Trócsányi Zoltán

Egy fizikus világképe[1]

Ha a népesség körében arról érdeklődünk, ki szereti a fizikát, a többségtől elutasító választ kapunk. Száz ember közül tíznél biztosan kevesebb fog tetszést nyilvánítani, annak ellenére, hogy a fizikai jelenségek átszövik mindennapjainkat, és minden folyamat legmélyén fizikai jelenségek állnak, továbbá az érdeklődés szintjén sokan rácsodálkoznak a természet e rejtelmeire. Vajon mi a fizika népszerűtlenségének oka? Néhány fizikai rendszer példáján bemutatom, hogy én miért szeretem a fizikát, valamint a fizika erős világképformáló erejét, és egyúttal keresem a választ a fenti kérdésre.

Tanulmányozzunk bármit,
eredményünk akkor érdekes,
ha egyszerű (és ekkor szép)

Nagy megtiszteltetésnek tartom, hogy a Debreceni Akadémiai Bizottság nekem ítélte a 2017. évi *Pro Scientia díj*at. Az esemény egyben elgondolkodásra is késztetett, hogy mivel érdemeltem ki a kitüntetést. Míg ezen töprengtem az a gondolatom támadt, hogy vajon mennyire ismeri a tudományos közösség egy fizikus világképét. Hiszen a fizika nem népszerű tudomány. Száz emberből tíznél biztosan kevesebbnek tetszik az, amiért magam rajongok. Mi lehet ennek az oka? Félreértés? A fizikusok különös gondolkodásúak? Erről szeretnék ez alkalommal hangosan töprengeni. Előadásom címe kétértelmű abból a szempontból, hogy lehet akár egy konkrét, akár egy általános fizikusra gondolni. Valójában egy konkrét fizikusra gondolok, akiről úgy vélem kellően fizikusi gondolkodású, hogy világképe általánosnak legyen nevezhető e tudomány művelői körében. Minthogy a fizikusi világképről beszélek, elkerülhetetlen lesz, hogy képleteket mutassak. Nem célom, hogy ezeket bárki megértse, csupán mondanivalóm jobb megértését segítő illusztrációként szolgálnak.

***

Az igazi fizika születése Newton eredményeihez köthető. Ő ismerte fel, hogy egy meghatározott környezetbe helyezett test mozgását le tudjuk írni, ha megoldjuk a (ma már az ő nevét viselő) Newton-egyenletet:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

[1] Az MTA DAB 2017. évi *Pro Scientia díj*át elnyerő kutató előadása.

ahol az egyenlet jobb oldalán a test tömegének (m) és gyorsulásának ($\vec{a}$) szorzata áll, a baloldalon pedig a testre ható erők összege (a nyilacska a jel felett azt jelzi, hogy a mennyiségnek nem csak nagysága, hanem iránya is van). Newton óriási felismerése az volt, hogy észrevette, ez a pofonegyszerű képlet minden test mozgásának leírására alkalmas, csak a környezet hatásait képviselő erőket kell *erőtörvények* alakjában megfogalmazni. Például meglehetősen közismert a tömegvonzás erőtörvénye:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

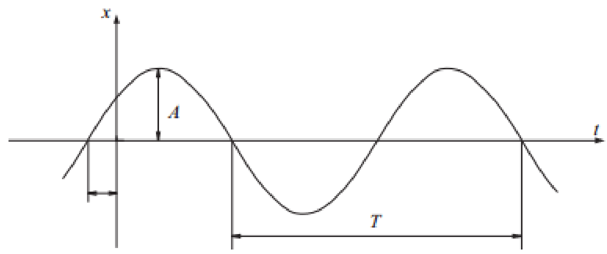
de további erőtörvények is léteznek. Miféle egyenlet a fizikusok között mozgásegyenletnek hívott $\vec{F} = m\vec{a}$? Hogyan lehet megoldani? Nos, az erőtörvényekben az erő a testek helyének és sebességének a függvénye. Egyszerű példa a rugóra akasztott, egyenes mentén mozgó test, amikor az erőtörvény $F_r(x) = -c\,x$ alakú, ahol a c a rugó merevségét jellemző állandó, az időtől függő $x(t)$ függvény pedig a test helyét jelöli a t pillanatban. A test gyorsulása a helynek az idő szerinti második deriváltja, tehát a mozgásegyenlet egy másodrendű differenciálegyenlet:

$$-cx = m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

A rugóerő esetében viszonylag könnyű megtalálni a mozgásegyenletet kielégítő függvényt,

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi)\ , \qquad \omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

amelyet ábrázolva (1. ábra) kirajzolódik előttünk a rugóra akasztott test periódikus mozgása (T a rezgés periódusideje, A pedig az amplitúdója):



1. ábra

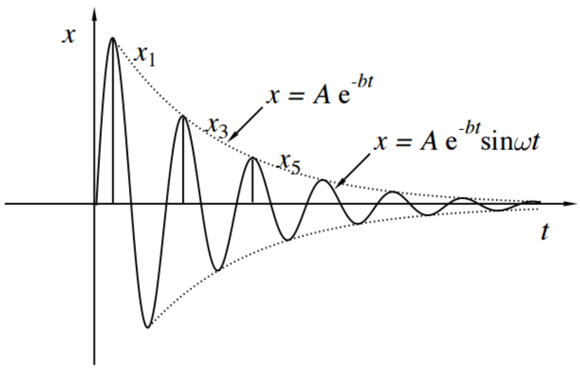
Azonnali ellenvetés lehet, hogy ilyen mozgást nem lehet megfigyelni a természetben. Egy rugóra helyezett, rezgésbe hozott test (például gépjármű) mozgása hamar lecsillapodik, azaz a rezgés amplitúdója csökken. Azonban ragyogóan működik ilyen esetekben is a fizikusi megközelítés, amelynek lényege, hogy *a hatásokat fontossági sorrendben vesszük figyelembe*. A rugóra akasztott test esetében a rugó által kifejtett erő után következő második legfontosabb hatás a testre ható közegellenállás, amely a tapasztalat szerint a test v sebességével arányos, $F_k = -C\,v(t)$, ahol a C a test alakjától és a közeg sűrűségétől függő állandó. Így a mozgásegyenlet az

$$-cx - C\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}$$

alakot ölti, hiszen a sebesség a hely idő szerint vett deriváltja. Ezt a kicsit bonyolultabb, de még mindig másodrendű differenciálegyenletet is könnyű egyszerű függvény alakjában megoldani:

$$x(t) = Ae^{-bt}\sin(\omega t + \varphi)\ , \qquad \omega = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad b = \frac{C}{2m}$$

Ezt a függvényt látjuk a 2. ábrán φ = 0 kezdő fázissal:



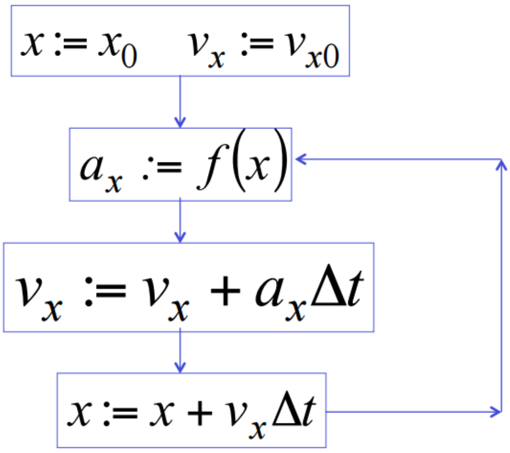
2. ábra

Kedves hallgatóim joggal teszik fel a kérdést, miért untatom Önöket ezekkel a valódi mozgások, változások bonyolultságát oly kevéssé tükröző tankönyvi példákkal. Nos a válasz egyszerű.

> Részben írásom mottója: *„tanulmányozzunk bármit, eredményünk akkor érdekes, ha egyszerű”* (és ekkor szép),
>
> részben pedig az, hogy *a bonyolult mozgások mögött is egyszerű törvények rejtőznek.*

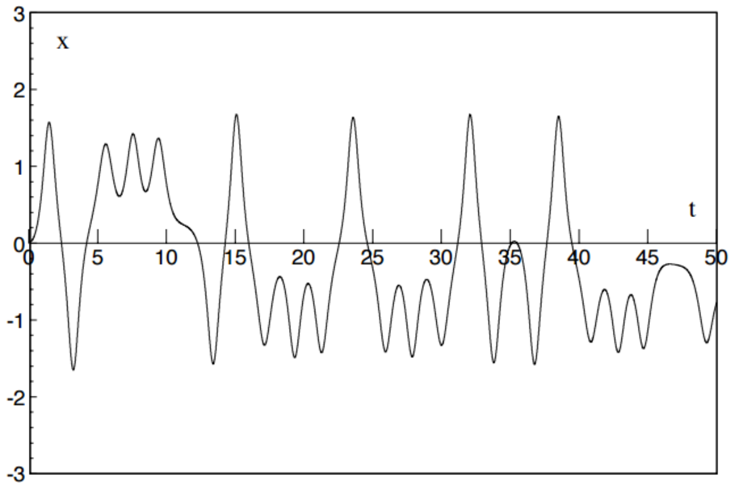
Mindkét állítás a fizikusi világnézet sarokköve. A második állítást nem tudom bizonyítani, de a belé vetett hitemet erősítő példákat tudok mutatni. Ha az ember elég sok példát lát valamire életében, akkor az könnyen meggyőződésévé válik (amíg ellenpéldára nem akad).

A valóságban a rugók erőtörvénye nem pontosan csak $x(t)$ első hatványával arányos (nem lineáris), hanem az $F_r(x)$ függvény eltér az egyenestől. Az eltérést legegyszerűbben úgy lehet figyelembe venni, hogy a rugó erőtörvényéhez hozzáadunk egy további tagot, $F_r(x) = -(c\,x + c'\,x^3)$, azaz az erő a megnyúlással hatványozottan növekedik. Az ilyen rugó nagy megnyúlásokra keményedik ha $c' > 0$, mint például a gumiszalag. Kérdezhetik, miért nem másodfokú tagot adok hozzá. Azért, mert az nem vezet érdekes eredményre. A kibővített erőtörvénnyel már nem lehet egyszerű függvények alakjában megoldani a mozgásegyenletet (nem létezik megoldása a közismert függvények körében). Azonban megoldható az egyenlet egyszerű numerikus algoritmussal. Itt $f(x) = F_r(x)/m$, Δt pedig kicsi időtartam, amely minél kisebb, annál pontosabb, de annál hosszadalmasabb is a számítás (3. ábra).

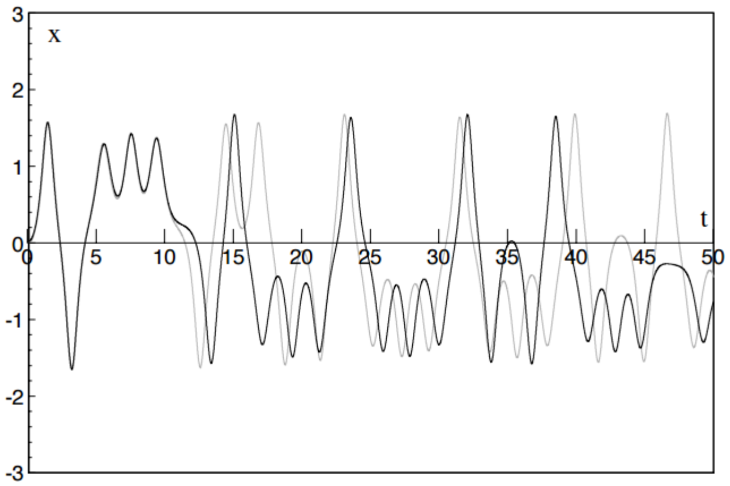


3. ábra

Ha a megnyúlás kicsi, akkor a köbös korrekció elhanyagolható, ha c' értéke nem nagy. Nagy amplitúdóknál – például kényszerített rezgésben rezonancia esetén – azonban x^3 számértéke akár nagyobb is lehet, mint x-é. Míg a lineáris erőtörvényű rugó esetén a rezgő test követi a kényszerítő gerjesztés harmonikus rezgőmozgását, *nemlineáris erőtörvényű rugó esetén a rugó nem képes arra, hogy pontosan átvegye a gerjesztés harmonikus mozgását, mert saját periodikus viselkedése nem harmonikus*. Az állandósult mozgás csak átlagos értelemben követi a rezgést, részleteiben attól mindig eltér. Sem a kényszerített rezgés amplitúdója, sem a frekvenciája nem állandó, a mozgás nem ismétli önmagát, úgy mondjuk, kaotikus.



4. ábra

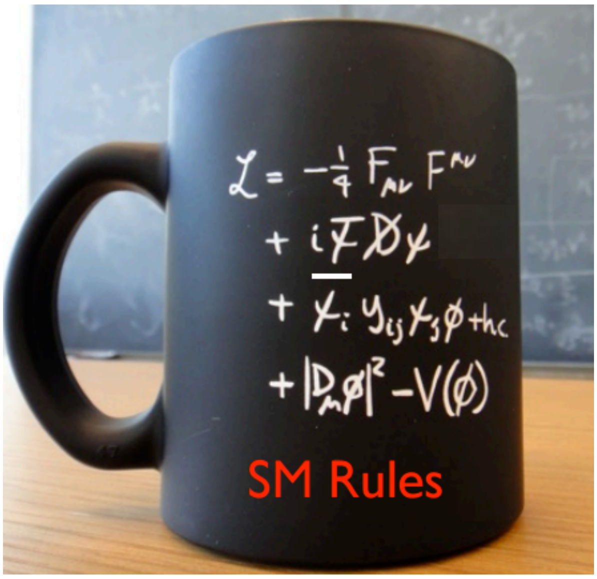


5. ábra

A 4. ábra egy keményedő rugó végére akasztott test kényszerített rezgésének kitérés–idő-grafikonját mutatja. A mozgásban semmilyen periodikusság nem fedezhető fel, a mozgás szabálytalan. Még inkább meglepő, hogy két, alig eltérő kezdőfeltétel mellett a kitérések igen rövid idő elteltével jelentősen különböznek, amint az 5. ábra mutatja. Matematikai értelemben lehet azonos kezdőfeltételeket szabni, a valóságban azonban nem, mert *valami apró véletlen mindig közbeszól*.

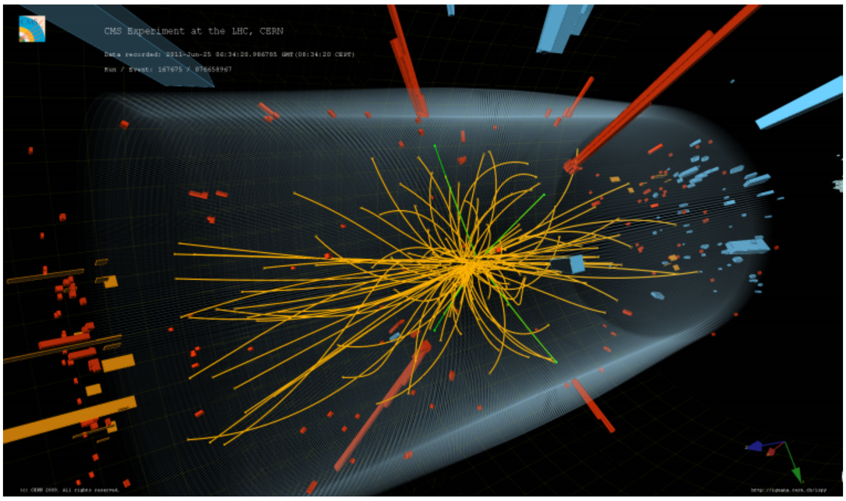
Ezek szerint a valódi mozgásokat nemlineáris erőtörvények esetén hosszú távra *elvileg lehetetlen* előre megjósolni. Ez a felfedezés mélyen megrendítette azt a mechanisztikus világképet, ami főleg a 19. században volt uralkodó, miszerint elegendő a kezdeti feltételeket megszabni, és attól kezdve a világ fejlődése elvileg előre megmondható. Akár nagyon egyszerű nem-lineáris erőtörvény esetén is lehetséges nagyon bonyolult mozgás. A mikrovilág törvényszerűségeit leíró kvantummechanika szerint *a véletlen minden folyamatban jelen van*, így a kezdeti feltételek soha nem adhatók meg tetszőleges pontossággal. Akkor pedig már a klasszikus mechanika is azt mondja, hogy hosszú távra nem lehet előre megjósolni egy fizikai rendszer fejlődését. Ennek megnyilvánulását tökéletesen példázza az időjárás hosszútávú előrejelzésének pontatlansága (lehetetlensége).

Az egyszerűségre törekvés a megismerés során nagyon sikeres volt a fizikában. Csupán azt kellett felismerni, hogy az erőtörvények helyett célszerűbb a test E_m mozgási, és E_h helyzeti energiájának különbségét tartalmazó $L = E_m - E_h$ Lagrange-függvénynek nevezett mennyiséget tekinteni alapmennyiségnek. A Lagrange-függvényből egyszerű – számunkra most nem érdekes –, de teljesen általános eljárással megkapható a mozgásegyenlet. A Lagrange-függvény nyelvén különösen egyszerű alakot öltenek a fizika törvényei. Például az általam sokat kutatott részecskefizika standard modellje a következő egyszerű, egy akár teáscsészére felírható egyenletbe foglalja a világ összes folyamatát a legelemibb szinten (6. ábra):



6. ábra

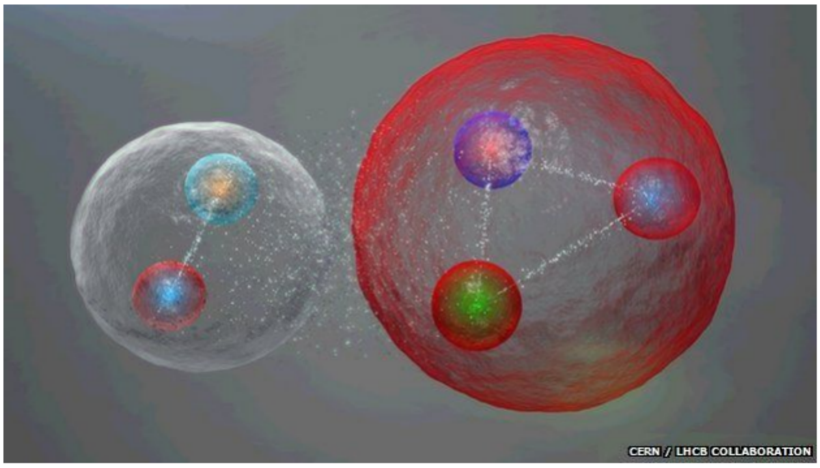
Természetesen egy képletnek önmagában nem sok jelentése van, értelmezni kell tudni. Hogyan lehet a standard modell Lagrange-függvényétől eljutni a Nagy Hadronütköztetőn észlelt események értelmezéséig? Honnan lehet tudni, hogy a 7. ábrán bemutatott esemény egy Higgs-részecske keletkezését dokumentálta?



7. ábra

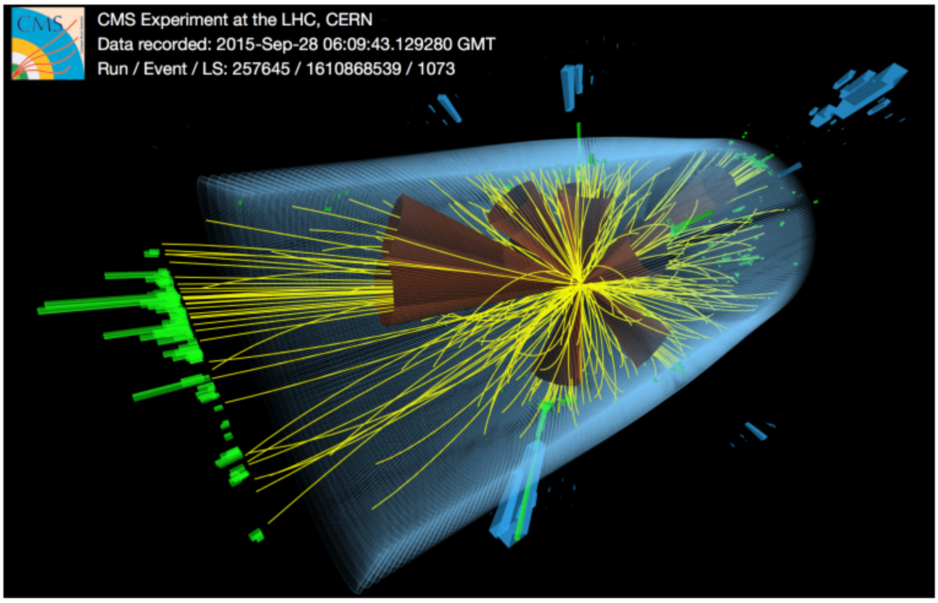
E kérdésre most nem adom meg a részletes választ, csupán egy 2017-ben megjelent egyetemi tankönyvre utalok, ahol az érdeklődők minden szükséges ismeretet megtalálhatnak (Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részek fizikájába*, TypoTex kiadó, 2017). Itt csupán arra szeretném a figyelmet irányítani, hogy egy jelenségkör leírásában az egyik legfontosabb kérdés, hogy megtaláljuk a helyes energiaskálát és szabadsági fokokat, azokat a változókat, amelyek leginkább alkalmasak a vizsgált rendszer jellemzésére. A vegyészek számára például az energiaskálát az atomok és molekulák kötési energiái szabják meg, a helyes szabadsági fokok az elektronok hullámfüggvényei, és a megfelelő alapegyenlet a Schrödinger-egyenlet, amely szintén igen egyszerű.

A részecskefizika fenti Lagrange-függvényében az elemi részecskék képezik a szabadsági fokokat. Ugyanakkor a detektorban észlelt részecskék többsége összetett részecske, például az atommagok alkotórészei a proton és a neutron, amelyek elemi összetevőkből, kvarkokból és a köztük fellépő erőt közvetítő gluonokból állnak, ahogy azt a 8. ábra is szemlélteti:



8. ábra

A jelenségek vizsgálata során kiderült, hogy az elemi részecskék elméletét nagy energiára gyorsított részecskék ütközésében keletkező végállapotok elemzésével lehet tanulmányozni. Ilyen eseményekben a helyes szabadsági fokokat se nem az elemi részecskék, sem pedig az egyes hadronok jelentik. Helyettük a hadronok zápora, szaknyelven „dzset”, amellyel a végállapotokat kísérletileg és elméletileg egyaránt jellemezni lehet (a 9. ábrán kúpokkal határolt részecskék):



9. ábra

Az egyszerű alapelv nem feltétlenül jelenti azt, hogy a dzsetek várható számát könnyű lenne előre jelezni, az egyes ütközési eseményekre ez nem is lehetséges. Csupán sok ütközés átlagáról mondhatunk valamit, ugyanis *a természet legalapvetőbb szintű folyamatait a véletlen vezérli*. Azt sem állítom, hogy az átlagértékek kiszámítása könnyű lenne, csupán annyit, hogy létezik egyszerű képlet, amely minden eddig észlelt elemi részecskefizikai jelenség leírására alkalmas kiindulópont.

A fizikus tehát egyszerű képletekkel leírható világot lát maga körül. Egy adott jelenségkör leírásához megkeresi a legalkalmasabb szabadsági fokokat és a legfontosabb hatásokat, amelyeket képlettel megfogalmazható törvény alakjába próbál önteni. Megvizsgálja, hogy a képlet segítségével milyen előrejelzéseket lehet tenni, és ha azok nem egyeznek a tapasztalattal, akkor megpróbálja felderíteni, milyen fontos hatásokat nem vett még figyelembe, illetve hogy a megfelelő szabadsági fokokat használja-e.

Ez a program és megközelítési elv rendkívül sikeres volt a fizika fejlődése során, ami megerősítette azt a hitet, hogy természeti törvények léteznek, és azok vezérelnek minden változást. A bonyolult rendszerek viselkedése is megérthető egyszerű képletekkel leírható törvények segítségével, legfeljebb azok felismerése nehéz a bonyolult viselkedés miatt. Ilyen megközelítéssel fizikusoknak sikerült értelmezni olyan bonyolult jelenségeket, hogy miért alakulnak ki autópályákon látható ok (útakadály, baleset) *nélkül* több kilométeres dugók; vagy éppen azt, hogyan viselkedik a tömeg például tűzeset alkalmával. Mindez azt sugallja, hogy az emberi viselkedést, a társadalmi mozgásokat is természeti törvények irányítják. A fájdalommentes eligazodáshoz az életben legalább az nélkülözhetetlen, hogy elfogadjuk az ilyen törvények létezését és saját életvitelünkkel ne akarjunk a törvények ellenére működni. A siker titka pedig az, ha a felismert törvényeket alkalmazni is tudjuk.

Előadásomban említett példáim sugallják, hogy kell léteznie valami általánosnak a fizikában, amitől olyan hatékony tud lenni, hogy minden területen használható. Mára már kiderült, hogy a fizika módszere, a fizikusi gondolkodásmód az, ami hatékonyságának az alapja. A fizika minden jelenséget a lényegtelen hatások kiszűrésével, egyszerű képletekkel megfogalmazható modellek felépítésével próbál megérteni. Ez a megközelítés egy rendezett, megismerhető és kiszámítható világ képét mutatja – ami azonban nem jelenti azt, hogy az egyszerű törvények felismerése könnyű lenne.