ha az elméletet néhány egyszerű, de hatásos modell-kísérlettel illusztráljuk.

A 10a, 10b, 10c ábrán bemutatott eszköz segítségével, gyufák alkalmazásával könnyen végezhetünk ilyen kísérleteket. A kísérleti eszköz egy lyukakkal ellátott kör alakú tárcsából áll. A lyukakba gyufákat csúsztattunk a 10a ábrán látható módon úgy, hogy csak a fejük álljon ki. Amikor a tárcsa közepén levő gyufát meggyújtjuk, láncreakció indul, és rövid időn belül minden gyufa lángra lobban. Ez a kísérlet az atombombában lejátszódó láncreakció alapelvét illusztrálja. A 10b ábra a tárcsa másik oldalát mutatja. Itt a lyukak körbefutó barázdákban végződnek. Ha néhány lyukba a gyufák helyett szögeket helyezünk (az ábrán fekete pontok), lehetővé válik a láncreakció szabályozása, így egyszerre csak néhány gyufa ég. A 10b ábrán látható elrendezésnél csak néhány gyufa ég egyidejűleg. A 10c ábrának megfelelő esetben több gyufa fog égni.

A tárcsa egyike azon eszközöknek, amelyeket a „Kérdezd a természetet!" program során fejlesztettünk ki. Nagyon hamar igen népszerűvé vált a dán iskolákban és ezért nagy mennyiségben állítottuk elő ezeket.

Vizsgán nem szereplő témák

Amikor egy magfizikai kurzust tervezünk minden fiatal számára, számításba kell vennünk, hogy a tanulóknak rendszerint vizsgázniuk kell. A gyakorlatban ennek sokszor az a következménye, hogy túl sokat összpontosítunk a vizsgán szereplő témákra és vonakodunk az olyanoktól, amelyek sokkal jobban megfelelnek a tanulói horizont szélesítésének. Amikor elkészítettünk egy atom- és magfizikai kurzust a „Kérdezd a természetet!" program keretében a 9 osztály részére, tudatában voltunk ennek a problémának és bár az idő rövidsége miatt meg kellett elégednünk egy minimum-kurzussal ahogy azt az előzőkben leírtam, elhatároztuk, hogy beleveszünk számos olyan témát, amit a tanulók szabad idejükben tanulmányozhatnak. Ezt úgy biztosítottuk, hogy ezeket „Olvasmányok" címen közöltük és a tanári kézikönyvben azt ajánlottuk, hogy ezeket a fejezeteket osztályvita háttereként használják fel, és hogy a tanár tisztázza ezekben a témákban a vizsgán nem szereplő kérdéseket.

A következő címek jelzik, milyen témákkal foglalkoztunk az „Olvasmányok" c. fejezetekben:

Radioaktivitás a házunkban
A radioaktivitás orvosi alkalmazásai
Sugárzási ártalmak
Nukleáris energia és a világ energiaellátása

A 10. osztály számára összeállítottunk egy másik atom- és magfizikai egységet. Ezt azoknak a tanulóknak szántuk, akik nem folytatják tanulmányaikat középiskolában, viszont maradnak még egy évig az általános iskolában. Itt is fontosnak tartottuk az „Olvasmányok" c. fejezeteket, így a következő témák szerepeltek az egyes egységek végén:

Niels Bohr, egyike a világ legnagyobb fizikusainak
A röntgensugárzás alkalmazásai
A radioaktivitás felfedezése
A radioaktív források felhasználása
Radioaktivitás és a Föld kora
CERN, a magfizika európai kutatóközpontja
A Föld születése
Az atomerőművek biztonsága

Úgy vélem, alapvető, hogy időt hagyjunk az ilyen témák megbeszélésére, amikor fizika kurzusokat tervezünk minden fiatal számára. Ezt kell tennünk, ha természettudományosan művelt polgárokat akarunk nevelni.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Angol nyelvű cikkek a „Kérdezd a természetet" c. programról, megtalálhatók az amerikai „The Physics Teacher" 1977. szeptemberi számában és a következő GIREP-publikációkban:
„Physics Teaching in Schools" (Szerk.: G. Delacote) (Taylor and Francis Ltd. London, 1978.)
„Physics Teaching, Oscillations and Waves, Current Problems" (Szerk.: Uri Ganiel) (Balaban International Science Services Philadelphia-Jerusalem)

A BŰVÖS KOCKA UNIVERZUMA

Gajzágó Éva*—Gnädig Péter—
Marx György—Zámbó Viktor**
ELTE Atomfizikai Tanszéke

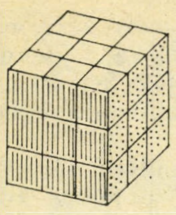
Irreverzibilitás

A rendezett bűvös kockát (1. ábra) add oda gyerekednek (tanítványodnak, barátodnak), és kérd meg: tekerjen rajta hatszor tetszőlegesen! Vedd vissza tőle a kockát, majd add át másvalakinek, megkérve: rendezze a kockát szintén hat tekeréssel! Nem fog neki sikerülni. Ellenkezőleg: a kocka eredeti színezése — ha lehet — mégjobban összekeveredik. (Még ha kockaszakértő is a második társad, hatnál sokkal több mozdulatra lesz szüksége, hogy visszataláljon az eredeti rendbe.) Ez az egyszerű foglalatosság élményszerűen tanít a Természet irreverzibilitására, és megsejteti annak magyarázatát is.***

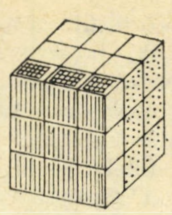
Egy kockának 6 lapja, 8 csúcsa és 12 éle van,

Műhelyfoglalkozás a GIREP és UNESCO Nemzetközi Fizikatanítási Konferenciáján Balatonfüreden, 1981. szeptember 10-én.

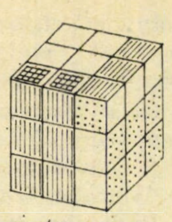
* Élet és Tudomány szerkesztősége
** a József Attila Gimnázium tanulója.
*** Az általunk használt színezés: fehér fenn, piros szemben, sárga jobbra, zöld balra, narancs hátul, kék alul.



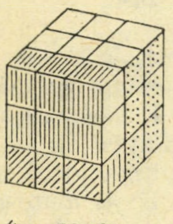
1.ábra: Vákuum: |0>



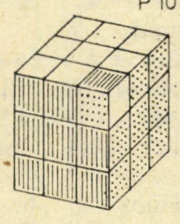
2.ábra: Piros forgatás: P |0>



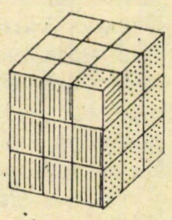
3.ábra: SP |0>



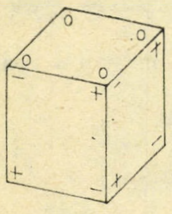
4. ábra: PS |0>



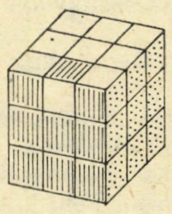
5. ábra: Kvark



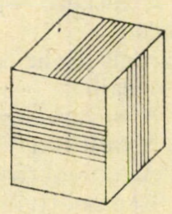
6. ábra: Antikvark



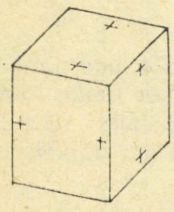
7. ábra: Bariontöltés



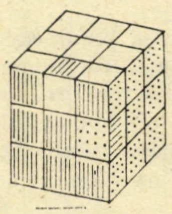
8.ábra: Lepton



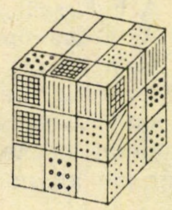
9. ábra: A főpántok



10. ábra: Leptontöltés



11. ábra



12.ábra: Hőhalál

ami összesen 26 elem. Rubik Ernő pontosan ennyi építőelemből alkotta meg a bűvös kockát. Nem látszanak túl soknak. Ha veszel 26 + 1 kockácskát, amelyek színezése a bűvös kocka kiskockáin található színezésnek felel meg, egy vagy két percen belül összerakhatsz belőlük egy nagy kockát, amelyen minden szín a megfelelő helyen van! De ezt nem tudod megcsinálni a büvös kockával. A bűvös kocka építőelemeinek száma csalókán kicsiny, de az elemek mozgásának dinamikája érdekesen megszabott. Ez teszi a bűvös kockát egy ismeretlen univerzummá.

Felcserélhetetlenség

Végy két kereket, mindegyik saját tengelyén foroghat. Egyik kereket fordítsd el 45°-kal az óramutató járásával egyező irányban, azután −180°-kal az óramutató járásával ellenkezően. Hajtsd végre a másik keréken is ugyanezt a két elfordítást, de fordított sorrendben. Mindkét kerék végállapota azonos lesz.

A gyárból kikerült bűvös kocka kiindulási állapotát jelölje $|0\rangle$. A bűvös kockát is lehet tekerni. Egy lap középső négyzete sohasem vándorol el helyéről, ezért az oldallapok tartósan jellemezhetők középső négyzetük színével. A „piros" lapréteg 90°-os elfordítása az óramutató járásának irányába egységmozdulatnak tekinthető, hiszen jobbkezes ember számára ez a természetes mozdulat, ha jobb tenyerében tartja a kocka piros oldalát. Jelöljük ezt a mozdulatot P-vel, a mozdulat által kialakított $P\,|0\rangle$ végállapot látható a 2. ábrán. Két piros fordulat egymás után (P^2) 180°-os elfordítást eredményez, három piros fordulat (P^3) 270°-osat, négy piros fordulat visszavisz a kiindulási állapotba ($P^4 = 1$). Természetesen a fehér, zöld, kék, sárga és narancs (középű) laprétegek is megtekerhetők + 90°-kal. Ezeket az egységmozdulatokat jelölje rendre F, Z, K, S, N.*** A kocka bármely $|x\rangle$ mintája elérhető a $|0\rangle$ rendállapotból az egységmozdulatok valamilyen kombinációjával. Így megkísérelhetjük, hogy a kocka egy tetszőleges mintáját

$$|x\rangle = F^aK^bN^cP^dS^eZ^f\,|0\rangle$$

alakban írjuk fel, ahol az *a, b, c, d, e, f* kitevők bármelyike a 0, 1, 2, 3 értékeket veheti fel. Ez összesen $4^6 = 4096$ különböző kombinációt tesz lehetővé, 4096 eltérő mintát ad. Nem is tűnik olyan elképesztően soknak...

De végy egy $|0\rangle$ gyári állapotú kockát! Csinálj egy piros, majd egy sárga egységfordulatot! ($SP\,|0\rangle$; eredményünk a 3. ábrán látható.) Egy másik $|0\rangle$ rendállapotú kockán előbb csinálj egy sárga, ezután egy piros fordulatot! ($PS\,|0\rangle$ látható a 4. ábrán.) A kapott két minta lényegesen különbözik! *Három dimenzióban* a forgatások nem cserélhetők fel: $PS \neq SP$. Ez ijesztően megnöveli a minták számát.

Próbáljuk kitalálni, hány különböző minta képzelhető el. A lapközépső kiskockák nem vándorolnak el helyükről. A 8 csúcshelyzetű kiskocka 8!-féleképpen osztható szét a csúcsokra, adott csúcson minden kiskocka 3 különböző állásban helyezhető el. A 12 élhelyzetű kiskocka 12!-féleképpen osztható szét az élközepekre, adott élen minden kiskocka számára 2 különböző állás lehetséges. Így a lehetséges kirakások száma $8!\ 3^8\ 12!\ 2^{12} =$ $= 519\,024039\,293678\,272000$. Jókora szám! Rubik Ernő kockája *háromdimenziós* struktúra, és ez annak leglényegesebb vonása.

Kiválasztási szabályok

Hámozd le egy csúcshelyzetű kiskocka színes műanyag négyzeteit (deus ex machina!), majd úgy ragaszd vissza e színes négyzeteket, ami a kiskocka 1/3 fordulatának felelne meg ($|q\rangle$ állapot, 5. ábra)! Kérj meg ezután egy kockamestert, hogy a $|0\rangle$-ból kiindulva hozza létre ezt a $|q\rangle$ állapotot!

A gyári állapotból szabályos tekerések sorozatával nem lehet elsétálni ehhez a „megcsavart" állapothoz, a $|q\rangle$ minta nem fordul elő a bűvös kocka univerzumában. A $|q\rangle$ csúcsmintát nevezzük *kvark*-nak. (A részecskefizikusokat sok hiábavaló kísérletezés tanította meg: senki nem tud a vákuumba magános kvarkot teremteni!)

Ha valaki mégegyszer meghámozza ugyanezt a csúcshelyzetű kiskockát, majd a színes négyzeteket úgy ragasztja vissza, ami a rendezett színezés —1/3 fordulatának felelne meg (tehát most az óramutató járásával ellentétes irányban), akkor $|q\rangle$ *antikvark* állapotot kapjuk (6. ábra). Ez is kívülesik a kockauniverzumon. (Az 5. minta sem tekerhető át a 6. mintába, $|q\rangle$-tól sem lehet $|\bar{q}\rangle$-ig elsétálni. „Túlvilág" is több van!) A tapasztalat tehát megtanít arra, hogy bizonyos minták elérhetetlenek.

A két kvarkcsúcsot tartalmazó $|qq\rangle$ minta szintén elérhetetlen, ha a $|0\rangle$ gyári állapotból indulunk el. (De van összeköttetés a $|qq\rangle$ kétkvark-állapot és a $|q\rangle$ antikvark-állapot között. Hiszen ha deus ex machina — hámozás — által duplán megcsavarunk egy csúcsot, észrevesszük, hogy egyetlen kétkvark-csúcs azonos egy antikvark-kvark-csúccsal.)

A három darab kvark-csúcsot tartalmazó $|qqq\rangle$ minta már elérhető a $|0\rangle$ „vákuumból" természetes mozdulatok sorozatával. (A részecskefizikusok kvarkmodelljével összhangban nevezzük ezt proton-állapotnak!) Ugyanúgy eljuthatunk egy kvarkot és mellette egy antikvarkot tartalmazó $|q\bar{q}\rangle$ mezon-állapotba is. S. W. Golomb (University of South Carolina, USA) fedezte fel: ily módon a bűvös kocka a kvark-modell árnyalt szemléltetését kínálja. Arra tanít, hogy a kvark elsősorban algebrai fogalom, amelyet nem kell feltétlenül korpuszkulának, azaz testecskének tekintenünk a szó tradicionális értelmében. Ahogy W. Golomb megfogalmazta: „A Rubik-kocka a matematikai és fizikai valóság egyik formája. A kvarkok, amelyekből minden hadron felépül, ugyanezen valóság másik formája. Az egyik nem tökéletes modellje a másiknak. De mindegyik leírható a megengedett transzformációk valamilyen szimmetriacsoportjával. Az a körülmény, hogy olyan sok váratlan hasonlóság lép fel, örömet okoz a matematikusnak, és a két csoport kapcsolatának keresésére ösztönöz."

Megmaradási törvények

A kiválasztási szabályok a bűvös kocka univerzumának közlekedési szabályaiból adódnak. Eredetük könnyen megérthető, ha megmaradási törvényekként fogalmazzuk meg őket. E megmaradási törvényeket a Rubik-KRESz-ből vezethetjük le.

Bariontöltés

Végy egy rendezett kockát, a fehér lap van fölül. Írj „0" jelet a felső és alsó lap mindegyik csúcshelyzetű négyzetére! A többi lap csúcshelyzetű négyzeteire írj + 1/3, illetve — 1/3 számokat oly módon, hogy egy csúcs három oldalán a — 1/3, 0, + 1/3 értékek az óramutató járásával ellenkező irányban kövessék egymást (7. ábra). Most kezd el tekergetni a bűvös kockát! Minden tekerés után add össze a felső (fehér közepű) és az alsó lapokon található számokat! Azt tapasztalod, hogy ez az összeg — nevezzük bariontöltésnek — csak egész értéket vesz fel. Vákuumban a bariontöltés zérus. Nem nehéz bebizonyítani, hogy egy tetszőleges tekerés vagy változatlanul hagyja a bariontöltés értékét, vagy — nagyritkán — egységnyivel változtat rajta. Az 5. ábrán mutatott magános kvark állapotban a bariontöltés értéke + 1/3 volna, ez pedig nem érhető el a vákuumból. A proton-állapotban viszont (három darab kvark-csúcs) a bariontöltés értéke + 1, ide — némi ügyességgel — eljuthatunk.**** (A protonok születésének és protonok elbomlásának kutatása ma a részecskefizika divatos területei.)

Leptontöltés

Operáld ki a bűvös kocka egyik élközép-helyzetű kiskockáját! (Ez az egyik lapréteg 45°-os elfordítása után egy zsebkés segítségével sikerülhet.) Ezután a kivett kiskockát egy 1/2 fordulat után (röviden: megfordítva) tedd vissza. (Így a 8. ábrán mutatott lepton-mintát kapjuk.) Olyan mintát hoztunk létre deus ex machina által, ahová gyári állapotból nem juthatunk el a szabályos lépések sorozatával. De ha a bűvös kocka valamelyik másik élkockáját is kioperáljuk, és azt is 1/2 fordulat után tesszük vissza, a kapott két-leptonos állapot (azaz: bozon-állapot) már elérhető! E mögött az új kiválasztási szabály mögött is egy megmaradási törvény rejtőzik.

Kéri Gerzson nyomán értelmezzük a bűvös kocka főpántjait a 9. ábra által mutatott módon! (A láthatatlan oldalak főpántjai párhuzamosak az ábrán látható oldalak főpántjaival.) Végy egy rendezett kockát, és írj 1/2 számot minden olyan élközépső négyzetre, amely főpánton fekszik (10. ábra)! Ha a hat oldal összesen hat főpántján levő számokat összeadjuk, az eredmény 6 lesz. Ezután tekergesd a megszámozott bűvös kockát, és minden tekerés után ellenőrizd: mennyi a főpántokon megjelenő számok összege! Mindig egész szám jön ki! Ezt a „leptontöltésnek" nevezett összeget egyik mozdulat sem változtatja meg tört értékkel. A leptonok tehát párokban keletkeznek. A 8. ábrán mutatott „magános lepton" leptontöltése feles érték lenne, így az vákuumból nem jöhet létre.

Paritás

A bűvös kockából operálj ki két élhelyzetű kiskockát (a korábban leírt fogással). Tedd egyiket a másik, másikat az egyik helyére. Ha a leptontöltés tiltott tört értéket vesz fel, akkor a kialakult mintáról biztosan tudjuk, hogy az tekeréssel elérhetetlen. Ezért olyan állásban operáld vissza a felcserélt kiskockákat, hogy a kialakult minta leptontöltése ne legyen tiltott tört érték! — Egy másik kockából operálj ki két csúcshelyzetű kiskockát, majd egyiket a másik, másikat az egyik helyére oly módon illeszd vissza, hogy a kapott minta bariontöltése ne vegyen fel tiltott tört értéket! (11. ábra.) Innen próbálj szabályos lépésekkel visz-

**** Például: $P^2F^3Z^3SP^2ZS^3F^3P^2F^2NFN^3FNF^2N^3\,|0\rangle = |\text{proton}\rangle$. (A forgatások jobbról balra olvasandók.)

szatalálni a vákuumba! Mindhiába. Egy kiskockapár felcserélése szintén tiltott, ugyanúgy bármely más páratlan permutáció is. Nem nehéz belátni, hogy egy tetszőleges egységmozdulat a kiskockákon mindig páros permutációt hajt végre. Az a szám, amely megmondja, hogy egy minta a vákuumból hány permutációval jött létre, mindig páros marad. Csak a páros permutációval keltett (mondjuk így: páros paritású) minták érhetők el.

Egy csúcshelyzetű kiskocka — külső erőszakkal történt — megcsavarása, egy élhelyzetű kiskocka tükrözése, két kiskocka permutációja egymástól független műveletek, ezért három független megmaradási törvényre jutottunk. A bariontöltés egész voltának megmaradása harmadára csökkenti a vákuumból szabályosan elérhető minták számát. A leptontöltés egész voltának megmaradása felére csökkenti az elérhető minták számát. A paritás megmaradása (a permutációk párossága) ismét felezi az elérhető minták számát. Így a bűvös kocka univerzumában csak $8!\,3^7\,12!\,2^{10} = 43\,252003\,274489\,856000$ eltérő minta létezik. A mikroállapotok számának kiválasztási szabályokból adódó redukciója vajon megkönnyíti-e a visszatalálást a kiinduláshoz, a gyári állapotba? Korántsem! Éppen a közlekedési szabályok nehezítik meg a hazavezető rövid út fellelését. És ezek a közlekedési tilalmak a bűvös kocka szerkezetéből következnek. Belőlük mégsem könnyű visszakövetkeztetni a szerkezetre. Akárcsak a fizikában.

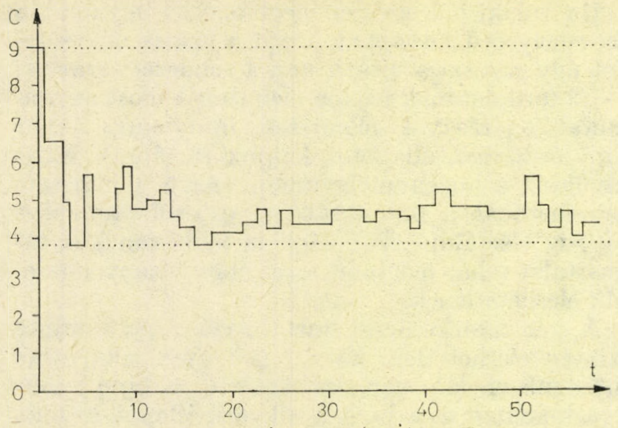
A második főtétel

A bűvös kocka univerzuma

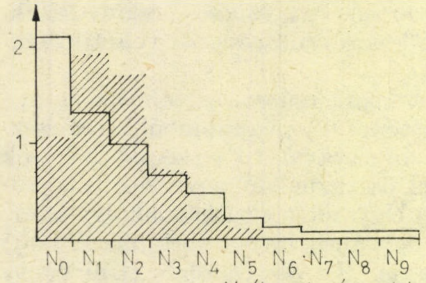
43 252003 274489 856000

mikroállapotból tevődik össze, és közülük csak egyetlen egy mikroállapot felel meg a tökéletes rendnek. Ez a magyarázata annak, hogy a laikus miért téved el olyan hamar ebben a világban: a rendes kockát néhány öntudatlan tekerés tarka tárggyá zilálja. Ha vaktában tovább tekergetünk, egész életünk nem elég, hogy visszataláljunk az őseredeti harmóniába. Irreverzibilisen bekövetkezett a ,,hőhalál" tarka állapota.

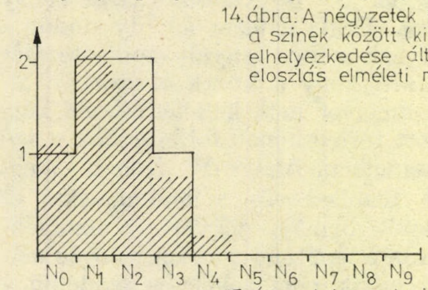
Ezt a tapasztalatot próbáljuk kvantitatívan megfogalmazni! Vegyük a színeket abc-rendben: fehér (F), kék (K), narancs (N), piros (P), sárga (S), zöld (Z). A bűvös kocka egyik lapjának színezettségét azáltal adjuk meg, hogy feljegyezzük: hány fehér, hány kék, ... négyzet van rajta. Pl. a 12. ábrán mutatott mintát hat fordulattal hoztuk létre az 1. ábra rendjéből: SKPFKS | 0⟩. A szemközti (pirosközepű) lap színezettségét a (2, 0, 1, 3, 1, 2) egész számsorozattal jellemezhetjük: két fehér négyzet, nincs kék négyzet, egy narancs négyzet, ... A hat szám egy hatdimenziós $\vec{C}$ színvektor koordinátáinak tekinthető. E színvektor hossza a kérdéses lap rendezettségét jellemzi. A 12. ábra szemközti oldalán $C = (2^2 + 0^2 + 1^2 + 3^2 + 1^2 + 2^2)^{1/2} = \sqrt{19}$. A színvektor a (0, 0, 0, 9, 0,



13. ábra: C változása időben



14. ábra: A négyzetek Boltzmann-eloszlása a színek között (kihúzott) és a négyzetek elhelyezkedése által torzított átlagos eloszlás elméleti menete (vonalkázva)



15. ábra: A leggyakoribb színeloszlás (kihúzott) és a tapasztalt átlagos színeloszlás (vonalkázott)

0) esetben (tökéletes rend) a leghosszabb: $C = 9$. Legteljesebb tarkaságnál, pl. (2, 1, 2, 1, 2, 1) esetében a színvektor a legrövidebb: $C = \sqrt{15} \simeq 4$. Csináljunk egy kísérletet! Ha gyári kockával indulunk, annak minden oldalán $C = 9$. Kezdjük el vaktában tekergetni! A bűvös kocka lapjai egyre tarkábbakká válnak. A színvektor össze-vissza billeg, de a hossza határozott zsugorodási tendenciát mutat. Például az eredetileg tiszta piros lap színvektorának hossza $C = 9$ értékről indul, de néhány mozdulat során $C = 5$ alá csökken, ezután eme kis érték körül ingadozik (13. ábra). A $C = 5$ értéknél csak kb. az esetek 10%-ában lesz nagyobb. ,,A színvektor az idő múlásával rövidülni szokott mindaddig, amíg csak tud." Ez a Második főtétel empirikus megfogalmazása a bűvös kocka világában, ami közvetlen ,,összekeveredési" tapasztalatunkat fejezi ki. A bűvös kocka univerzumban tehát létezik időirány! Rubik kockája többet kínál puszta geometriánál és csoportelméletnél. Termodinamikára tanít, méghozzá ezt provokatívan teszi.

Entrópia

A bűvös kockát türelmesen tekergetve, vagy a véletlen tekeréseket számítógépen szimulálva statisztikát készíthetünk pl. a fedőlap színezettségének alakulásáról. Azt találjuk, hogy a legtarkább színezettség, (2, 2, 2, 1, 1, 1 számok tetszőleges sorrendben, $C = \sqrt{15}$) meglepően ritkán fordul elő. Leggyakoribb a 3, 2, 2, 1, 1, 0 színeloszlás (tetszőleges sorrendben), tehát $C = \sqrt{19}$ értékhez tartozik a legtöbb mikroállapot. A 13. ábrán C e körül az érték körül ingadozik. Az egy C színeloszláshoz tartozó mikroállapotok (mintázatok) számának logaritmusát ezen eloszlás entrópiájának tekinthetjük. Legnagyobb entrópiával a 3, 2, 2, 1, 1, 0 színeloszlású lap (a színek tetszőleges sorrendjét megengedve) rendelkezik.

Ha egy mérsékelten megkevert kockán tudatos elhatározással rendezni kívánjuk a tetőlapot, akkor annak rendszerint az az ára, hogy a többi lap még jobban összekeveredik: az entrópiát a fehér lapról a többire exportáltuk.

Maxwell-eloszlás

Próbáljuk kitalálni, hányféle módon osztható el a fedőlap 9 négyzete (azaz 9 ,,energiakvantum") a 6 szín (azaz 6 ,,atom") között? Ha N_r azon színek (,,atomok") száma, amelyek éppen r darab négyzetet (,,energiakvantumot") kaptak a fedőlapon, akkor a legvalószínűbb 3, 2, 2, 1, 1, 0 színezettségnek megfelelő $N_0 = 1$, $N_1 = 2$, $N_2 = 2$, $N_3 = 1$, $N_4 = N_5 = N_6 = N_7 = N_8 = N_9 = 0$ színeloszlást kihúzott vastag vonal tünteti fel a 15. ábrán. Az N_r betöltöttségi számok empirikusan nyert átlagértékét az árnyékolt terület adja. A kocka lapjain a színes négyzetek statisztikus egyensúlyban kialakuló véletlen eloszlása a gázmolekulák Maxwell-eloszlási görbéjére emlékeztet. Nem is olyan véletlenül. A színek N_r eloszlását két tényező szorzatával jól vissza lehet adni. Az első tényező egy Boltzmann-típusú faktor, amely azt veszi figyelembe, hogy a 9 négyzet N_r számokkal jellemzett módon $6!/N_1!N_2!N_3!N_4!N_5!N_6!N_7!N_8!N_9!$ féleképpen osztható el a 6 szín között, ami a 14. ábrán a kihúzott vonal által mutatott átlagos eloszlást adja. De a bűvös kockán nem mindegy, hogy a piros négyzet egy sarokban és a kék négyzet mellette egy élen helyezkedik el, vagy megfordítva. Az adott színű négyzetek lapon való elhelyezkedési lehetőségeit egy másik faktor veszi figyelembe, amelyben C_i-k a színvektor koordinátái. A két tényező szorzata

$$\frac{6!}{N_1!N_2!N_3!N_4!N_5!N_6!N_7!N_8!N_9!} \cdot \frac{9!}{C_1!C_2!C_3!C_4!C_5!C_6!}$$

(vonalkázott terület a 14. ábrán) jól egyezik az empirikusan meghatározott színeloszlással (vonalkázott terület a 15. ábrán). Végeredményben az összekeveredett kocka tarkaságát hasonló módon lehet leírni, mint a gáz molekuláris káoszában az energiaeloszlást.

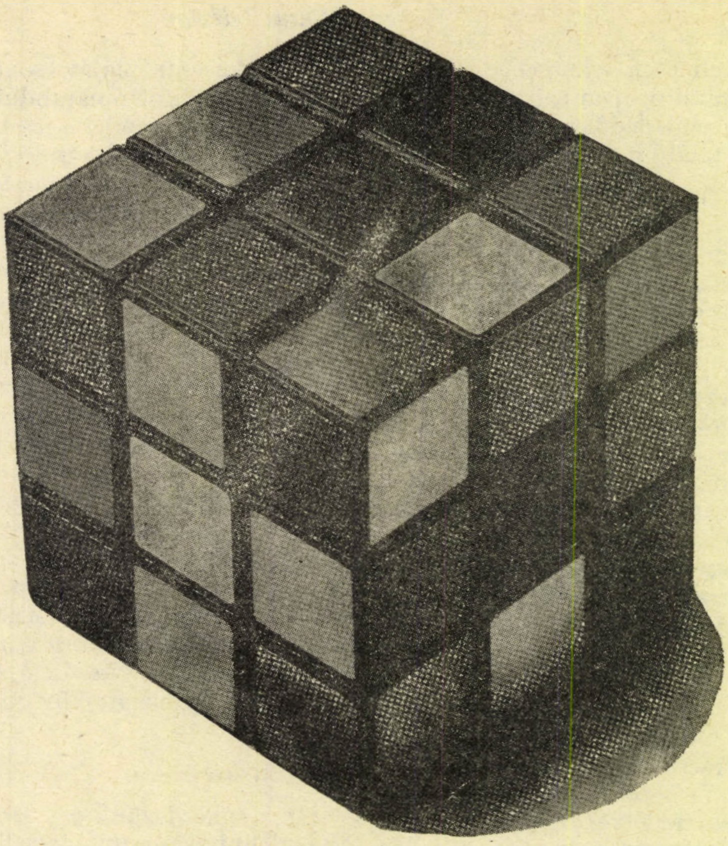
Maxwell-démon

A kocka entrópiáját csökkenthetjük kockán kívüli (emberi) entrópiaprodukció árán. A rendetlen kocka tudatos rendezésére különböző stratégiákat kínálnak. A legtöbb stratégiának többszáz lépésre van szüksége a rendteremtéshez. Egy jólképzett kockamester — fizikusnyelven Maxwell-démon — száznál kevesebb lépéssel is célhoz érhet, de még ez is messze van a mozgás tökéletes megfordításától. (Lehet, hogy a vaktában tett 6 lépés már elvezet a maximális entrópiájú hőhalálhoz, mint a 12. ábra esetében, de az ügyes Maxwell-démonnak is kell legalább 60 lépés a rend visszaállításához.) A rendhez visszavezető legrövidebb ösvény hossza legfeljebb húsz-egynéhány lépés lehet a legtávolabbi minta esetében, de hogy az merre húzódik, erre a kérdésre ma még senki sem ismeri a választ. ,,Isten algoritmusának" megtalálása, a bűvös kocka univerzumának rendszeres feltérképezése a jövő kutatóira vár. Ha ma félsz az eltévedéstől a kocka labirintusában, Ariadne fonala segíthet. Jegyezz fel egymás után minden tekerést! Ekkor a jegyzet alapján visszafelé követheted saját lábnyomaid, így hazatalálhatsz a kiindulási ponthoz.

Világmodell

Ha megkérdezünk egy elméleti fizikust: melyek fizikai univerzumunk legjellegzetesebb vonásai, a következőket sorolhatja fel: Diszkrét minták szimmetriái, amelyek egész kvantumszámokkal jellemezhetők. Mozgástörvények és a velük kapcsolatos nemkommutativitás. Megmaradási törvények, amelyek a mozgástörvényekből következnek. Irreverzibilitás, második főtétel. És végül, de nem utolsósorban: a még megoldásukat váró tudományos problémák gazdagsága.

A bűvös kocka mindössze 26 elemből tevődik össze, szépen beleillik kezünkbe, mégis a fizikai univerzum összes felsorolt jellegzetességét megtestesíti. A fizikus és fizikatanár a bűvös kockában nagyszabású univerzumunk legkisebb nemtriviális modelljét tisztelheti. ,,Álmodhatott-e Rubik Ernő arról, hogy találmánya mindannak modelljéül és metaforájául szolgál majd, ami mély és szép a természettudományban?" (Douglas R. Hofstaedter a ,,Scientific American"-ban.) ,,Ez az egyetlen olyan rejtvény, amely megfejtőjétől egy egész tudomány kiépítését követeli meg" (Bernie Greenberg, MIT). ,,A magyar Rubik Ernő találmánya olyan zseniális logikai fejtörő játék, amely nemcsak a matematikusokat és számítástechnikusokat hozta lázba, de a matematikától távolállókat, a teenagereket is" (Emanuel Halberstadt francia matematikus). És a fizikatanárok figyelmét szeretnénk még felhívni arra, amit David Singmaster londoni professzor írt a bűvös kockáról 6 kiadásban megjelent monográfiájában: ,,A bűvös kocka valószínűleg a legnevelőbb hatású játékszer, amit ember valaha is kitalált." Lesz-e kedvük arra használni, amire Rubik Ernő kitalálta: a fiatalok nevelésére?



Ez nem a Fizikai Szemlébe fizetett hírdetés. Annak bemutatására közöljük, hogy milyen a **kocka tekintélye tengerentúl is!** **A hírdetésszöveg** magyar fordítása: „Még komplex problémák is **megoldhatók, ha megfelelő módon közelítjük** meg **őket.** Keresd **a** hatékony megoldást! Texas Instruments" (ez **a világ** egyik **legrangosabb számítógépgyára).**