SEAN CARROLL

AZ UNIVERZUM LEGFONTOSABB ELMÉLETEI 2.

KVANTUMOK ÉS MEZŐK

SEAN CARROLL

AZ UNIVERZUM LEGFONTOSABB ELMÉLETEI

2.

KVANTUMOK ÉS MEZŐK

TYPOTEX

A kötet megjelenését a Magyar Tudományos Akadémia
és a könyvkiadói program keretében a Nemzeti Kulturális Alap támogatta.



Nemzeti
Kulturális
Alap

MTA MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

A fordítás a következő kiadás alapján készült:
The Biggest Ideas in the Universe. Quanta and Fields
Dutton, New York, 2024.
Copyright © 2024 by Sean Carroll.
All rights reserved.
Hungarian translation © Kovács József, 2026
Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2026
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta
Takács Gábor

ISBN 978 963 493 384 7

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 (XeLaTeX)
Borítóterv: Somogyi Péter
Nyomta és kötötte: OOK-PRESS Nyomda, Veszprém
Felelős vezető: Szathmáry Attila

TARTALOM

	BEVEZETÉS	9
Egy	**HULLÁMFÜGGVÉNYEK**	15
Kettő	**MÉRÉS**	39
Három	**ÖSSZEFONÓDÁS**	63
Négy	**MEZŐK**	83
Öt	**KÖLCSÖNHATÁSOK**	105
Hat	**EFFEKTÍV TÉRELMÉLET**	129
Hét	**SKÁLÁK**	153
Nyolc	**SZIMMETRIA**	171
Kilenc	**MÉRTÉKELMÉLET**	197
Tíz	**FÁZISOK**	217
Tizenegy	**ANYAG**	237
Tizenkettő	**ATOMOK**	255
	FÜGGELÉK **FOURIER-TRANSZFORMÁCIÓ**	275
	NÉV- ÉS TÁRGYMUTATÓ	283

Arielnek

BEVEZETÉS

A fizikatörténet számos zseniális, időnként korszakalkotó elképzelést jegyzett fel. De ha az igazán forradalmi váltásokat hozó gondolatokat keressük – olyan paradigmaváltásokat, amelyek tényleg felforgatták a valóság természetéről alkotott elképzeléseinket –, valójában kettőt emelhetünk ki: a klasszikus mechanika kiteljesedését a 17. század végén és a kvantummechanika megjelenését a 20. század elején.

A klasszikus mechanikával foglalkozott *Az univerzum legfontosabb elméletei* első kötete, a *Tér, idő, mozgás* című könyvem, amelyben a newtoni/laplace-i keretek fontosságát hangsúlyoztam, eljutva a téridő és a relativitás gondolatáig. Eljött a pillanat, hogy áttérjünk a kvantummechanikára.

Jelenlegi legjobb tudásunk szerint a kvantummechanika nem más, mint az a mód, ahogyan a világunk működik. A változás szükségességét előrevetítő első jeleket Max Planck és Albert Einstein munkái jelentették, amelyek arra utaltak, hogy a fény nem csupán hullám, ahogyan azt a fizikusok korábban gondolták. Megfelelő körülmények között a fény részecskék sokaságaként viselkedik, amelyeket ma **fotonoknak** nevezünk. Ezek a részecskék a címben szereplő **kvantumok** példái, a kvantummechanika szabályaiból következő diszkrét energiaadagok. A dolog azonban még ennél is kacifántosabb. Más körülmények között ugyanis az általunk részecskéknek gondolt dolgok, például az elektronok, protonok és neutronok hullámszerű viselkedést mutatnak.

Mint látni fogjuk, a kvantummechanika folyamatosan akadályoz bennünket abban, hogy a fizikai rendszerek viselkedésének leírását tiszta, közérthető formába öntsük.

Egyáltalán ne érezzük magunkat azonban kényelmetlenül, ha a kvantummechanika alapvetései elsőre furcsának, idegennek tűnnek. Az igazság az, hogy maguk a fizikusok sem értenek egyet abban, hogy valójában mi is a kvantummechanika lényege. A fizikusok rendkívül jól *használják* a kvantummechanikát. Képesek vagyunk megjósolni az atomok és molekulák szerkezetét, vagy kiemelkedő pontossággal kiszámítani a részecskék szóródásának körülményeit. Az egész mégis inkább egy fekete dobozra hasonlít. A világ vezető kvantumfizikusai körében nincs egyetértés abban, hogy mi vezet az általuk olyan sikeresen megjósolt és megfigyelt eredményekhez.

Az intellektuális konszenzus hiánya arra vezethető vissza, hogy a kvantummechanika különleges jelentőséget tulajdonít a fizikai rendszerek „mérésének" vagy „megfigyelésének". A klasszikus fizikában a testeknek olyan tulajdonságaik vannak, mint például a hely és a sebesség, ezeket pedig közvetlenül mérhetjük, olyan pontossággal, amilyennel csak akarjuk. De a kvantumobjektumok gyökeresen másnak tűnnek. Egy kvantumrendszer tulajdonságainak mérése általában drámaian megváltoztatja magukat a tulajdonságokat. Az elmélet bizonyos, teljesen észszerű értelmezései szerint egy részecskének, például egy elektronnak még olyan tulajdonságai sincsenek, mint a „hely" vagy az „impulzus" – ezek lehetséges mérési eredmények, nem pedig belső tulajdonságai magának a kvantumrendszernek.

Minket azonban többnyire ez egyáltalán nem fog zavarni.[1] *Az univerzum legfontosabb elméletei* – sorozatban hozzáállásunk a keményvonalas fizikusoké, akik jól alátámasztott elméleteket használnak arra, hogy ellenőrizhető előrejelzéseket tegyenek a világról. Bőven elég lesz nekünk az, hogy ezeken rágódjunk. Persze az alapkérdések vitathatatla-

[1] Az érdeklődő olvasónak jó szívvel ajánlom *A mélyen elrejtett valóság. Kvantumvilágok és a téridő megjelenése* című könyvemet (Typotex, 2023), amely bevezetést nyújt a kvantummechanika középpontjában álló kényes problémákba. A téma lenyűgöző történetét pedig Adam Becker írta meg *What Is Real?* (Basic Books, 2018) című könyvében.

nul fontosak: a kvantummechanika mélyebb szintű megértése könnyen döntő szerepet játszhat abban, hogy a jelenlegi elméleteinken túllépve a valóságról alkotott sokkal átfogóbb kép felé haladjunk. E könyv fókuszában azonban a jelenlegi elméletek alapjául szolgáló fogalmak, elképzelések megértése áll, és az, hogy ezek miként szolgáltattak példátlanul pontos képet a fizikai világról.

A szóban forgó fogalmak, gondolatok közé tartozik maga a kvantummechanika; a kvantumtérelmélet, amely természetes módon következik a kvantummechanika és a speciális relativitáselmélet követelményeinek összekapcsolásából; valamint a kvantumtérelméleten belül felmerült különböző mélyreható elképzelések, beleértve a Feynman-diagramokat, a renormálást, a mértékelméleteket, a szimmetriasértést és a spin-statisztika tételt.

Hatalmas mennyiségű anyag ez, amelyet igyekeztem a puszta lényegre leegyszerűsíteni. A módszer az előző könyvéhez hasonló: elegendő matematikai konkrétumot fogunk megismerni ahhoz, hogy valóban megértsük a lényegi elképzeléseket, de anélkül, hogy elérnénk a problémák megoldásához szükséges részletesség azon szintjét, amit egy PhD-hallgató. Egyszóval ugyanazokat az elképzeléseket fogjuk megismerni, mint ők, de nem kell egész éjjel a feladatsorok megoldásával bajlódnunk.

Ez azonban kicsit más stratégiát igényel, mint amit a *Tér, idő, mozgás* című könyvben alkalmaztunk, bár az alapvető törekvés ugyanaz. Abban a könyvben szó szerint az összes egyenletet pontosan úgy tudtam megmutatni, ahogyan egy szakember megtanulja azokat. Itt egyszerűen túl sok az információ ahhoz, hogy ez működőképes legyen. A kvantumtérelmélet tele van apró részletekkel és jelölési rétegekkel, amelyek akadályozhatják a lényegre történő összpontosítást. Márpedig nekünk a lényegi gondolatok számítanak. Ezért lesznek olyan esetek, amikor figyelmen kívül hagyjuk a csatolási állandókat, elrejtjük az indexeket, vagy a mátrixokat számokként kezeljük. Ígérem, mindez nem elfedni igyekszik majd, hogy mi is történik valójában, éppen ellenkezőleg: azt szolgálja, hogy segítsek megérteni azt.

De természetesen lesz azért matematika is. A *Tér, idő, mozgás* című könyvben bemutattuk a kalkulus alapgondolatait, beleértve a deriváltakat (a változás üteme) és az integrálokat (a változás halmozott összege). A későbbi fejezetekben foglalkoztunk a tenzorokkal és a görög betűkkel, amelyekkel a téridő indexeit jelöljük. Mindezeket itt is használni fogjuk. Csakúgy, mint a tömeg, az energia és a relativitáselmélet fizikai alapgondolatait. Ha az olvasó már ismeri ezeket a fogalmakat, akkor ez a könyv mindent magában foglal, amire szüksége lesz. Ha nem, a *Tér, idő, mozgás* minden szükséges háttértudást tartalmaz.

Lélegzetelállító utazás lesz. A 20. század hajnalán a klasszikus mechanika sziklaszilárd alapokon állt. Huszonöt évvel később kialakult a kvantummechanika első teljes formalizmusa. Újabb huszonöt év elteltével a kvantum-elektrodinamika lett az első jól megalapozott kvantumtérelmélet. Huszonöt évvel azt követően pedig a fizikusok összeállították a részecskefizika standard modelljét, amely a mai napig egyeduralkodó. Ezt az utat járjuk be most, hogy megismerjük a legelképesztőbb gondolatokat, amelyek emberi elmében valaha megszülettek.

Ismét abban a szerencsében volt részem, hogy részletes visszajelzéseket kaptam a könyv első változataival kapcsolatban. Hatalmas hála illeti Scott Aaronsont, Justin Clarke-Doane-t, Ira Rothsteint és Matt Strasslert, akiknek nagy szerepük volt abban, hogy fizikai magyarázataim úgy maradtak hitelesek, hogy első megfogalmazásukhoz képest egyébként jelentősen egyszerűsödtek. Ügynököm, Katinka Matson bölcs tanácsokkal látott el az út során. Kiemelt köszönet jár szerkesztőmnek, Stephen Morrow-nak, aki türelmes, megértő és egyedülállóan segítőkész volt abban, hogy ezt a könyvsorozatot olyanná formáljam, amelyből reményeim szerint az olvasók élvezettel fognak tanulni.

Ezúttal különösen nagy szükség volt a türelemre, mivel az írás folyamatát megszakította egy országon átívelő költözés és egy állás betöltésének megkezdése a Johns Hopkins Egyetemen. Köszönöm minden új kollégámnak és tanítványomnak, hogy mindent a lehető leggördülékenyebbé tettek, és megértők voltak akkor is, amikor nem voltam annyira elérhető, mint szerettem volna.

Legfőbb köszönettel feleségemnek, Jennifernek tartozom, aki velem együtt költözött, vállalta új otthonunk kialakításának oroszlánrészét, és mindig segít abban, hogy írásaim őszinték és hitelesek maradjanak. Alig várom ezt az új és izgalmas fejezetet.

A 10. fejezetben felhasznált, sombrero alakú potenciált bemutató ábra Vitaliy Kaurov Mathematica-kódján (https://mathematica.stackexchange.com/questions/19578/how-can-i-make-a-plot-of-the-higgs-potential) alapul. A 11. fejezetben látható, a LIGO obszervatórium hanfordi állomását ábrázoló képet (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/LIGO_Hanford_aerial_05.jpg) a LIGO-együttműködés bocsátotta rendelkezésünkre. A nuklidok 12. fejezetben bemutatott ábrája Christian Hill *Learning Scientific Programming with Python* című könyvének (https://scipython.com) egyik példáján alapul.

EGY

HULLÁMFÜGGVÉNYEK

A 19. század végéhez közeledve a fizikusok joggal remélhették, hogy jó úton haladnak a mindenség megértésében. Az ekkoriban uralkodó elképzelés szerint a világegyetem részecskékből áll, amelyek mozgását mezők, erőterek irányítják.

A teret kitöltő **mezők** gondolata az 1800-as években vált igazán népszerűvé. Isaac Newton már megalkotta a mozgás és a gravitáció meggyőzően gyönyörű elméletét, Pierre-Simon Laplace pedig megmutatta, hogyan fogalmazhatjuk újra ezt az elméletet az univerzum minden objektuma között kölcsönhatást teremtő gravitációs mező formájában. Egy mezőnek a tér minden pontjában van valamilyen értéke. Ez lehet egyszerű szám, de lehet vektor vagy még annál is bonyolultabb valami, a lényeg, hogy minden mező mindenhol jelen van a térben.

Ha azonban csak a gravitáció érdekelt valakit, a mezőkön alapuló tárgyalás pusztán opcionálisnak tűnt, olyan nézőpontnak, amelyet preferenciáinktól függően választhatunk, de akár figyelmen kívül is hagyhatjuk. Teljességgel elfogadható volt a newtoni megközelítés, miszerint minden objektumra közvetlenül hat az összes többi gravitációs vonzóereje anélkül, hogy bármi is feszülne közöttük.

Ez a felfogás a 19. században változott meg, amikor a fizikusok elkezdték alaposabban tanulmányozni az elektromos és a mágneses jelenségeket. Az elektromosan töltött testek erőhatást gyakorolnak egymásra, amit természetes módon tulajdonítunk a közöttük létrejövő elektromos mezőnek. Michael Faraday kísérletei megmutatták, hogy egy mozgó mágnes elektromos áramot indukálhat egy vezetékben anélkül, hogy ténylegesen megérintené azt, ami külön mágneses mező létezésére utalt. James Clerk Maxwellnek sikerült e kétféle mezőt egyetlen **elektromágneses** elméletben egyesítenie, amelyet 1873-ban közölt. Az egyesítés óriási diadal volt, mivel az elektromos és mágneses jelenségek sokféle változatát egységes, tömör elmélet keretei között magyarázta meg. A „Maxwell-egyenletek" a mai napig feladják a leckét a fizika szakos egyetemistáknak.

Maxwell elméletének egyik diadalmas következménye a **fény** természetének megértése volt. A fény nem egyedi anyagfajta, hanem az elektromos és mágneses mezőkben terjedő hullám, más néven **elektromágneses sugárzás**. Az elektromágnességre „erőként" gondolunk, és ez rendben is van, de Maxwell megtanított minket arra, hogy az erőket hordozó mezők oszcillálhatnak, az elektromos és mágneses mezők esetében pedig ezeket a rezgéseket fényként érzékeljük. A fény kvantumai a fotonoknak nevezett részecskék, ezért néha azt mondjuk, hogy „a fotonok közvetítik az elektromágneses kölcsönhatást". De ezen a ponton még mindig a klasszikus fizika mentén gondolkodunk.

Tekintsünk egyetlen töltött részecskét, például egy elektront. A magára hagyott elektront elektromos mező veszi körül, amelynek erővonalai az elektron felé mutatnak. Az erő a Newton-féle gravitációhoz hasonlóan az inverz négyzetes törvény szerint csökken.[2] Ha az elektront megmozdítjuk, két dolog történik. Először is a mozgó töltés az elektromos mellett mágneses mezőt is létrehoz. Másodszor a meglévő elektromos mező térbeli orientációja úgy változik meg, hogy az továbbra is a részecske felé mutasson. Ez a két hatás pedig (kis mágneses mező, kis eltérés a meglévő elektromos mezőben) együttesen úgy

[2] A könyv későbbi részében látni fogjuk, hogy miért inverz négyzetes törvény írja le mind a gravitációt, mind az elektromágnességet. Ennek oka az, hogy a mögöttes mezők tömeg nélküliek, ez pedig az úgynevezett mértékinvariancia miatt van.

fodrozódik kifelé, mint a tóba dobott kavics hullámai. Maxwell megállapította, hogy ezeknek a hullámoknak a sebessége pontosan megegyezik a fény sebességével – mivel valójában *ez* a fény. A rádiótól a röntgen- és gamma-tartományig terjedő bármilyen hullámhosszúságú sugárzás az elektromos és mágneses mezőkben terjedő rezgés. Környezetünk majdnem minden fénysugárzása töltött részecskék rezgéséből származik, történjék az egy izzószálban vagy a Nap felszínén.

Ezzel párhuzamosan a 19. században a **részecskék** szerepe is tisztázódott. A kémikusok John Dalton vezetésével azt az elképzelést hirdették, hogy az anyag egyedi **atomok** halmaza, és minden egyes kémiai elemhez meghatározott típusú atom tartozik. A fizikusok azonban csak később kaptak észbe, miután rájöttek, hogy ha a gázokat ők is egymással folyamatosan ütköző atomok halmazának tekintik, akkor a hőmérsékletet, a nyomást és az entrópiát is meg tudják magyarázni.

De az „atom" elnevezés, amelyet az anyag oszthatatlan elemi egységének ókori görög elképzeléséből kölcsönöztek, kissé elhamarkodottnak bizonyult. Az atomok valóban a kémiai elemek építőkövei, de nem oszthatatlanok. A részleteket majd később pótolva, most csak egy gyors áttekintés róluk: az atomokat **protonokból** és **neutronokból** álló **atommag** és a körülötte keringő **elektronok** felhője alkotja. A protonok elektromos töltése pozitív, a neutronoknak nincs töltésük, az elektronoké pedig negatív. Semleges atomot akkor tudunk létrehozni, ha a protonok és az elektronok száma megegyezik, mivel az elektromos töltéseik kiegyenlítik egymást. A protonok és a neutronok tömege nagyjából ugyanakkora, a neutronok csak kicsit nehezebbek, az elektronok viszont sokkal könnyebbek, tömegük körülbelül 1 800-ad része a proton tömegének. Tehát egy ember vagy bármely makroszkopikus test tömegének nagy része a protonoktól és a neutronoktól származik. A könnyű elektronok jobban tudnak mozogni, ezért azok felelősek a kémiai reakciókért, valamint az elektromos áramokért. Ma már tudjuk, hogy a protonok és a neutronok maguk is kisebb részecskékből, úgynevezett **kvarkokból** állnak, amelyeket **gluonok** tartanak össze, de az 1900-as évek elején erre még semmi nem utalt.

Az atomokról alkotott ezen elképzelés fokozatosan körvonalazódott. Az elektronokat 1897-ben fedezte fel J. J. Thompson brit fizi-

kus, aki megmérte a töltésüket, és azt is megállapította, hogy sokkal könnyebbek az atomoknál. Tehát valamiképpen két összetevőnek kell lennie egy atomban: a könnyű, negatív töltésű elektronoknak és egy nehezebb, pozitív töltésű résznek. Néhány évvel később Thompson egy olyan képet javasolt, amelyben az apró elektronok egy nagyobb, pozitív töltésű térfogatban lebegnek. Ezt nevezték el mazsoláspuding-modellnek, amelyben az elektronok játszották a mazsolák szerepét.

A mazsoláspuding-modell azonban gyorsan tarthatatlannak bizonyult. Ernest Rutherford, Hans Geiger és Ernest Marsden híres kísérletükben alfa-részecskéket (ma már tudjuk, hogy héliumatomok atommagjait) lőttek egy vékony aranyfóliára. Azt várták, hogy ezek többnyire egyenes vonalban áthatolnak rajta, pályájuk csak akkor térül el kissé, ha történetesen egy atomon áthaladva kölcsönhatásba lépnek az elektronokkal (a mazsolákkal) vagy a pozitív töltésű diffúz masszával (a pudinggal). Az elektronok túl könnyűek, hogy megzavarják az alfa-részecskék pályáját, a szétkent pozitív töltés pedig túlságosan diffúz ahhoz, hogy érzékelhető hatást gyakoroljon rájuk. Ezzel szemben azt tapasztalták, hogy ugyan a részecskék többsége valóban szinte érintetlenül suhant át a fólián, néhányuk egészen nagy szögben eltérült, sőt egyenesen visszafelé jött. Ez csak úgy történhetett meg, hogy a részecskék valami nehéz és szilárd dologról visszapattantak. 1911-ben Rutherford helyesen magyarázta az eredményt azzal, hogy a pozitív töltés egy nagy tömegű központi magban összpontosul. Ha egy bejövő alfa-részecske közvetlenül eltalálta a kicsi, de nehéz magot, akkor éles szögben eltérült – éppen ezt figyelték meg a kísérlet során. 1920-ban Rutherford felvetette a protonok létezését (amelyek nem mások, mint hidrogén atommagok, így akkorra valójában már felfedezték őket), 1921-ben pedig a neutronok létezését feltételezte (amelyeket végül 1932-ben fedeztek fel).

Eddig minden rendben, gondolhatta képzeletbeli századvégi fizikusunk. Az anyag részecskékből áll, a részecskék erők révén lépnek kölcsönhatásba egymással, és ezeket az erőket mezők hordozzák. Az egész mechanizmus pedig a klasszikus fizika keretei által meghatározott szabályok szerint működik. A részecskék esetében ez eléggé ismerős: megadjuk az összes részecske helyét és impulzusát, majd a klasszikus tech-

nikák egyikét (Newton törvényeit vagy azok megfelelőit) használjuk a dinamikájuk leírására. A mezők lényegében ugyanígy működnek, azzal a különbséggel, hogy egy mező „helye" annak a tér minden egyes pontján mért értéke, „impulzusa" pedig az, hogy milyen gyorsan változik minden egyes pontban. Az általános klasszikus eljárás mindkét esetben alkalmazható.

Csábító volt a gondolat, hogy a fizika közel áll a végső kiteljesedéshez. Albert Michelson 1894-ben a Chicagói Egyetem új fizikai laboratóriumának felavatásán kijelentette: „A fizikában minden fontosabb alapvető törvényt felfedeztek, és ezen törvények mára olyan alapos igazolást nyertek, hogy szinte elképzelhetetlen, hogy bármely későbbi eredmény miatt elavuljanak… A jövőbeli felfedezések esélye egy a millióhoz."

Nagyobbat nem is tévedhetett volna.

Szerencsére azonban a legtöbben nem osztották a véleményét. Más fizikusok – köztük Maxwell is – felismerték, hogy a részecskék és a hullámok viselkedésének már feltárt jellegzetességei nem mindig felelnek meg a klasszikus elvárásainknak. Gyakran idéznek egy másik kijelentést is, amelyet tévesen Lord Kelvinnek, azaz William Thomsonnak tulajdonítanak: „A fizikában már nincs semmi új felfedeznivaló. Már csak az egyre pontosabb mérések vannak hátra." Thomson valódi nézete ennek éppen az ellenkezője volt. Egy 1900-as előadásában kiemelte, hogy a fizika felett két „viharfelhő" tornyosul – ezek közül az egyiket végül a relativitáselmélet megfogalmazása, a másikat pedig a kvantummechanika elmélete oszlatta el.

FEKETETEST-SUGÁRZÁS

A tudomány története kifinomult és bonyolult, és az előrehaladás ritkán követi azt az egyenes utat, amilyennek visszatekintve tűnik. A kvantummechanika fejlődése pedig különösen problémás és zűrzavaros volt. A tudománytörténeti fordulatok nagy részét átugorva most csak két rejtélyes jelenségre összpontosítunk, amelyek elindították a

kvantumforradalmat: a részecskeszerű tulajdonságokat mutató hullámokra és a hullámszerű tulajdonságokat mutató részecskékre.

Elsőként a fény részecskeszerű tulajdonságait ismerték fel. A gondolat a **feketetest-sugárzás** (vagy „termikus" sugárzás) tanulmányozásából származott. Ez olyan testek által kibocsátott sugárzás, amelyek elnyelik az összes rájuk eső fényt, de mégis bocsátanak ki sugárzást, mert a hőmérsékletük nem nulla. A fizikusok számára egy test hőmérséklete az azt alkotó részecskék véletlenszerű nyüzsgését jellemzi, a véletlenszerűen nyüzsgő részecskék pedig attól függően bocsátanak ki sugárzást, hogy milyen gyorsan mozognak. Ha egy festményt nézünk, formák és színek bonyolult együttesét látjuk, amely visszaveri a rá eső fényt. Ezzel szemben feketetest-sugárzást akkor kapunk, ha kikapcsoljuk az összes környezeti fényt, és hagyjuk, hogy a testek csak a hőmérsékletük miatt sugározzanak. Az elektromos tűzhely fűtőelemének izzása jó példa erre. Minden nem nulla hőmérsékletű test ad le némi hősugárzást, de a tiszta feketetest-sugárzás csak a hőmérséklettől függ, nem befolyásolja a szín, a fényvisszaverő képesség vagy a test egyéb tulajdonságai. Egy alacsony hőmérsékletű fekete test elsősorban infravörös hullámhosszakon vagy akár a rádiótartományban sugároz, de ahogyan növeljük a hőmérsékletét, egyre több látható fényt, ultraibolya, majd végül röntgensugárzást bocsát ki.

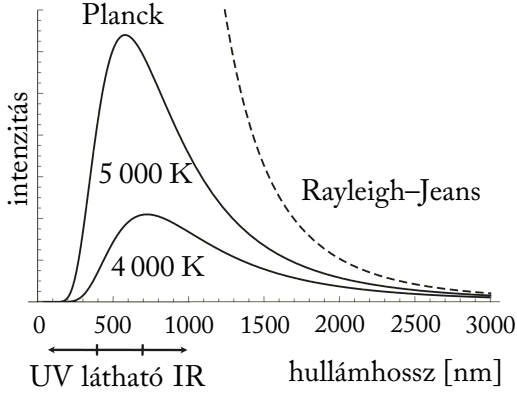
A feketetest-sugárzás tehát látszólag egyszerű fizikai problémát jelent (lásd még a „gömb alakú tehén" esetét). Van hőmérséklete, de semmilyen más tulajdonsága nem számít. A hőmérséklet a testben ide-oda mozgó atomok mozgási energiáját méri, ezek az atomok pedig töltött részecskéket tartalmaznak, amelyek mozgása elektromágneses sugárzás kibocsátásához vezet. A fizikai probléma az, hogy a test mennyi sugárzást bocsát ki az egyes hullámhosszakon.

A 19. századi fizikusok nekiláttak, hogy megmérjék a sugárzás intenzitását a hullámhossz függvényében, azaz felvegyék a fekete test színképét, illetve elméletileg is kiszámítsák azt. A mért görbe gyönyörű: a rövid hullámhosszakon nullától emelkedik egy hőmérséklettől függő csúcsig, majd a hosszú hullámhosszakon szépen tart a nullához.

Az elméleti helyzet azonban zűrzavaros volt. A Wilhelm Wien által 1896-ban javasolt egyik megoldás rövid hullámhosszakon jól illesz-

kedett, de hosszabb hullámhosszakon eltért a kísérleti adatoktól. Egy másik, John Strutt (Lord Rayleigh) által 1900-ban kidolgozott elmélet pedig éppen fordítva működött: hosszú hullámhosszakon jól illeszkedett, de rövid hullámhosszakon nem. Sőt, rövid hullámhosszakon végtelen mennyiségű sugárzási energiát jósolt.

Rayleigh – később James Jeans által továbbfejlesztett – számításairól általában úgy tartják, hogy pontosabban tükrözik azt, amit megfigyelhetnénk, ha a világ valóban a klasszikus módon működne. E számítások rövid hullámhosszakon bekövetkező kudarcát az **ultraibolya-katasztrófa** elnevezéssel illették, mivel a fizikusok minden, a látható tartománynál rövidebb hullámhosszúságú sugárzást hajlamosak ultraibolya vagy egyszerűen UV-, a látható tartománynál hosszabb hullámhosszúságú sugárzást pedig infravörös vagy IR-sugárzásnak nevezni. (Az elmélet és a kísérlet közötti bármilyen eltérést pedig katasztrófának.) Az IR-jelenségek megértésének viszonylagos könnyűsége, illetve az UV-jelenségek megértésének viszonylagos nehézsége akkor válik különösen hangsúlyossá, amikor elérkezünk a kvantumtérelmélethez.



Max Planck német fizikus – akinek a történet szerint egyik professzora azt mondta, hogy ne foglalkozzon fizikával, mert „már majdnem mindent felfedeztek" – úgy döntött, hogy nekilát a problémának. 1900-ban sikerült levezetnie egy olyan képletet, amely kompromisszumot jelentett a Wien- és a Rayleigh–Jeans-féle formulák között, és mind a

hosszú, mind a rövid hullámhossztartományban (valamint a kettő között is) megfelelt a megfigyeléseknek, méréseknek. Eredménye, a híres **Planck-féle feketetest-sugárzási törvény** minden λ hullámhosszra megadja egy T hőmérsékletű test B intenzitását:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \tag{1.1}$$

A T hőmérsékleten és a λ hullámhosszon kívül ez a kifejezés három rögzített paramétertől függ: a c fénysebességtől, a termodinamikából származó k_B Boltzmann-állandótól és egy új h állandótól, amelynek értékét Plancknak kellett kitalálnia a képlet teljessé tételéhez. Ez a ma **Planck-állandó** néven ismert mennyiség mindenütt megjelenik, ahol a kvantummechanika releváns szerepet játszik:

$$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\,s}. \tag{1.2}$$

A J (joule) az energia egysége, és megegyezik azzal a mennyiséggel, amelyet egy egywattos izzólámpa egy másodperc alatt felvesz. Különböző okokból a h-t gyakran 2π-vel elosztva használjuk, így a **redukált Planck-állandót** a

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \tag{1.3}$$

módon határozzuk meg, és úgy ejtjük, hogy „hávonás". Hamarosan látni fogjuk, hogy ez az állandó alapvető jelentőségű, ezért célszerű olyan mértékegységrendszert választani, amelyben $\hbar = 1$, ahogyan a relativitáselmélettel dolgozva is kényelmes a fénysebességet $c = 1$ értékre állítani. Egyelőre azonban még ne tegyünk így.

Planck először nem is levezette, inkább kitalálta a képletét. Kidolgozta a megfelelő matematikai eljárásokat, amelyekkel a Wien- és a Rayleigh–Jeans-féle eredményeket egyetlen kompakt kifejezésben egyesítette. De keményen dolgozott azon, hogy megértse, miért működik a képlete ilyen jól. A feladat részben azért volt nagy kihívás Planck számára, mert alapjában véve konzervatív fizikus volt. Nem rajongott a Maxwell- és Ludwig Boltzmann-féle statisztikus mechanikáért, amely

a termodinamikai törvényeket nagyszámú atom kollektív viselkedésével akarta magyarázni, sőt még maguknak az atomoknak a létezését is kétkedve fogadta. Élete későbbi részében is szkeptikusan viszonyult a kvantummechanika fő alapvetéseihez. Ez azonban nem akadályozta meg abban, hogy ráleljen arra a zseniális feltevésre, amely megoldotta a feketetest-sugárzás rejtélyét.

A sorsdöntő feltételezés a következő volt: amikor egy testben egy töltött részecske ide-oda rezeg és elektromágneses sugárzást bocsát ki, a sugárzásban távozó energia mennyisége nem lehet akármilyen kicsi. Ehelyett a kibocsátás diszkrét adagokban történik, az adag pedig a hullám f frekvenciájától függ, amely a hullám λ hullámhosszával és a c fénysebességgel az $f = c/\lambda$ módon fejezhető ki. A nagyobb frekvenciájú fényhullámok energiaadagjai is nagyobbak a ma már jól ismert

$$E = hf \tag{1.4}$$

képlet szerint, amelyben ismét megjelenik a Planck-állandó. Mivel a frekvencia helyett sokszor kényelmesebb az $\omega = 2\pi f$ körfrekvencia használata, az egyenlettel gyakran az $E = \hbar\omega$ formában találkozhatunk.

RÉSZECSKEKÉNT VISELKEDŐ HULLÁMOK

Mi az oka annak, hogy a kibocsátott sugárzás energiája diszkrét adagokban érkezik, ahelyett hogy bármilyen kicsiny értéke lehetne? Talán az, hogy a fekete test részecskéi csak diszkrét módon rezegnek. De egy alternatív magyarázat is eszünkbe juthat: nem a rezgés diszkrét, hanem a kibocsátott fény. Más szóval a fény valójában diszkrét egységek – részecskék – áramlása.

Planck azonban nem merészkedett olyan messzire, hogy ezt mondja; kijelentése csak a kibocsátott energia mennyiségére vonatkozott, nem pedig arra, hogy az milyen formát ölt. Régi probléma, hogy a fény részecske-e vagy hullám, amely legalább Isaac Newtonig és Christiaan Huygensig nyúlik vissza: előbbi a részecskék, utóbbi a hullámok mellett foglalt állást. Maxwell egyenleteinek megjelenését követően azonban a

fizikusok meg voltak győződve arról, hogy a fény hullám. Kísérletek bizonyították, hogy a fény interferál önmagával, és a várakozásunknak megfelelően találkozáskor a hullámok pozitív és negatív részei kioltják egymást. Arról nem is beszélve, hogy Maxwell a fény természetét az elektromágnesség elméletével magyarázta, amely számos más okból is sikeres volt. Így valószínűtlen felvetésnek tűnt az elképzelés, hogy a fényben van valami részecskeszerűség, és a fizikusok úgy gondolták, már rég túlléptek ezen a koncepción.

A huszonhat éves Albert Einstein volt az, aki megtette a nagy lépést. 1905-öt Einstein „csodálatos éveként" *(annus mirabilis)* emlegetik: ez volt az az év, amely során egy tanulmánysorozatban felvázolta a speciális relativitáselmélet alapjait, megfogalmazta a tömeg és az energia közötti kapcsolatot, a Brown-mozgást (mikroszkopikus részecskék véletlenszerű mozgását folyadékban) pedig az atomok ütközéseivel magyarázta, ami végleg meggyőzte a tudósokat az atomok létezéséről. Ezen eredmények bármelyike megalapozta volna egy átlagos tudós karrierjét, de Einstein még csak Nobel-díjat sem kapott értük.

Nobel-díját a fény **energiakvantumairól** szóló elképzelés felvetéséért kapta. A „kvantum" azt jelenti, „a legkisebb rész, amire valami feloszthatő". A **foton** szót csak később alkották meg, de Einstein pontosan ezt javasolta: a fény részecskékből áll, amelyeket ma fotonoknak nevezünk.

A célja ezzel az volt, hogy megmagyarázza a **fényelektromos hatás** némileg homályos jelenségét. Ha egy fémlemezre fényt bocsátunk, az néha meghatározott energiájú elektronokat bocsát ki. A hatás nem függ a fény intenzitásától vagy erejétől, ahogyan azt várnánk, ha a fény folytonos energiahullám lenne, csak annak frekvenciájától. Ez viszont csak akkor értelmezhető, ha a fény energiacsomagokban (kvantumokban, fotonokban) érkezik, amelyek egyedi energiáját (az 1.4) egyenlet adja meg. Ha egy foton energiája elegendő ahhoz, hogy egy elektront kiüssön a fémből, akkor ez meg is történik, ha viszont nem, akkor nem számít, hány fotont küldünk, az elektronok biztonságban a helyükön maradnak. Ez az elképzelés – ahogyan azt Einstein megjegyezte – elegendő a feketetest-sugárzásra vonatkozó Planck-formula magyarázatához is.