik az alma a fájától?* – Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok 55 (2005) 297
4. HORVÁTH GÁBOR: *A mechanika biológiai alkalmazásai* – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2001.
5. A.E. GILL: *Atmosphere–Ocean Dynamics* – Academic Press, New York, 1982.
6. JÁNOSI IMRE, TÉL TAMÁS, SZABÓ GÁBOR, HORVÁTH VIKTOR: *A környezeti áramlások fizikája* – Fizikai Szemle, 51 (2001) 6–8

ETTORE MAJORANA (1906–1938)

Toró Tibor
Temesvár

A 2006-os évben a neutrínófizikának három fontos évfordulója van:

1. Fél évszázada, hogy (a Reines–Cowan-kíséletben) sikerült az (anti)-neutrínó közvetlen kimutatása;

2. 75 éves a neutrínó létezésére vonatkozó hipotézis;

3. 100 évvel ezelőtt született *Ettore Majorana* olasz fizikus, az egyik érdekes neutrínóelmélet megalkotója.

A neves Fermi-tanítvány, Ettore Majorana, 1906. augusztus 5-én született a szicíliai Cataniában. 1928-ban végezte a római Tudományegyetem fizikai fakultását, ahol egy évre rá *Fermi* irányítása alatt elméleti fizikából doktorált.

A neutron felfedezése után, 1932-ben, *D. Ivanyenkó*-tól és *W. Heisenberg*-től függetlenül rájött arra, hogy az



atommag csak protonokból és neutronokból áll. Ezt az elméletet kollégái többszörös biztatására sem közölte. Majorana magerőrkről szóló dolgozata később, 1933-ban, Heisenberg biztatására jelent meg (*Zeitschrift für Physik*, 82, 133, 1933), amikor egy pár hónapig Lipcsében, a Heisenberg vezette Elméleti Fizikai Intézetben dolgozott. (Amely, Majorana megjegyzése szerint, „üde környezetben, a temető és a bolondokháza között” helyezkedett el.)

1938. március 28-án Majorana – abban az időben a nápolyi Tudományegyetem professzora – teljesen ma sem ismert körülmények között, eltűnt. (*Leonardo Sciascia* szicíliai író Majorana titokzatos eltűnéséről szóló érdekes könyvében – L. Sciascia: *La scomparsa di Majorana*)