

SZABÓ GÁBOR

Milyen messzire esett Newton almája?



*Szabó Gábor
fizikus
az MTA levelező tagja*

A fizikai gondolkodás és a természettudományok

Több nagy szakmai szervezet javaslatára a 2005-ös évet – Einstein „nagy évének” centenáriumát – az ENSZ Közgyűlése 2004 nyarán a Fizika Nemzetközi Événé nyilvánította. A Fizika Événé egyik fő célja az, hogy hozzájáruljon a fizika és szélesebb értelemben a természettudományok társadalmi elfogadottságának, illetve presztízsének javításához. Ezzel összhangban az előadás megvizsgálja, hogyan hatott a fizika a társadalom és kultúra fejlődésére. Ez a hatás két területen követhető nyomon. A kevésbé megfogható, ugyanakkor talán fontosabb hatás az, hogy a fizika alapvető szerepet játszott gondolkodásunk fejlődésében. Ennek bemutatására áttekintjük, melyek a fizikai gondolkodás alapvető jellemzői, és példákkal szemléltetjük, hogy ezek hogyan jelennek meg a fizikától távoli tudományterületeken. A fizika hatása jóval közvetlenebb módon nyilvánul meg hétköznapi eszközeinkben. Néhány kiragadott példán keresztül bemutatjuk, hogy a fizika milyen meglepően sok helyen bukkan fel körülöttünk, milyen sokféle módon járul hozzá életminőségünk javításához.

1954-ben született Nagykanizsán. 1978-ban diplomázott a szegedi József Attila Tudományegyetem fizikus szakán. 1988-ban a fizikatudomány kandidátusa, 1993-ban akadémiai doktora lett; 2004-től az MTA levelező tagja.

Pályáját Szegeden kezdte mint a JATE TTK Kísérleti Fizikai tanszékének adjunktusa, 1994 óta a JATE TTK Optikai és Kvantumelektronikai tanszékének egyetemi tanára. Munkatársaival ipari és környezetvédelmi mérésekre alkalmas nagy érzékenységgű gázanalizátorokat fejlesztett ki.

Számos tudományos testület munkájában vesz részt: többek között az MTA Lézerfizikai és Spektroszkópiai Bizottságának titkára, a Doktori Tanács fizikai és csillagászati szakbizottságának tagja, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat főtítkára.

Főbb kutatási területe: a lézerek fejlesztése, az ultragyors spektroszkópia, valamint optikai módszerek ipari és orvosi alkalmazásainak tanulmányozása.

**Brown-mozgás:**

1828-ban Robert Brown angol botanikus megfigyelte, hogy a vízben lebegő virágporszemcsék furcsa, rendszertelen mozgást végeznek. A folyadékban vagy gázban lebegő mikroszkopikus részecskék rendszertelen mozgását azóta Brown-mozgásnak nevezik. A Brown-mozgást Einsteinnek sikerült 1905-ben az anyagot alkotó molekulák hőmozgására visszavezetni.

Fénykvantum:

Einstein 1905-ben felismerte, hogy a hullámtermészetűnek ismert elektromágneses sugárzás (fény) bizonyos esetekben úgy viselkedik, mintha kis részecskékből állna, melyek energiája $h\nu_n$, ahol ν_n a sugárzás frekvenciája, h az úgynevezett Planck-állandó. A $h\nu_n$ szorzat az elektromágneses sugárzás energiájával kapcsolatban már korábban, Planck munkássága során felmerült, ő azonban ezt csak matematikai segédeszköznek tekintette. Einstein volt az, aki a fénykvantumoknak – más néven fotonoknak – fizikai realitást tulajdonított. A hullám-részecske kettős természete később a kvantumelmélet egyik alap gondolatává vált.

Bevezetés

Einstein 1905-ben három, külön-külön is fizikatörténeti jelentőségű dolgozatot publikált. Az elsőben az úgynevezett **Brown-mozgás** értelmezésével alapvetően járult hozzá a statisztikus fizika fejlődéséhez, a másodikban – melyért később Nobel-díját kapta – a **fény kvantum**os természetét feltételezve sikerült megmagyaráznia a **fotoeffektust**, míg a harmadikban a speciális relativitáselméletet írta le. A dolgozatok mindegyike alapvető a maga területén, de a kvantumhipotézis, illetve a speciális relativitáselmélet a nem szakemberek számára is a modern fizika szimbólumává vált.

Az előadásban a Fizika Nemzetközi Éve kapcsán egyfajta leltárt szeretnénk készíteni arról, hogy mit adott a fizika az emberiségnek. Erre nem azért van szükség, hogy az évfordulót „letudjuk”, hanem főként azért, mert ezzel talán hozzájárulhatunk a fizika – és általában a természettudományok – társadalmi elfogadottságának javításához. Az ugyanis egyértelműen megállapítható, hogy a tudományok elfogadottsága messze elmarad a kívánatostól. Félreértés ne essék, nem arról van szó, hogy a tudósok azért szeretnék a tudományok elfogadottságát javítani, hogy kutatásaikhoz több pénz kapjanak. A tudományra a társadalomnak van szüksége, csak ezt általában nem ismeri fel. Ezt két példával szeretném alátámasztani. Az első: az emberi civilizáció túlélése múlik azon, hogyan tudjuk globális problémáinkat – a környezetrombolást, az energiahordozók kimerülését, az ivóvízkészlet fogyását stb. – megoldani. Ezeket a megoldásokat csak a tudománytól várhatjuk. (A problémák jó részét az emberi gondatlanság súlyosbította; ezen helyes szemlélettel sokat enyhíthetünk. Azt azonban tudomásul kell vennünk, hogy az alapvető probléma: a jelenleg ismert megoldások mellett a Föld hosszú távon nem képes hat-nyolc milliárd embert eltartani.)

A második példa: száz évvel ezelőtt az emberek döntő többsége olyan környezetben élt és dolgozott, hogy nem nagyon találkozott olyan eszközzel, amelynek a működését egy kis erőfeszítéssel ne érthette volna meg. Ma viszont csupa olyan eszköz vesz körül bennünket, amelynek megértése elképzelhetetlen természettudományos ismeretek nélkül. Ebben a világban a „tudományos analfabéta” nem érezheti jól magát.

A fizika hatása két fő területen követhető leginkább nyomon. Egyrészt a fizikai gondolkodás mint a természettudomány modellje megjelenik gyakorlatilag az összes tudományterületen. Másrészt a fizikai felfedezések, illetve az ezeken alapuló eszközök gyakorlatilag mindenhol felbukkannak a bennünket körülvevő világban. Az előadásban is alapvetően ezt a két nyomot követve mutatjuk be, hogy mit adott a fizika az emberiségnek.

Egy természettudományos témájú előadásban elvárható, hogy az előadó a tárgykört néhány definícióval vezesse be. Nekem azonnal mentegetőzőnöm kell, mert az előadásban körüljárandó egyik legfontosabb alapfogalom, a fizikai gondolkodást nem tudom definiálni. (Ha egészen őszinte akarok lenni, akkor be kell vallanom, hogy magát a fizikát sem tudom jobban definiálni, mint Jay Orear jeles amerikai fizikus, aki azt mondta egyszer, hogy „a fizika az, amit a fizikusok csinálnak, amikor nem látja őket



2005 a Fizika Nemzetközi Éve

senki”.) Ezért azt a megoldást választom – ami valószínűleg sokkal jobb, mint ha valami száraz és nehezen érthető definícióval intéznénk el a dolgot –, hogy példákon keresztül tekintjük át, miről is van szó.

A fizikai gondolkodás természetesen nem lenne elképzelhető matematika nélkül. Azt azonban hangsúlyoznunk kell, hogy a matematika eszköz, és nem a dolog lényege. Úgy is mondhatnánk, hogy éppen a fizikai gondolkodás az, ami megteremti a kapcsolatot a matematika és a tapasztalt világ között. Einsteint idézve: „Amennyiben a matematika törvényei a valóságra vonatkoznak, nem bizonyosak, amennyiben bizonyosak, nem a valóságra vonatkoznak.”

A fizikai gondolkodás három alapvető elemét azért mindenképpen célszerű megfogalmazni.

- > Először is meg kell találnunk azokat a jellemző (fizikai) mennyiségeket, amelyek segítségével a vizsgált problémát mérhető módon tudjuk megoldani. (A megfelelő mennyiségek megtalálása – amint azt később látni fogjuk – már önmagában is meglepő mélységű következtetések levonását teszi lehetővé.)
- > Ezek után modellt állítunk fel, amelynek segítségével problémánk lényegét próbáljuk megragadni. (A modellalkotásban az igazi művészet az, hogy el tudjuk választani a lényegest a lényegtelenről, és hogy a dolgok felszínén nyilvánvalóan megjelenő észlelések mögött meglássuk a valódi okokat. A modellnek ugyanis egyrészt a lehető legegyszerűbbnek kell lennie, mert különben kezelhetetlenné válik, másrészt ha valamilyen lényeges tényezőt elhanyagolunk vagy lényegtelennek fontosnak vélünk, hibás eredményre jutunk.)
- > A modellből levont következtetéseket összevetjük a kísérleti tapasztalatokkal, és szükség esetén változtatunk a modellen.

Tudománytörténeti adatok bizonyítják, hogy a fenti elemek már 2500 éve kisebb-nagyobb mértékben megjelentek, de egységes rendszerré Galilei és Newton munkássága kapcsán álltak össze. (A kultúrtörténet ilyen döntő lépését egy-két névhez kötni mindig igazságtalan az elődökkel szemben, de Galilei és Newton szerepe mindenképpen meghatározó.)

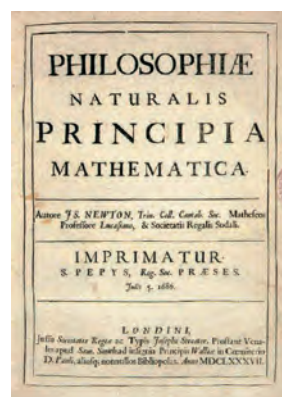
Vegyük most sorra a fizikai gondolkodás elemeit.

A fizikai mennyiségek

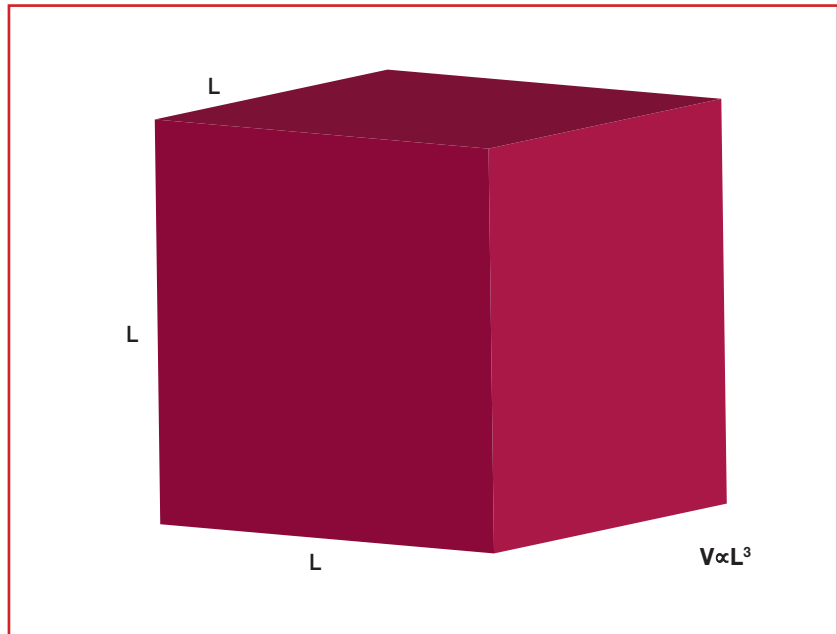
Az ókori görög tudomány számos bámulatra méltó eredményt produkált annak ellenére, hogy a fizikai mennyiségek fogalmának kialakulása alig kezdődött meg. (Ez azonban mit sem csökkenti az ókori tudósok érdemeit, sőt például Arkhimédész zsenialitását akkor tudjuk igazán értékelni, ha figyelembe vesszük, hogy a testek úszására vonatkozó eredményeit úgy érte el, hogy a sűrűség fogalmát nem használta.) A sokszor elhamarkodottan sötétnek nevezett középkor érdeme az, hogy elkezdtek – az akkori szóhasználat

Fotoeffektus (fényelektromos hatás):

Heinrich Hertz és Wilhelm Hallwachs 1887-ben megfigyelte, hogy ha fémlemezre megfelelően rövid hullámhosszú fény esik, akkor abból elektronok lépnek ki. A későbbi kísérletek megmutatták, hogy a kilépő elektronok száma a fény erősségétől (intenzitásától), energiájuk a fény hullámhosszától függ. A jelenséget a fény kvantumosságának feltételezésével 1905-ben Einstein értelmezte, amely eredményéért 1921-ben Nobel-díjat kapott.



Isaac Newton (1643–1727)
és főműve, a *Principia* (1687)

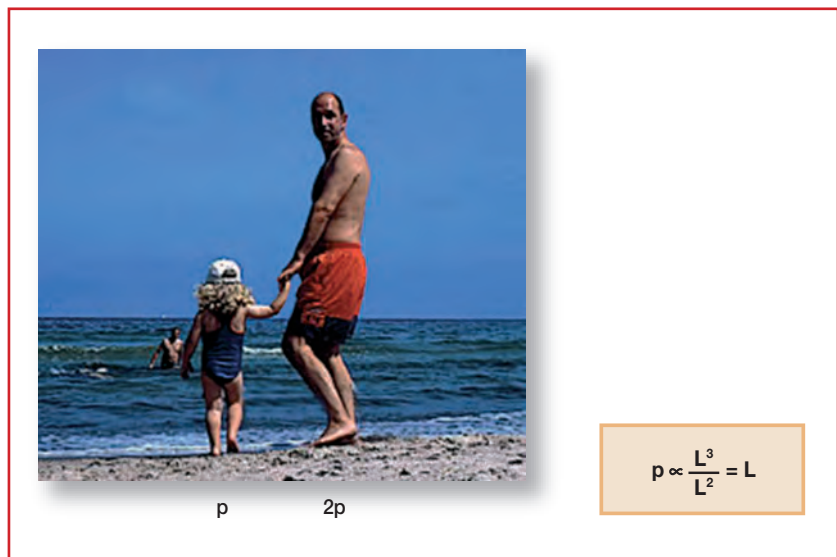


A térfogat a lineáris méret
köbével skálázódik

szerint – „a kvalitásokhoz intenzitásokat” rendelni, azaz megalkotni a mai értelemben vett fizikai mennyiségeket. Egy jó példa erre a leíró mozgástan egyik legalapvetőbb fogalma, a sebesség. Ma már az általános iskolában előkerül a sebesség fogalma, ezért elég nehéz elképzelni, hogy valami ahhoz hasonló először az 1300-as évek közepén bukkan fel (Merton College és D’Oresme), de a pillanatnyi sebesség mai értelmezéséhez Newton munkásságáig, illetve ezen belül is a differenciálszámítás megjelenéséig kellett várni.

Amennyiben rendelkezésünkre állnak a megfelelő fizikai mennyiségek, a skálázás, illetve a dimenzióanalízis segítségével meglepően messzemenő következtetésekre juthatunk.

Nézzünk először a skálázásra egy egyszerű példát. Tekintsük például egy test lineáris méreteit (L). A test felülete nyilván a lineáris méret négyzetével arányos ($F \propto L^2$), azaz négyzetesen skálázódik. Az is nyilvánvaló, hogy a tér-



Apa vagy gyermeke talpát szúrja
jobban a homok?

fogat a lineáris méret köbével skálázódik, azaz $V \propto L^3$. Homogén test esetén a test tömege a sűrűségnek és a térfogatnak a szorzata, tehát $m = V\rho$. Ebből viszont az is következik, hogy $m \propto L^3$.

Ez eddig rendben van, de használható-e mindez valamire? Vessük fel a következő kérdést. Egy 180 centiméter testmagasságú apa 90 centiméter magas gyermekével a vízpartra igyekszik. Mindketten mezítláb vannak, melyikük talpát szúrja jobban a talaj? Ez attól függ, hogy mekkora a talpukon ébredő nyomás. A nyomást úgy tudjuk kiszámítani, hogy a nyomóerőt osztjuk a felülettel:

$$p = \frac{F}{q}.$$

A nyomóerő jelen esetben a súly, ami $G = mg \propto L^3$. Ha feltételezzük, hogy a két test hasonló – ami esetünkben jó közelítésben igaz –, akkor a talp felülete a testmagasság négyzetével arányos, tehát a nyomásra írhatjuk:

$$p \propto \frac{L^3}{L^2} = L.$$

Tehát az apa talpát közelítőleg kétszer annyira szúrja a talaj.

A skálázás lényegével már Galilei is tisztában volt. Kiindulásként azt a ma már nem egészen gyakorlatias problémát vizsgálta, hogy megtartja-e saját súlyát a pokol teteje. Dante művéből arra következtetett ugyanis, hogy a poklot egy Marseille-től Jeruzsálemen át Taskentig húzódó, 5000 kilométer átmérőjű, körülbelül 600 kilométer vastag gömbhéj fedi. Arra a kérdésre, hogy egy ilyen tető megtartja-e saját súlyát, először azt a helytelen választ adta, hogy igen, mert ez olyan, mintha a firenzei katedrális kupoláját nagyítanánk fel. Később rájött, hogy tévedett – bár ezt nyilvánosan sohasem vallotta be –, és élete végéig kísérletezett a különböző anyagok teherbírásával. Ennek során világosan felismerte a skálázás lényegét, és eljutott ahhoz a gondolathoz is, hogy a szárazföldi állatok nem lehetnek tetszőlegesen nagyok, mert csontvázuk nem bírja el saját súlyukat.

Azt, hogy skálázással pénzt is lehet szerezni, I. K. Brunel, a 19. század legendás mérnöke bizonyította be. Ő ugyanis javaslatot tett olyan gőzhajó megépítésére, amely képes átszelni az Atlanti-óceánt. Egy szakértő viszont azt mondta, hogy egy gőzhajó sohasem tud annyi tüzelőanyagot szállítani, amennyi az átkeléshez szükséges. Ekkor Brunel nagyjából a következő érveléssel győzte meg az érthetően vonakodó befektetőket. Ahhoz, hogy egy hajó s távolságot tegyen meg, $W = Fs$ munkát kell végeznünk, ahol F a közeg (víz) ellenállásának legyőzéséhez szükséges erő. F -ről tudjuk, hogy a hajó vízbe merülő részének keresztmetszetével arányos, azaz $F \propto L^2$, ahol L a hajó lineáris mérete. A szállítható fűtőanyag tömege – és ezzel együtt energiája – viszont a hajó térfogatával, azaz L^3 -nel arányos. Ebből viszont az következik, hogy $s \propto L$, azaz bármekkora is a távolság, elvben mindig építhető akkora hajó, amely képes azt megtenni. Brunel meg is kapta a pénzt az egyik korabeli technikai csoda, a Great Western nevű gőzhajó megépítésére, amely természetesen képes volt átszelni az óceánt.

A fenti eredmények alapján érdemes lenne megnézni, hogy a skálázás nem vezethet-e használható következtetéshez a fizikán kívül is – mondjuk a



A firenzei katedrális kupolája



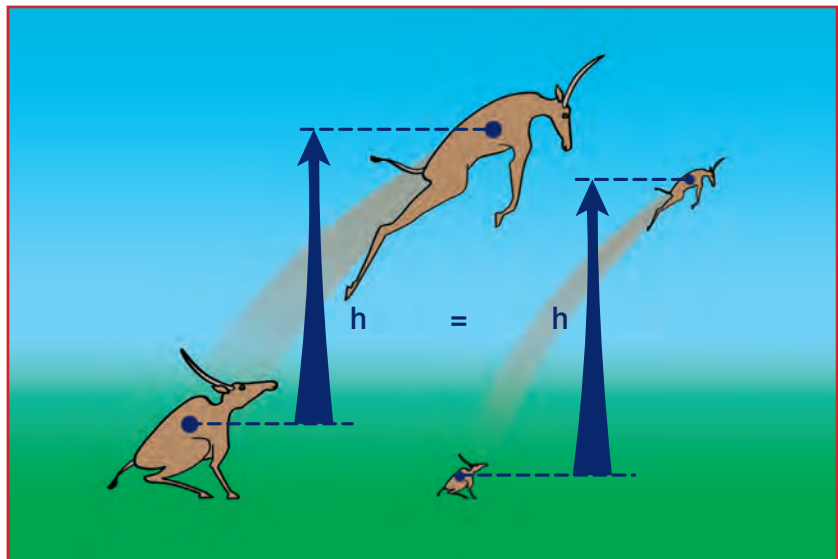
biológiában. Ehhez tekintsük meg a következő problémát. Egy szafariparkba új gazellafaj érkezik. A kérdés: meg kell-e emelni a kerítést? (Más szavakkal: tudunk-e általánosságban mondani valamit arról, hogy milyen magasra tudnak ugrani egymáshoz közelítőleg hasonló állatok?) A kérdés megválaszolásához egészen vázlatosan át kell tekintenünk, hogyan működnek az izmok.

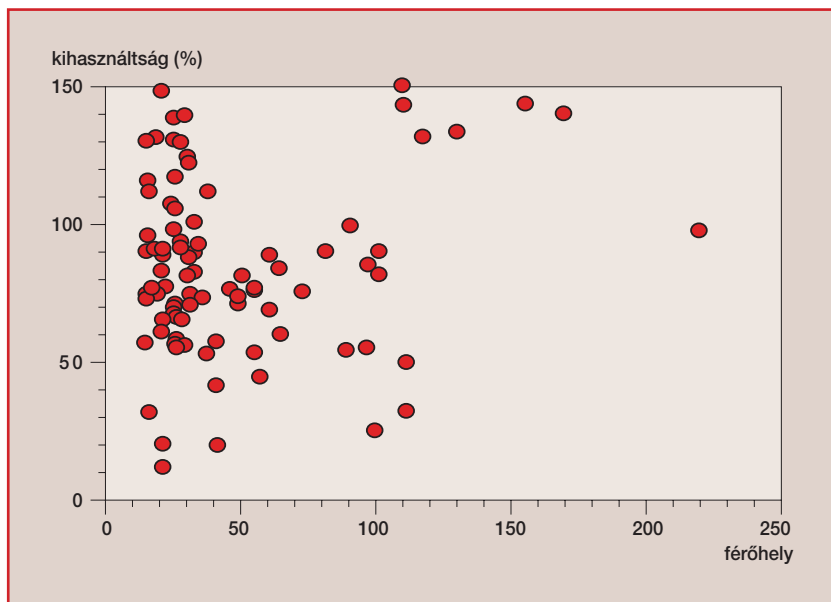
Az izmok mikrométer nagyságrendű rostokból állnak úgy, hogy egy rost azonos hosszúságú részegységekből épül fel. Miután egy-egy rost azonos nagyságú (összehúzó) erőt képes kifejteni, egy izomköteg által kifejtett erő arányos a benne levő rostok számával, ami viszont arányos az izomköteg keresztmetszetével, azaz $F \propto L^2$. A rostban levő egységek azonos mértékben képesek összehúzódni, ebből következően egy izomköteg maximális összehúzódása a kötegben levő egységek számával, tehát az izomköteg hosszával arányos $s \propto L$.

Ezen igen vázlatos megfontolások alapján már meg tudjuk mondani, hogy mivel arányos egy izomköteg által végzett munka. A munka, amint azt korábban már felhasználtuk, az erőnek és az elmozdulásnak a szorzata, tehát $W_i = Fs \propto L^2 L = L^3$, azaz az izomköteg által végzett munka az izomköteg térfogatával, vagy ami ezzel egyenértékű, a tömegével arányos. Hogyan hozható ez kapcsolatba az emelkedési magassággal? Ahhoz, hogy egy m tömegű állat h magasságba emelkedjék, $W_b = mgh$ munkát kell végezni, ahol g a nehézségi gyorsulás. A szükséges munkára tehát írhatjuk $W_b \propto m \propto L^3$. Ebből viszont az a meglepőnek tűnő következtetés adódik, hogy a hasonló állatok azonos magasságba képesek felugrani. (Szemléletesen: ha egy eredetileg h magasságba felugrani képes állat méreteit megnöveljük, akkor az izmai által végzett munka éppen olyan mértékben növekszik meg, mint amennyivel több munka szükséges a megnövekedett tömeg adott magasságba való emeléséhez.)

Eredményünk – melyet egyébként feltalálója után Hill első törvényének is szokás nevezni – furcsának tűnik, de a tapasztalatok szerint jó közelítéssel igaz. (A fentiekhez alapelveiben hasonló érveléssel John R. Hutchinson és

Mekkorát képesek ugrani az állatok?





Hogyan mérik a tantermek kihasználtságát a fizikusok?

Mariano Garcia 2002-ben kimutatták, hogy – szemben a *Jurassic Park* című filmmel – a *Tyrannosaurus rex* aligha tudott gyorsan futni.)

Az, hogy egy tulajdonság mérésére értelmes mennyiséget vezessünk be, nem csak a fizikában fontos. Amikor az 1990-es évek legvégén a Világbank által finanszírozott egyik projekt keretében a Szegedi Tudományegyetem fejlesztési tervei készültek, vita folyt arról, hogy milyen típusú új oktatási helyiségekre lenne szükség. Ha csak az órarendeket nézzük meg, akkor az elég egyértelműen kiderül, hogy a negyven férőhelynél nagyobb tantermek ki vannak használva, míg az ennél kisebbeknél nagy a szórás. Kellene tehát nagy termeket építeni, de mekkorákat?

Az Integrációs Bizottságban fizikusok is helyet kaptak, akik azt mondták, hogy a heti óraszám önmagában nem méri helyesen a kihasználtságot, hiszen ha egy százfős teremben egész héten tízen ülnek, akkor az nincs kihasználva. Vezessünk be a kihasználtság mérésére egy másik jellemzőt. Egy terem akkor legyen 100 százaléig kihasználva, ha benne heti 36 órában a székek 80 százaléka ülnek. Ha elkészítjük az ábrát úgy, hogy a heti óraszám helyett a kihasználtságot ábrázoljuk, rögtön világossá válik, hogy valóban nagy termekre van szükség, de 100–120 férőhelynél kisebb termeket nem érdemes építeni, mert azok amúgy sincsenek kihasználva.



Tyrannosaurus rex koponya-csontváza

Modellalkotás

A bevezetőben a modellalkotást művészetnek neveztem. Ez egyáltalán nem volt véletlen. Szilárd meggyőződésem ugyanis, hogy a tudományos tevékenység legnagyobb kreativitást igénylő mozzanata – éppen a kreativitáson keresztül – sokban hasonló a művészethez.

A modellalkotás lényegét a legjobban talán Galilei zseniális művén keresztül lehet bemutatni. Ahhoz, hogy Galilei munkásságát kellően értékelni



Arisztotelész. Justus van Gent festménye, 1476

tudjuk, röviden át kell tekintenünk, mi volt a helyzet, amikor ő színre lépett. Galilei előtt a fizikát az Arisztotelész által kidolgozott, úgynevezett **peripatetikus mechanika** uralta. A mozgásokra vonatkozóan a peripatetikus mechanika a következő alapelven nyugodott. A köznap tapasztalat szerint a mozgásba hozott testek előbb-utóbb megállnak. (Ez természetesen nem vonatkozik az égitestek mozgására, de az égitesteknek a maguk tökéletességében amúgy sincsen közük a földi mozgásokhoz.) Ebből nyilvánvalóan következik, hogy a testek természetes állapota a nyugalom, ezért ha egy test mozog, akkor e mögött valamilyen ok áll. A mozgást fenntartó okokat ezután Arisztotelész egy meglehetősen bonyolult, de koherens rendszerbe foglalta. A peripatetikus mechanika erőssége, hogy a tapasztalatból indul ki, és logikus egységet képez. A probléma csupán az, hogy alapvetően hibás. Galilei volt az, aki egy közel kétezzer éves tévút után észrevette, hogy a mozgó testek valóban megállnak, de ez azért van, mert nem tudjuk őket tökéletesen elszigetelni más testek hatásától. A testek természetes állapota tehát nem a nyugalom, hanem a mozgás, és nem a mozgás fenntartásához, hanem megváltoztatásához van szükség okra.

Négyszáz évvel Galilei után azt is gondolhatnánk, hogy életműve teljes mértékben gondolkodásunk részévé vált. Ennek ellenőrzésére egy négy kérdésből álló egyszerű tesztet töltöttünk ki mintegy 250 középiskolással, melyben olyan kérdések szerepeltek, amelyekre Galilei minden bizonnyal helyes választ adott volna. A tesztkérdések:

1. Egy kerékpáros egyenletes sebességgel halad vízszintes útszakaszon. Közben függőlegesen feldobja a kezében lévő golflabdát. Válassza ki a helyes megoldást az alábbi lehetőségek közül:
 - a) A labda a kerékpáros elé esik vissza.
 - b) A labda a kerékpáros kezébe esik vissza.
 - c) A labda a kerékpáros mögé esik vissza.
2. A sümegei várban várjátékokat rendeznek. A feladat az, hogy a fabábu fejére helyezett almát íjjal löje le. Hova céloz?
 - a) Kicsit az alma fölé.
 - b) Pontosan az almára.
 - c) Kicsit az alma alá.
3. A következő feladat: egy íjjal el kell találnia egy körülbelül fél dm^3 térfogatú homokzsákot, melyet az önnel egy magasságban lévő lőrésből ejtenek ki. A nyilat egy kürtjelre az elejtés pillanatában kell kilőni. Hova céloz?
 - a) Egy kicsit a zsák fölé.
 - b) Pontosan a zsákra.
 - c) Egy kicsit a zsák alá.
4. A lövészverseny utolsó feladata: az előbbi zsákot egy héliummal töltött kisméretű léggömbre erősítve ejtik le. A lövés pillanatát most is az elejtéskor megszólaló kürtszó jelzi. Hova céloz?

Peripatetikus mechanika:

a peripatetikus mechanika Arisztotelész mechanikai rendszere. Az elnevezés minden bizonnyal a peripatetomai (=sétálni) görög szóból ered, miután Arisztotelész az athéni Lúkeion ligetben sétálgatva tanította tanítványait. A peripatetikus mozgástan egyik alapelve, hogy a testek természetes állapota a nyugalom, a mozgások létrejöttéhez valamilyen okra van szükség.

- a) A zsák fölé.
b) Pontosan a zsákra.
c) A zsák alá.

Az eredmények a táblázatban láthatók (a fejlécben vastagon szedett betűk a helyes válaszokat jelzik):

	1. kérdés			2. kérdés			3. kérdés			4. kérdés			Összesen
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
9. osztály	0	52	49	59	9	4	0	12	62	15	39	19	74 fő
10. osztály	1	22	66	60	24	11	7	5	75	11	43	34	87 fő
12. osztály	0	28	49	61	11	5	0	15	61	20	33	17	77 fő
Összesen:	1	102	164	180	44	20	7	32	198	46	115	70	238 fő



Galilei, Galileo (1564–1642)

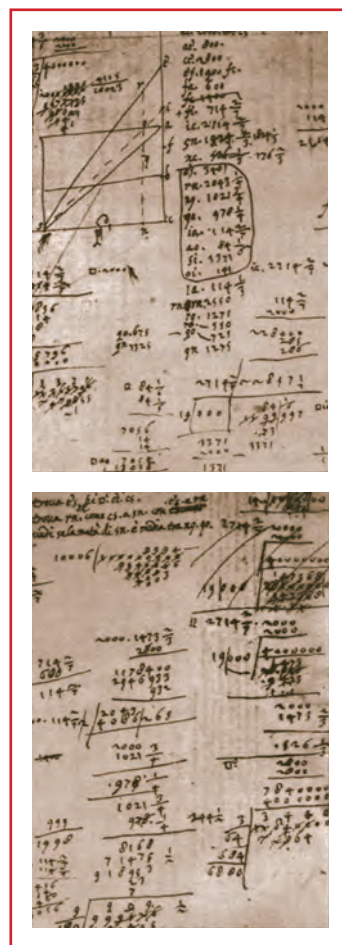
A táblázatból világos, hogy aligha mondhatjuk azt, hogy a mai diákok készség szintjén hordozzák magukkal Galilei tudását.

Galilei példája jól mutatja, hogy a modellalkotás során milyen fontos, hogy ne vezessen félre bennünket az, ami nyilvánvalónak tűnik. Ennek kapcsán megfogalmazhatjuk a kis herceg elvének Szabó-féle adaptációját a fizikára: „jól csak az eszével lát az ember”.

Galilei minden zsenialitása ellenére csak részproblémákat oldott meg, a mechanika egészére vonatkozó modellt Newton alkotta meg. Newton ezzel a klasszikus mechanikát a természettudomány modelljévé tette.

A modellalkotás természetesen nem csak a szorosan értelmezett fizikán belül fontos, fizikai jellegű modellekkel igen távoli tudományterületeken is találkozunk. Ezt is szeretném egy kiragadott példával szemléltetni. Serge Galam és Annick Vignes a közelmúltban tették közzé eredményeiket *Divat, kreativitás és hatékonyság: egy alkalmazás a fizikából* címmel. Annak ellenére, hogy a vásárlói magatartásnak nem sok köze van a fizikához, a cikkből kiderül, hogy egy viszonylag egyszerű feltevéseken alapuló modell segítségével jól lehet modellezni, hogy a divat terjedése során az új, divatos termék hogyan szorítja ki a piacon elérhető modelleket.

A cikk azt szemlélteti, hogyan függ a divat elterjedésének sebessége az úgynevezett referenciacsoportok nagyságától. (A referenciacsoport azt az egységet jelenti, amelynek tagjai egymás viselkedését döntéseiknél figyelembe veszik. Ez az áru jellegétől függően lehet baráti kör, osztály, település stb.) Az egyik fő megállapítás az, hogy a divat annál gyorsabban terjed el, minél kisebbek a referenciacsoportok, azaz a közönséget kisebb csoportokban könnyebb „megdolgozni”. Galam a modellt kis módosításokkal annak leírására is felhasználta, hogy miként jelenik meg a szegregáció és extrémizmus egy eredetileg heterogén közvéleményben.



Galilei számításai a mozgásról



Torziós inga

Mérés a fizikában

Amint azt a bevezetőben említettük, modellünk megalkotása után a levonható következtetéseket kísérletileg kell ellenőrizni. Ez természetesen azt is jelenti, hogy a mérési módszerek pontossága meghatározza a modellek ellenőrizhetőségét, és ezen keresztül a tudomány fejlettségi szintjét. Sőt a mérés-technika csúcsteljesítményei gyakran újabb elméletek kiindulópontjává válhatnak. Erről a témáról beszélve nem hagyhatjuk említés nélkül Eötvös Loránd kísérleteit. Eötvös az általa kifejlesztett **torziós ingával** a 19. és a 20. század fordulóján munkatársaival azt a kérdést vizsgálta, hogy a súlyos és tehetetlen tömeg hányadosa függ-e a testek anyagi minőségétől. A mérés alapötlete az volt, hogy amennyiben ez így lenne, a nehézségi gyorsulás irányának is függenie kellene az anyagi minőségtől. A feladat tehát „csupán” annyi, hogy kellő pontossággal meg kell határoznunk a nehézségi gyorsulás irányát különböző testekre. Eötvös és munkatársai több évtized munkájával kimutatták, hogy a kérdéses függés – ha egyáltalán létezik – nem lehet nagyobb, mint néhányszor 10^{-9} . Ezt a metrológiai csúcsteljesítményt akkor tudjuk igazán értékelni, ha meggondoljuk, hogy ehhez arra volt szükség, hogy a nehézségi gyorsulás irányát 10^{-11} radián pontossággal határozzák meg. (Ekkora szög alatt látszana a Földről nézve a Holdon egy körülbelül 3 milliméter átmérőjű korong, vagy ha valaki a földi méretekben jobban tud tájékozódni: ilyen szög alatt látszik egy szőke hajszál Moszkvában, Budapestről nézve.) Ez a mérés a tudomány fejlődésére igen nagy hatással volt, miután megadta a döntő lökést Einsteinnek arra, hogy kidolgozza az általános relativitáselméletet.

Azt gondolhatnánk, hogy az ilyen különleges pontosságú mérések a tudomány számára ugyan nagyon fontosak lehetnek, de a hétköznapi élethez aligha van sok közüük. Ezzel kapcsolatban vizsgáljuk meg egy kissé közelebbről az időmérés fejlődését. Az időmérés legpontosabb eszközei jó háromszáz éven át az ingaórák voltak. Bár a 20. század első harmadában ugrás-szerű fejlődést jelentett a nagy pontosságú kvarcoszcillátorok megjelenése, az igazán nagy áttörés a második világháború után következett be, amikor kifejlesztették az atomórákat. Az atomórák mérési pontossága a következő évtizedekben rohamosan fejlődött, és mára már elérte a 10^{-15} -t. (Ezekről az úgynevezett **atomi szökőkút** elvén működő órákról – melyek pontossága a fentiek szerint 1 millió év alatt 0,03 másodperc – Bor Zsolt előadásában hallhattak – ME 1. köt. 307–321. p.) Mindez természetesen nagyon fontos a metrológia számára; de vajon hogyan jelenik meg a gyakorlatban? Nos, az az áttörés, amely a hétköznapi élethez elérhető közelségbe hozza az atomórákat, 2004-ben következett be, amikor az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Mérésügyi Intézetében John Kitching és munkatársai kifejlesztettek egy chip méretű atomórát.

Ezek már néhány éven belül megjelenhetnek gyakorlati eszközeinkben, ami legalább ezerszer pontosabb időmérést jelentene a mai legjobb kvarc-órákhoz képest. Azt persze még ezután is kérdezhetjük: mire lenne ez jó? Valószínűleg napi időbeosztásunkat nem sokban érintené, de forradalma-

Torziós inga:

a torziós ingát Eötvös Loránd a gravitációs mező tanulmányozásához fejlesztette ki. A torziós inga egy igen vékony szátra függesztett rúdból áll, amelynek végén mérőtömegek helyezkednek el. A tömegekre ható erő következtében a szál elcsavarodik. Az elcsavarodást a rúdra erősített tükkörről eső fénysugár segítségével optikai úton mérik.

sítaná például a globális helymeghatározó rendszer (Global Positioning System, GPS) működését. Ennek pontosságát ugyanis a készülékekben levő óra pontossága határozza meg. Egy, mondjuk, egy-két centiméter pontossággal működő GPS ma még nehezen belátható új lehetőségeket nyitna meg. (A GPS-ről szolt Pap László előadása – ME 2. köt. 329–355. p., és szóba került Bor Zsolt és Detrekői Ákos előadásán is – ME 4. köt. 321–342. p.)

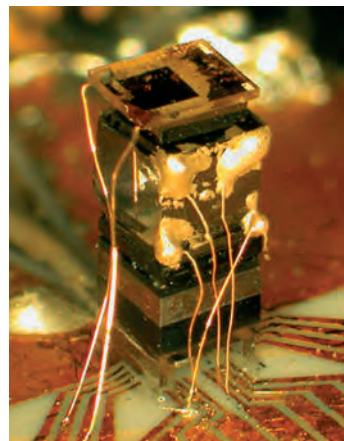
Fizika a mindennapi eszközökben

Az előzőekben a fizikai gondolkodás sajátosságait követve eljutottunk a gyakorlati eszközökhöz. Ez az a másik terület, ahol könnyű bemutatni, hogy mit adott a fizika az emberiségnek. Áttekintést adni arról, hogy a fizika hogyan jelenik meg eszközeinkben, teljesen reménytelen feladat, ezért itt is egy kiragadott példán keresztül mutatjuk be, hogy mi mindenre nem gondolunk, amikor egy eszközt használunk.



Ma már természetes az, hogy repülőre szállunk, legfeljebb azon aggódunk, hogy a csomagunk is velünk együtt érkezik-e meg, az aligha jut eszünkbe, hogy milyen hihetetlen intellektuális teljesítmény áll a mögött a szerkezet mögött, amelyre rábízzuk életünket. (Ezt egyébként nyugodtan megtehetjük, mert egy, az Egyesült Államokban készült statisztika szerint kétszer nagyobb a valószínűsége annak, hogy egy állati erővel vont járművel kapcsolatos balesetben halunk meg, mint hogy repülőbaleset áldozatai leszünk.) Ennek illusztrálására vizsgáljuk meg kissé közelebbről egy modern utasszállító hajtóművét.

A turbina működése négy fázisra osztható. Első lépésként a belépő oldalon nagy mennyiségű levegőt szívnak be, a második szakaszban ezt nagy nyomásra összesűrítik, a harmadik fázisban ehhez üzemanyagot kevernek, majd begyűjtik, végül a nagy sebességű forró gáz a kilépő fúvókán elhagyja

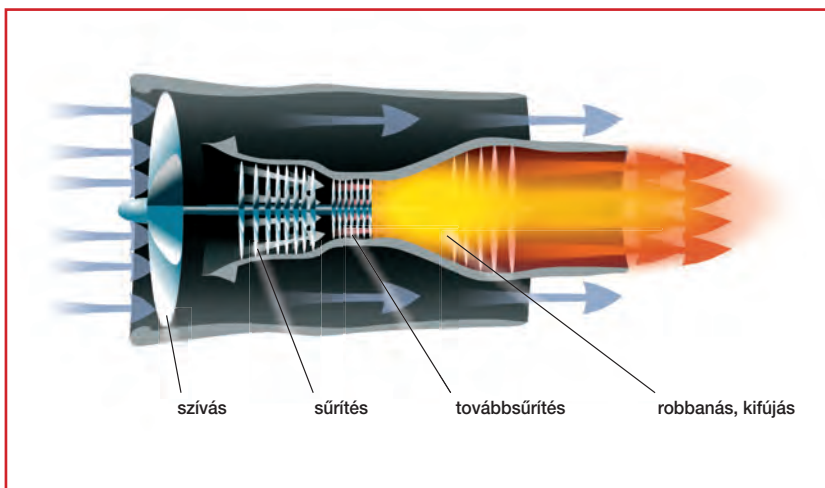


Chip méretű atomóra
(Forrás: NIST)

Turbinalapátok

Atomi szökőkút:

az atomórák működése azon alapszik, hogy egy atom két lehetséges energiaállapota közötti átmenetkor keletkező vagy elnyelődő sugárzás frekvenciája igen pontosan meghatározott. Az atom lehetséges energiaállapotai azonban – bár csak igen kis mértékben – függenek a környezeti hatásoktól. Ennek kiküszöbölésére az atomokat egy lézeres csapdába ejtik, ahol gyakorlatilag megállnak, majd ugyancsak lézer segítségével az atomgömböt fellövik, hogy áthaladjon a mérőcellán. Eközben az atomok a függőleges hajtás törvényszerűségének megfelelően mozognak, mint egy szökőkútból kilövellő vízszög.

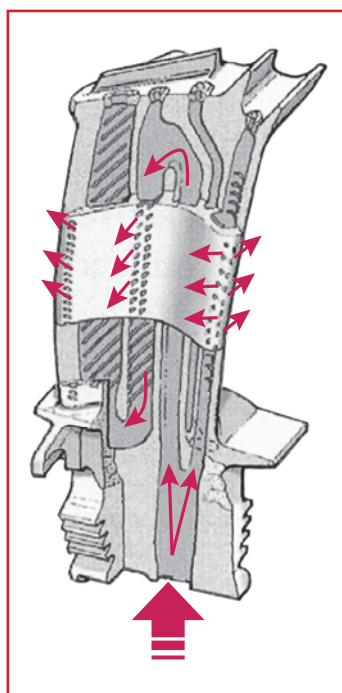


A sugárhajtású turbina működése

a hajtóművet. Vessünk egy-egy rövid pillantást ezekre a részegységekre. A hajtómű belépő oldalán látható lapátok által alkotott körülbelül 3 méter átmérőjű, 3300 fordulat/perc sebességgel forgó ventilátor percenként 70 tonna levegőt képes beszívni. (A lapátok végén a gyorsulás 6800 g, 900 kN centrifugális erő hat, ha menet közben egy lapát kitörne, akkor 250 kJ energia szabadulna fel, ami egy 1000 kilogramm tömegű személygépkocsit képes lenne a hetedik emelet magasságába felrepíteni.)

Ezeknek a hihetetlen mechanikai követelményeknek csak különleges anyagból, különleges technikával készült lapátok képesek megfelelni. Mivel az anyagok szilárdságát leginkább a szennyezések rontják, ezeket a lapátokat a mikroelektronikában megszokott, legszigorúbb tisztatéri környezetben gyártják.

Amint azt a termodinamikából tudjuk, a hőerőgépek hatásfoka annál jobb, minél magasabb hőmérsékleten dolgoznak. A jobb hatásfok elérése érdekében ezért a fejlesztések többek között arra irányultak, hogy a turbínák hőmérséklete minél magasabb legyen. A fejlesztések eredményeképp a turbínák működési hőmérséklete az 1950-es évekbeli 800 °C-ról mára 1550 °C környékére emelkedett. Ez különösen azért érdekes, mert a turbínákat alkotó fém olvadáspontja 1500 °C. Azt a lehetetlennek tűnő feladatot, hogy a turbínák magasabb hőmérsékleten dolgozzanak, úgy oldják meg, hogy a lapátok felületére a bennük kialakított csatornák segítségével hideg levegőt fúvatnak, így azokat egy hideg légpárna választja el a forró gáztól. Ezt persze úgy kell megtenni, hogy közben a lapátoknak el kell bírniuk a 10 000 fordulat/perces fordulatszámot.



Turbinalapátok belső hűtésének kialakítása

A fizika tanítása, tanulása

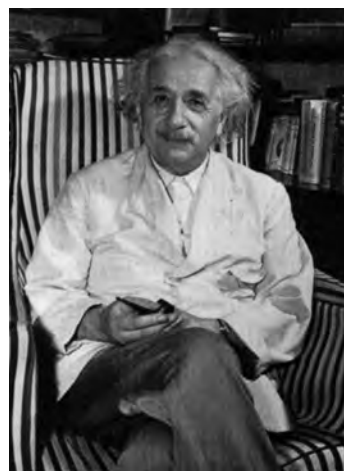
A fizika, illetve a természettudományok társadalmi elfogadottságáról beszélve nem állhatom meg, hogy a fizika tanításáról ne szóljak legalább néhány szót. Ehhez szeretném idézni egy magyar géniusz visszaemlékezését gyermekkorára:

Gyerekkoromban egyszer azt hallottam, hogy az átmelegedett üveg elpattan, ha hideg víz freccsen rá. Aznap este, mikor a mama kitette a lábát a konyhából, azonnal kipróbáltam e tétel igazságát. Egy kis vizet fröcsköltem a lámpaüvegre. Az üveg eltört, én megdöbbsentem, a mama pedig belépett. Meglepetten s egyben fölindultan támadt rám: Te, te – mért törted el a lámpaüveget? Lesütött szemmel hallgattam a szemrehányást és növekvő daccal tűrtem a pofonokat, melyek ugyancsak zuhogtak. Anyámat különösen csökönyös hallgatásom ingerelhette. Mért törted el a lámpaüveget? Mit is válaszolhattam volna? A legszemtelenebb hazugságnak látszott volna, ha az igazat felelem: Én nem törtem el a lámpaüveget! Eltört, „mert az átmelegedett üveg elpattan, ha hideg víz freccsen rá”. Ugyan én fröcsköltem le, de nem azért, hogy eltörjem, hanem, hogy lássam, igaz-e, amit hallottam, s ami oly érdekes volt számomra, hogy meg kellett vizsgálnom. Nagyon igazságtalannak éreztem a fenyítést. De ha védekezésül azt mondom, azért fröcsköltem vizet az üvegre, mert úgy hallottam, hogy akkor eltörik, anyámban azt a hitet keltetem volna, hogy tudatos rosszság, komoly gonoszság volt, amit tettem. Úgy, hát te tudad és mégis? Igen, tudtam, de azt is tudtam, hogy a gyereket mindig becsapják, hol gólyamesével, hol meg azzal, hogy hercsula lesz ebédre.



Ez az idézet, amelyben szerintem minden benne van, amit a fizika tanításával kapcsolatban elmondani érdemes, nem egy Nobel-díjas magyar származású tudóstól, hanem József Attilától származik, aki ugyanabban az évben született, amikor Einstein a speciális relativitáselméletet publikálta.

Ahogy azt a gyermek József Attila kitűnően példázza, minden gyermekben ott van a „természettudós”. Kíváncsi a világra, és megpróbálja ellenőrizni azt, amit hall. Ezt az adottságot sajnos nagyon gyakran „kipofozzák” belőle. Ma már általában nem a mama, hanem az az oktatási módszer, amely a kísérleteken, a tapasztalaton alapuló tanítás helyett üres definíciók, szabályok biflázását várja el a gyerekektől. Ismét csak Einsteint idézve: „A tanulás tapasztalás. Minden más egyszerűen csak információ.” A recept tehát egyszerű, bár kétségkívül fáradtságos. A probléma csak az, hogy egyre kevesebb tanár használja. Amellett hogy szeretném kifejezni a legnagyobb elismerésem a kísérletező tanároknak, kérem a többieket, hogy gondolják meg a fentieket. Higgyék el, nincs az a politikus, aki annyit tudna tenni az ország jövőjéért, mint egy fizikatanár, aki 30–35 éves pályafutása során kétháromezer gyermeket indít el az életbe úgy, hogy megszerettette velük a tudományt.



Einstein, Albert (1879–1955)



Ajánlott irodalom

Fisher, Len: Weighing the Soul. London: Weidenfeld and Nicholson, 2004.

Koestler, Arthur: Alvajárók. Bp.: Európa K., 1996.

Pennycuik, Colin J.: Newton Rules Biology. Oxford: Oxford University Press, 1992.

Pólya György: A problémamegoldás iskolája. I–II. Bp.: Tankönyvkiadó, 1968.

Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete. Bp.: Akadémiai K., 1998⁴.