

**Kit Jejts**

**Matematika  
ŽIVOTA  
I SMRTI**

**Zašto je (skoro) sve  
matematika**

Prevela  
Jelena Kosovac

**■ Laguna ■**

Naslov originala

Kit Yates

THE MATHS OF LIFE AND DEATH

Copyright © 2019 Kit Yates

The moral right of Kit Yates to be identified as the author of this work has been asserted in accordance with the Copyright, Designs and Patents Act, 1988.

All rights reserved.

Translation copyright © 2020 za srpsko izdanje, LAGUNA



Kupovinom knjige sa FSC oznakom pomažete razvoj projekta odgovornog korišćenja šumskih resursa širom sveta.

NC-COC-016937, NC-CW-016937, FSC-C007782

© 1996 Forest Stewardship Council A.C.

Mojim roditeljima,  
Timu, Nensi i Meri,  
koji su me naučili da čitam  
i mojoj sestri Lusi,  
koja me je naučila da pišem

# SADRŽAJ

Uvod: Skoro sve je matematika . . . . .	9
<b>1. Razmišljati eksponencijalno:</b> Istraživanje ogromne moći i velikih ograničenja eksponencijalnog ponašanja. . . . .	17
<b>2. Senzitivnost, specifičnost i savetovanje sa još lekara:</b> Zašto je matematika važna (u) medicini. . . . .	55
<b>3. Zakoni matematike:</b> Istraživanje uloge matematike u pravosuđu. . . . .	101
<b>4. Ne verujte istini:</b> Šta se krije iza statističkih podataka u medijima . . . .	143
<b>5. Pogrešno mesto, pogrešno vreme:</b> Evolucija naših brojevnih sistema i kako su nas izneverili. . . . .	187
<b>6. Nezaustavljiva optimizacija:</b> Nesputane mogućnosti algoritma – od evolucije do elektronskog trgovanja. . . . .	223
<b>7. Osetljivi, zarazni, oporavljeni:</b> Zauzdavanje bolesti je u našim rukama . . . . .	265
<b>Epilog: Matematička emancipacija . . . . .</b>	<b>303</b>
<i>Izjave zahvalnosti . . . . .</i>	<i>307</i>

## Uvod

---

### SKORO SVE JE MATEMATIKA

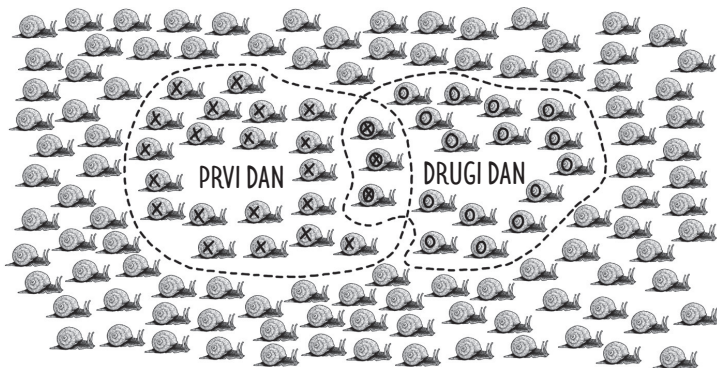
Moj četvorogodišnji sin obožava da se igra u bašti. Omiljena aktivnost mu je da iz zemlje iskopava razna sitna bića koja gamižu, naročito puževe. Ako ima dovoljno strpljenja da sačeka, videće kako puževi, posle početnog šoka što su iskopani, obazrivo kreću da se pomalaju iz svojih kućica i počinju da klize po njegovim malim rukama ostavljajući za sobom lepljive tragove sluzi. Kad mu dosade, na kraju će ih bezdušno baciti na gomilu đubriva ili na naslagana drva iza šupe.

Krajem prošlog septembra, posle naročito plodne sezone kad je iskopao i odbacio pet ili šest velikih primeraka puževa, došao je kod mene dok sam sekao drva za potpalu i pitao me je: „Tata, koliko je [*sic*] puževa u bašti?“ Varljivo jednostavno pitanje na koje nisam imao dobar odgovor. Može da ih bude sto ili hiljadu. Da budem sasvim iskren, on ne bi razumeo razliku. A ipak, njegovo pitanje me je kopkalo. Kako bismo to mogli zajedno da otkrijemo?

Odlučili smo da izvedemo eksperiment. Sledećeg vikenda, u subotu ujutru izašli smo u baštu da sakupljamo puževe. Posle deset minuta, imali smo ukupno dvadeset tri puža. Uzeo sam olovku i na kućici svakog puža nacrtao mali krst. Kad smo ih sve označili, ispraznili smo kofu i pustili puževe nazad u baštu.

Nedelju dana kasnije ponovo smo izašli u baštu i ovog puta smo sakupili, posle deset minuta, samo osamnaest puževa. Kad smo ih izbliza osmotrili, otkrili smo da tri imaju krstić na svojoj kućici, a da su ostalih petnaest neoznačeni. To su bili svi podaci koji su nam bili potrebni da bismo obavili proračun.

Zamisao je sledeća: broj puževa koje smo uhvatili prvog dana, dvadeset tri, predstavlja dati udeo puževa u odnosu na ukupnu populaciju puževa u bašti čiji broj želimo da ustanovimo. Ako možemo da izračunamo taj odnos, onda možemo da povećamo broj puževa koje smo uhvatili da bismo otkrili ukupnu populaciju puževa u bašti. Dakle, koristili smo drugi uzorak (puževe koje smo uhvatili one druge subote). Odnos označenih primeraka u tom uzorku puževa, tri prema osamnaest, treba da bude reprezentativan za odnos označenih primeraka u celoj bašti. Kad pojednostavimo taj odnos, otkrivamo da se jedan obeleženi puž pojavljuje na svakih šest puževa u ukupnoj populaciji puževa (to je prikazano na Slici 1). Stoga



**Slika 1:** Odnos (3 prema 18) broja ponovo uhvaćenih puževa (obeleženi su sa  $\circ$ ) prema ukupnom broju puževa uhvaćenih drugog dana (obeleženi sa  $\circ$ ) treba da bude isti kao odnos (23 prema 138) broja puževa uhvaćenih prvog dana (obeleženi sa  $\times$ ) prema ukupnom broju puževa u bašti (obeleženi i neobeleženi).

---

smo za šest puta povećali broj obeleženih primeraka puževa koje smo uhvatili prvog dana, dvadeset tri, da bismo procenili ukupan broj puževa u bašti, a to je 138.

Pošto sam obavio ovaj mentalni proračun, okrenuo sam se ka sinu koji se „starao“ o puževima koje je sakupio. Šta je on mislio o tome kad sam mu rekao da u našoj bašti živi 138 puževa? „Tata“, rekao je, gledajući u deliće smrskane puževe kućice koji su mu i dalje bili prilepljeni na prstima, „mislim da sam ga ubio.“ Neka ih onda bude 137.

Ovaj jednostavan matematički metod, poznat kao metod markiranja i ponovnog ulova, potiče iz ekologije gde se koristi za procenjivanje brojnosti populacije životinja. I sami možete da koristite ovu tehniku tako što ćete uporediti preklapanje između dva zasebna uzorka. Možda želite da procenite koliki je broj srečki koje su prodate na lokalnom sajmu ili da procenite koliko je posetilaca na fudbalskoj utakmici na osnovu broja karata, a ne da se bavite zamornim prebrojavanjem ljudi koji sede na tribinama.

Metod markiranja i ponovnog ulova koristi se i u ozbiljnim naučnim projektima. Na primer, zahvaljujući tom metodu možemo dobiti važne podatke o kolebanju (fluktuciji) broja ugroženih vrsta. Ako raspoložu procenom o broju riba u jezeru<sup>1\*</sup>, ribolovci mogu da znaju koliko dozvola za ribolov treba da izdaju. Ta tehnika je toliko delotvorna da se njena primena proširila izvan područja ekologije da bi se dobile tačne procene maltene o svemu – od broja zavisnika od narkotika<sup>2</sup> u populaciji do broja mrtvih u ratu u Siriji.<sup>3</sup> To je pragmatična moć jednostavnih matematičkih ideja. Upravo takve koncepte istraživaćemo u ovoj knjizi, a njih redovno koristim u svakodnevnom poslu matematičkog biologa.

---

\* Brojevi u tekstu označavaju reference, koje sadrže spisak literature korišćene u knjizi. Fajl sa referencama nalazi se na sajtu Lagune [www.laguna.rs](http://www.laguna.rs) u odeljku *Matematika života i smrti*. Nazivi knjiga u referencama su dati u originalu i u elektronskoj formi radi lakšeg traženja na internetu.

\* \* \*

Kad ljudima kažem da se bavim matematičkom biologijom, reakcija je obično uljudno klimanje glavom praćeno neprijatnom tišinom, kao da se baš spremam da ih ispitam koliko se sećaju formule za rešavanje kvadratne jednačine ili Pitagorine teoreme. No važnije od toga što su malčice zastrašeni, ljudi se upinju da shvate kako matematika, koju doživljavaju kao apstraktnu, odvojenu od sveta i nepraktičnu ima ikakve veze s nečim kao što je biologija, koju doživljavaju kao praktičnu, haotičnu i pragmatičnu. Tu veštačku dihotomiju obično prvi put susrećemo u školi: ako ste bili skloni prirodnim naukama, ali niste baš bili zagrejani za algebru, tada bi vas pogurali ka prirodnim naukama. Ako ste pak voleli te nauke, kao što sam ih ja voleo, ali niste voleli da sečete mrtva bića (jednom sam se onesvestio, na početku časa gde smo se bavili seciranjem, kad sam ušao u laboratoriju i video odsečenu glavu ribe na svom stolu), tada vas usmere ka fizici, hemiji, astronomiji, matematici. Te dve oblasti prirodnih nauka neće se nikad sresti.

To se dogodilo meni. Odustao sam od biologije u poslednje dve godine srednje škole i prebacio se na matematiku, i još matematike, fizike i hemije. Na fakultetu sam se još ozbiljnije posvetio tim predmetima, i bilo mi je žao što sam biologiju morao zauvek da ostavim iza sebe, nauku za koju sam smatrao da ima neverovatnu moć da život promeni nabolje. Bio sam silno uzbuđen što imam priliku da uronim u svet matematike, ali nisam mogao a da se ne zabrinem što biram predmet koji ima vrlo malo praktične primene. Pokazalo se da nisam mogao više da grešim.

Dok sam marljivo učio čistu matematiku koju su nam predavali na fakultetu, pamtio dokaz teoreme o srednjoj vrednosti ili definiciju vektorskog prostora, živio sam za časove primenjene matematike. Slušao sam predavače dok demonstriraju matematiku koju koriste inženjeri da bi gradili mostove koji



---

neka frekvencija neće dovesti u rezonanciju, neće početi da osciliraju, i koji se ne urušavaju se pod naletom vetra ili osmišljavaju takva krila aviona zahvaljujući kojima se te letelice neće srušiti. Učio sam kvantnu mehaniku koju fizičari koriste da bi shvatili neobična dešavanja na subatomsom nivou i teoriju specijalne relativnosti koja istražuje čudne posledice nepromenljive vrednosti brzine svetlosti. Išao sam na predavanja na kojima se objašnjavalo kako sve matematika može da se koristi u hemiji, u finansijama i u ekonomiji. Čitao sam o tome kako se matematika primenjuje u sportu da bi se poboljšale sposobnosti i učinci vrhunskih sportista, te kako je koristimo kad snimamo filmove da bismo stvorili kompjuterski generisane scene koje ne postoje u stvarnosti. Ukratko, saznao sam da matematika može da se iskoristi za objašnjenje gotovo svega.

Na trećoj godini studija imao sam sreću da odaberem kurs iz oblasti matematičke biologije. Profesor je bio Filip Mejni, izuzetno zanimljiv predavač, u četrdesetim godinama, iz Severne Irske. Ne samo što je bio uvažen i istaknut u svojoj oblasti (kasnije će biti izabran u Kraljevsko društvo) već je bilo očito da je obožavao predmet koji je predavao, te je na predavanjima svoj entuzijizam prenosio na studente.

Filip me nije samo naučio matematičkoj biologiji već i da su matematičari ljudska bića koja imaju osećanja, a ne jednodimenzionalni automati kakvim ih ljudi često prikazuju. Kako je to jednom sročio mađarski teoretičar verovatnoće Alfred Renji, „matematičar je nešto više od mašine koja kafu pretvara u teoreme“. Dok sam sedeo u Filipovoj kancelariji čekajući da počne razgovor za prijavu za doktorske studije, na zidu sam ugledao mnogobrojna uramljena pisma u kojima ga profesionalni fudbalski klubovi Premijer lige Engleske odbijaju, a kojima je on iz šale slao prijavu za radno mesto menadžera. Na kraju smo više razgovarali o fudbalu nego o matematici.

U tom presudnom trenutku u mojoj karijeri, Filip mi je pomogao da se iznova potpuno upoznam s biologijom. Tokom

spremanja doktorata pod njegovim mentorstvom, radio sam na svemu – od analiziranja kretanja roja skakavaca do toga kako ih zaustaviti, od predviđanja složene koreografije razvoja embriona sisara i razornih posledica koje nastaju kad koraci nisu usklađeni. Napravio sam modele kojima se objašnjava kako ptičja jaja dobijaju svoje prelepe šare pigmentacije i napisao sam algoritme za praćenje širenja bakterija. Takođe sam napravio simulaciju toga kako paraziti napadaju naš imuni sistem i model načina na koji se smrtonosne bolesti šire populacijom. Rad koji sam započeo tokom spremanja doktorata postao je kamen temeljac moje buduće karijere. I dalje se bavim tim i drugim fascinantnim oblastima biologije sa studentima kojima sam sada ja mentor za pripremu doktorata, na svom sadašnjem mestu vanrednog profesora (višeg predavača) za primenjenu matematiku na Univerzitetu Bat.

\* \* \*

Kao stručnjak za primenjenu matematiku, nju doživljam pre svega kao praktičnu alatku za razumevanje našeg složenog sveta. Matematičko modelovanje daje nam prednost u svakodnevnom situacijama, i ne mora da podrazumeva rad na stotinama zamornih jednačina ili linija računarskog koda da bi nam omogućilo da budemo u prednosti. Matematika, u svom najelementarnijem, suštinskom obliku, jeste obrazac. Kad god posmatrate svet, formirate vlastiti model obrazaca koje opažate. Ako zapazite motiv fraktala na granama drveća ili u simetriji snežne pahuljice, tada vidite matematiku. Ako lupkate nogom u ritmu muzike ili ako vam glas odzvanja dok pevate pod tušem, tada čujete matematiku. Ako šutirate loptu tako da ide zakrivljenom putanjom u zadnji deo gola ili ako hvatate lopticu za kriket na njenoj putanji u obliku parabole (kosi hitac), bavite se matematikom. Sa svakim novim iskustvom, svakim delićem čulnog podatka koji primete, modeli koje stvarate o svom okruženju sve su detaljniji, složeniji, finiji i stalno su

---

u procesu rekonfigurisanja. Pravljenje matematičkih modela, osmišljenih da obuhvate našu zapetljanu stvarnost, jeste najbolji način da razumemo pravila koja upravljaju svetom oko nas.

Verujem da su najjednostavniji i najvažniji modeli priče i analogije. Skriveno delovanje matematike najbolje može da se pokaže preko uticaja koji ima na život ljudi: od onih neuobičajenih do svakidašnjih upliva. Kad posmatramo kroz odgovarajuću prizmu, onda možemo da počnemo da razaznajemo skrivena matematička pravila koja su u temelju naših zajedničkih iskustava.

U sedam poglavlja ove knjige istražujem istinite priče o događajima koji su izmenili živote ljudi, a u kojima je primena (ili pogrešna primena) matematike imala presudan značaj. To su priče o ljudima koji su oštećeni defektnim genima, o preduzimačima koji su bankrotirali zbog pogrešnog algoritma, o nedužnim žrtvama loše vođenog pravnog postupka, o onima koji su nenamerno stradali zbog grešaka u softveru. Ispričaćemo priče o ulagačima koji su izgubili svoje bogatstvo i roditeljima koji su izgubili decu, a sve to zbog nerazumevanja matematike. Uhvatićemo se ukoštac s etičkim dilemama koje pred nas postavljaju pojave u rasponu od masovnih testiranja na bolesti (skrining) do prikrivanja statističkih podataka, a u vezi s tim ćemo proučiti relevantna društvena pitanja poput političkih referenduma, mera prevencije bolesti, krivičnog prava i veštacke inteligencije. U knjizi ćemo pokazati da matematika zaista ima mnogo toga bitno da kaže o svim navedenim pitanjima, i još o mnogo čemu.

Neću vam ukazivati gde sve matematika može da se pojavi već ću vas na ovim stranicama naoružati jednostavnim matematičkim pravilima i sredstvima koja mogu da vam pomognu u vašem svakodnevnom životu: od toga kako da dobijete najbolje sedište u vozu, do toga kako da ostanete pribrani kad od lekara čujete neočekivane rezultate testiranja. Predložiću vam jednostavne načine kako da izbegnete da načinite brojne

greške, a i zaprljaćemo ruke štampom kad budemo otpetljavali podatke i brojke navedene u novinskim naslovima. Takođe ćemo se detaljno upoznati s matematikom u osnovi analize i tumačenja genoma osobe i videti matematiku na delu dok budemo opisivali mere koje možemo da preduzmemo da bismo sprečili širenja neke smrtonosne bolesti.

Nadam se da ste do sada već shvatili da ovo nije knjiga o matematičarima. A nije ni knjiga za matematičare. U njoj neće biti ni jedne jedine jednačine. Suština ove knjige nije u tome da vas natera da se priselite lekcija iz matematike koje ste učili u školi i možda davno digli ruke od njih. Sasvim suprotno. Ako ste se ikad osetili da vam je uskraćeno pravo na bavljenje matematikom jer vam je neko usadio osećaj da vam nije mesto u matematičarima ili da niste dovoljno dobri u bavljenju njom, onda ovu knjigu smatrajte emancipatorskom.

Zaista mislim da je matematika za svakoga i da svi možemo da uvažavamo lepotu matematike koja je u srži komplikovanih pojava s kojima se svakodnevno srećemo. Kao što ćemo videti u narednim poglavljima, matematika jesu lažni alarmi zbog kojih brinete i lažna sigurnost koja vam pomaže da noću zaspate, priče koje nam nameću masovni mediji i sadržaji koji se šire preko njih. Matematika su rupe u zakonu i igla koja ih kрпи, tehnologija koja spasava živote i greške koje ih ugrožavaju, izbijanja smrtonosnih bolesti i strategije za njihovo kontrolisanje. Ona je najbolje čime raspolažemo i naša najveća nada koju imamo ako želimo da dobijemo odgovore na najfundamentalnija pitanja u vezi s tajnama kosmosa i misterijama naše vrste. Ona nas vodi nebrojenim putevima u našem životu i skriva se ispod vela, čekajući da nas pogleda pre našeg poslednjeg uzdaha.

# 1

---

## RAZMIŠLJATI EKSPONENCIJALNO

Istraživanje ogromne moći i velikih ograničenja  
eksponencijalnog ponašanja

Daren Kedik je instruktor vožnje iz Koldikota, gradića u južnom Velsu. Prijatelj mu je 2009. godine predložio nešto što bi moglo da bude unosno. Ako bi Daren dao samo tri hiljade funti lokalnom investicionom sindikatu i pronašao još dve osobe koje bi uložile isto toliko, za samo nekoliko nedelja dobio bi nazad dvadeset tri hiljade funti. Kedik je isprva mislio da to previše dobro zvuči da bi bilo istinito, ali je podlegao iskušenju. Prijatelj ga je naposljetku ubedio da „niko neće ništa izgubiti jer će se ta šema neprestano održavati“, pa je tako odlučio da se priključi ekipi koja sigurno pobeđuje. Izgubio je sve. I sada, deset godina posle toga, još oseća posledice.

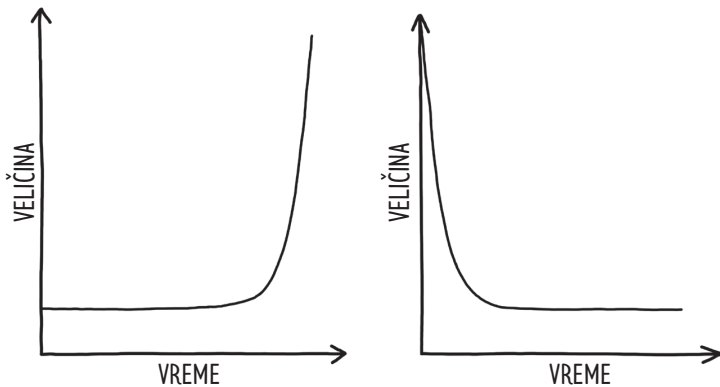
Kedik se našao na dnu piramidalne šeme koja naprosto nije mogla „neprekidno da se održava.“ Investiciona šema „dati i uzeti“, koja je započeta 2008. godine, ostala je bez novih ulagača i urušila se za manje od godinu dana, ali ne pre nego što je izvukla dvadeset jedan milion funti od više od deset hiljada ulagača širom Velike Britanije, od kojih je devedeset posto njih izgubilo svojih tri hiljade uložениh funti. Investicione šeme koje se oslanjaju na ulagače koji regrutuju još ulagača da

bi ostvarili isplatu osuđene su na propast. Broj novih ulagača potrebnih na svakom nivou povećava se srazmerno broju ljudi uključenih u takvu šemu. Posle petnaest rundi regrutovanja, u toj vrsti investicione šeme biće više od deset hiljada ljudi. Mada se čini da je to veliki broj, do njega se lako dolazi primenom strategije „dati i uzeti.“ Međutim, ako se izvede još petnaest rundi povrh onih prvih, jedna od sedam osoba na planeti moraće da investira da bi šema mogla da opstane. Taj fenomen brzog rasta, koji vodi ka neizbežnom manjku novih ljudi (regruta) i naposljetku ka urušavanju šeme, poznat je kao ekspancijalni rast.

### Ne treba plakati nad prosutim mlekom

Nešto raste ekspancijalno kad se povećava srazmerno svojoj trenutnoj veličini. Zamislite šta se desi kad otvorite bocu mleka ujutru: jedna ćelija bakterije *Streptococcus faecalis* pronalazi put i ulazi u bocu mleka pre nego što je zatvorite. *Streptococcus faecalis* je razlog što se mleko kiseli i zgrušnjava, ali jedna bakterija i nije toliko bitna, zar ne?<sup>4</sup> Možda će vas više zabrinuti kad otkrijete da *Streptococcus faecalis* u mleku može da se deli i svakog sata proizvodi dve ćerke ćelije.<sup>5</sup> U svakoj generaciji, broj ćelija povećava se srazmerno trenutnom broju ćelija, tako da njihov broj raste ekspancijalno.

Kriva koja prikazuje kako se ekspancijalni rast kvantitativno povećava podseća na rampu (nalik četvrtini donjeg dela cilindra) koju koriste skejteri, skejtborderi i BMX vozači. Nagib rampe je prvo vrlo nizak – kriva je sasvim pri dnu i uspinje se postepeno (kao što možete da vidite na osnovu prve krive na slici 2). Posle dva sata, u vašem mleku se nalaze četiri ćelije *Streptococcus faecalis*, a posle četiri sata ima ih šesnaest, što i ne deluje kao baš veliki problem. No kad je reč o obliku pomenute rampe, visina ekspancijalne krive i njen uspon naglo



**Slika 2:** J-oblik eksponencijalnog rasta (*levo*) i krive opadanja (*desno*).

se povećavaju. Kvantiteti koji rastu eksponencijalno isprva izgledaju kao da se sporo povećavaju, ali mogu naglo i naizgled neočekivano da uzlete. Ako je mleko van frižidera četrdeset osam sati, i eksponencijalni rast ćelija *Streptococcus faecalis* se nastavi, kad ga ponovo budete sipali u žitarice, u boci mleka moglo bi da bude skoro hiljadu biliona ćelija – što je dovoljno da vam se krv zgruša, a kamoli mleko. U tom trenutku ćelije bi nadmašile broj ljudi na našoj planeti – četrdeset hiljada ćelija prema jednom čoveku. Krive eksponencijalnog rasta ponekad se nazivaju krive „J oblika“ jer gotovo podražavaju naglu uzlaznu liniju slova J. Naravno, pošto bakterije koriste hranljive sastojke u mleku i menjaju njegovu pH vrednost, uslovi za njihovo razmnožavanje propadaju, pa eksponencijalni rast traje relativno kratko. Zaista, u gotovo svakoj okolnosti u stvarnom svetu dugotrajni eksponencijalni rast je neodrživ, a u mnogim slučajevima patološki jer subjekat rasta nezajazljivo iskorišćava resurse. Održivi eksponencijalni rast ćelija u telu, na primer, tipična je oznaka raka.

Drugi primer krive eksponencijalnog rasta je vodeni tobogan sa slobodnim padom, koji se tako naziva jer je na početku

kosina toliko oštra da onaj ko se spušta toboganom ima doživljaj slobodnog pada. Ovog puta, dok se spuštamo niz tobogan, idemo eksponencijalno *opadajućom* krivom, a ne *rastućom* (primer takvog grafikona možete da vidite na drugoj ilustraciji na Slici 2). Do eksponencijalnog opadanja dolazi kada se kvantitet  *smanjuje* srazmerno svojoj trenutnoj veličini. Recimo, otvarate veliku kesu bombona *M&Ms*, istresate ih na sto i pojedete sve koje su pale tako da im je na gornjoj strani slovo M. Ostale vraćate nazad u kesu i sledećeg dana ih ponovo istresate na sto. I ponovo pojedete sve na kojima se vidi slovo M, a ostale vratite u kesu. Svaki put kad istresete bombone iz kese, pojedete otprilike polovinu bombona koje su preostale, bez obzira na početni broj bombona u kesu. Broj bombona smanjuje se srazmerno broju preostalih bombona u kesu, što uzrokuju eksponencijalno opadanje broja bombona. Na isti način, eksponencijalni nagib vodenog tobogana počinje visoko i spušta se gotovo vertikalno, pa je opadanje visine s koje se osoba spušta izuzetno naglo; kad imamo veliki broj bombona, takođe je veliki broj njih koje ćemo pojesti. No kriva neprekidno i postepeno postaje sve manje strma dok naposljetku ne postane gotovo horizontalna na kraju tobogana; što nam je ostalo manje bombona u kesu, manje će ih biti narednog dana koje su nam preostale da ih pojedemo. Iako je nasumično i nepredvidljivo da li će jedna bombona pasti tako da je M gore ili je na poledini, pojavljuje se predvidljiva toboganska kriva eksponencijalnog opadanja broja bombona koje preostaju s vremenom.

U ovom poglavlju otkrićemo skrivene veze između eksponencijalnog ponašanja i svakodnevnih pojava: širenja bolesti populacijom ili širenja mema preko interneta, naglog razvoja embriona ili presporog uvećavanja novca na našem računaru, načina na koji doživljavamo vreme (protok vremena), čak i pojavu eksplozije atomske bombe. Temeljno ćemo razotkriti potpunu propast piramidalne investicione šeme. Priče ljudi čiji



---

je novac usisan i progutan pokazaće nam koliko je važno da naučimo da razmišljamo eksponencijalno, što će nam zauzvrat pomoći da predvidimo katkad neočekivani tempo promena u modernom svetu.

### **Suviše dobro da bi bilo istina**

U vrlo retkim prilikama kad odem da deponujem novac na svoj bankovni račun tešim se činjenicom da bez obzira na to koliko malo novca imam na računu, on uvek raste eksponencijalno. Zaista, bankovni račun je mesto gde istinski nema nikakvih ograničenja za eksponencijalni rast, barem na papiru. Pod uslovom da su sredstva oročena (to jest, kamata pristiže na našu početnu sumu novca i sama donosi dobit), tada se ukupna suma na računu povećava srazmerno svojoj trenutnoj veličini – odlika eksponencijalnog rasta. Kao što je rekao Bendžamin Frenklin: „Novac pravi novac, a novac koji pravi novac pravi još više novca.“ Ako biste dovoljno dugo čekali, i najmanja investicija donela bi vam bogatstvo. Ali nemojte sada odmah da odete i zatočite svoj fond za crne dane. Ako uložite sto funti s kamatom od jedan posto godišnje, bilo bi potrebno da prođe devetsto godina da postanete milioner. Premda se eksponencijalni rast obično dovodi u vezu s naglim povećanjem, u slučaju kad su kamatna stopa rasta i početna investicija male, tada će se eksponencijalni rast odvijati zaista vrlo sporo.

Negativna strana ovoga jeste što, pošto vam naplaćuju fiksnu kamatnu stopu na uloženu sumu (obično veliku stopu), i dugovanja po kreditnoj kartici takođe mogu eksponencijalno da se povećavaju. Kao i u slučaju hipoteka, što pre isplatite dugove s kreditne kartice i što više dugova isplatite ranije, to ćete na kraju manje plaćati sveukupno jer eksponencijalni rast „nema priliku“ da započne svoj proces.

\* \* \*

Otplata hipoteke i drugih dugova bio je jedan od glavnih razloga koji je naveo žrtve prevare „dati i uzeti“ da se upuste u tu investicionu prevaru. Iskušenje da brzo dođu do lakog novca radi smanjenja finansijskog pritiska bilo je preveliko za većinu pozvanih ljudi da bi uspeli da mu se odupu, uprkos sumnji, koja ih nikako nije ostavljala na miru, da tu nešto nije baš u redu. Kedik priznaje: „Stara izreka 'Ako nešto izgleda suviše dobro da bi bilo istina, onda verovatno nije istina', u ovom slučaju je zaista, ali zaista istinita.“

Inicijatorke te investicione šeme, penzionerke Lora Foks i Kerol Čalmers su prijateljice još iz vremena kad su išle u katoličku školu. Njih dve, a obe su bile stubovi svoje lokalne zajednice – jedna potpredsednica lokalnog Rotari kluba, druga ugledna baka – odlično su znale šta rade kad su počele da sprovode u delo svoje prevarantske investicione šeme. Prevara je bila lukavo osmišljena da privuče potencijalne investitore, a da se prikriju rizici. Za razliku od klasične piramidalne prevare koja ima dva nivoa, gde učesnik na vrhu piramide uzima novac direktno od investitora koje je regrutovao, „dati i uzeti“ funkcioniše kao „avionska“ šema na četiri nivoa. U „avionskoj“ šemi osoba na vrhu poznata je kao „pilot.“ Pilot regrutuje dva „kopilota“, a svaki kopilot regrutuje dva „člana posade“, dok svaki od njih pak regrutuje dva „putnika.“ Kad je hijerarhija u investicionoj šemi Foksove i Čalmersove bila kompletirana s petnaestoro ljudi, osmoro putnika dalo je svojih tri hiljade funti organizatoricama, koje su isplatile ogromnih dvadeset tri hiljade funti prvobitnom ulagaču, a za sebe uzele hiljadu funti od te sume. Deo novca otišao je u dobrotvorne svrhe, sve s dobijenim pismima zahvalnosti od Nacionalnog društva za sprečavanje nasilja nad decom, što je doprinelo tome da investiciona šema izgleda legitimno. Deo novca su zadržavale kako bi se dotična šema i dalje glatko odvijala.

Pošto je isplaćen, pilot izlazi iz investicione šeme i dva koplota bivaju promovisani u pilote, čekajući da novih osam putnika budu regrutovani na položaju na dnu lestvice. Investitorima su najviše privlačne „avionske“ investicione šeme jer novi učesnici moraju da privuku samo još dve osobe da bi umnožili svoju investiciju za osam puta (iako se, naravno, od to dvoje novih učesnika traži da regrutuju još dvoje učesnika, i tako dalje). Druge, primamljivije šeme iziskuju daleko više truda od jedne osobe za povraćaje istih suma. Struktura šeme „dati i uzeti“, koja se odvija na četiri nivoa, znači da „članovi osoblja“ nikad ne uzimaju novac direktno od „putnika“ koje regrutuju; naime, pošto će novi učesnici, oni tek regrutovani, najverovatnije biti prijatelji ili rođaci članova „osoblja aviona“, time se obezbeđuje da se novac nikad ne razmenjuje direktno između bliskih poznanika. Pošto putnici i piloti, čije isplate putnici finansiraju, nisu direktno povezani, regrutovanje se lakše obavlja, a osvete su manje verovatne, što priliku za investiranje čini atraktivnijom, pa samim tim olakšava regrutovanje hiljada ulagača u investicionu šemu.

Mnogi investitori u šemi „dati i uzeti“ stiču sigurnost i na osnovu priča o uspešnim isplatama koje su već obavljene, a u nekim slučajevima čak i direktno prisustvuju davanju novca. Organizatorke šeme, Foksova i Čalmersova, održavale su luksuzne privatne zabave u hotelu *Somerset*, čija je vlasnica bila Čalmersova. Na zabavama su delile brošure na kojima su bile i fotografije učesnika u njihovoj investicionoj šemi kako se izležavaju na krevetu prekrivenom novčanicama ili drže u šaci novčanice od pedeset funti i mašu njima u kameru. Na svaku zabavu organizatorke su pozivale i neke od „nevesti“ – osobe (uglavnom žene) koje su se uspele na položaj pilota svoje ćelije u okviru piramide i kojima je trebalo da bude isplaćen novac. Nевestama bi bila postavljena četiri jednostavna pitanja poput „Koji deo tela raste Pinokiju kad laže?“ pred publikom od dvesta do trista potencijalnih investitora.

Taj aspekt šeme – „kviz“ – trebalo je da iskoristi rupu u zakonu jer su Foksova i Čalmersova verovala da su takve investicije dozvoljene ako postoji i neki element „provere znanja“. Na snimku mobilnim telefonom jednog od tih događaja, čula se Foksova kako viče: „Kockamo se u sopstvenoj kući i zato je to zakonito!“ Nije bila u pravu. Majls Benet, advokat koji je vodio slučaj protiv njih, objasnio je: „Kviz je bio toliko lak da nikad nije bilo nijedne osobe kojoj je novac trebalo da bude isplaćen a da nije dobila svoj novac. Čak su mogli da im pomognu prijatelji ili članovi komiteta u odgovoru na pitanje, a komitet je znao koji su tačni odgovori!“

To nije zaustavilo Foksovu i Čalmersovu da zabave na kojima su davale nagrade koriste kao imunizaciju protiv sumnje u svojoj viralnoj marketinškoj kampanji u kućnoj radinosti. Mnogi gosti, videvši da su neveste dobijale ček na dvadeset tri hiljade funti, investirali bi novac i podsticali prijatelje i članove porodice da urade to isto, formirajući piramidu ispod sebe. Ako bi svaki novi investitor preneo odgovornost na nova dva ili više ulagača, šema bi se održavala unedogled. Kad su Foksova i Čalmersova započele šemu, još 2008. godine, bile su jedina dva pilota. Time što su regrutovale prijatelje da investiraju i zaista pomogle da se organizuje data šema, njih dve vrlo brzo su dovele još četiri osobe u tim. Oni su regrutovali još osmoro ljudi, a ovi pak šesnaestoro, i tako dalje. Eksponencijalno udvostručavanje broja novih učesnika u šemi umnogome nalikuje udvostručavanju broja ćelija u embrionu koji se razvija.

### **Eksponencijalni rast embriona**

Kad je moja žena prvi put bila trudna bili smo opsednuti, poput mnogih parova koji će uskoro postati roditelji, time šta se dešava u njenom stomaku. Pozajmili smo ultrazvučni aparat za praćenje rada srca bebe, prijavili smo se za medicinska

istraživanja da bismo imali dodatne snimke, čitali smo silne veb-stranice na kojima se opisuje šta se događa s vašom ćerkom dok raste i svakodnevno smo time uznemiravali moju ženu. Među našim „favoritima“ bile su veb-stranice tipa „Koliko je velika vaša beba?“, gde se poredila, za svaku nedelju razvoja, veličina nerođene bebe s nekim voćem, povrćem ili drugom hranom odgovarajuće veličine. Svake nedelje pokazivali su budućim roditeljima nešto od toga uz komentar tipa „Ako je težak 42 grama i dugačak 9 centimetara, vaš anđelić je otprilike veličine limuna“ ili „Vaša dragocena mala repa sada je teška 140 grama i dugačka otprilike 12 centimetara.“

Ono što me je zaista iznenadilo u vezi s ovim poređenjima jeste koliko se brzo menja veličina embriona, iz nedelje u nedelju. U četvrtoj nedelji vaša beba velika je otprilike kao semenka maka, a u petoj nedelji nadula se do veličine semenke susama! Njena veličina se povećava za otprilike šesnaest puta tokom jedne sedmice.

No možda to brzo povećanje veličine ne bi trebalo da predstavlja toliko iznenađenje. Kad spermatozoid oplodi jajnu ćeliju, zigot koji nastane prolazi kroz niz promena u samoj ćeliji, kroz ćelijski ciklus, koji se naziva deoba ćelija, a to omogućava da se broj ćelija embriona povećava velikom brzinom. Prvo, zigot se deli se na dve ćelije. Osam sati kasnije te dve ćelije dele se na četiri, a još osam sati kasnije četiri ćelije postaju osam ćelija, koje ubrzo deobom postaju šesnaest, i tako dalje – baš kao broj novih ulagača na svakom nivou piramidalne šeme. Sve naredne deobe ćelija odvijaju se gotovo istovremeno svakih osam sati. Dakle, broj ćelija raste srazmerno količini ćelija koje sačinjavaju embrion u datom trenutku: što ima više ćelija, to se stvara više ćelija u narednoj deobi. U ovom slučaju, pošto svaka ćelija prilikom svakog pojedinog procesa deobe stvara tačno jednu ćeliju ćerku, eksponent rasta ćelija u embrionu jeste dva; drugim rečima, veličina embriona udvostručava se sa svakom novom deobom.

Tokom razvoja ljudskog bića, period kad embrion raste eksponencijalno je relativno (srećom) kratak. Ako bi embrion nastavio da se razvija istom eksponencijalnom brzinom tokom cele trudnoće, 840 sinhronizovanih deoba ćelije proizvele bi superbebu koja se sastoji od otprilike  $10^{253}$  ćelija. Radi poređenja, evo primera: ako bi svaki atom u univerzumu i sam bio kopija našeg univerzuma, tada bi ukupan broj atoma u svim tim univerzumima bio otprilike jednak broju ćelija superbebe. Naravno, deoba ćelija se usporava kad počnu da se odvijaju i usklađuju složeniji događaji u životu embriona. U stvarnosti, broj ćelija koje sačinjavaju tek rođenu bebu može se proceniti na otprilike skromna dva biliona. Do tog broja ćelija dospeva se za manje od četrdeset jedne istovremene deobe.

### Uništitelj svetova

Eksponencijalni rast je presudan za brzo širenje broja ćelija neophodnih za stvaranje novog života. Međutim, zadivljujuća i zastrašujuća moć eksponencijalnog rasta nagnala je nuklearnog fizičara Roberta Openhajmera da kaže: „Sada sam postao Smrt, uništitelj svetova.“ Taj rast nije bio razvoj ćelija, niti pojedinačnog organizma nego energije stvorene cepanjem jezgra atoma.

Openhajmer je za vreme Drugog svetskog rata bio na čelu laboratorije u Los Anđelesu, gde je bilo središte projekta Menhetn – razvijanja i pravljenja atomske bombe. Cepanje jezgra (spojenih protona i neutrona) teškog atoma na manje sastavne delove otkrili su nemački hemičari 1938. godine. Proces je nazvan nuklearna fisija po analogiji s binarnom fisijom, deljenjem jedne ćelije na dve, na onako impresivan način na koji se dešava prilikom razvoja embriona. Otkriveno je da se fisija zbiva ili prirodno, kao radioaktivni raspad nestabilnih hemijskih izotopa, ili da može veštački da se izazove

bombardovanjem jezgra jednog atoma subatomske čestice u takozvanoj nuklearnoj reakciji. U oba slučaja, deljenje jezgra na dva manja jezgra, produkta fisije, dešavalo se istovremeno s otpuštanjem ogromnih količina energije u obliku elektromagnetnog zračenja, kao i energije povezane s kretanjem produkata fisije. Naučnici su brzo uvideli da se ti pokretljivi produkti fisije, nastali prvom nuklearnom reakcijom, mogu iskoristiti da se utiče na druga jezgra, da se deli još više atoma i oslobađa još više energije: da se izazove takozvana nuklearna lančana reakcija. Ako svaka nuklearna fisija u proseku daje više od jednog produkta koji može da se iskoristi za cepanje sledećih atoma, onda bi, u teoriji, svaka fisija mogla da izazove deljenje više atoma. Ukoliko bi se taj proces nastavio, broj reakcija eksponencijalno bi rastao, stvarajući ogromnu energiju, kakva nikad ranije nije postojala. A ako bi se pronašao materijal koji dopušta nesputanu nuklearnu lančanu reakciju, eksponencijalno povećanje energije emitovane tokom kratkog perioda odvijanja reakcija potencijalno bi omogućilo da se takav *materijal* za fisiju iskoristi kao oružje.

U aprilu 1939. godine, uoči Drugog svetskog rata, francuski fizičar Frederik Žolio-Kiri (zet Marije i Pjera Kirija i dobitnik Nobelove nagrade zajedno sa suprugom) došao je do presudnog otkrića. U časopisu *Nejčer* objavio je dokaz da posle fisije izazvane jednim neutronom, atomi izotopa uranijuma, uranijum-235, emituju u proseku 3,5 (kasnije je smanjeno na 2,5) neutrona visoke energije.<sup>6</sup> Upravo je to bio neophodan materijal da se pokrene eksponencijalni rast nuklearne lančane reakcije. „Trka za bombom“ je počela.

Pošto su dobitnik Nobelove nagrade Verner Hajzenberg i drugi proslavljeni nemački fizičari radili za naciste na izradi istovetne bombe, Openhajmer je znao da mu predstoji težak zadatak. Laboratorija u kojoj je u tajnosti radio nalazila se u Los Alamosu. Njegov glavni zadatak bio je da stvori uslove koji će olakšati eksponencijalni rast nuklearne lančane reakcije

i time omogućiti gotovo trenutno oslobađanje ogromne količine energije neophodne za atomsku bombu. Da bi se stvorila ta samoodrživa i dovoljno brza lančana reakcija, Openhajmer je morao da se postara da dovoljno neutrona oslobođenih fisijom atoma uranijuma-235 budu ponovo apsorbovani jezgrima drugih atoma uranijuma-235, te da zauzvrat izazovu njihovo cepanje. Otkrio je da kod uranijuma koji se pojavljuje u prirodi previše oslobođenih neutrona apsorbuju atomi uranijuma-238 (drugi važan izotop, koji čini 99,3 odsto uranijuma u prirodi)<sup>7</sup> što znači da svaka lančana reakcija eksponencijalno opada umesto da raste. Da bi izazvao lančanu reakciju koja eksponencijalno raste, Openhajmer je morao da dobije što čistiji uranijum-235 uklanjanjem što je moguće više uranijuma-238 iz rude uranijuma.

Ta razmišljanja dovela su do ideje o *kritičnoj masi* fisionog materijala. Kritična masa uranijuma jeste količina materijala neophodnog da se generiše samoodrživa nuklearna lančana reakcija. To zavisi od raznih faktora. Verovatno je najvažniji čistoća uranijuma-235. Čak i sa dvadeset procenata uranijuma-235 (u poređenju sa 0,7 procenata koji se pojavljuje u prirodi), za kritičnu masu i dalje je potrebno više od četiristo kilograma, zbog čega je izuzetna čistoća presudna za održivu bombu. Onda kad je Openhajmer uspeo da dobije dovoljno čist uranijum da postigne kritičnu masu, i dalje je pred njim bio izazov da napravi bombu. Bilo je očito da ne može jednostavno da spakuje kritičnu masu uranijuma u bombu i nada se da neće eksplodirati. Samo jedan raspad uranijuma, raspad koji se prirodno dešava, izazvao bi lančanu reakciju i pokrenuo eksponencijalnu eksploziju.

Dok im je za vratom bila nacistička Nemačka koja je radila na stvaranju bombe, Openhajmer i njegov tim brzo su smislili kako da naprave atomsku bombu na bazi fisije. Primenili su metod „ispaljivanja“, što znači da se jedna potkritična masa uranijuma ispaljuje u drugu, korišćenjem konvencionalnih



eksploziva, da bi se stvorila kritična masa. Lančanu reakciju izazvala bi spontana fisija koja oslobađa početne neutrone. Time što je razdvojio dve potkritične mase, Openhajmerov tim se postarao da bomba ne eksplodira pre nego što treba. Visok nivo obogaćenog uranijuma (oko osamdeset procenata) značio je da je bilo dovoljno samo dvadeset do dvadeset pet kilograma za postizanje kritične mase. Međutim, Openhajmer nije smeo da rizikuje da njegov projekat propadne i tako svojim nemačkim suparnicima da prednost, pa je insistirao na mnogo većim količinama.

Drugi svetski rat se već završio kad je konačno bilo pripremljeno dovoljno čistog uranijuma. Ali rat u oblasti Tihog okeana i dalje je divljao; Japanci, naime, nisu pokazivali znake predaje uprkos nepovoljnim vojnim okolnostima u kojima su se našli. Generalu Lesliju Grouvsu, direktoru projekta Menhetn, bilo je jasno da bi napad na Japan s kopna samo još više povećao broj američkih žrtava, te je izdao naredbu da se na Japan baci atomska bomba čim vremenski uslovi to dozvole.

Posle nekoliko dana lošeg vremena zbog efekata ciklona, 6. avgusta 1945. godine nad Hirošimom je nebo konačno bilo čisto. U sedam sati i devet minuta ujutru, na nebu iznad Hirošime viđen je američki avion i širom grada oglasila se sirena za vazдушnu opasnost. Sedamnaestogodišnja Akiko Takakura se tek zaposlila kao službenica u banci. Na putu ka poslu, kad se oglasila sirena, zajedno s drugim ljudima koji su takođe krenuli na posao, otišla je u jedno od skloništa, strateški raspoređenih po gradu.

Upozorenja za vazдушnu opasnost nisu bila neuobičajena u Hirošimi; grad je bio strateška vojna baza gde se nalazio štab japanske Druge armije. Do tada je Hirošima uglavnom bila pošteđena bombardovanja iz vazduha za razliku od mnogih japanskih gradova. Ni Akiko ni drugi ljudi koji su krenuli na posao tog jutra nisu znali da su Amerikanci Hirošimu namerno

čuvali od napada da bi mogli da procene punu meru uništenja koje će izazvati njihovo novo oružje.

U pola osam ujutru oglasio se signal za prestanak vazdušne opasnosti. Avion B-29 koji je leteo iznad grada nije bio ništa zlokobniji od aviona za osmatranje. Kad su izašli iz skloništa, Akiko je odahnula: ovog jutra neće biti vazdušnih napada.

Ni Akiko niti iko od stanovnika Hirošime koji su išli na posao tog jutra nisu znali da je B-29 radio-vezom javio avionu *Enola Gej* da je nebo nad Hirošimom čisto – avionu koji je nosio „pištolj“ tip fisione bombe poznate pod imenom „Mališa“. Deca su bila na putu ka školi, ljudi su se bavili svojim svakodnevnim poslovima, išli su u kancelarije ili fabrike, a Akiko je stigla u banku u centru Hirošime u kojoj je radila. Službenice je trebalo da stignu pola sata pre muškaraca službenika da bi počistile njihove kancelarije pre početka novog radnog dana, tako da je Akiko u osam i deset ujutru bila u velikoj praznoj zgradi i prionula na posao.

U osam sati i četrnaest minuta ujutru, pukovnik Pol Tibets, koji je upravljao avionom *Enola Gej*, ugledao je most Aioi u obliku slova T. Bacio je „Mališu“ od 4.400 kilograma, koji je započeo pad sa oko devet i po kilometara iznad Hirošime. Pošto je bomba padala oko četrdeset pet sekundi, aktivirana je na visini od oko šeststo metara iznad tla. Jedna potkritična masa uranijuma bila je ispaljena u drugu, stvorivši tako kritičnu masu spremnu da eksplodira. Gotovo istog trenutka spontana fisija atoma je oslobodila neutrone, od kojih je makar jedan bio apsorbovan atomom uranijuma-235. Zauzvrat je došlo do fisije tog atoma, koji je oslobodio još neutrona, a njih je pak apsorbovalo još atoma. Proces se naglo ubrzavao, uzrokujući eksponencijalni rast lančane reakcije i istovremeno oslobađanje ogromne količine energije.

Dok je čistila radne stolove svojih kolega, Akiko je pogledala kroz prozor i videla blistavi beli blesak svetlosti, kao kad se zapali magnezijumska traka. Ono što nije mogla da zna

jeste da je eksponencijalni rast omogućio bombi da oslobodi energiju koja je jednaka energiji istovremeno upaljenih trideset miliona štapova dinamita. Temperatura bombe povećala se na nekoliko miliona stepeni; bila je toplija od površine Sunca. Desetinu sekunde kasnije, jonizujuće zračenje dospelo je do tla, i svako živo biće izloženo radioaktivnom zračenju pretrpelo je stravične posledice. Posle jedne sekunde iznad grada se pojavila vatrena lopta, trista metara u prečniku, koja je dostigla temperaturu od nekoliko hiljada stepeni Celzijusa. Očevici su to opisali kao da se nad Hirošimom tog jutra u zoru ponovo pojavilo sunce. Snažni udarni toplotni talas, koji se kretao brzinom zvuka, sravnio je zgrade u celom gradu, a Akiko je bacio na drugu stranu prostorije, gde je ostala da leži onesvešćena. Infracrveno zračenje pržilo je kožu ljudi, kilometrima u svim pravcima. Oni koji su se našli u blizini centra eksplozije atomske bombe bili su istog trenutka sprženi i pretvoreni u pepeo.

Akiku je od najgoreg udara bombe zaštitila zgrada banke koja je bila izgrađena da izdrži zemljotres. Kad joj se povratila svest, nesigurno je izašla na ulicu i videla da je plavo, čisto nebo nestalo. Drugo „sunce“ nad Hirošimom zašlo je isto tako brzo kao što se i pojavilo. Ulice su bile tamne i prepune prašine i dima. Tela su ležala gde su i pala prilikom eksplozije i udara, a bilo ih je posvuda, dokle je pogled dopirao. Udaljena samo dvesta šezdeset metara od centra eksplozije atomske bombe, Akiko je bila jedna od najbližih centru eksplozije koja je preživela stravičan udarni talas koji se širio eksponencijalnom brzinom.

Procenjuje se da su bomba i posledični požari koji su se širili gradom usmrtili oko sedamdeset hiljada ljudi, od toga pedeset hiljada civila. Većina zgrada bila je potpuno uništena. Openhajmerova proročka rečenica se obistinila. O opravdanju bombardovanja i Hirošime, i tri dana kasnije i Nagasakija, s obzirom na okončanje Drugog svetskog rata, i dalje se raspravlja.

## Nuklearna energija kao izbor

Kakvi god da su dobri i loši aspekti atomske bombe, bolje razumevanje eksponencijalne lančane reakcije uzrokovane nuklearnom fisijom koja je razvijena u sklopu projekta Menheten dalo nam je tehnologiju za proizvodnju sigurne, čiste energije, s niskim emisijama ugljenika, posredstvom nuklearne snage. Jedan kilogram uranijuma-235 može da oslobodi tri miliona puta više energije od one koja nastane sagorevanjem iste količine uglja.<sup>8</sup> Uprkos dokazu koji ukazuje na suprotno, nuklearna energija ima lošu reputaciju kad je reč o sigurnosti i uticaju na okolinu. Za to je delimično krivac eksponencijalni rast.

Predveče, 25. aprila 1986. godine, Aleksandar Akimov došao je na posao u nuklearnu elektranu gde je bio šef smene. Za nekoliko sati trebalo je da počne eksperiment, koji je sam Akimov osmislio, kojim je trebalo da se testira sistem pumpi za hlađenje. Možda bi mu se moglo oprostiti za tu inicijativu; mislio je, naime, koliko ima sreće da ima stalan posao (koji valja i zadržati) u nuklearnoj elektrani u Černobilju, u vreme kad se Sovjetski Savez raspadao, a dvadeset procenata ljudi je živelo u siromaštvu.

Oko 23 sata, da bi smanjio izlaznu snagu reaktora na oko dvadeset procenata od uobičajenog kapaciteta za rad, u svrhu testiranja Akimov je ubacio kontrolne šipke između uranijumskih šipki u jezgro reaktora. Kontrolne šipke trebalo je da apsorbuju neke od neutrona oslobođenih fisijom atoma, tako da ti neutroni ne mogu da uzrokuju cepanje previše drugih atoma. To je zaustavilo naglo širenje lančane reakcije, koja bi se inače eksponencijalno nekontrolisano odvijala kao u nuklearnoj bombi. Međutim, Akimov je slučajno ubacio previše šipki, što je velikom brzinom previše smanjilo izlaznu snagu reaktora. Znao je da će ubacivanje kontrolnih šipki izazvati usporavanje rada reaktora i snižavanje temperature. Ali previše ubačenih kontrolnih šipki dovodi do dodatnog usporavanja

rada reaktora i ogromnog smanjenja temperature, što još više usporava rad reaktora i izaziva još više hlađenja, a jedan proces sve više pojačava drugi, kao u zlokobnom začaranom krugu. Sad je već bio u panici, pa je isključio automatsku kontrolu sigurnosnih sistema, devedeset posto kontrolnih šipki stavio pod manuelnu kontrolu i uklonio ih iz jezgra reaktora da bi sprečio potpun prestanak rada reaktora.

Gledajući kako se pokazatelji na instrumentima podižu dok se izlazna snaga polako povećava, Akimovljevi srčani otkucaji polako su se vraćali u normalu. Pošto je sprečio krizu, prešao je na sledeću fazu testa i isključio pumpe. Akimov nije znao da pomoćni sistemi nisu pumpali vodu za hlađenje onoliko brzo kao što je trebalo. Mada se isprva to nije moglo otkriti, voda za hlađenje koja je sporo dolazila je isparavala, čime se smanjivala i njena mogućnost da apsorbuje neutrone i da redukuje toplotu jezgra reaktora. Povećana toplota i izlazna snaga još brže su pretvarali vodu za hlađenje u paru, što je dovelo do pojačavanja reakcije, stvaranja više snage: još jedan povratno šireći začarani zlokobni krug. Nekoliko preostalih kontrolnih šipki koje Akimov nije ručno kontrolisao automatski su ubačene da bi kontrolisale povećano stvaranje toplote, ali nisu bile dovoljne. Kad je shvatio da se izlazna snaga naglo i brzo povećava, Akimov je povukao sigurnosni prekidač za slučaj nesreće i pokrenuo sistem osmišljen da se u jezgro reaktora automatski ubace sve kontrolne šipke i time ga isključe, ali bilo je prekasno. Naime, kad su šipke ubačene izazvale su kratak i intenzivan skok izlazne snage, zbog čega je došlo do pregrevanja jezgra reaktora; nekoliko uranijumskih poluga se polomilo i blokiralo dalje ubacivanje kontrolnih šipki. Pošto je toplotna energija rasla eksponencijalno, izlazna snaga povećala se za više od deset puta od one potrebne za optimalan nivo rada. Voda za hlađenje je velikom brzinom isparavala, što je izazvalo dve snažne eksplozije koje su uništile jezgro reaktora i otpustile radioaktivne elemente daleko po okolini.

Odbijajući da poveruje u obaveštenja o eksploziji reaktora, Akimov je preneo pogrešne informacije o stanju reaktora, odlažući time preduzimanje presudnih mera za sprečavanje širenja katastrofe. Kad je napokon shvatio kolike su razmere nesreće, Akimov je zajedno s članovima tima, svi nezaštićeni, upumpavao vodu u uništen reaktor. Dok su radili, bili su ozračeni dozama od 200 greja (jedinica za apsorbovanu dozu zračenja). Fatalna doza je oko deset greja, što znači da su nezaštićeni radnici primili fatalne doze za manje od pet minuta. Akimov je umro dve nedelje posle nesreće od akutnog trovanja radijacijom.

Sovjetski Savez je zvanično objavio da je u černobiljskoj katastrofi stradala trideset jedna osoba, mada je po nekim procenama, kojima su obuhvaćene i osobe koje su učestvovala u dekontaminaciji mesta, stradalo mnogo više. A to se ne odnosi na ljude koji su umrli od radioaktivnog zračenja koje se širilo izvan same nuklearne elektrane. Požar koji je buknuo u uništenom jezgru reaktora trajao je devet dana. Vatra je odnela u atmosferu više stotina puta radioaktivnog materijala nego što je bilo otpušteno prilikom bombardovanja Hirošime, a to je imalo užasne posledice, i po ljude i po prirodu, gotovo u celoj Evropi.<sup>9</sup>

Ne primer, 2. maja 1986. godine, u planinskim delovima Velike Britanije bilo je obilnih padavina netipičnih za taj period godine. U kapljici kiše pronađeni su radioaktivni produkti nuklearnog otpada od eksplozije – stroncijum-90, cezijum-137, jodin-131. Otprilike jedan posto radijacije oslobođene iz černobiljskog reaktora palo je na Veliku Britaniju. Tlo je apsorbovalo te radioaktivne izotope, koji su postali deo trave koju su pasle ovce. Posledica – radioaktivno meso.

Ministarstvo poljoprivrede smesta je zabranilo prodaju i premeštanje ovaca iz zagađenih oblasti, a to je uticalo na devet hiljada farmi i više od četiri miliona ovaca. Odgajivač ovaca u Jezerskoj oblasti Dejvid Elvud nije mogao da shvati šta se dešava. Oblak koji je nosio nevidljive radioaktivne izotope koje

gotovo da nije bilo moguće detektovati bacao je dugačku senku na njegov izvor prihoda i život. Kad god je želeo da proda ovce, morao je da ih izoluje i pozove državnog inspektora da proveri nivo radijacije u njima. Svaki put kad bi došli, inspektori bi mu rekli da će zabrana trajati još samo godinu dana ili otprilike toliko. Elvud je živeo dvadeset pet godina pod tim oblakom, sve dok zabrana konačno nije ukinuta 2012. godine.

Bilo bi, međutim, mnogo lakše da je vlada obavestila Elvuda i druge farmere kad će nivo radijacije biti dovoljno bezbedan da mogu da prodaju svoje ovce. Nivo radijacije je izuzetno predvidljiv, zahvaljujući pojavi poznatoj kao eksponencijalno opadanje.

## Nauka datiranja

Eksponencijalno opadanje, po direktnoj analogiji s eksponencijalnim rastom, opisuje svaki kvantitet koji *se smanjuje* srazmerno svojoj trenutnoj vrednosti – setite se smanjenja broja bombonica *M&Ms* svakog dana i krive tobogana koja prikazuje kako opadaju. Eksponencijalno opadanje opisuje raznolike pojave: od vremena eliminacije lekova iz krvi<sup>10</sup> do opadanja pene u čaši piva.<sup>11</sup> Naročito dobro prikazuje stopu smanjenja, s vremenom, nivoa zračenja koje emituje neka radioaktivna supstanca.<sup>12</sup>

Nestabilni atomi radioaktivnih supstanci spontano će emitovati energiju u obliku radijacije, čak i bez spoljašnjeg okidača, u procesu poznatom kao radioaktivni raspad. Na nivou pojedinačnog atoma, proces raspada je nasumičan – kvantna teorija implicira da je nemoguće predvideti kad će se dati atom raspasti. Međutim, na nivou materijala sačinjenih od ogromnog broja atoma, smanjenje radioaktivnosti odvija se kao predvidljivo eksponencijalno opadanje. Broj atoma se smanjuje srazmerno broju koji preostaje. Svaki atom raspada