

ISAAC ASIMOV

Egy kis csomag energia

Amikor nagyra becsült kiadóm, a Doubleday, ismét megjelentette az *Én, a robot* c. könyvem, nagy meglepéssel nyugtáztam, hogy bizonyos (nyilvánvalóan intelligens és jó ízléssel megáldott) kritikusok mint „klasszikus” művet kezdik emlegetni.

Ez a szó, „klasszikus”, származását és értelmét tekintve nem különbözik a hétköznapi szóhasználat „klassz” szavától; megfelelőbb szót az *Én, a robot* jellemzésére magam sem találnék; eltekintve attól (és ez szerénységemnek tudható be), hogy inkább belepusztulnék, mintsem nyíltan hangoztassam a fenti véleményeket. Itt is csak azért említem meg, mert most bizalmasan beszélek. Mindazonáltal a „klasszikus” szónak van egy másodlagos jelentése, amelyet nem szeretek. Ez a szó akkor kezdett önálló életet élni, amikor a reneszánsz művészei ezzel a jelzővel illették a régi görögök és rómaiak azon műalkotásait, amelyek saját erőfeszítéseik modelljéül szolgáltak. Ezt követően a „klasszikus” már nemcsak azt jelentette, hogy jó, hanem azt is, hogy régi.

Ami azt illeti, az *Én, a robot* jó néhány évvel ezelőtt jelent meg először, és ami a kötetben foglalt novellák keletkezésének idejét illeti... Nos, ne törődjenek vele. Mindenesetre úgy döntöttem, egy kicsit sértő, hogy elég öregnek találnak már egy klasszikus mű megírásához, és ezért a most következőkben egy olyan területről lesz szó, ahol a „klasszikus” jelző általában a sértés egy formája*

Természetesen a szóban forgó területnek olyannak kell lennie, ahol ami régi, az egyben szinte automatikusan rossznak és hiányosnak is számít. Az ember beszélhet fitymálva modern művészetről, modern irodalomról vagy modern bútorokról, és közben — természetesen hátrányukra — összehasonlíthatja őket régi korok műremekeivel. De ha valaki modern természettudományról beszél, akkor le kell emelnie és áhítatosan szívéhez kell, szorítania kalapját.

A fizikára ez különösképpen áll. Van modern fizika és van (mintegy mellékesen és elnéző félmosollyal) klasszikus fizika. Mi több, a kettőt elválasztó határvonal a fizikában kifejezetten éles. Minden, ami 1900 után született, az modern, minden, ami 1900 előtt, az klasszikus.

Mindez meglehetősen önkényesnek tűnhet, szűk látókörű XX. századbeli nézőpontnak. A datálás, furcsa módon, mégis teljesen jogos. Az 1900. évben ugyanis egy alapvető fizikai elmélet látott napvilágot, és vonult be a tankönyvekbe, és azóta semmi sem a régi.

Gondolom, közben már kitalálták, ez az, amiről a továbbiakban beszélni fogok.

A dolog még 1859-ben, Gustav Robert Kirchhoff-fal kezdődött, aki Robert Wilhelm Bunsennel (a Bunsen-égő népszerűsítőjével) a spektroszkópia úttörője volt. Kirchhoff fedezte fel, hogy minden kémiai elem izzásba hozva csak rá jellemző, különböző karakterisztikus frekvenciákból álló fényt bocsát ki magából; és hogyha ennek az elemnek a gőzét egy nála melegebb anyag sugárzásának tesszük ki, akkor ebből a sugárzásból ugyanazokat a frekvenciákat nyeli el, amelyeket maga is kisugározna. Röviden, valamely anyag olyan frekvenciájú fényt nyel el, amelyet más körülmények között maga sugároz ki, és fordítva, olyan frekvenciákon sugároz, amelyeken más körülmények között elnyeli a

fényt* Képzeljünk el most egy testet, amely a rá eső sugárzást, bármilyen frekvenciájú legyen is az, teljesen elnyeli. Ez azt jelenti, hogy róla a fény, legyen az bármilyen frekvenciájú, nem verődik vissza, ezért a testet teljesen feketének látjuk* Ez az ún. „abszolút fekete test”. Kirchhoff rámutatott, hogy egy ilyen test izzításakor szükségképpen minden frekvencián sugározni fog. Ezt a típusú sugárzást nevezzük „feketetest-sugárzás”nak.

Természetesen abszolút fekete test nincs. Az 1890-es években azonban Wilhelm Wien német fizikus kigondolt valamit, amivel megkerülhetjük ezt a problémát. Képzeljünk el egy zárt kemencét, amelyen csak egyetlen kis nyílás található. Ha ezen a nyíláson sugárzás lép a kemencébe, a szemközti fal ennek egy részét elnyeli, másik részét visszaveri. A visszavert sugárzás egy másik falba ütközik, amely megint elnyel belőle egy részt, és a maradékot visszaveri. Az ismételt

visszavert sugárzás újabb falba ütközik és így tovább. Végeredményben az egész sugárzás elnyelődik anélkül, hogy megtalálná az utat a kis nyíláson át a külvilágba. Azaz, ez a kis nyílás olyan, hogy a rá eső sugárzást teljességgel elnyeli anélkül, hogy valamit is visszaverne belőle: tehát fekete testként viselkedik ! Ha a szóban forgó kemencét felfűtjük, a nyíláson kilépő sugárzásnak feketetest-sugárzásnak kell lennie, és Kirchhoff érvelése szerint az összes frekvenciát tartalmaznia kell.

Wien tanulmányozta a fekete test sugárzásának a tulajdonságait, és azt találta, bármely hőmérsékleten a test valóban igen széles frekvenciasávban sugároz, de a sugárzás intenzitásának eloszlása nem egyenletes. Bizonyos, a frekvenciasáv közepe táján található frekvenciákon a sugárzás nagyobb intenzitású, mint a magasabb vagy alacsonyabb frekvenciákon. Továbbá a hőmérséklet növekedésével az intenzitásmaximum magasabb frekvenciák felé tolódik el. Ha az abszolút hőmérséklet a kétszeresére nőtt, az intenzitásmaximumhoz tartozó frekvencia is kétszerese volt az előzőnek. Felvetődött a kérdés: miért ilyen a fekete test sugárzásának intenzitáseloszlása? Hogy szemléletesebbé tegyük, mi a zavarba ejtő a jelenségben, vegyük példaként az infravörös, a látható és az ibolyántúli fényt. Az infravörös fény frekvenciatartománya a 1 00 000 000 000/másodperctől a 400 000 000 000 000/másodpercig terjed. Ugyanezek a frekvenciák 10 hatványaival felírva: 10^{11} /sec, ill. $4000 \cdot 10^{11}$ /s. Látható fényre a két határfrekvencia $4000 \cdot 10^{11}$ /s (vörös) és $8000 \cdot 10^{11}$ /s (kék), míg az ultraibolya fény határfrekvenciái: $8000 \cdot 10^{11}$ /s és $300 000 \cdot 10^{11}$ /s.

Feltehető, hogyha a fekete test minden sugárzást egyformán elnyel, akkor ugyanilyen könnyen képes bármilyen frekvencián sugározni. Tetszőleges hőmérsékleten a kisugárzott energiának egyenletesen kellene eloszlania a színek összes frekvenciáján.

Válasszunk ki most véletlenszerűen számokat 1 és 300 000 között. Ha ezt milliárdszor megismételjük, a számok 1,3%-a fog 1 és 4000, 1,3%-a 4000 és 8000, végül 97,4%-a 8000 és 300 000 közé esni.

Eszerint azt várhatjuk, hogy a fekete test által kisugárzott energia 1,3%-a az infravörös, 1,3%-a a látható és 97,4%-a az ibolyántúli fény tartományába esik. Ha a hőmérséklet emelkedik, és több energiát kell kisugározni, akkor mindhárom tartományra arányosan több energiának kellene jutnia. És ekkor még nem vettük számításba az ibolyántúlinál is magasabb frekvenciájú sugárzásokat. Ha számításainknál a röntgensugárzást is figyelembe vesszük, kiderül, hogy bármilyen hőmérsékleten számolunk, a látható fény tartományára alig jut valamicske energia. Az összes energia, amit fekete testünk kisugároz, az ultraibolya és a röntgen tartományba esne.

Egy angol fizikus, Lord Rayleigh (1842-1919) egy olyan egyenletre jutott, amely épp ezt fejezte ki: a fekete test sugárzásának energiája a kisugárzott fény frekvenciájával arányosan nő. A tapasztalat azonban azt mutatta, hogy valójában van egy frekvencia, amelyen a kisugárzott energia maximális, és magasabb frekvenciákon fokozatosan egyre kevesebb energiát sugároz ki a fekete test. Rayleigh egyenlete nem volt érdektelen, de nem írta le a valóságot.

Fizikusok rámutattak, ha Rayleigh számításai igazak lennének, ez az ún. „ultraibolya-katasztrófához” vezetne: minden test, amely sugároz, összes energiáját ibolyántúli vagy még magasabb frekvenciájú fény formájában sugározná ki.¹

Ez azonban szerencsére nem így van: a sugárzó test energiáját zömében alacsony frekvenciákon sugározza ki. 1000 °C alatt az intenzitásmaximum az infravörösbe, e fölött – mintegy 6000 °C-ig, a Nap felszínének hőmérsékletéig – a látható fény tartományába esik.

A baj az volt, hogy Rayleigh egyenletét megdönthetetlenül igaznak hitt fizikai elvekre alapozva állította fel. Mondhatnánk, műve a klasszikus fizika remeke volt.

Wien maga is levezetett egy egyenletet, amely jól leírta a fekete test sugárzásának intenzitáseloszlását magas frekvenciákon, anélkül hogy meg tudta volna magyarázni, miért működik ez az egyenlet jól ezeken a frekvenciákon, és miért nem használható az alacsony frekvenciájú tartományban.

Mindent összevéve, fekete, nagyon fekete volt a fizikusok hangulata az 1890-es évek vége felé.

¹ Ha ez igaz lenne, például a villanykörte fénye szempillantás alatt kék színbe, majd ibolyántúliba, végül halálos gammasugárzásba csapna át. (Pápay Kálmán)

Aztán, 1899-ben új bajnok jelent meg a színen, Max Karl Ernst Ludwig Planck német fizikus. És ő a következőképpen érvel ..*

Ha megtámadhatatlan érveléssel gyönyörű egyenleteket állítunk fel megtámadhatatlan fizikai elvekből kiiindulva, és ezek az egyenletek mégsem írják le a valóságot, úgy vagy az érvelésünkben, vagy a fizikai elvekben kell a hibát keresnünk. Esetleg mind a kettőben.

És ha az érvelés tényleg megtámadhatatlan (valóban ez volt a helyzet), akkora kiindulásul szolgáló fizikai alapokat kell módosítani.

Az akkori fizika alapvető elvei szerint feltételezni kellett, hogy a fekete test minden frekvencián egyforma valószínűséggel sugároz, ezért Planck azt javasolta, induljunk ki az ellenkezőjéből, abból, hogy a sugárzás valószínűsége minden frekvencián más és más. A tapasztalatból kiindulva Planck azt javasolta, a sugárzás valószínűségét vegyék fordítottan arányosnak a frekvencia nagyságával, hiszen ahogy egyre magasabb és magasabb frekvenciák felé haladunk, a sugárzás intenzitása csökken.

Planck feltételezését elfogadva két, egymás ellen dolgozó effektussal van dolgunk. Az első a kisugárzott frekvencia véletlenszerűségének kedvez, és a frekvencia növekedésével a kisugárzott energia megnövekedését vonja maga után. A második – Planck szerint – a frekvencia növekedésével a sugárzás valószínűségének és így intenzitásának csökkenését eredményezi.

Alacsony frekvenciákon az első hatás dominál, de a magas frekvenciákon egyre inkább a második érvényesül. Ezért a fekete test sugárzásának intenzitása a frekvencia emelkedésével egyre növekszik, elér egy maximális értéket, majd – még magasabb frekvenciák felé – ismét csökken: úgy, ahogy azt megfigyelték.

Változzon most fekete testünk hőmérséklete. Az első hatást ez nem befolyásolja: ami véletlenszerű, az ettől nem függhet. De mi történik, ha a hőmérséklet emelkedésével megnő a magasabb frekvenciákon való sugárzás valószínűsége? Ez nyilvánvalóan a második hatás gyengülését eredményezi: a sugárzás intenzitása magasabb frekvenciáig fog zavartalanul növekedni, a gyengülő második hatás később kezd csak dominálni. Ennek következtében az intenzitás maximum egyre magasabb frekvenciák felé tolódik el – pontosan úgy, ahogy azt Wien megfigyelte.

Az előbbieken alapján Planck kidolgozott egy egyenletet, amely most már mind az alacsony, mind a magas frekvenciákon helyesen írta le a fekete test sugárzását* Mégis, bármennyire is helyesnek bizonyult az a feltételezés, hogy magasabb frekvenciák felé a sugárzás valószínűsége csökken, még mindig megválaszolatlan a kérdés: miért van ez így? Az akkor ismert fizikai törvények erre nem adtak magyarázatot, ezért Plancknak valami újjal kellett előállnia.

Vessük el egy pillanatra azt az akkoriban uralkodó, általános felfogást, amely szerint az energia folytonosan áramlik, és feltételezzük helyette, hogy kis csomagokban kerül kisugárzásra !

Feltételezzük továbbá, hogy egy sugárforrás addig nem sugároz ki fényt egy adott frekvencián, ameddig a frekvenciától függő, megfelelő nagyságú energiacsomag nem akkumulálódott.

Planck szerint minél magasabb a szóban forgó frekvencia, annál nagyobb az „energiacsomag”, és annál kisebb a valószínűsége annak, hogy ez adott pillanatban rendelkezésre áll. Az energia legnagyobb része így alacsony frekvenciákon sugárzódik ki, ahol a szükséges energiacsomagok kisebbek, és így könnyebben akkumulálódnak. Ez az oka annak, hogy egy 400 °C hőmérsékletű test már teljes energiáját az infravörös tartományban, tehát hő formájában sugározza ki. Ebben az esetben olyan kis számú energiacsomag gyűlik össze a látható fény tartományában, hogy a test izzását szemünk nem érzékelheti.

Ahogy a hőmérséklet növekszik, megnő a valószínűsége annak, hogy a magasabb frekvenciák igényelte nagyobb energiacsomagok is könnyen akkumulálódnak. 6000 °C-on a kisugárzott energiacsomagok már a látható fénynek megfelelő nagyságrendbe esnek, de az ultraibolya fény kisugárzásához szükséges energiacsomagok még elenyésző számúak.

De vajon mekkora egy ilyen energiacsomag? Vajon mekkora energiát képvisel? Mivel ez a „mekkora” kulcskérdés, Planck csodálatra méltó merészséggel az „energiacsomagot” kvantumnak nevezte el, ami latinul annyit tesz mint „mekkora” ?

Planck egyenlete megkívánta, hogy a kvantum nagysága arányos legyen a sugárzás frekvenciájával. Ha a kvantum nagyságát, ha úgy tetszik, az általa képviselt energia nagyságát E -vel jelöljük, és a

amelyet a klasszikus fizika nem tudott értelmezni, Planck kvantumelmélete alapján megmagyarázható.

A fizikusok megdöbbenek: Planck a kvantum fogalmát azért vezette be, hogy a fekete test sugárzását értelmezni lehessen, és most kiderült, hogy a fogalom alkalmas a fényelektromos hatás magyarázatára is, amely az előzőtől merőben különböző jelenség volt* A kvantumok létezésének feltételezése hirtelen nagyon ésszerűnek tűnt.

(Einstein negyedik és ötödik dolgozata, A speciális relativitás elmélete, a világegyetemről alkotott képünket módosította jelentősen. Ezekben a dolgozatokban találkozunk először a híres $E = m \cdot c^2$ egyenlettel is*)

A fenti dolgozatokban foglaltakat általánosította később, 1915-ben, amikor kidolgozta Az általános relativitás elméletét, amely ismertté tette nevét a fizikusvilágon kívül is* Érdemes megjegyezni, hogy amikor 1921-ben neki ítelték a fizikai Nobel-díjat, ezt fényelektromos hatás értelmezéséért, és nem a relativitás elmélet kidolgozásáért kapta.)

A Planck-állandó értéke olyan hihetetlenül kicsiny, hogy a mi makroszkopikus világunkban nyugodtan figyelmen kívül hagyhatjuk. A mindennapi élet eseményeinek leírásakor az energiát „első közelítésben”, folytonosnak tekinthetjük.

Azonban ha egyre kisebb és kisebb energiákat cserélő folyamatokkal foglalkoztunk, a folyamatok kvantumos természetét egyre inkább figyelembe kell vennünk. Egy olyan lépcső, amely 1 mm magas és 3 mm széles lépcsőfokokból áll, egy 180 cm magas ember számára egy finoman recézett rámpának tűnik csupán. Egy hangya méretű ember számára viszont a lépcső megmászása komoly nehézséget jelent. Végül egy baktérium nagyságával összemérhető ember a lépcsőt szakadékokkal szabdalta hegyvidéknek látja.

Hasonlóképpen, mikor a fizikai kutatások behatoltak a mikroszkopikus világba, kiderült, az atomon belül egy kvantumugrás óriási lépés. Ezért az atomfizikában a klasszikus fizika módszerei használhatatlanok. Az első, aki ezt világosan látta, Niels Bohr dán fizikus volt. 1913-ban Bohr rámutatott, hogyha egy elektron energiát vesz fel, akkor egy egész kvantumot kell egyszerre elnyelnie, és mivel az elektron számára egy kvantum óriási energia, ezért elnyelése azonnal és drasztikusan megváltoztatja az atomon belüli viszonyokat.

Bohr úgy képzelte, hogy az elektron az atommag körül rögzített pályán kering, de amikor elnyel egy energiakvantumot, hirtelen egy, a magtól távolabbi pályán találja magát, és ez az átmenet hirtelen és ugrásszerű.

Bohr elmélete szerint a lehetséges pályák száma korlátozott, és az atom csak bizonyos meghatározott méretű kvantumokat képes elnyelni, olyanokat, amelyek elegendő nagyok ahhoz, hogy az elektront az egyik megengedett pályáról a másikra emeljék. Ha az elektron valamelyik külső pályáról egy megengedett belső pályára kerül, egy (vagy több) energiakvantumot sugároz ki. A sugárzás frekvenciája az egyik pályáról a másikra történő átmenethez szükséges energiakvantum nagyságának megfelelő.

A spektroszkópia fejlődésének ezek az eredmények új lökést adtak. Az emberek kezdték érteni, miért sugároz minden kémiai elem (amely azonos típusú atomokból épül fel, azonos elektronszerkezetű, az illető elemre, atomra jellemző energiaviszonyokkal) csak bizonyos frekvenciákon és csak akkor, ha izzítjuk. Érthetővé vált az is, miért képes valamely anyag sugározni azokon a frekvenciákon, amelyekeken más körülmények között energiát nyel el.

Más szóval Kirchhoff elindított valamit a fizikában, amely végül oda vezetett, hogy tapasztalati törvényeit racionális alapokra lehetett helyezni.

Bohr modellje túlszimplifikáltnak bizonyult; de ő és mások sorozatos módosításokkal elérték, hogy mind több és több jelenséget lehetett megmagyarázni vele. Végül 1926-ban Erwin Schrödinger osztrák fizikus egy olyan matematikai módszerrel jelentkezett, amely alkalmas volt az atom belsejében lejátszódó folyamatok, mozgások kvantumos értelmezésére. Megszületett a kvantummechanika, amely a klasszikus mechanikától eltérően nem Newton mozgástörvényeire épül, hanem a világ kvantumos természetéből indul ki, és a modern fizika alapjául szolgál.

PÁPAY KÁLMÁN FORDÍTÁSA