

SEAN CARROLL
TÉR, IDŐ, MOZGÁS

FORDÍTOTTA • **GERNER JÓZSEF**

**SEAN
CARROLL**

TÉR, IDŐ,
MOZGÁS



AZ UNIVERZUM
LEGFONTOSABB
ELMÉLETEI 1.

A könyv megjelenését a Magyar Tudományos Akadémia támogatja.



A fordítás a következő kiadás alapján készült:

The Biggest Ideas in the Universe. Space, Time, and Motion.

Dutton, New York, 2022.

Copyright © 2022 by Sean Carroll.

All rights reserved.

Hungarian translation © Gerner József, 2025

Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2025

Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Takács Gábor

ISBN 978 963 493 356 4

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!

Újabb kiadványainkról, akcióinkról a www.typotex.hu

és a facebook.com/typotexkiado oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó

Alapította Votisky Zsuzsa, 1989

A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.

Felelős kiadó: Németh Kinga

Felelős szerkesztő: Brunner Ákos

Szerkesztette: Böröczki Tamás

Tördelés: Juhász Lehel (X_YL^AT_EX)

Borítóterv: Somogyi Péter

Nyomta és kötötte: OOK-PRESS Nyomda, Veszprém

Felelős vezető: Szathmáry Attila

TARTALOM

	BEVEZETÉS	9
Egy	MEGMARADÁS	15
Kettő	VÁLTOZÁS	35
Három	DINAMIKA	61
Négy	TÉR	93
Öt	IDŐ	119
Hat	TÉRIDŐ	141
Hét	GEOMETRIA	173
Nyolc	GRAVITÁCIÓ	207
Kilenc	FEKETE LYUKAK	233
	A FÜGGELÉK	
	Függvények, deriváltak és integrálok	261
	B FÜGGELÉK	
	Konnexió és görbület	273
	NÉV- ÉS TÁRGYMUTATÓ	279

Jennifernek

BEVEZETÉS

Néha elképzelek egy olyan világot, ahol az emberek többsége jól ismeri a modern fizikai elképzeléseket, és határozott véleménnyel rendelkezik róluk. Ahol a napi munka végeztével barátainkkal a kocsmában kedvenc sötétanyag-jelöltünkről vagy a kvantummechanika versengő értelmezéseiről vitatkozunk, és a születésnap gyereksúron megszólal egy szülő: „Nem látom be, miért gondolja bárki is, hogy az elektromos kölcsönhatások szintjén lennie kell egy újabb részecskének!”, mire valaki rögtön rávágja: „Különben hogyan fogod kezelni a hierarchia-problémát?” Az embereknek végül is van véleményük a keresletoldali közgazdaságtanról vagy a kritikái fajelméletről. Miért ne lehetne az inflációs kozmológiáról és a szuperhúrelméletről is?

Csak hogy mi nem ilyen világban élünk. Az akadémiai szakterületek megértése és művelése a szakemberek dolga – és ez a fizikára fokozottan érvényes. A tudomány emberei egymás közt igencsak sajátos zsargon használnak, és ezt a szaknyelvet olyan matematikai fogalmak uralják, amelyekről a legtöbb ember nem is hallott, nem hogy elsajátította volna őket. Emögött észszerű okok húzódnak meg, de a kialakult helyzet nem feltétlenül szükségszerű. Nagyrészt annak a következménye, ahogyan a fizikusok megosztják tudásukat a külvilággal.

Ha nem szakemberként többet szeretnénk tudni a modern fizikáról, alapvetően két lehetőség közül választhatunk. Az egyik opció, hogy beérjük a tudományos népszerűsítés szintjével: megtanulunk valamit a

releváns fogalmakról anélkül, hogy beleásnánk magunkat a technikai és matematikai részletekbe. Könyveket olvasunk, előadásokra járunk, videókat nézünk, és podcasteket hallgatunk. Jó hír, hogy ilyen forrásokban bővelkedünk – meglehetősen sokat lehet így megtanulni, bár kissé véletlenszerű módon. Végül is be kell látnunk, hogy ily módon nem jutunk valódi ismeretekhez. Képeket és metaforákat kapunk, a jelenségek mögött meghúzódó matematikai esszencia felszínes, köznyelvi fordításait. Persze még így is imponáló távolságot tehetünk meg, de valami alapvetőt mindig hiányolni fogunk.

A másik út az, hogy fizikushallgatónak állunk. Beiratkozunk valamelyik egyetemre, vagy begyűjtjük a megfelelő tankönyveket és online forrásokat. Tanulmányaink során jártasságot kell szereznünk a matematika egy jelentős részében: mindenekelőtt a kalkulusban és a differenciálegyenletekben, de a vektoranalízis, a komplex számok, a lineáris algebra és más területek vonatkozásában is. Ez az út kifizetődő – csak hogy elkészerítően lassú. Legalább egy évig bevezető kurzusokra jár az egyetemi hallgató, mielőtt egyáltalán hallana a relativitáselméletről vagy a kvantummechanikáról. Ráadásul a legtöbb fizikushallgató anélkül kaphat diplomát – de akár a PhD-fokozatig is eljuthat –, hogy bármiféle ismeretet szerezne a részecskefizikáról, a fekete lyukakról vagy a kozmológiáról. Ezek a nyalánkságok meghatározott szakterületek specialistái számára vannak fenntartva.

A fizika terén metaforákra és homályos fordításokra hagyatkozó érdeklődő amatőr, illetve az ijesztően bonyolult egyenletekkel is megbirkózó, elismert szakértő közötti szakadék nagy, de nem áthidalhatatlan. Lehet, hogy nem akarok profi autóversenyzővé válni, de attól még vezethetek autót. Bizonyára van rá mód, hogy megismerkedjünk a modern fizika valódi lényegének egy részével anélkül, hogy végigküzdenénk magunkat a többéves egyetemi tanterven – még ha ennek érdekében meg is kell vizsgálnunk néhány egyenletet.

Nos, ha olvasóm ezt a célt tűzte ki maga elé, akkor a legjobb helyen jár!

Az univerzum legfontosabb elméletei köteteinek az a kiindulópontja, hogy a modern fizikáról lehetséges tényleges ismereteket szerezni – beleértve az egyenleteket és minden egyebet – akkor is, ha inkább ama-

török, mint szakemberek vagyunk, és azok is akarunk maradni. Olyan embereket tart szem előtt, akik nem rendelkeznek a középiskolainál mélyebb matematikai ismeretekkel, de készek megvizsgálni egyenleteket és elgondolkozni a jelentésükön. Ha hajlandóak vagyunk gondolkodni egy kicsit, teljesen új világ fog megnyílni előttünk.

Az egyenletekről annyit, hogy nem is annyira ijesztőek. Csupán mennyiségek közötti viszonyokat fejeznek ki sajátos, tömör alakban. Egy dolog azt mondani, hogy Einstein általános relativitáselmélete szerint „a tömeg és az energia meggörbíti a téridőt”. És egészen más dolog, ha ezt az Einstein-egyenlettel fejezzük ki:

$$R_{\mu\nu} + \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}.$$

A magyar nyelvű mondat bizonyos fókig persze érzékelteti, hogy mi-
ben áll az általános relativitás, az egyenlet azonban elmondja nekünk,
hogy valójában miről is van szó – mégpedig pontos, félreérthetetlen
szakkifejezésekkel. Olvashatunk róla, amennyit csak tetszik, de amíg
nem értjük meg ezt az egyenletet, addig nem fogjuk igazán érteni Ein-
stein elméletét.

A fenti egyenlet teljesen átláthatatlan, ha nem ismerjük az egyes
szimbólumok jelentését. Zagyvaságnak tűnik. Hogy felfoghassuk, meg
kell értenünk valamennyi betű és szám egyedi szerepét, beleértve az al-
só indexben álló μ és ν szimbólumokét, amelyek – te jó ég! – a görög
ábécé betűi. Nem véletlenül tart jellemzően évekig, mire a fizikushall-
gatók idáig eljutnak.

De mi eljutunk idáig, ha elolvassuk ezt a könyvet. A 8. fejezethez
érve már ismerni fogjuk az Einstein egyenletében szereplő valamennyi
szimbólum jelentését, továbbá azt, hogy miként illeszkednek egymás-
hoz, és mit mondanak nekünk a téridőről, valamint a gravitációról. Bár
az egyenlet tartalmaz görög betűket is, még így is sokkal könnyebb ezt
megérteni, mint mondjuk megtanulni írni és beszélni újjörög nyelven.

A legtöbb népszerűsítő könyv feltételezi, hogy olvasója nem sze-
retne erőfeszítéseket tenni az egyenletek megértése érdekében. A tan-

könyvek ezzel szemben azt feltételezik, hogy olvasójuk nemcsak megérteni akarja az egyenleteket, de meg is akarja *oldani* azokat. Kiderül azonban, hogy ezeknek az egyenleteknek a megoldása jóval több munkával jár, és sokkal több gyakorlatot és tanulást feltételez, mint az egyenletek „puszta” megértése.

Hadd fejtsem ki a megoldás és a megértés közötti különbséget, mert ez lesz a kulcsa feltűnően gyors haladásunknak. Einstein egyenlete – hogy az előbbi példánál maradjunk – nem valamely speciális tömeg- és energiaegyüttest kapcsol össze a téridő egy speciális görbületével; teljesen általános összefüggést fejez ki, mégpedig abban a formában, hogy „ha te megadsz nekem egy tömeg- és energiaeloszlást, én meg fogom mondani neked, hogy válaszul mennyire görbül meg a téridő”. Ennek az ígéretnek a beteljesítését jelenti az „egyenlet megoldása”.

Az egyenletmegoldás olykor egyszerű: ha az egyenlet $x = y^2$, és megmondják nekünk, hogy $y = 2$, akkor a megoldás $x = 4$. Nem nagy ördögösség. A valódi fizikai egyenletek ennél sokkal bonyolultabbak, és megoldásukhoz szükség van a kalkulussal összefüggő fogalmakra (azaz a folytonos változás matematikájára), továbbá egyéb haladó szintű fogalmakra. *A gyakorló fizikus idejének nagy része ilyen egyenletek megoldásával telik.* Ezért – nagyon helyesen – képzésük javarészt az egyenletmegoldás módszereinek elsajátításából áll. Bármelyik fizikushallgató tanúsíthatja, hogy egyetemi éve alatt nem az előadásokra járás kötelezettsége volt a leginkább megterhelő, hanem azoknak a feladatsoroknak a kidolgozása, amelyeket a professzorok úgy osztanak ki a hallgatóknak, mintha a hétvégeken semmi más dolguk nem lenne.

Az univerzum legfontosabb elméleteiben nem azt fogom megtanítani, hogyan kell megoldani az egyenleteket. Ám meg fogjuk tanulni megérteni az egyenleteket, még azokat is, amelyeket a bevett fizikakönyvek is nehéznek minősítenek. Ki fog derülni, hogy ez utóbbi sokkal egyszerűbb. Könyveimet az a meggyőződés hatja át, hogy a modern fizikai elképzelések – az igaziak, nem a metaforává hígítottak – felfoghatók mindazok számára, aki nem riadnak vissza attól, hogy picit elgondolkozzanak az egyenletek jelentésén.

Rendben, de milyen elképzelésekről beszélünk? Mint azt gondolhatják, meglehetősen sokféléről. Mindenesetre elegendők ahhoz, hogy az anyagot három részre osszuk fel: *Tér, idő, mozgás*; *Kvantumok és mezők*; valamint *Komplexitás és emergencia*. Végül is a trilógia mint formátum sikeresnek bizonyult már *A gyűrűk ura* és más népszerű franchise-ok esetében is.

A kezünkben tartott könyv – a *Tér, idő, mozgás* – a fizika Isaac Newton által megalkotott keretrendszerére összpontosít, amely egészen a 20. század kvantumforradalmáig uralta a fizikai gondolkodást. Az olvasónak nem kell megijednie, nem fogunk túl sokáig elidőzni a csigáknál és a lejtőknél, bármilyen fontosak is legyenek egyébként. A klasszikus fizika a tér, az idő és a változás természetére vonatkozó alapvető kérdéseket is felvet, és nem fogunk visszarettenni attól, hogy egyenleteink közé olykor filozófiai megfontolásokat is beleszöjünk. Idetartozik a relativitáselmélet is egészen Einsteinnek a görbült téridőről alkotott elképzeléseiig, valamint az elmélet olyan következményei, mint a fekete lyukak létezése. Ez a könyv tehát több évszázados elképzelésektől indul, de egészen a modern kutatás szintjén tárgyalt koncepciókig vezet el.

A *Kvantumok és mezők*ben olyan izgalmas dolgokról is szó lesz, mint az összefonódás és Schrödinger macskája, elsősorban azonban a kvantumtérelmélet és a részecskefizika – azaz a természet alapvető törvényeinek legmodernebb felfogása – megismertetésére törekszünk. Az utolsó kötetben, a *Komplexitás és emergenciában* felismerjük, hogy a világ nem csupán két vagy három részecskéből épül fel. Márpedig érdekes dolgok történnek, amikor a vizsgált rendszer nagyszámú mozgó alkotórészből áll.

Ez rengeteg elgondolás! És mégis, szinte valamennyi a fizika és a hozzá kapcsolódó területek hatáskörébe tartozik. Ez nem más tudományterületek (és végképp nem a művészet és a humán tudományok) hasonlóan nagy és fontos vívmányainak alábecsülését jelenti, egyszerűen csak valahol meg kell húzni a határvonalat.

Egy másik dologban is világos határvonalat kell húzni, mégpedig az „ígéretes spekulációk” és azok között az elképzelések között, ame-

lyek „igaz voltában jó okunk van hinni”. Míg a fizikatankönyvek szerzői hajlamosak leragadni a hasznosságuk folytán már megalapozottnak tartott elméleteknél, a tudománynépszerűsítők szívesen mennek bele teljes egészében hipotetikus elképzelések ismertetésébe. Ez tökéletesen érthető: a kutatók idejük java részét a határvidéken töltik, olyan lehetőségeken töprengve, amelyek még nem tekinthetők elfogadottnak. Mi ragaszkodni fogunk azokhoz az elméletekhez, amelyekről jó okunk van azt hinni, hogy száz év múlva is részei lesznek a gyakorló fizikus eszköztárának.

Örömmel fejezem ki köszönetemet a rendkívüli segítőkészségért, amelyet a könyv megírása során élvezhettem. Scott Aaronson, Justin Clarke Doane és Matt Strassler értékes visszajelzései megóvtak az alkalmatlan kifejezések használatától. Szerkesztőm, Stephen Morrow, mint mindig, most is támogatott és bölcs tanácsaival segített. Ügynököm, Katinka Matson segített formába önteni ezt a bonyolult vállalkozást. A könyv a Covid-járvány alatt készített videósorozatból nőtt ki, amelyet barátom, Lauren Gunderson online drámaíróórái ihlettek. És természetesen nem tudom megfelelően kifejezni a hálámat Jennifer Ouellette-nek a tanácsaiért, erkölcsi támogatásáért és még sok egyébért.

A videók, továbbá egyéb kiegészítő anyagok a <https://preposterousuniverse.com/biggestideas/> weboldalon érhetőek el.

EGY

MEGMARADÁS

Nézzünk körül! Hasonlóan az emberek többségéhez, van testünk. Annak helye van valahol. Jó eséllyel különféle tárgyak vesznek körül bennünket, amelyek mind máshol találhatóak. Asztalok, székek, a padló, a mennyezet, a falak, ha kint vagyunk, akkor fák, esetleg víztömeg. Mindezek a tárgyak léteznek, határozott helyzettel és tulajdonságokkal, és ezek a helyzetek és tulajdonságok időben változhatnak. Székünket közelebb tolhatjuk a falhoz, vagy távolabb tőle. Iszunk egy pohár vizet, és a pohár tartalmát magába fogadja a testünk. Ha ehelyett a pohár vizet az asztalra tesszük és ott is hagyjuk, a víz végül elpárolog.

Így gondolkodunk a világról közvetlen, emberi távlatból: vannak körülöttünk a dolgok, amelyek térben helyezkednek el. A dolgok változhatnak, de időben állandók is lehetnek. A fizika mindezeknek a dolgoknak és viselkedésüknek a tanulmányozását jelenti, az elképzelhető legegységesebb szinten. Mik ezek a dolgok valójában? Hogyan viszonyulnak egymáshoz a különféle dolgok? Hogyan változnak az időben? Mi az „idő”, és ami azt illeti, mi a „tér”, ha közelebről szemügyre vesszük?

A fizika egyik legizgalmasabb vonása, hogy a hétköznapi megfigyelésektől – „nézd csak ezt a dolgot, így és így viselkedik” – nagyon gyors

san eljutunk a valóság természetét illető alapvető kérdésekig. A kulcs az, hogy a dolgok nem egyszerűen csak történnek – minden történés bizonyos *mintázatot* követ. Ezeket a mintázatokat nevezzük **fizikai törvényeknek**, és az a dolgunk, hogy felismerjük őket.

Mind közül a legegyszerűbb mintázat az, hogy bizonyos dolgok állandók, függetlenül az idő múlásától. A valóságnak ez az elemi vonása remek kiindulópont vizsgálódásunkhoz – még ha utunk meglehetősen gyorsan meredekké válik is majd.

KISZÁMÍTHATÓSÁG

Természetesnek vesszük, hogy a körülöttünk lévő világ valamennyire kiszámítható. Ha a szobában levő asztalról egy pillanatra elfordítjuk a fejünket, majd pedig visszafordulunk, arra számítunk, hogy az asztal még mindig ugyanott lesz. Ha egy almát helyezünk az asztalra, arra számítunk, hogy az asztal alátámasztja az almát ahelyett, hogy az az asztalon keresztül a földre hullna. Akármennyire is sajnálkozunk néha az időjárás vagy a választási eredmények nehezen megjósolhatósága fölött, nem szabad alulbecsülnünk a fizikai jelenségek kiszámíthatóságát.

A fizikát a kiszámíthatóság teszi lehetővé. Lehet, hogy nem tökéletesen, de valamelyest mégis előre láthatjuk, mi fog következni a világban, amennyiben tudjuk, mi történik most. A kiszámíthatóság legalapvetőbb típusa a **megmaradás**, az a tény, hogy bizonyos dolgok egyáltalán nem változnak.

A megmaradás pontosan az, amit a fizikusok „időbeli állandóságnak” hívnak. Olvasóm talán hallott már például az **energia** megmaradásáról. Az energia nem valamiféle szubsztancia, mint a víz vagy a kosz. Az energia a dolgok egy *sajátossága*, amely függ attól, hogy milyen dologról beszélünk, és attól, hogy az adott dolog milyen állapotban van. Nem létezik semmiféle „energiafolyam”, amely egyik helyről a másikra folya. Csupán helyzettel, sebességgel és más tulajdonságokkal rendelkező tárgyak vannak, és ezeknek a tulajdonságoknak köszönhetően a tárgyakhoz bizonyos energiamennyiséget társíthatunk.

Egy tárgy számos okból rendelkezhet energiával: például a mozgása miatt, vagy mert magasan van, mert forró, mert nagy a tömege,

mert elektromosan töltött és így tovább. Megfelelő körülmények között ezek az energiaformák egymásba alakulhatnak. A borosüveg energiája, amellyel csupán annak következtében rendelkezik, hogy az asztalra került, ha az üveget leütjük az asztal széléről, esés közben gyorsan mozgási energiává alakul át, azután meg hővé, zajjá és más disszipatív energiaformákká, amikor a földre érve darabokra törik. Az energiamegmaradás fogalma egyszerűen azt jelenti, hogy az egyes energiaformák összegzésével előálló teljes energia az egész folyamatban állandó.

(Várjunk csak – nem körkörös ez az érvelés? Nem pusztán arról van itt szó, hogy bevezetünk jó néhány mennyiséget, amelyek összegezve definíció szerint egy állandó értéket adnak, amit „energiának” nevezünk, majd vállon veregetjük magunkat, mert felfedeztünk egy fizikai törvényt? Nem. Az energiát ettől függetlenül definiálhatjuk, majd megmutatjuk, hogy az megmarad, annak a ténynek köszönhetően, hogy maguk a fizikai törvények az idő múlásával nem változnak. De a kérdés helyénvaló.)

Ez az elképzelhető legegyszerűbb fogalom – van egy mennyiség, amely nem változik, azaz időben változatlan. Az energia és más mennyiségek megmaradása azonban nem csupán megnyugtató kiindulópont a fizika egészének feltérképezéséhez. Ez a kiindulópont logikailag indokolt, mivel a megmaradás fogalmának megértése volt a modern kor előttitől a modern tudomány felé vezető átmenet első lépése.

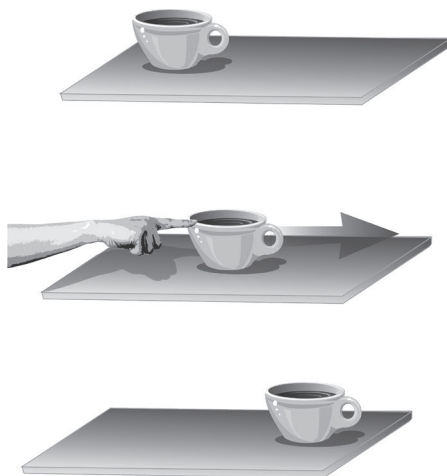
A TERMÉSZETTŐL A MINTÁZATOKIG

Helyezkedjünk bele egy pillanatra abba a gondolkodásmódba, ahogyan az emberek a modern fizika megjelenése előtt próbálhatták megérteni a világot. Általában Arisztotelész görög filozófust hozzák fel példaként, bár a többi görög gondolkodó is hasonlóképpen érvelhetett. A komplex, árnyalt fogalmak összességét nagymértékben egyszerűsítve Arisztotelész a dolgok mozgását két csoportra osztotta, a „természetnek megfelelő” és a „természetellenes” (vagy „erőszakolt”) mozgásokra. A világot alapjában véve teleologikusnak – egy jövőbeli cél felé törekvőnek – fogta fel. A tárgyaknak természetes helyük vagy körülményeik vannak, és

e felé a hely felé tartanak. A kő a földre hull, és ott marad; a tűz az ég felé törekszik.

Arisztotelész szerint amennyiben itt a Földön minden a maga természetes állapotában lenne, a dolgok nem mozognának. A dolgok mozgásba lendítése külső hatást igényel még akkor is, ha a mozgás csupán átmeneti jellegű. Felvehetek egy követ és elhajíthatom, de ez természetellenes, erőszakolt mozgás. Végül azonban a kő visszahull, talán ugrál egy picit, és visszatér természetes állapotába, nyugalomba jut a talajon.

Arisztotelész, legalábbis a körülmények széles skáláját alapul véve, nem tévedett. Ha az asztal mellett üldögélek, előttem egy csésze kávéval, a csésze önmagában ott is marad az asztalon. Ha megtolom a csészét, az mozgásba lendül, de a tolás megszűntével a csésze újra nyugalomba jut. Arisztotelész úgy vélte, hogy ebből a világegyetem egy alapvető tulajdonságára következtethetünk. A tárgyak természetes állapota a nyugalom, mozgás csupán akkor figyelhető meg, ha valami kibillenti őket természetes állapotukból.



Ám ez a leírás kevésbé jól illik más jelenségekre, köztük olyanokra, amelyek már Arisztotelész korában is ismertek voltak. Az ókori görögök tisztában voltak a teret átszelő nyíl mozgásával. A kezdeti erőt az új

húrja fejt ki, nyilvánvaló azonban, hogy a nyíl jóval azután is mozgásban marad, hogy a húrt elhagyta. Miért nem hull rögtön a talajra? Mi tartja vissza attól, hogy gyorsan visszatérjen természetes állapotába?

Ez az a kérdés, amelyen kiváló elmék évszázadokon keresztül törték a fejüket. Jó időbe telt, ám a válasz végül Arisztotelész teleologikus világegyetem-felfogásának elvetéséhez vezetett. Olyan világgéppel helyettesítették, amelyben a tárgyak nem valamiféle cél irányába fejlődnek; ehelyett olyan törvényeknek engedelmesskednek, amelyek a pillanatnyi történések alapján előre jelzik, hogy mi fog történni a következő pillanatban.

A LENDÜLET MEGMARADÁSA

Fontos lépést tett Ióánnész Philoponosz bizánci gondolkodó a 6. században. Azt állította, hogy az íjhúr átad a nyílnak egy bizonyos, később „impetusnak” elnevezett mennyiséget, amely mozgásban tartja a nyilat, míg végül szertefoszlik. Egyszerű javaslat, az biztos, de fontos elmozdulás a célokat kereső gondolkodásmódtól a felé a felfogás felé, amely a célokat az adott pillanatban létező tulajdonságokkal helyettesíti.

Philoponosz elgondolását a 11. századi perzsa polihisztor, Ibn Szína (Avicenna) fejlesztette tovább. Ibn Szína vitatta a lendület átmeneti jellegét – és ez döntő lépésnek bizonyult. Minden tárgynak van valamekkora lendülete (álló tárgyak esetében nulla, mozgó tárgyak esetében nullánál nagyobb szám), és ez a lendület állandó, amíg a tárgyra valamilyen erő nem hat.

Ebben a felfogásban a kő és a kávéscsésze nem azért jut nyugalomba, mert az a természetes állapotuk, hanem azért, mert valamilyen erő (súrlódás, légellenállás) megfosztották őket a lendületüktől. Üres térben, azaz vákuumban nem lenne légellenállás – állította Ibn Szína –, és a mozgó testek állandó sebességgel örökre mozgásban maradnának. Ezer éve ez nagyon merész gondolatkísérletnek számított, ám ma már rendszeresen építünk olyan űrhajókat, amelyek (a gravitáció gyenge hatásától eltekintve) gyakorlatilag állandó sebességgel haladnak a bolygók között. A 14. században Jean Buridan francia filozófus matematikai ki-

fejezést talált a lendületre: azt a test súlyának és sebességének szorzatával tette egyenlővé.

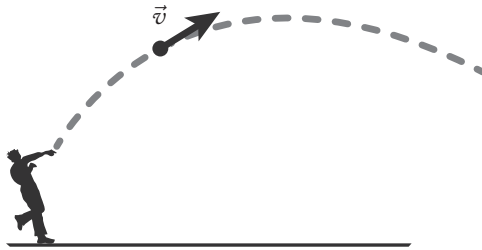
Ez egy fizikai törvény megszületésének pillanata: a **lendületmegmaradás** törvényéé. A valamilyen „mozgásmennyiség” megmaradására vonatkozó elképzelés kidolgozatlan formában már azelőtt felmerült, hogy bárki pontosan meghatározta volna ennek a mennyiségnek a mi-benlétét. Ez gyakran előforduló jelenség az elméleti fizikában; valaki előáll egy új fogalommal, azután kidolgozzuk annak mennyiségi jellemzőit, végül megadjuk a mennyiségi kifejezését – egy egyenletet –, és azt firtatjuk, hogy összhangban van-e a világban megfigyelt más jelenségekkel. Ma már tudjuk, hogy a lendület a tömeg és a sebesség szorzata (legalábbis addig, míg a relativitáselmélet nem szól közbe és bonyolítja kissé a dolgokat).

Buridan lendületdefiníciójával az az egyik probléma, hogy a „súly” a tárgynak nem belső tulajdonsága, ugyanis függ attól, hogy milyen mértékben hat rá a gravitáció – súlyunk a Holdon kisebb, mint a Földön, és súlytalanná válunk, ha a bolygóközi térben haladó űrhajóban lebegünk. Másfelől a **tömeg** belső tulajdonság; durván szólva a tömeg a testnek a gyorsító erővel szembeni ellenálló képessége. Nagy tömegű testek bizonyos sebességre gyorsításához nagy erőre van szükség, míg a kis tömegű testeknek ugyanerre a sebességre gyorsításához csupán kis erőre.

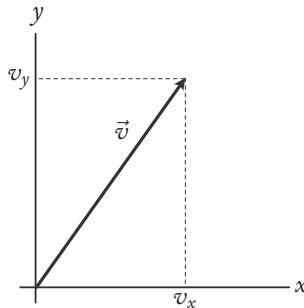
Hasonlóképpen, a **gyorsaság** és a **sebesség** között is van némi különbség. A gyorsaság egy szám, a másodpercenként megtett méterek száma, míg a sebesség egy **vektor** – olyan mennyiség, amelynek nagysága és iránya is van. Valójában éppen a sebességvektor nagysága az, amit „gyorsaságnak” hívunk, a sebesség azonban egy meghatározott irányba is mutat. Így a gyorsaságunk ugyanaz lesz, ha 90 km/h-val északra, illetve délnek haladunk, a sebességünk azonban különböző.

A vektorokat úgy jelöljük, hogy a mennyiség jele fölé egy kis nyíl rajzolunk, vagyis egy tárgy sebességét általában \vec{v} -vel jelöljük. Gyakran van szükségünk a vektor méretére, vagyis nagyságára, amit ugyanazzal a jellel jelölünk, de nyíl nélkül: tehát a \vec{v} vektor nagysága egyszerűen v .

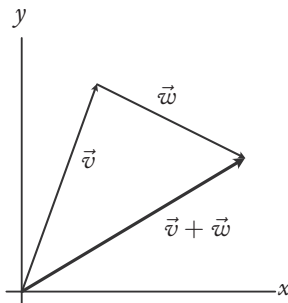
A nyilas jelölésmód nem véletlen, a vektormennyiségeket ugyanis gyakran a vektor irányával megegyező irányú nyíllal ábrázoljuk, a nyíl



hossza pedig a vektor nagyságával arányos. Ehelyett a vektort **összetevőivel** – különböző irányú járulékaival – is kifejezhetjük. Ha pontosan északi irányba utazunk, sebességvektorunk kelet–nyugati irányú összetevője nulla lesz.



A vektorok összeadása egyszerű. Helyezzük képzeletben a második vektor kezdőpontját az első vektor végpontjába: ekkor az összegvektor definíció szerint az első vektor kezdőpontjától a második vektor vég-



pontjába mutató vektor lesz. Ha az összeadandó vektorok (majdnem) ugyanabba az irányba mutatnak, akkor az összegvektor nagysága (majdnem) az összetevő nagyságának összegével egyenlő, míg ha a vektorok (majdnem) ellentétes irányba mutatnak, az összegvektor jóval rövidebb lehet.

Buridan és elődei nem vektorokban gondolkodtak. A vektorfogalom fokozatosan alakult ki, számos 19. századi gondolkodónak, közöttük (a Möbius-szalagról ismert) német matematikusnak, August Ferdinand Möbiusnak, William Rowan Hamilton ír matematikusnak, Hermann Grassmann német polihisztornak, valamint Oliver Heaviside angol matematikusnak köszönhetően. Így aztán nem meglepő, hogy a lendület helyes definíciójához eljutni időbe telt.

A lendületvektort manapság általában \vec{p} -vel jelölik. (Az m betű a tömeg jelölésére van fenntartva, így a jelölés a latin *petere* szóból ered.) Mindezt szem előtt tartva a lendület kifejezése a legegyszerűbb dolog a világon:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (1.1)$$

Ezzel eljutottunk az első hiteles egyenletünkhöz. A lendületvektor ugyanabba az irányba mutat, mint a sebességvektor, nagysága pedig arányos a sebességvektoréval. Az **arányosság** számunkra lényeges fogalom: azt jelenti, hogy ha az egyik mennyiséget megszorozzuk egy számmal, akkor a másik mennyiséget is ugyanazzal a számmal kell megszorozni. Ha megduplázzuk a sebességet, a lendületet is megduplázzuk. A két mennyiséget az „arányossági tényező” kapcsolja össze, bár az az egyes egyenletekben nem is állandó. Jelen esetben azonban állandó: nem más, mint a test tömege.

Még egy ilyen elemi egyenlet ereje is nyilvánvaló. Nem azt mondjuk, hogy valamely konkrét tárgy lendülete történetesen épp a tömegének és a sebességének a szorzata; azt állítjuk, hogy a lendület, a tömeg és a sebesség között *univerzális* összefüggés van, amely bármely testre ugyanebben a formában írható fel. (Amikor a relativitás is szerephez jut, egyes egyenletek explicit alakját módosítani kell, az alapelvek azonban nagyrészt ott is ugyanezek.)

Az ehhez hasonló egyenletekbe nincs beépítve a kauzalitás fogalma; szigorú összefüggést jelent az adott mennyiségek vonatkozásában, bal-

ról jobbra és jobbról balra egyaránt olvasható. Az egyenletet bármilyen módon átalakíthatjuk, amennyiben mindkét oldalon elvégezzük ugyanazt a műveletet; m -mel osztva például a $\vec{p}/m = \vec{v}$ egyenlőséget kapjuk. „Egy test sebességének ismeretében azt a test tömegével megszorozva megkapom a lendületet”; de ugyanúgy igaz, hogy „egy test lendületének ismeretében azt a test tömegével elosztva a test sebességét kapom”.

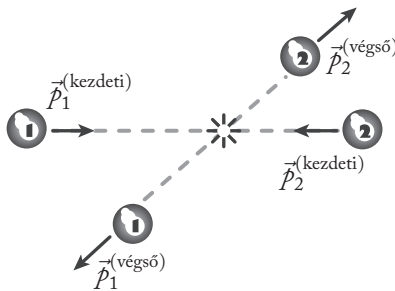
KOCCANÁSOK ÉS LÖKÉSEK

A lendületmegmaradás törvényének hatóköre jóval túlmegy azon az ismereten, hogy az a test, amelyre nem hat erő, állandó sebességgel mozog. Amikor valamilyen erő hat rá, például beleütközik egy másik testbe, a rendszer teljes lendülete megmarad.

Képzeljük el, hogy van két olyan tárgyunk, amelyekre nem hat erő, például két biliárdgolyó egy súrlódásmentes asztalon. (A léghokiasztalra helyezett korong valamivel valószínűbb közelítés, de a „súrlódásmentes” kifejezés mindig idealizálás, bármennyire is szeretik kijátszani a fizikusok ezt a kártyát.) Kezdetben egyenes vonalban mozognak, majd összeütköznek, és új pálya mentén egymástól távolodnak. Az első golyó kezdeti lendületét jelölje \vec{p}_1 (kezdeti), a másodikét \vec{p}_2 (kezdeti). Hasonlóképp, az első golyó végső lendületét jelölje \vec{p}_1 (végső), a másodikét \vec{p}_2 (végső). A lendületmegmaradás törvénye erre az esetre:

$$\vec{p}_1(\text{kezdeti}) + \vec{p}_2(\text{kezdeti}) = \vec{p}_1(\text{végső}) + \vec{p}_2(\text{végső}). \quad (1.2)$$

Az egyedi lendületek nyilvánvalóan megváltoznak, amikor a golyók



visszapattannak egymásról. A rendszer teljes lendülete azonban továbbra is megmarad.

A lendület mindig megmarad, de megbocsáthatjuk elődeinknek, hogy ezt nem vették észre azonnal. Gondoljunk csak vissza Arisztotelész kávéscsészéjére, amely először nyugalomban van, aztán mozdul egy keveset, amikor meglökjük, majd újra nyugalomba jut. Úgy néz ki, hogy a lendület nem marad meg, mert a csésze kezdetben nulla sebessége nullától különböző lesz. Észrevétlenül azonban a csésze visszahat ránk: testünket a szék felé taszítja, amely maga is meglöki a Földet. A kávéscsésze lendületváltozását pontosan kompenzálja a szék-Föld rendszer ellentétes irányú lendületváltozása. Ezt soha nem észleljük, mert olyan óriási tömegről van itt szó, hogy a sebességváltozás mérhetetlenül kicsi – de nem nulla. Amikor a csészét nem toljuk tovább, akkor a csésze azért áll meg, mert az asztal visszahat rá, és ezúttal a szék-Föld rendszer visszanyer valamit a lendületéből, visszatér eredeti állapotába.

A *Gravitáció* című film egyik jelenetében Sandra Bullock és George Clooney veszélybe kerül, amikor űrruhájukban az űrállomáson kívül lebegnek. (Figyelmeztetés: ebben és a következő bekezdésben felfedjük a cselekményt.) Egyetlen kötélt köti őket össze az űrállomással. Az egyébként nagyon élvezetes filmben e jelenet fizikája meglehetősen zavaros. Azt látjuk, hogy miközben Bullock az életéért kapaszkodik, Clooney elszakad tőle. Valójában mivel mind ők, mind az űrállomás nagyjából ugyanazon a Föld körüli pályán keringenek, nem hat rájuk olyan erő, amely eltávolítaná őket az űrállomástól; egy könnyed rántás a kötélen, és biztonsággal visszatérhetnének. A filmben viszont a női főszereplő csak úgy térhet vissza, ha közben veszni hagyja társát.

Nem tiltakozom, ha egy jó sztori érdekében a filmesek kissé rugalmasan kezelik a fizikai törvényeket. Ebben az esetben azonban erre nem volt szükség. A jelenet ugyanolyan drámai lehetett volna, ha egyáltalán nem szerepel benne kötélt. Képzeld el, hogy Bullock és Clooney egymás kezét fogva lassan távolodik az űrállomástól, amelyhez egyáltalán nincsenek hozzárögzítve. A lendületmegmaradás törvénye világosan megmondja, mi a teendő. Ha együtt maradnak, továbbsodródznak, és végül mindketten el fognak pusztulni. De van egy másik lehetőség:

egyikük ellökheti a másikat. Teljes lendületük továbbra is változatlan, az egyik szereplő azonban visszajut az állomásra, míg a másik nagyobb sebességgel sodródik tovább. Clooney feláldozhatta volna magát azért, hogy hazajuttassa Bullockot. Vagy bármelyikük megmenekülhetett volna, ha a másikat az elkerülhetetlen végzetbe taszítja. Ez azonban már egy másik film lenne.

KLASSZIKUS MECHANIKA

A lendületmegmaradás máig fontos fizikai elv, de még ennél is fontosabb szerepet játszott az új fizikai gondolkodásmód kialakításában a megértéséhez vezető hosszú út. Eltűnt a belső jelleg teleologikus arisztotelészi világa, az okok és a hatások, a mozgatót igénylő mozgás. Ezek helyébe a mintázatok világa, a fizikai törvények léptek. René Descartes, Galileo Galilei és még néhány hasonló kaliberű tudós fontos eredményeire építve a fizikai törvények első teljes értékű rendszerét, a **klasszikus mechanika** néven ismert elméletet Isaac Newton alkotta meg 1687-ben.

Akadékoskodásnak tűnő, mégis fontos megjegyzés: a modern fizika különbséget tesz a „klasszikus” és a „newtoni” mechanika között: az előbbi egy széles keretrendszer, az utóbbi egy konkrét modell ebben a keretrendszerben. A klasszikus mechanika szerint a világot meghatározott, mérhető értékekkel bíró dolgok alkotják, amelyek determinisztikus mozgásegyenleteknek engedelmeskednek; ez ellentétes a kvantummechanikai felfogással. A newtoni mechanika ezt az abszolút tér és idő fogalmával egészíti ki. A newtoni mechanika a „relativisztikus” mechanikával áll ellentétben, amely klasszikus ugyan, de nem newtoni, valamint egyesíti a teret az idővel. Addig, amíg nem kifejezetten a relativitásról lesz szó, az általunk felírt, például az energiára és a lendületre vonatkozó egyenletek a newtoni mechanikában érvényes egyenletek. Hogy tovább bonyolítsuk a dolgot, vannak elméletek, mint a „Lagrange-mechanika” és a „Hamilton-féle mechanika”, amelyek matematikai szempontból egyenértékűek a newtoni mechanikával, csak más terminológiát használnak, és más elveket helyeznek előtérbe. A Lagrange-mechanika és a Hamilton-mechanika minden bizonnyal

klasszikus; az már ízlés dolga, hogy newtoninak tekintjük-e őket, vagy sem.

A klasszikus mechanika a mintázatok elmélete, nem pedig a minőségeké vagy ok-okozati viszonyoké, mert nem azt kérdezi, hogy „mi a rendszer természetes állapota?”, vagy hogy „mi okozza a rendszer bizonyos mozgását?”. Mindössze arra kíváncsi, hogy „mit csinál a rendszer az adott pillanatban?”. És ennek alapján pontosan megjósolja, hogy mit fog tenni bármely más időpillanatban. Ez az időpillanat múltbeli is lehet, nem csupán jövőbeli. Ha visszalapozunk az (1.2) egyenlethez, két részecske lendületének megmaradásához, a következtetés egyformán igaz, akár előre, akár hátrafelé haladunk az időben. Ha ismerjük a teljes lendületet, tudjuk, hogy az korábban is ugyanannyi volt.

Ez már példa egy másik, még lenyűgözőbb megmaradási törvényre: az **információ megmaradására**. Az elvet burkoltan tartalmazták a klasszikus mechanika Newton által megállapított törvényei, de nem került rivaldafénybe, amíg egy francia matematikus, Pierre-Simon Laplace 1814 táján fel nem hívta rá a figyelmet. A klasszikus rendszer állapotát minden időpillanatban a rendszer részeinek helyzete és sebessége határozza meg – gondoljunk például a Naprendszer valamennyi bolygójára. Az információmennyiség megőrződik az időben – mutatott rá Laplace. Bármely időpontban ismerjük is a rendszer állapotát, ennek alapján tetszőleges – akár múltbeli, akár jövőbeli – időpontra kiszámíthatjuk azt. Vagy legalábbis megtehetnénk, ha tökéletesen ismernénk minden információt, és képesek lennénk tetszőlegesen pontos számításokra. Laplace ilyen képességekkel rendelkező „mérhetetlen intelligenciát” képzelt el, kommentátorai azonban ezt a hipotetikus lényt Laplace-démonnak nevezték. A Laplace-féle gondolatkísérletnek nem az a lényege, hogy bárki is ténylegesen rendelkezhet ilyen információval, és gyakorlati értelemben képes lenne ilyen számításokra, és nem is kell erre törekednünk. Már az is lehetetlen, hogy egy valóságos létező ismerje egyetlen homokszem valamennyi atomjának helyzetét és sebességét, nem beszélve az univerzuméről. A világegyetem maga azonban rendelkezik ezzel az információval, és a klasszikus mechanika törvényei szerint ez az információ megmarad.