GALILEI SZEREPE A MAI, MODERN VILÁGKÉPÜNK KIALAKULÁSÁBAN – II.

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

A fizika kapujában – szemelgetés a *Discorsi*ból

Galilei utolsó nagy műve, a *Discorsi* tekinthető az első modern fizikatankönyvnek [1]. Tudományos alapmű, amely a tudomány fejlődése, a fizika kialakulása szempontjából legnagyobb hatású munkája. A könyv teljes címe: *Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből.* A discorso olasz kifejezés, jelentése beszéd, előadás, beszélgetés. Írását Sienában (toszkán kisváros) kezdte el, ahová a „per” után érkezett a sienai érsek meghívására. Az első két nap beszélgetései készültek el itt. Azonban a római egyház utasítására el kellett hagynia Sienát, és Firenze környéki kis házába, Arcetribe költözött (*1. ábra*). Végül ott készült el a teljes mű. A könyv kiadása nem volt egyszerű dolog, ugyanis az egyház megtiltotta, hogy bármit is kiadjon. Ezért nem vállalkoztak erre sem Velencében, sem Bécsben. Azonban néhány évtizeddel korábban alakult meg a hollandiai Leydenben az *Elzevir* testvérek könyvkiadója és nyomdája, és a legfiatalabb testvér európai körútja során éppen Itáliában járt, hogy készülő tudományos műveket keressen. A szerencsés találkozást követően Galilei könyvét részletekben csempészték ki Itáliából.

Az *első nap* beszélgetéseiben Galilei szinte a kor egész anyagelméleti tudását összegezte. Teljesen természetes módon jelenik meg írásában a korpuszkuláris szemlélet. De nagy helyet foglalnak el benne a végtelenre, az oszthatatlanra és a kontinuumra vonatkozó fejtegetések is, amelyek bizonyos mértékig a mozgások leírását is előkészítik. Vizsgálja a különböző sűrűségű testek különféle közegekben végzett mozgásait, majd ezekből általánosítással, szinte szabályos határátmenettel eljut ahhoz az alapvető tételhez, hogy a vákuumban minden testnek, sűrűségétől és alakjától függetlenül egyforma gyorsulással kell esnie. A következőt írja: „…ha a közeg ellenállását teljesen megszüntetnénk, minden test azonos sebességgel zuhanna”. A könyv további részeiben is sokat foglalkozik a közeg szerepével.

Ez nagyon fontos a fizika oktatása szempontjából is. Ugyanis egyik jellegzetes gyermeki elképzelés az, hogy a nehéz testek hamarabb érnek földet. Tehát célszerű az oktatás során is végigbeszélni a diákokkal sok esetet, mint például vasgolyó és kis sűrűségű műanyaggolyó mozgása vízben, levegőben, vákuumban.

Galilei vizsgálta azt is, hogyha fonálra akaszt különböző testeket, miként változik a lengésidő. Azt találta, hogy mind a súlyos, mind pedig a könnyű testek lengése azonos. Ugyanakkor abban tévedett, hogy a lengésidő nem függ a kitéréstől, mivel ez a függetlenség csak kis kitérések esetében igaz.

Az arisztotelészi elképzelés szerint egy tízszer nagyobb tömegű test tízszer gyorsabban mozog, mint egy egységnyi tömegű. Galilei viszont azt állítja, hogy ezek egyszerre érnek földet. De megjegyzi: „elhanyagolja az egyéb tényezők, például az alak vagy az igen kis részecskék szerepét, pedig ezektől függően a közeg nagymértékben megváltoztathatja a súly hatását”.

Gyakorlatilag megfogalmazza a súlytalanságot is, mivel Simplicio azt állítja, hogy ha egy súlyhoz hozzáteszünk egy másikat, akkor a sebességének is növekednie kell. Salviati viszont azt állítja, hogy nem igaz, hogy növelik egymás súlyát: „a szabad és természetes esés során a kisebb kő nem nehezedik rá a nagyobbra, következésképpen nem növeli meg annak súlyát, mint nyugalmi állapotban teszi”.

A *második nap* beszélgetéseiben a különböző szárazföldi és vízi állatok méretei és mozgásuk kerülnek elő. Továbbá különböző alakú tartók, gerendák teherbírásáról, töréssel szembeni ellenállásáról, tehát tipikus gyakorlati, mérnöki kérdésekről esik szó.

A *harmadik és negyedik nap* beszélgetéseinek nagyon érdekes a kerettörténete. Mintha egy „bizonyos” akadémikus könyvét olvasnák, amelyben szerepelnek a tárgyalt mozgásokkal kapcsolatos leírások, és ezeket

1. ábra. A *Discorsi* címlapja és a Villa „Il Gioiello” Arcetriben, ahol Galilei befejezte utolsó műve írását.


DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
GALILEO GALILEI LINCEO,
IN LEIDA,
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. XXXVIII.

értelmezi a három szereplő. Ez a rész félig latinul, félig olaszul íródott. A „könyv” szövege latin, míg a szereplők párbeszédei olasz nyelven íródtak. A „könyv” felépítése is rendkívül érdekes, és Galilei eddigi írásai alapján szokatlan, mivel *Eukleidész*t és *Arkhimédész*t követő axiomatikus felépítésű tudományos mű benyomását kelti. Vannak az axiómák, amelyeket nem bizonyít, majd következnek a tételek, amelyeket a beszélgetések során bizonyítanak, szigorúan geometriai módszerekkel, elsősorban az arányelméletet használva, nem pedig függvényeket. (Évtizedekkel később *Newton* is arányokkal dolgozott a *Principiá*ban, holott éppen ő alkotta meg a differenciál- és integrálszámítás módszerét, de tartott tőle, hogy másképpen nem értenék meg.) Ezek a tételek valójában feladatok, amelyek akár napjaink példatáraiban is szerepelhetnének. Ha geometriát akarunk gyakorolni, akkor ahhoz használhatók, de ha kinematikát, akkor ott tanulságosak. Át lehet írni mai jelöléseinket felhasználva a nemegyszer nehézkes megfogalmazásokat. De ne feledjük el, hogy abban a korban még nem használták az algebrai jelöléseket a fizikában (sőt még Newton idejében sem). Az a tény, hogy Galilei ábrázolta az időt és a sebességet, kifejezett újításnak volt tekinthető. Bár a matematikában ismert volt már akkor a függvény fogalma (a 14. századtól), de azt nem használták fizikai folyamatok leírásához. Galilei egy, a függvényhez hasonló ábrázolás bevezetésének köszönheti, hogy sikerült leírnia a gyorsuló mozgást.

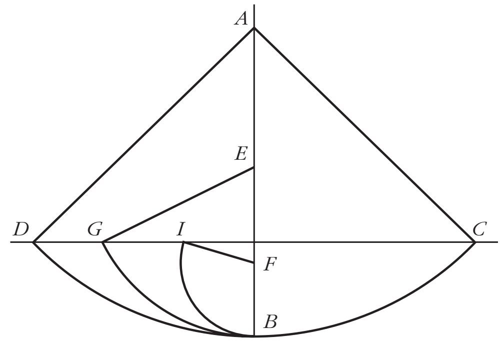
Galilei ókori elődje Arkhimédész volt, akit a mechanika atyjának kell tekintenünk. Ő volt az, aki először kapcsolta össze a fizikai kísérleteket a matematikai összefüggésekkel. Könyvei azonban hosszas lappangás után csak Galilei idejében kerültek elő, megtermékenyítve ezzel az újkori természettudományt.

A *harmadik nap* az egyenes vonalú egyenletes mozgás tárgyalásával kezdődik. A definíció és a négy axióma megfogalmazása olyan, hogy napjaink bármelyik fizika tankönyvében helyet kaphatnának. Az axiómák leírását hat tétel követi, amelyek akár feladatoknak is tekinthetők. Például nézzük a IV. tételt: „Adott két egyenletesen, de különböző sebességgel mozgó test. Különböző időintervallumok alatt megtett útjaik aránya a sebességek arányának és az időintervallumok arányának szorzata.”

Majd következik „a természet szerint gyorsuló mozgás” tárgyalása. Ehhez először definíciót keres, amely a következő miatt szükséges: „mert az ebből általunk levezetett jelenségek láthatóan megfelelnek és megegyeznek azokkal, amelyeket a természetes kísérletek mutatnak az érzékeknek”.

Érdekes a „természet szerinti” kifejezés használata. Ez valószínűleg Galilei arisztotelészi gyökereinek a maradványa. *Arisztotelész* különböztetett meg természetes és kényszerített mozgásokat. Ha egy „nehéz” testet elengedünk, akkor az természete szerint a földre esik (szabadesés).

Végül a következő definíciót alkotta meg: „egy mozgást akkor nevezünk egyenletesen gyorsulónak, ha a nyugalomból induló test sebessége egyenlő időintervallumok alatt egyforma sebességmomentumokkal növekszik”.



2. ábra. Az inga azonos magasságra lendül vissza

A meghatározás után egyetlen elvet posztulál, amely a következő: „Ha egy és ugyanazon test különböző hajlásszögű síkokon mozog lefelé, valahányszor a síkok magassága egyenlő, az általa szerzett sebességek is egyenlőek.”

A súrlódástól és közegellenállástól való eltekintésről természetesen itt is beszélgetnek. Azonban matematikai bizonyítás helyett Galilei egy másik jelenséget ír le. Egy függőlegesen álló falba verjünk szöget, és a szögre függesszünk fel vékony fonálon lógó testet és jelöljük meg a legalsó helyzetet. Majd kitérítve és elengedve az a másik oldalon mindig ugyanolyan magasra megy vissza (*2. ábra*). Ez még akkor is így van, ha a falba még egy szöget verünk, hogy az akadályozza az inga lengését. (Ha a második szög nagyon alacsonyan van, akkor fonál a szög köré csavarodik.)

A Galilei által impetusnak nevezett mennyiség – ez a mai impulzus fogalmunk elődje – attól függ, hogy milyen magasról érkezett a test, amely képes arra, hogy ugyanolyan magasra visszakerüljön.

A megfogalmazottakat lehet a mechanikai energia megmaradása első megnyilvánulásaként is felfogni, amelyet mai jelöléseinkkel leírva:

$$m\,g\,h = \frac{1}{2}\,m\,v^2,$$

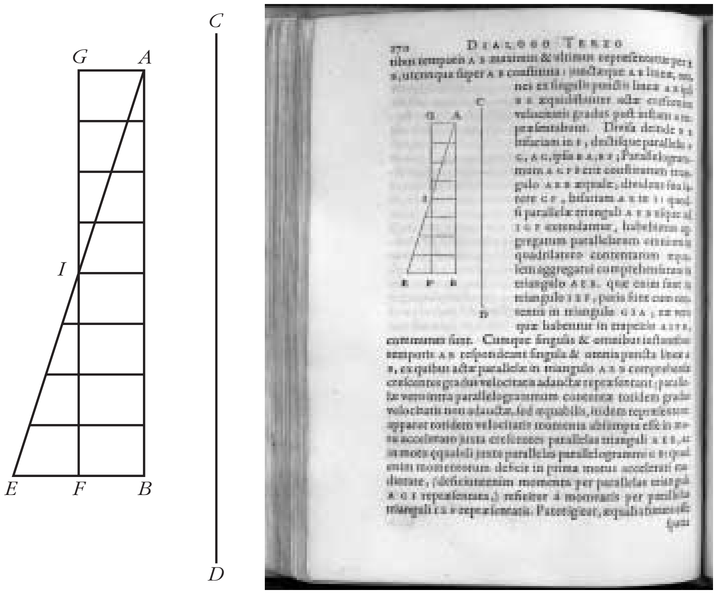
innen a sebesség:

$$v = \sqrt{2\,g\,h}.$$

Majd így ír: „Egyelőre tekintsük ezt az állítást posztulátumnak, amelynek abszolút igazságát az fogja bizonyítani, ha tapasztaljuk: az erre a hipotézisre épülő következtetések pontosan megegyeznek a kísérleti eredményekkel.”

Ezek után következnek a tételek, melyeket Galilei bizonyít is.

A szabadesés törvényszerűségei Galilei színrelépése előtt már közel egy évszázada foglalkoztatták a tudósokat. Sok problémát okozott, hogy vajon az egyenletes változás az idő vagy pedig a hely függvényében értendő-e. Általában ez utóbbi elképzelést tartották valószínűnek, sokáig Galilei is így gondolkodott. Későbbi hipotézise szerint mégis az idő függvé-



3. ábra. Galilei sebesség-idő függvénye lerajzolva és a *Discorsi* 170. oldalán

nyében változik a sebesség a szabadesés során, amelyet már megpróbált a *Dialogó*ban is megfogalmazni. Ez nagyon komoly szemléletváltás volt Galilei részéről, amelyhez valószínűleg több évre, évtizedre volt szükség. A témával kapcsolatos első kísérleteit, méréseit még az 1600 körüli években végezte padovai tanársága alatt, amelyekről feljegyzéseket készített. A *Discorsi* írása alatt ezeket a több évtizeddel korábbi jegyzeteit használta és próbálta megérteni a mozgást, korábban kapott kísérleti eredményeit.

Mai jelölésmódunkat használva a következőképp foglalhatjuk össze gondolatmenetét, amelynek végeredményét kísérletileg vizsgálni lehet:

A sebesség tehát legyen arányos az idővel, vagyis $v = at$. Ha a test nulla kezdősebességgel indul, akkor a középsebesség, vagy átlagsebesség:

$$v_{közép} = \frac{v}{2} = \frac{a\,t}{2}.$$

A megtett út a következőképp számítható:

$$s = v_{közép}\,t = \frac{a\,t}{2}\,t = \frac{a\,t^2}{2}.$$

Ebből az következik, hogy:

$$\frac{s}{t^2} = \frac{a}{2} = \text{állandó},$$

amit másképp, méréssel vizsgálható módon megfogalmazva a következőképp írhatunk fel:

$$\frac{s_1}{t_1^2} = \frac{s_2}{t_2^2} = \ldots .$$

Mind az utat, mind pedig az időt mérni lehet, és így vizsgálni, hogy fennáll-e a kettő között az előbb matematikailag megfogalmazott arányosság. A mérés közvetlen végrehajtásánál azonban felmerült egy nehézség, a szabadesés esetében túlságosan kicsi időket kellene mérni. Galilei zseniális ötlete volt az, hogy vett egy kis hajlásszögű lejtőt, és ezzel – megtartva a jelenség időbeli lefolyásának jellegét – lelassította a szabadesés folyamatát úgy, hogy a rendelkezésére álló időmérő eszközökkel kellően pontos méréseket tudott végezni.

Galilei módszere a következőképp foglalható össze:

1. A fogalmak tisztázása (út, idő, sebesség és a gyorsulás fogalmának „megsejtése”).

2. Hipotézisalkotás a jelenség várható lefolyására vonatkozóan (az idő függvényében egyenletesen változik a sebesség).

3. Hipotéziséből matematikai úton olyan összefüggéseket vezet le, amelyek kísérletileg ellenőrizhetők (s/t^2 = állandó).

4. Kísérleti úton ellenőrzi az elméleti következtetéseket.

Nézzük Galilei szövegét! Az I. tétel a következő: „A nyugalomból induló, egyenletesen gyorsuló test tetszőleges utat ugyanannyi idő alatt tesz meg, mintha olyan egyenletes sebességgel mozogna ugyanezen úton, melynek értéke fele az említett egyenletesen gyorsuló mozgásban szerzett végső és legnagyobb sebességértéknek.”

És itt következik az a grafikus ábrázolás, melyet Galilei alkotott meg a jelenség ábrázolásához, amely valójában nem más, mint egy sebesség-idő függvény. A test a *CD* távolságot teszi meg nyugalomból indulva, állandó gyorsulással. Az *AB* szakasz jelöli az ehhez szükséges időt. Az *EB* szakasz jelzi a végsebesség nagyságát. Közben pedig vízszintes vonalakkal jelöli az egyre növekvő sebességértékeket (*3. ábra*).

Az *ABE* háromszög területe jelzi az út nagyságát. Ezt úgy látja be, hogy veszi a végsebesség felét, melyet az *I*-ben végződő vízszintes egyenes jelöl, és belátja, hogy az *ABGF* téglalap területe megegyezik az előbbi *ABE* háromszög területével. (Mintegy kiintegrálja a „sebességgörbe alatti területet”, ahogy ma mondanánk, csak mi fordítva vesszük fel a tengelyeket.) Vagyis az egyenletesen változó mozgást megpróbálja úgy leírni, mintha egyenes vonalú egyenletes mozgást végezne a test a végsebesség felével. És ezt a módszert alkalmazza a többi esetben is, hiszen csak így tudja elvégezni az integrálást.

Nézzük meg, miként bizonyította Galilei, hogy a megtett távolság az idő négyzetével arányos, és hogy egy ilyen mozgásnál az utak úgy aránylanak egymáshoz, mint az eggyel kezdődő páratlan számok. A bizonyítás során kétszer is alkalmazza az arányossági tételt, amely kissé bonyolult.

1. Hivatkozik arra a 4. tételre, amelyet az egyenes vonalú egyenletes mozgásnál fentebb idéztünk.

2. Majd hozzáteszi a következőt: „Ebben az esetben azonban a sebességek aránya megegyezik az időintervallumok arányával. … Világos tehát, hogy a megtett utak aránya a mozgáshoz szükséges idők arányának négyzete.”

Mai jelöléseinket használva a következőképp írhatjuk fel a fentieket:

1. Az utak arányának kiszámítása a közepes sebességek használatával, amely a legnagyobb sebesség fele:

$$s_1 = \frac{v_1\, t_1}{2}, \qquad s_2 = \frac{v_2\, t_2}{2}.$$

Majd a kettő aránya:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{v_1\, t_1}{v_2\, t_2}.$$

2. Most figyelembe vesszük a sebességek idő szerinti egyenletes változását:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{t_1}{t_2},$$

azután ezt behelyettesítjük az utak arányát leíró összefüggésbe:

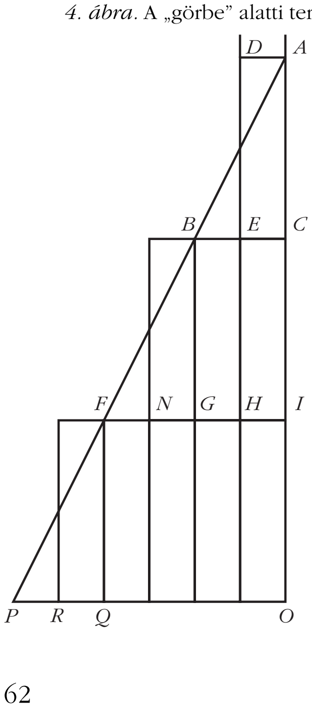
$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2},$$

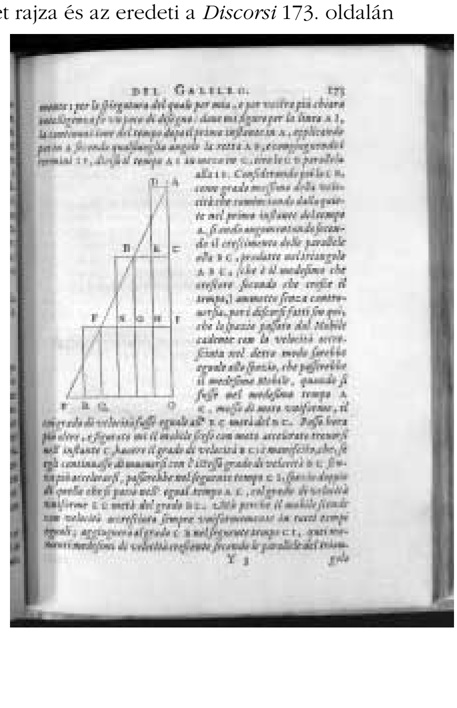
megkapjuk a négyzetes összefüggést.

Galilei további újítása az volt, hogy míg korábban arányokat csak hosszúságokra fogalmaztak meg, addig ő hosszúságok és idők, illetve sebesség és idő arányokat is felhasznált. És valójában ezért volt arra szüksége, hogy valamilyen grafikus ábrázolási lehetőséget keressen, vagyis az időt is ábrázolta, mint hosszúságot, és a sebességet is, mint hosszúságot.

A négyzetes összefüggés magyarázataként Sagredo szájába ad egy egyszerűbb bizonyítási lehetőséget, melyben nem szerepelnek arányok. Az *ábra* szintén egy sebesség-idő függvény, ahol a „görbe alatti terület” a megtett út (*4. ábra*).

4. ábra. A „görbe” alatti terület rajza és az eredeti a *Discorsi* 173. oldalán




DEL GALILEO. 173

Az *AC, CI* és *IO* időegységek egyformák. Az első időegység (*AC*) alatt megtett út az *ACB* terület, mely megegyezik az *ACDE* területtel, mint azt az előbb láttuk. A második időegység alatt (*CI*) megtett út kiszámításához szintén az időintervallum alatti közepes sebességet veszi, amely láthatóan háromszorosa az elsőnek. Az időintervallum kezdetén meglévő sebességgel két egységnyi utat tenne meg, de ehhez hozzáadódik még egy egység a gyorsulás miatt.

A harmadik (*IO*) időintervallum alatt ötszöröse a megtett út az elsőnek, amely az előzőhöz hasonlóan látható. És ezek valóban az egymás után következő páratlan számok.

Továbbá az is leolvasható, hogy egy egység alatt egy, a két egység alatt már négy és a három egység alatt már kilencszeres a megtett út az első egységhez képest. Ami a négyzetes törvény. És a sor az előbbiekhez hasonlóan folytatható.

Az oktatás során a diákok tanulmányozhatják a fent közölt eredeti ábrákat, amely véleményünk szerint segíthet az egyáltalán nem egyszerű és könnyű kinematikai alapfogalmak elsajátításában és megértésében.

Ezen bizonyítások után, a mozgásokkal kapcsolatban először Galilei volt az, aki leírt egy elvégezhető és feltehetően általa ténylegesen elvégzett kísérletet (Simplicio kérésére Salviati mondja el) úgy, hogy részletesen leírja a körülményeket is, ahogy azt ma elvárjuk egy tudományos közleményben:

„Kerestünk egy körülbelül tizenkét rőf hosszú, fél rőf széles, háromujjnyi vastag lécet, illetve deszkát, hosszában (az éle mentén) rendkívül egyenes, ujjnyi széles csatornát vájtunk, gondosan megtisztítottuk és megcsiszoltuk, majd a lehető legfinomabb, tökéletesen sima pergament enyveztünk bele; a csatornában pedig egy tökéletesen gömb alakú és sima bronzgolyót gurítottunk le. A léc egyik végét rögzítettük, a másikat pedig tetszésünk szerint egy- vagy kétrőfnyire a vízszintes fölé emeltük, és, mint említettem, hagytuk, hogy a golyó végigguruljon a csatornában; gondosan megmértük a teljes mozgáshoz szükséges időt (mindjárt megmondom, hogyan); a kísérletet számtalanszor megismételve meggyőződtünk róla, hogy a futási idők soha, még a pulzusütés tizedrészével sem térnek el egymástól. Miután a kísérletet sokszor elvégeztük, és az eredmény mindig ugyanaz volt, úgy intéztük, hogy a golyó csupán a csatorna negyedrészén gurulhasson le; ismét megmértük a mozgáshoz szükséges időt, és megállapítottuk, hogy a lehető legpontosabban fele az előzőnek. A kísérletet különböző részutakkal is elvégeztük, a teljes út megtételéhez szükséges időt előbb a fél, majd a kétharmad és a háromnegyed úthoz szükséges idővel hasonlítottuk össze, valamint más osztásokkal is; a méréseket legalább százszor megismételtük, és mindig az volt az eredmény,

5. ábra. A régi toszkán mértékegység, a braccio kétszerese és alatta a méter hossza a toszkánai Pistoia városháza falán.

hogy a megtett utak úgy aránylanak egymáshoz, mint idők négyzetei, és ez igaz, akárhogyan rögzítjük is a sík, illetve a csatorna (ahol a golyó legurul) vízszintessel bezárt szögét; sőt azt is alkalmunk volt megfigyelni, hogy különböző hajlásszögek esetén a mozgáshoz szükséges idők pontosan úgy aránylanak egymáshoz, mint azt a Szerző egy későbbi tételében állítja és bizonyítja. Az időt pedig a következő módszerrel mértük: felakasztottunk egy nagy, vízzel teli dézsát, amelyből a fenekébe illesztett csövecskéken keresztül vékony sugárban csordogált a víz; a kicsorgó vizet poharakban fogtuk fel mindaddig, amíg a vizsgált mozgás (a teljes csatorna vagy annak egy része mentén) tartott; az így összegyűjtött vizeket időről időre megmértük egy rendkívül pontos mérlegen, súlyaik különbségei és arányai megadták az időkülönbségeket és -arányokat, éspedig, mint említettem, olyan pontosan, hogy sok-sok mérés eredménye között nem volt lényeges eltérés." (*Dávid Gábor* fordítása.)

A rőf az eredeti szövegben braccio (*5. ábra*), amely egy korabeli toszkán hosszúságegység, és körülbelül 60 cm-nek felel meg. Galilei lejtője 60×12 = 720 cm, vagyis több, mint 7 méter hoszszú volt.

Egy firenzei középiskolában megismételték a fent említett lejtős kísérletet tanulókísérlet formájában [2]. A tanulók az eredeti szöveget tanulmányozták, ez nem volt különösebben nehéz, hiszen olaszul íródott (ráadásul toszkán dialektusban, amely egyben a hivatalos olasz nyelv is napjainkban). Ez egyben nagyon fontos tudománytörténeti bevezető is volt: a tanulók a valóságban is látták, hogy Galilei a kísérlet során milyen kérdésre kereste a választ. (Sok esetben „misztikus" a tanulók számára, hogy éppen mit miért tanulnak, egy-egy kísérlet milyen kérdésre is adott választ, mit honnan is tudunk.) A méréshez egy hasonló lejtőt készítettek, amely 3,2 méter hosszú volt. Az időméréshez bürettát használtak, amelyet 0,1 ml-es pontossággal olvastak le. Egy-egy mérés esetében 3–7 ml víz fogyását mérték. Minden távolságon 30 mérést végeztek, amelyeket hisztogramon ábrázoltak, majd átlagot és hibaszámítást is végeztek. Végül ábrázolták a megtett utat az időnégyzet (vízfogyás ml-ben és ennek a négyzete) függvényében, amelyre egyenest kaptak.

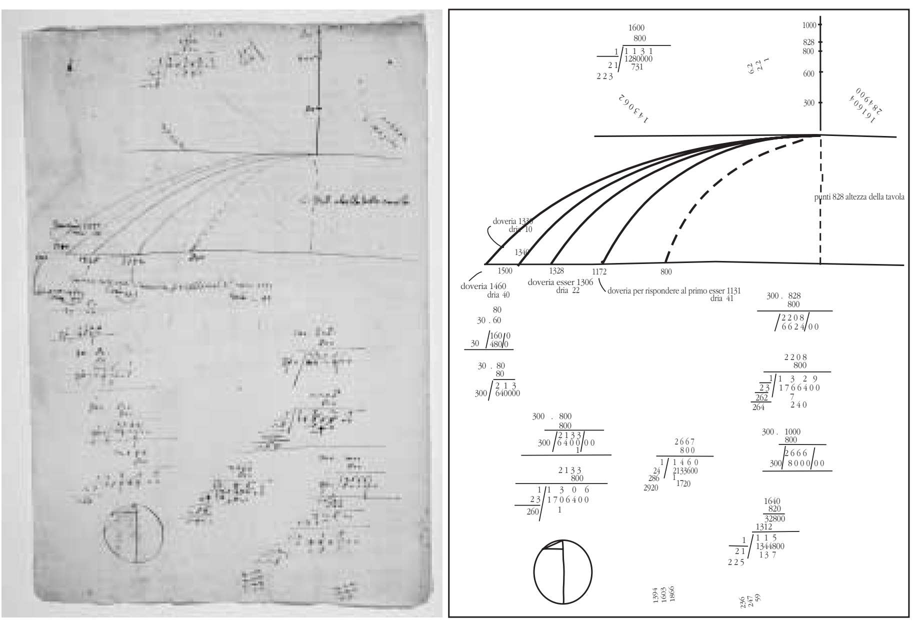
A *negyedik napon* a könyv a lövedékek mozgását tárgyalja, a vízszintes és a függőleges hajítást végző testek pályájáról látja be, hogy azok parabolák. A test két független mozgást végez, egy egyenes vonalú egyenletes mozgást és egy szabadesést. A beszélgetések során tisztázza a vektoriális összegzés módját is. Egy impulzus jellegű mennyiség vektoriális összegzését írja le, amely a következő: „mindkét mozgás impetusát négyzetre kell emelni, majd a négyzetek összegéből négyzetgyököt kell vonni, és ez adja meg a két mozgás eredőjének impetusát".

Érdekes lehet még annak vizsgálata, hogy Galilei miként is jutott el a szabadesés leírásához. Ahogy azt könyvében leírta, vagy kicsit másképp. Erre mondhatjuk, hogy a végeredmény szempontjából ez nem fontos, de az oktatás számára azonban lehet jelenősége. Az iskolában is csak a végeredményeket szoktuk tanítani, és ahhoz próbálunk valamiféle didaktikus megközelítést megalkotni. Ehhez a munkához nyújthat segítséget a felfedezés folyamata.

Valószínűleg előbb a vízszintes hajítás parabola pályáját vette észre, és ebből következtetett vissza a szabadesés időnégyzetes összefüggésére, majd később a már ismert összefüggést próbálta meg belátni az arányok felhasználásával, illetve az új jelöléssel. Az időnégyzetes függés viszont csak úgy volt magyarázható, ha a sebesség nagysága az idővel arányosan növekszik, nem pedig a távolsággal. Erre jegyzeteiből lehet következtetni, amelyek közül több kísérleti leírást, ábrát (*6. ábra*) és mérési eredményeket is tartalmaz [3].

Ez azért érdekes az oktatás számára, mivel általában úgy gondoljuk, hogy a tanulókat lépésről lépésre kell vezetni az egyszerűbb dolgoktól a bonyolultabbak felé, minthogy azt hisszük, hogy a felfedezési fo-

6. ábra. A 116-os kísérlet vázlata Galilei kézirataiból, illetve annak rekonstrukciója



lyamat is ilyen. Holott nem egy esetben találkozunk ennek az ellenkezőjével, mint például jelen esetben. A legújabb pszichológiai elméletek szerint az emberi megismerés olyan, hogy először bizonyos általános kategóriák alakulnak ki, majd a megismerési folyamat során azok gazdagodnak, telnek meg egyre több tartalommal. Például a gyereknek először van virág fogalma, majd egyre több és több virágot ismer meg. Egy festményre rápillantva először az egészet vesszük szemügyre, majd csak később merülünk el a részletekben. Sokszor a bonyolultabb jelenség megértését követik az egyszerűsítések.

Ugyanakkor nem akarjuk azt mondani, hogy előbb a ferde hajítást tanítsuk, bár mint jelenséget persze be kell mutatni. De a feldolgozás módszertanát illetően Galilei gondolatmenete példa értékű. Ő nem csak a jelenséget írta le, de megalkotta a feldolgozás didaktikáját is, amelyet azóta is sikerrel használ a fizika oktatása.

7. ábra. Galilei síremléke a firenzei Santa Croce bazilikában és a templom homlokzata

Galilei gondolkodásmódját jellemzi, ahogy soksok jelenségben kereste, nem egy esetben sikeresen meg is találta, és ki tudta választani azt, amit felhasznált az általa elfogadott elmélet igazolására. Az ég felé fordított távcsövével azért találhatott nyomban oly sok kitűnő érvet a kopernikuszi világrend mellett, mert akkor már régen töprengett az Univerzum felépítéséről. Ugyanis egészen Newtonig a különböző modellek alkalmazásával csak arra törekedtek, hogy az égitestek helyét leírják, képesek legyenek előre jelezni a korábbi adatok felhasználásával, de mozgásuk okait nem kutatták. A továbblépéshez hozzájárult az is, hogy Galilei végre a kor fizikai tudásának szintjén írta le a korszak gondolkodását jellemző geocentrikus világképet, amelynek előzőleg sokáig ő maga is híve volt. Ez azért fontos lépés a tudomány történetében, mert ilyen módon lehet számba venni egy elmélet alkalmazhatóságát, illetve alkalmazhatóságának korlátait. Továbbá a fizika történetében ő volt az, aki első ízben beszélt a mellékes hatások elhanyagolásának szükségességéről, elképzelte, hogy milyen is lehet az úgynevezett „ideális” eset. Ő volt az, aki ezzel bevezette a modellalkotást a természettudományos jelenségek leírásához, amely kiemeli a lényeges elemeket és a többit elhanyagolja, egyszerűsít, és ezzel a jelenséget hozzáférhetővé teszi a matematikai tárgyalás számára. Napjainkban már természetes módon alkalmazzuk ezt a módszert. A fizika sok modelljét használjuk, mint súrlódásmentes mozgás, ideális gáz, merev test, pontszerű test, nyújthatatlan fonál stb. A pontosabb leírás esetében pedig különböző kiegészítéseket alkalmazunk, mint például az ideális gáz állapotegyenlete helyett a Van der Waals-egyenlet stb. A társadalomtudományok esetében is használnak modelleket, igen gyakoriak a gazdasági modellek; a Brown-féle mozgás modelljének alkalmazása a pénzügyekre egészen a közgazdasági Nobel-díjig vezetett.

Napjainkban ez kiegészül a különböző számítógépes szimulációs programokkal. Tulajdonképpen ezekben az esetekben is a modellalkotás Galilei féle útját kell követni. Ez nagyon szépen felismerhető az anyagtudományok esetében a matematikai modell, a számítógépes szimuláció és a kísérleti tapasztalatok kapcsolatában.

A mozgások leírásához használt módszeréről a következőt írta: „Minthogy a súly, sebesség és az alak végtelen sokféleképp változhat, ezeket a jelenségeket nem tudjuk szigorú törvényekbe foglalni, ha tehát mégis tudóshoz méltóan akarjuk tárgyalni anyagunkat, el kell vonatkoztatni tőlük, majd miután felismertük és bebizonyítottuk az összes zavaró körülménytől elvonatkozatott tulajdonságokat, a mindennapi tapasztalat megtanít, hogy törvényeink milyen korlátozások mellett érvényesek a gyakorlatban.”

Ugyanakkor érdekes tény, hogy Galilei élete végéig az egyenletes körmozgást tekintette alapmozgásnak, mivel valójában „félig” az arisztotelészi szemlélet híve volt.

1642. január 8-án halt meg Firenzében (Newton ugyanezen év karácsonyán született). Galilei sírja, és halála után évtizedekkel később készült síremléke (*7. ábra*) *Michelangelo, Ghiberti, Marconi, Machiavelli, Rossini* sírjának, valamint *Dante* és *Fermi* jelképes sírjának társaságában a firenzei Santa Croce bazilikában, a legkiválóbb toszkánok „panteonjában” van.

Irodalom

1. Galileo Galilei: *Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből.* Fordította: Dávid Gábor. Jegyzetek: Gazda István. Utószó: Vekerdi László. Európa Könyvkiadó, Budapest, 1638/1986.
2. Straulino, S.: Reconstruction of Galileo Galilei's experiment: the inclined plane. *Physics Education 43/3* (2008) 316–321.
3. Vekerdi László: *Így él Galilei.* Typotex Kiadó, Budapest, 1997.