

FRANK WILCZEK

ALAPELVEK

FRANK WILCZEK

ALAPELVEK

A fizika tíz kulcsa a valósághoz

Fordította
GERNER JÓZSEF



A könyv megjelenését a Magyar Tudományos Akadémia támogatta.



A fordítás a következő kiadás alapján készült:

Fundamentals. Ten keys to reality.

Penguin Press, New York, 2021

Copyright © 2021 by Frank Wilczek.

All rights reserved.

Hungarian translation © Gerner József, 2024

Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2024

Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Takács Gábor

ISBN 978 963 493 319 9

TARTALOM

Előszó: Újjászületés	9
Bevezetés	17

Első rész: MI AZ, AMI VAN?

1 Bőven van tér	27
2 Bőven van idő	50
3 Nagyon kevés alkotóelem van	66
4 Nagyon kevés törvény van	91
5 Bőven van anyag és energia	118

Második rész: KEZDET ÉS VÉG

6 Kozmikus történetünk nyitott könyv	133
7 A komplexitás létrejötte	145
8 Sok van még, mit látnunk kell	152
9 Megmaradt rejtélyek	167
10 A komplementaritás felszabadító	182
Utószó: Hosszú az út hazafelé	196
Köszönetnyilvánítás	201
Függelék	203
Jegyzetek	213

Betsynek

Vallomások

*Összehangolt sokaságok rajzolják meg
Életünk bonyolult mintázatait.
Születés, tanulás, szerelem és kéretlen öregség –
Érdemtelen ajándékok, más kijelölte határok.
A tér némán tágul, nem érhetjük fel észszel.
Az elszórtan lebegő égitestek
Ideális törvényeknek engedelmesskednek.
Nem a bölcső mellett énekelt nyelvet beszélük.
Az idő változás, közönyösen kényszeríti ránk magát.
Az ősi tárgyokban látjuk az idő végtelenségét,
Még a parányi, tökéletes órák is az erejéről tanúskodnak.
Az idő ránk vadászik, és messze túlél minket.
S míg bensőmben megújul a világ,
Nem gondolok semmire, csak terád.**

* Gyárfás Vera fordítása.

ELŐSZÓ

ÚJJÁSZÜLETÉS

I

Ez a könyv a fizikai világ vizsgálatából leszűrhető alapismeretekről szól. Sok olyan emberrel találkoztam, aki a modern fizika által nyújtott ismeretek után sóvárog. Ügyvédek, orvosok, művészek, egyetemi hallgatók, oktatók, szülők vagy egyszerűen csak a világra nyitott emberek. Intelligensek, de nincsenek megfelelő tudás birtokában. Ezeken az oldalakon megkísérlem átadni a modern fizika központi üzeneteit – olyan egyszerűen, amilyen egyszerűen az a pontosság veszélyeztetése nélkül egyáltalán lehetséges. A könyv írása során mindvégig szem előtt tartottam kíváncsi barátaim szempontjait és kérdéseit.

Azok a bizonyos alapismeretek számomra sokkal többet jelentenek a fizikai világ működésére vonatkozó pusztán tényeknél. Kétségkívül nyomós és különlegesen szép tények, de a felismerésüket lehetővé tevő gondolkodásmód maga is nagyszerű vívmány. Ugyanakkor fontos mérlegelnünk azt is, hogy mit mondanak azok a bizonyos alapismeretek arról, hogy nekünk, embereknek hol a helyünk a nagy egészben.

II

Tíz vezérelvet választottam ki, amelyeket én alapismeretnek tekintek. Mindegyiknek egy-egy fejezetet szenteltem. Ezeken belül az adott fejezet tárgyát különböző perspektívákból is értelmezem és dokumentálom,

azután néhány hitelt érdemlő feltételezést teszek a jövőbeli fejlődésére vonatkozóan. Ezeknek a feltételezéseknek a kimunkálását nagy kedvvel végeztem, s remélem, hogy olvasóim is izgalmasnak tartják majd őket. Általuk egy másik alapvető üzenetet kívánok közvetíteni: a fizikai világra vonatkozó ismereteink egyre bővülnek és változnak. Ez eleven folyamat.

A spekulációkat és a tényeket gondosan elkülönítettem egymástól, a tények esetében jeleztem, hogy milyen természetű megfigyeléseken és kísérleteken alapulnak. Mind közül talán a legfontosabb üzenetem az, hogy *képesek vagyunk* mélyen megérteni a fizikai világ számtalan vonatkozását. Ahogy Albert Einstein mondta: „Ami a világból mindörökké felfoghatatlan, az éppen megérthető volta.”¹ Ez is egy a nehezen kicsikarható felismerések közül.

Pontosabban, mivel oly meglepő, a fizikai univerzum megismerhető voltát bizonyítani kell, nem elég pusztán feltételezni. A legmeggyőzőbb bizonyíték, hogy bár jelenlegi értelmezésünk nem teljes, mégis nagy, sőt bámulatos dolgokra tesz képessé bennünket.

Kutatásaim során megpróbálom kitölteni a tudásunkban mutatkozó réseket, és új kísérleteket készítek elő, amelyek tovább tágíthatják lehetőségeink határát. Öröm volt számomra, hogy e könyv megírása során egyet hátráléphettem, reflektálhattam és rácsodálkozhattam a tudomány néhány olyan vívmányára, amelyeket a tudósok és mérnökök generációi térben és időben együttműködve már elértek.

III

A tudományos alapismeretekről szólva könyvemnek az is célja, hogy a hagyományos vallási fundamentalizmussal szemben alternatívát kínáljon. Részből ugyanazokkal az alapkérdésekkel foglalkozik, mint a vallás, de a válaszokat a fizikai valóságtól várja, nem ősi szövegektől vagy hagyománytól.

Tudományos főhőseim közül sokan – Galileo Galilei, Johannes Kepler, Isaac Newton, Michael Faraday, James Clerk Maxwell – jámbor

keresztények voltak. (Korukban és környezetükben ez volt a norma.) Úgy gondolták, hogy alkotásának vizsgálata révén kapcsolatba kerülhetnek Istennel, és ilyen módon tisztelhetik őt. Einstein ugyan konvencionális értelemben nem volt vallásos, beállítottsága mégis hasonlóan mondható. Gyakran hivatkozott Istenre (vagy „az Öregre”), ahogy leghíresebb mondásában is: „Isten ravasz, de nem rosszindulatú.”²

Ezek a tudósok arra vállalkoztak – ahogy én is –, hogy meghaladjanak konkrét dogmákat, legyen szó akár vallási, akár vallásellenes dogmáról. Kedvenc megfogalmazásomban: a világ működését kutatva Isten munkásságát kutatjuk, s ily módon *mibenlétét* is jobban megismerjük. Ebben a szellemben tudásunk tökéletesítését az áhítat egy formájaként értelmezhetjük, felfedezéseinket pedig kinyilatkoztatásként.

IV

E könyv írása közben megváltozott a világról alkotott felfogásom. Az *Alapelvek* ismertetésnek indult, aztán szemlélődéssé nőtte ki magát. Miközben könyvem anyagán töprengtem, váratlanul két átfogó téma került érdeklődésem homlokterébe. Egyértelműségük és mélységük lenyűgözött.

Az első az abundancia. Világunk hatalmas. Elég egy tiszta éjszakán felpillantunk az égboltra, és máris láthatjuk, mekkora tér van „oda-kint”. Ha alaposabb vizsgálatot követően számokat rendelünk hozzá ezekhez a méretekhez, elménk szinte visszariad. Ám a tér nagysága csupán egyik aspektusa a természet abundanciájának – az emberi tapasztalatok vonatkozásában nem is a legfontosabb.

Mint azt Richard Feynman megjegyezte: „Bőven van hely az alján.”³ Az emberi test sokkal több atomot tartalmaz, mint ahány csillagot a látható univerzum, agyunkban pedig körülbelül annyi neuron van, ahány csillag a galaxisban. Belső univerzumunk méltó kiegészítése a külső univerzumnak.

Akárcsak a térről, az időről is hasonló mondható el. A kozmikus idő töméntelenül tágas. Az ősrobbanás óta eltelt idő mellett eltörpül

az emberi élet hossza. És mégis, ahogy arról majd szó lesz, egy emberi élet sokkal több tudatos pillanatból áll, mint ahány emberi élethossznyi az univerzum története. A belső idő túlaradó bőségével vagyunk megáldva.

A fizikai világ felfoghatatlanul bőséges, ahogy a teremtés és érzékelés eddig kiaknázatlan forrásai is. A tudomány megmutatta, hogy környezetünk jóval több energiát és felhasználható anyagot tartalmaz ismert és elérhető formában, mint amennyit az ember jelenleg kiaknáz. Ez a felismerés erőt ad, és fel kell ébresztenie ambícióinkat.

Tökéletlen érzékelésünk csak a szilánkjait mutatja annak a valóságnak, amelyet a tudományos kutatás feltárni képes. Vegyük szemügyre például a látást! Látásunk a legszélesebb és legfontosabb kapu a külvilág felé. Csak hát oly sok mindent látatlanul hagy! A távcsövek és a mikroszkópok olyan, a fénybe kódolt információs kincsesbányákat tárnak fel előttünk, amelyek szemünk számára általában érzékelhetetlenek. Látásunk ráadásul csupán egy oktávot fog le az elektromágneses sugárzás végtelen klaviatúráján, amely egyik oldalon a rádióhullámoktól a mikrohullámokon keresztül az infravörös sugárzásig, a másik oldalon pedig az ultrabolyától a röntgensugárzáson át a gamma-sugarakig terjed. És színlátásunk még ezen a kis tartományon belül is homályos. Miközben érzékszerveink a valóság számos vonatkozását nem ismerik fel, elménk segítségével meghaladhatjuk természetes korlátainkat. Az érzékelés kapuinak tágítása nagyszerű, folyamatos kaland.

V

A másik dolog, ami foglalkoztatott, az a gondolat, hogy a fizikai univerzum megfelelő értékeléséhez „újja kell születnünk”.

A könyv megírásának idején született meg unokám, Luke. Írás közben nyomon követhettem életének első néhány hónapját. Láttam, ahogy saját kezét tanulmányozza tágra nyílt szemmel, és kezdi felismerni, hogy ő maga irányítja őket. Láttam az arcán az örömet, amikor megtanulta kinyújtani a kezét, és megragadni vele a külvilág tárgyait.

Figyeltem, ahogy kísérletezik a tárgyakkal, elejti, aztán megkeresi őket, majd mindezt megismétli (és újra megismétli), mintha nem lenne teljesen biztos az eredményben, de nevet örömeiben, amikor újra rájuk talál.

Így és még sok más módon tapasztaltam meg Luke próbálkozásait saját világmodelljének felépítésére. Telhetetlen kíváncsisággal és néhány feltételezéssel látott hozzá. A világgal kapcsolatba lépve megismerte azokat a dolgokat, amelyeket szinte minden felnőtt ember természetesnek vesz: vagyok én, és van a külvilág; gondolataimmal irányítani tudom saját mozgásomat, de a külvilágét nem; a dolgokra rátekintve azok tulajdonságai nem változnak meg.

A csecsemők aprócska tudósok, akik kísérleteket végeznek és következtetéseket vonnak le. A modern tudomány követelményeihez képest azonban az ő kísérleteik meglehetősen elnagyoltak. Távcső, mikroszkóp, spektroszkóp, magnetométer, részecskegyorsító és atomóra nélkül dolgoznak, híján vannak mindazoknak az eszközöknek, amelyekben megbízva pontos világmodelljeinket mi felépítjük. Kísérleteiket meglehetősen szűk hőmérséklet-tartományban végzik; nagyon speciális kémiai összetételű és nyomású légkörben élnek; hat rájuk a földi gravitáció (és minden más, ami környezetükben megtalálható), miközben a Föld felszíne megtartja őket... és így tovább.

A csecsemők olyan világmodellt építenek fel, amely számot ad az érzékelésük és környezetük határain belül tapasztalt jelenségekről. Amíg gyerekek vagyunk, célszerű és hatékony fegyver úgy küzdeni meg a gondokkal, hogy leckéket a mindennapok világából veszünk.

A modern tudomány azonban olyan világot fed fel, amely merőben eltér a csecsemők világmodelljétől. Ha újra megnyílunk a világra, kíváncsian és előítéletektől mentesen – ha megengedjük magunknak az újjászületés luxusát –, másképp fogjuk érteni a világot.

Néhány dolgot meg kell tanulnunk. A világ kevés alapvető építőközből épül fel, amelyek szigorú, ám különös és ismeretlen szabályokat követnek.

Néhány dolgot el kell felejtenünk.

A kvantummechanika feltárta, hogy nem tudunk megfigyelni semmit anélkül, hogy végül meg ne változtatnánk. Minden ember egyedi

üzeneteket kap a külvilágból. Képzeljük el, hogy egy barátunkkal egy nagyon sötét szobában ülünk, és egy halvány fényt figyelünk. A fény nagyon-nagyon halvány, mondjuk, újabb és újabb szövetrétegeket helyeznek elé. Előbb-utóbb mi is, a barátunk is csupán fényfelvillanásokat fogunk látni. Ezeket a felvillanásokat azonban eltérő időpontokban észleljük. A fény egyedi kvantumokra bomlik, és a kvantumokat nem lehet megosztani. Ezen az elemi szinten eltérő világokat tapasztalunk.

A pszichofizika feltárta, hogy a tudat legtöbb tevékenységünket nem közvetlenül irányítja, ehelyett öntudatlan egységek jelentéseit dolgozza fel. Transzkraniális mágneses stimuláció (TMS) alkalmazásával lehetséges külön-külön ingerelni a bal, illetve jobb agyfélteke motoros központjait. A jobb oldali motoros központ megfelelő TMS-jellel való ingerlése a bal csukló összerándulását fogja eredményezni, míg a bal oldali központ megfelelő TMS-jellel való ingerlése a jobb csuklót. Alvaro Pascual-Leone zseniálisan alkalmazta ezt a technikát, egy egyszerű kísérlettel alapvető eredményekhez jutott. A kísérleti személyeket arra kérte, hogy amint arra jelzést kapnak, döntsék el, hogy a bal vagy a jobb csuklójukon szeretnék-e az összerándulást megtapasztalni. Aztán arra utasították őket, hogy egy újabb jelzést érzékelve maguk hajtsák végre a kívánt stimulációt. A kísérleti személyeket agyszkennerrel folyamatosan vizsgálták, így a kutatást végző személy láthatta az összerándulást előkészítő motoros területeket. Ha a résztvevők a jobb csukló összerándulása mellett döntöttek, akkor a bal oldali motoros terület aktiválódott; ha a bal csuklójuk javára döntöttek, akkor a jobb oldali motoros terület vált aktívvá. Így még mielőtt a mozgás megtörtént, már tudni lehetett, hogy a kísérleti személy hogyan választott.

És most jön a csavar. Pascal-Leone időnként a kísérleti személy döntésével ellentétes TMS-jelet küldött az agynak (ami felülírta az illető választását). A kísérleti személy csuklója ez utóbbi jelnek, és nem az eredeti választásának megfelelően rándult meg. Fontos, hogyan értelmezték a történeteket a résztvevők. *Nem* számoltak be arról, hogy külső erők rendelkeztek felettük. Inkább azt mondták: „Meggondoltam magam.”

Alapos vizsgálatok mutatják, hogy testünk és agyunk – az „én” fizikai platformja – minden megérzésünknek ellentmondva ugyanolyan anyagból épül fel, mint a „nem én”, és úgy tűnik, közöttük folytonos az átmenet.

Amikor csecsemőként sietősen értelmet tulajdonítunk a dolgoknak, félreértjük a világot és önmagunkat. A mélyebb megértéshez elvezető úton sokat kell felejtenünk és sokat kell tanulnunk.

VI

Az újjászületés folyamata zavarba ejtő lehet. De mint a hullámvasút, üdítő is egyben. És az út végén ajándék vár ránk: a tudományos értelemben újjászületett ember számára a világ üde, értelmes és csodálatosan sokszínű. Számára életre kel William Blake víziója:

Egy porszem világot jelent,
S egy szál vadvirág az eget,
Fogd föl tenyeredben a végtelent
S egy percben élj évezredet.⁴

BEVEZETÉS

I

A világegyetem különös hely.

Az újszülött számára a világ zavarba ejtő benyomások összevisszasága. Rendezésükre törekedve a csecsemő gyorsan megtanul különbséget tenni a külvilágból és a belső világából származó üzenetek között. Belső világa érzésekből áll, amilyen az éhség, a fájdalom, a jóllét és az álomság, de az álmok pokla is onnan ered. A belső világ részei az egyéni gondolatok is, tekintetének, fogásának irányítása, majd hamarosan a beszéd.

A külvilág bonyolult intellektuális építmény. A csecsemő idejének nagy részét ennek megteremtésére szánja. Megtanulja felismerni az érzékei által közvetített tartós mintázatokat, amelyek – saját testének reakcióitól eltérően – nem az ő gondolataira vonatkozó, megbízható válaszok. Ezeket a mintázatokat aztán tárgyakba tömöríti. Megtanulja, hogy a tárgyak előre megjósolható módon viselkednek.

Végül a csecsemő, immár kisgyermekként, felismeri, hogy a tárgyak némelyike hozzá hasonló élőlény, akivel kommunikálni lehet. A velük való információcsere meggyőzi őt arról, hogy ők is egy belső és egy külső világ létét tapasztalják, mindannyian sok közös tárgyon osztoznak, és hogy a tárgyak ugyanazoknak a szabályoknak engedelmeskednek.

II

A közös külső világ – más szóval a fizikai világ – irányítási lehetőségeinek megértése természetesen egy aktuális gyakorlati probléma, amelynek számos vonatkozása van. Egy vadászó-gyűjtögető társadalomban például a gyerekeknek sok egyéb tény és képesség mellett meg kellett tanulnia, hogy hol talál vizet, mely növények és állatok alkalmasak tápláléknak, hol lehet megtalálni, felnevelni vagy levadászni őket, hogyan kell előkészíteni és megfőzni az ételt.

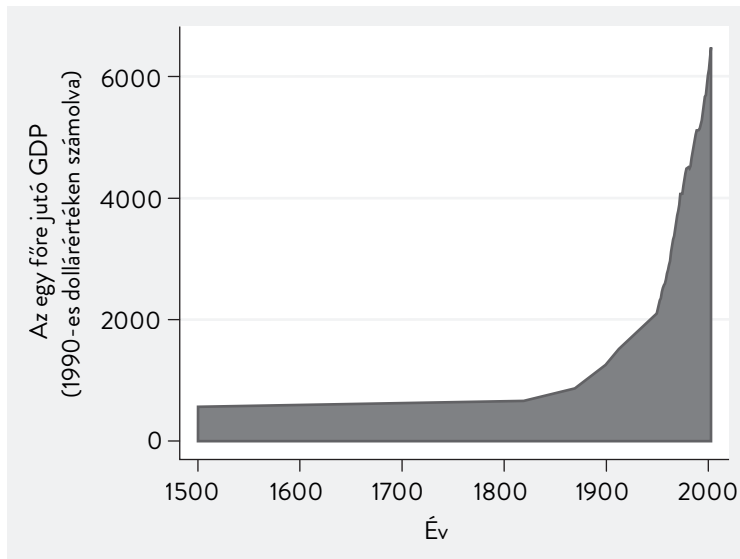
A fejlettebb társadalmakban már mások a kihívások: hogyan készítünk speciális eszközöket, hogyan építünk tartós szerkezeteket, hogyan követhetjük nyomon az idő múlását. A problémák sikeres megoldása a fizikai világ felfedezését, az ismeretek megosztását és generációkon átívelő felhalmozását feltételezi. Így alakul ki a társadalmak „technológiája”.

A tudományt nélkülöző népek is gyakran dolgoznak ki gazdag és bonyolult technológiát. Ezekkel a technológiákkal az emberek képesek voltak – és képesek ma is – mostoha körülmények között is elboldogulni, például a sarkvidéken vagy a Kalahári sivatagban. Más népek nagy városokat és lenyűgöző emlékműveket hoztak létre – gondoljunk csak az egyiptomi és közép-amerikai piramisokra.

Az ember története során azonban, a tudományos módszer megjelenése előtt, a technológia fejlődése csupán esetleges volt. A sikeres technikákat többé-kevésbé véletlenül fedezték fel. Ha rájuk bukkantak, nagyon sajátos eljárások, rituálék és hagyományok formájában adták tovább őket. Nem rendezték őket logikai rendszerbe, és nem is törekedtek az ismeretek következetes átadására.

Az „ökölszabályon” alapuló technológiák lehetővé tették az ember számára a túlélést, a reprodukciót, sőt gyakran még némi kényelmet, elégedettségérzést is nyújtottak. A legtöbb embernek, a legtöbb kultúrában, az emberi történelem meghatározó részében ennyi elegendő is volt. Az embernek nem volt módja megtudni, mi az, ami hiányzik neki, vagy hogy ami hiányzik, az fontos lehet-e számára.

Most azonban már tudjuk, hogy sok mindennek híján voltak. Az alábbi ábra a termelékenység időbeli változását mutatja, és önmagáért beszél.



III

A világ megértésének modern módszere Európában alakult ki a 17. században. Korábban és a világ más részein is részlegesen ráéreztek erre. De az áttörések tudományos forradalomként ismert konstellációja inspiráló példákat hozott arra nézve, hogy mire képes az emberi elme, ha kreatív módon közelít a fizikai világhoz, az áttörésekhez elvezető módszerek és hozzáállás pedig világos modellt adott a jövőbeli felfedezésekhez. Ezzel a lendülettel kezdődött el az, amit ma tudományának nevezünk. És innen már nem volt visszaút.

A 17. században számos fronton történt drámai erejű elméleti és technológiai előrelépés: a gőzgépek és hajók tervezésében, az optikai eszközök (nevezetesen a mikroszkóp és a távcső) terén, az óra- és

naptárkészítésben. Közvetlen eredményként kitágultak az ember lehetőségei, többet látott és megbízhatóbban intézhette ügyeit. Ami azonban az úgynevezett tudományos forradalmat páratlanná tette, s ezzel rászolgált a forradalom névre, az egy kevésbé kézzelfogható dolog. Megváltoztatta a távlatokat: új törekvéseket, új reményeket hozott.

Kepler, Galilei és Newton módszere a tények alázatos tiszteletét a természettől eltanult szisztematikus pimaszsággal ötvözi: mindazt, amit már tudni véltek, agresszíven alkalmazták, ahol csak lehetett, még eredeti meggyőződésükön túlmutató szituációkban is. Ha működik, felfedeztek valami hasznosat, ha nem, akkor tanultak valami fontosat. Ezt a felfogást radikális konzervativizmusnak nevezem, és számomra ez a tudományos forradalom legfőbb innovációja.

A radikális konzervativizmus konzervatív felfogás, mert a természetből tanulásra és a tények tiszteletére szólít fel – amelyek kulcsfontosságú tényezők az úgynevezett tudományos módszer esetében. De radikális is, mert arra készlet, hogy a tanultakat mindarra használjuk fel, amire csak érdemes. A tudomány aktuális működésében ez ma sem kevésbé lényeges. Ez adja a tudomány fegyverének az élet.

IV

Új távlatokat ígért egy olyan terület fejlődése, amely már a 17. században is ősinék és gondosan kimunkáltnak látszott. Ez volt az égi mechanika, az égen látható objektumok mozgásának leírása.

Az emberiség már jóval írott történetének kezdete előtt felismert olyan szabályosságokat, mint az éjszakák és nappalok váltakozása, az évszakok körforgása, a Hold fázisai és a csillagok szabályos mozgása. A mezőgazdaság kialakulásával már fontos volt nyomon követni az évszakok váltakozását, mert a magvetést, az ültetést, a termés betakarítását az arra legalkalmasabb időpontban kellett elvégezni. A megfigyelések másik erős, bár hiábavaló hajtóereje volt az a hit, hogy az emberi életet közvetlen kapcsolat fűzi a bolygók együttállásához: azaz

az asztrológia. Az emberek mindenesetre többféle okból – az egyszerű kíváncsiságot is beleértve – gondosan vizsgálták az égboltot.

Nyilvánvalóvá vált, hogy a csillagok óriási többsége meglehetősen egyszerű módon, kiszámíthatóan mozog. Látszólagos mozgásukat ma a Föld tengely körüli forgásának következményeként értelmezzük. Az „állócsillagok” oly távoliak, hogy a távolságukban bekövetkező viszonylag kismértékű változás, akár a Föld Nap körüli keringése, akár a csillag saját mozgása okozza azt, szabad szemmel észrevehetetlen. Néhány kivételes objektum azonban – a Nap, a Hold és néhány „vándor”, köztük a szabad szemmel is látható bolygók, azaz a Merkúr, a Vénusz, a Mars, a Jupiter és a Szaturnusz – nem követi ezt az egyszerű mintát.

Az ókori csillagászok generációi folyamatosan feljegyezték ezeknek a speciális objektumoknak az égbolton elfoglalt helyzetét, és végül megtanulták meglehetősen pontosan megjósolni a helyzetükben bekövetkező változásokat. Ehhez a feladathoz geometriai és trigonometriai számításokon alapuló bonyolult, de teljesen egyértelmű receptekre volt szükségük. Ptolemaiosz (kb. 100–170) matematikai szöveg formájában összegyűjtötte ezeket az ismereteket, amelyet ma *Almagest*-ként ismerünk. (A *magest* egy görög felsőfokú melléknév, jelentése „legnagyobb”. Ugyanaz az eredete, mint a *magasztos* szónak. Az *al* egyszerűen a görög „a”).

Ptolemaiosz összefoglalója nagyszerű eredmény, volt azonban két hiányossága. Egyik a bonyolult volta és ezzel szorosan összefüggő csúnyasága. A bolygók mozgásának kiszámítására használt leírásaiban sok olyan szám volt, amelyeket csupán a megfigyelések támasztottak alá anélkül, hogy az őket összekapcsoló mélyebb elvekre utaltak volna. Kopernikusz (1473–1543) észrevette, hogy ezek között a számértékek között meglepően egyszerű összefüggés van. Ez az egyébként misztikusnak, „véletlenszerűnek” tűnő összefüggés geometriai módszerekkel értelmezhető, amennyiben feltételezzük, hogy a Föld a Vénusszal, a Marssal, a Jupiterrel és a Szaturnusszal együtt a Nap mint középpont körül kering (a Hold pedig a Föld körül).

Ptolemaiosz összefoglalójának másik hiányossága egyszerűbb: nem pontos. Tycho Brahe (1546–1601), ráérezve napjaink „nagy tudomá-

nyának” szellemére, pontosabb műszereket tervezett, és sok pénzt költött egy obszervatórium megépítésére, amivel lehetővé vált a bolygók helyzetének pontosabb megfigyelése. Új megfigyelései félreérthetetlenül eltértek Ptolemaiosz előrejelzéseitől.

Johannes Kepler (1571–1630) kidolgozott egy egyszerű és pontos geometriai modellt a bolygók mozgására. Figyelembe vette Kopernikusz elképzeléseit, és fontos technikai változtatásokat hajtott végre a ptolemaioszi modellen. Konkrétan megengedte, hogy a bolygópályák eltérjenek a körtől, a körpályát pedig olyan ellipszispályával helyettesítette, amelynek egyik fókuszpontjában a Nap van. Azt is megengedte, hogy a bolygó Nap körüli keringésének sebessége a távolság függvényében változzon oly módon, hogy egyenlő időközök alatt egyenlő nagyságú területeket sűröljön. Ezekkel a változtatásokkal a rendszer jelentősen egyszerűsödött, ráadásul pontosabbá vált.

Lent, a Föld felszínén Galileo Galilei (1564–1642) időközben sikeresen vizsgált egyszerű mozgásformákat, például a golyó lejtőn való legördülését és az inga lengéseit. Ezek az egyszerű kísérletek, melyek számokat rendeltek hozzá helyzetekhez és időtartamokhoz, szármalman alkalmatlannak látszottak arra, hogy általuk a világ működésének nagy kérdéseit feszegezzük. Galilei tudományos kortársainak szemében, akik a filozófia nagy kérdéseivel foglalatostkodtak, ez minden bizonnyal nyilvánvalónak látszott. Galilei azonban más jellegű megértésre törekedett. Inkább szeretett volna pontosan megérteni *valamit*, mint *mindent* homályosan érteni. Az egyszerű kísérleteinek teljes megértésére keresett és talált világos matematikai összefüggéseket.

Isaac Newton (1643–1727) összekapcsolta a bolygómozgásra vonatkozó Kepler-féle geometriát és Galilei földfelszíni mozgásokra vonatkozó dinamikai leírását. Megmutatta, hogy mind Kepler bolygómozgásokra vonatkozó elméletét, mind Galilei speciális mozgásformákra érvényes elméletét jobban meg lehet érteni, ha azokat egy általánosabb törvényszerűség speciális eseteiként fogjuk fel, ezek a törvények pedig az összes testre bárhol és bármikor érvényesek. A newtoni elmélet, amit ma klasszikus mechanikaként ismerünk, győzelmet