

MERENJE - DISKRETNI ŠARM CIVILIZACIJE

Ivan V. Aničin

Fizički Fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, Jugoslavija

OMNIA IN NUMERO ET MENSURA

Natpis nad ulazom u
Astronomsku Opservatoriju
u Beogradu

Naslov ovog eseja odslikava autorovo ubeđenje da se merenje suviše retko prepoznaje kao jedan od bitnih činilaca pod čijim se uticajem formirala basnoslovno kompleksna savremena civilizacija. Ekspliciranje bar jednog dela uloge merenja u evoluciji čovečanstva, a naročito u evoluciji njegovog kolektivnog intelekta, cilj je ovog teksta.

Naizgled suvoparno ali zato najsažetije rečeno *merenje je postupak kojim se dolazi do opisivanja određene karakteristike datog entiteta brojem*. Celokupna moć merenja, odnosno pridruživanja realnih brojeva karakteristikama entiteta, i leži u jednostavnoj činjenici da je skup realnih brojeva uređen, sa jasno definisanim relacijama "jednako", "toliko i toliko puta manje, ili veće", itd. Rezultat svakog merenja je, dakle, broj koji pokazuje koliko puta je u konkretnom slučaju data karakteristika veća ili manja od neke istovrsne koju smo izabrali za standardnu jediničnu karakteristiku. Da bi se merenje obavilo potrebno je prema tome, bar u principu, imati:

- 1) materijalnog predstavnika te standardne karakteristike i
- 2) sredstva i metode za upoređivanje sa tim standardom.

Danas je moguće, i potrebno, meriti, odnosno kvantitativno upoređivati, nekoliko stotina veoma raznovrsnih karakteristika najraznovrsnijih entiteta. Neke od tih karakteristika bliske su čulnom percepiranju prirode dok su druge veoma apstraktne. Raznih sredstava i metoda za merenje ima na desetine hiljada. Čitava jedna nauka bavi se razvojem i usavršavanjem merenja *per se*. Sve države poseduju organizacije koje se združeno trude da se rezultati istih merenja po Zemljinom šaru što manje razlikuju. Po grubim procenama u svetu se svakodnevno izvrši do hiljadu milijardi merenja. Zašto sve to?

Najtačniji ali trivijalan odgovor na gornje pitanje bio bi da razloga za to ima tačno onoliko koliko se ukupno merenja izvrši. U pokušaju da budemo informativniji mogli bismo osnovne razloge zbog kojih se meri da svrstamo u četiri glavne grupe:

1. **Razmena dobara u svakodnevnom životu.** Nesumnjivo je da je od toga, u preistorijsko vreme, sve i počelo. Kvantifikacija raspodele, vrednovanje rada i dobara, razmena i trgovina, odvajkada su zahtevali egzaktnije upoređivanje dužina, površina, težina, vremena, brzina, no što se to može uraditi "od oka". Već ovde intuitivno shvatamo da je *merenje jedini način da se priroda objektivno opiše*; da rezultat tog opisa ne zavisi od toga ko, gde, i kada, taj opis pokušava.

2. **Masovna proizvodnja dobara.** Obezbeđenje kvalitetnog života za brzo narastajuću populaciju Zemlje nemoguće je bez standardizovane masovne proizvodnje. Izrada sredstava za masovnu proizvodnju dobara koja će zadovoljavati date standarde i kontrola standardnosti tih proizvoda stalni su visokozahtevan korisnik merenja. To čini samu osnovu tehnike i tehnologije, odnosno industrijalizovanog društva uopšte.

3. **Kontrola i upravljanje sistemima.** Prikupljanje mernih informacija o stanju u sistemu, preduzimanje određenih dejstava i kontrole učinka tih dejstava (opet merenjem) osnova je "informatičkog društva" današnjice. Delove tog operacionog lanca u kome je merenje ključni element nalazimo u upravljanju jednostavnim mašinama, u rukovođenju proizvodnim kompleksima, u upravljanju energetske sistemima, pa možda i u upravljanju celim društvima. Tu se mogu pridružiti i tako različite oblasti kao što su, na primer, navigacija, medicinska dijagnostika i terapija, kao i beskonačno raznovrsne primene merenja u svim ostalim naukama.

4. **Upoznavanje pravilnosti u ponašanju prirode.** Ni najmanje ne umanjujući značaj tri prethodna razloga zbog kojih se merenja vrše, a kojima su posvećeni drugi tekstovi ovog zbornika, ovde ćemo naročitu pažnju posvetiti baš ovom, četvrtom razlogu.

Među svim entitetima u prirodi (bez obzira na to šta pod tim terminom tačno podrazumevali) postoje oni čija se stanja u potpunosti mogu opisati nevelikim brojem njihovih bitnih karakteristika, kao što postoje i procesi i promene u kojima oni učestvuju koji se takođe mogu opisati nevelikim brojem odgovarajućih karakteristika. Takvi se entiteti nazivaju fizičkim sistemima, takvi procesi fizičkim procesima a te karakteristike koje ih jednoznačno specificiraju - fizičkim veličinama. Te se karakteristike mogu meriti a time se stanja fizičkih sistema i procesa mogu u potpunosti opisivati skupovima brojeva. Istovremeno pretpostavljamo da posedujemo i operaciona znanja potrebna da svaki takav sistem zaista i dovedemo u stanje opisano unapred zadatim skupom brojeva. Dovodeći fizičke sisteme u stanja definisana određenim brojevima i prateći evoluciju tih brojeva i međusobne zavisnosti mi smo u stanju da, uočavajući **matematičke relacije** između tih brojeva, **egzaktno predvidimo** buduća (i prošla) stanja tog sistema i da se u ispravnost tog predviđanja uverimo novim, kontrolnim merenjima. Celokupno iskustvo nas uverava da su te matematičke relacije, za identičnu situaciju u prirodi, uvek iste, odnosno da su zakoni prirode kauzalni i kanonični a time i spoznatljivi. Po svemu sudeći to važi i za sve druge sisteme koji se od fizičkih razlikuju verovatno samo po nivou složenosti.

Nekoliko prethodnih rečenica predstavljaju pokušaj maksimalnog sažimanja definicije ideala egzaktnog naučnog poznavanja prirode. Fizika je danas najbliža tom idealu te smo se zato na nju i ograničili. Taj idealni opšti program, iskristalisan tokom nekoliko stotina godina iskustva, izbacuje dva pojma kao bitna za razvoj čovekovog poznavanja sveta: **merenje** i **matematiku**. Ovo dvoje dali su genezu, svaki sa svoje strane, **eksperimentu** i **teoriji**. Jer prvo behu merenje i matematika a zatim eksperiment i teorija. Njihova sinteza i čini potpun skup **operativnih znanja**. Ovim smo želeli da potvrdimo da je merenje zaista prvi od dva stožerna stuba civilizacije, i da je to onaj čarobni ključ koji **čoveku koji zna matematiku** otvara vrata prirode. Takav čovek u prirodu ulazi sa uverenjem da može spoznati njenu prošlost i budućnost i da može voljno i predvidivo da utiče na njenu evoluciju. Ko na tom putu previdi primat merenja neizbežno kliza u metafiziku.

Da ovo što smo taksativno izrekli dalje ilustrujemo i oživimo prodiskutovaćemo delimično bar neke od mnogih aspekata merenja koji su bitni za proces spoznavanja funkcionisanja prirode.

Principa merenja ima praktično onoliko koliko je fizičkih pojava a svi metodi merenja mogu uglavnom da se svrstaju u dve osnovne kategorije:

1) *metod upoređenja sa merom*, u kome se data veličina direktno poredi sa materijalnim predstavnikom jedinice mere i odatle nalazi koliko je puta njena aktuelna vrednost veća ili manja od te jedinice, i,

2) *metod devijacije*, u kome se aktuelna vrednost date veličine dobija iz stanja mernog sistema (instrumenta) koji je u interakciji sa merenim sistemom, pri čemu je stanje mernog sistema kada se on nalazi u interakciji sa merenim sistemom u kome je vrednost merene veličine jednaka jedinici, poznato.

U prvom slučaju potrebno je, kako se to kaže, imati **kalibrisane mere** a u drugom **kalibrisane instrumente**. Bez obzira na notornu činjenicu da je merenje po svojoj suštini *apsolutno objektivno* jer njegov ishod zavisi praktično samo od toga kako jedan fizički sistem (merni sistem) kroz tzv. mernu interakciju "vidi" drugi fizički sistem (mereni sistem), o čemu najbolje govori današnje stanje mernih tehnika gde upotreba supersenzora i brzih računara dovodi dotle da čovek u merenjima uopšte i ne učestvuje; bez obzira na to, dakle, rezultati merenja jedne te iste situacije dobijeni korišćenjem istih ili raznih principa i metoda merenja, istih ili različitih mernih sredstava, na istim ili različitim mestima, u isto ili različito vreme, *uvek će se međusobno razlikovati*.

Razloga za ovo razlikovanje ima više. U najgrubljem, njihovo poreklo je dvojako. Kao prvo, tačnost kalibracije mera i instrumenata je konačna, tj. u svakom merenju koristimo više ili manje različitu jedinicu mere. Uz to ide i činjenica da se u većini merenja teško može apsolutno znati da li je stanje sistema koje je u merenju zaista realizovano identično stanju u kome pretpostavljamo da se sistem nalazi i koje je opisano odgovarajućom teorijom, tj. na koje *de facto* primenjujemo konkretnu, naješće vrlo složenu logiku merenja (korekcije, itd.). Kao rezultat ovoga dobija se od slučaja do slučaja raznoliko odstupanje od neke stvarne vrednosti koju pretpostavljamo da merena veličina konkretno ima a koje pripisujemo postojanju tzv. *sistematske greške*. Procena stvarne sistematske greške predstavlja osnovno umeće eksperimentatora a njeno smanjenje je, onda kada je to potrebno, ono što jedno merenje čini skupim, u smislu uloženog novca, vremena i truda. Potpuna eliminacija sistematske greške, što bi se svelo na dostizanje apsolutne tačnosti kalibracije, odnosno apsolutno tačnu reprodukciju etalona, očigledno nije moguća. Svako merenje, nadalje, mernom interakcijom na sebi svojstven način manje ili više perturbira stanje sistema koje meri a potpuna eliminacija i egzaktna korekcija ove perturbacije nikad nije moguća. Zlatno pravilo eksperimentalnog spoznavanja prirode zato i glasi da se nešto može smatrati poznatim tek onda kada se rezultati iz više metodološki različitih ispitivanja unutar sebi svojstvenih sistematskih grešaka slože.

Drugi skup razloga dovodi do međusobnog razlikovanja rezultata merenja čak i kada su ova ponovljena na maksimalno identičan način, na istom mestu, na istom sistemu, istim mernim sredstvima, pod identičnim uslovima. Ovaj rastur rezultata ponovljenih merenja u skladu sa teorijom verovatnoće i matematičkom statistikom definiše tzv. *slučajnu grešku* rezultata. Sam rezultat takvog niza ponovljenih merenja jednak je njihovoj srednjoj vrednosti a veličina slučajne greške određuje interval oko te srednje vrednosti u

kome bi se, sa datom verovatnoćom, našla stvarna srednja vrednost kada bi se takav isti niz merenja ponovio beskonačno mnogo puta. Osnovna osobina slučajne greške je da ona opada sa kvadratnim korenom iz broja ponovljenih merenja iskorišćenih za nalaženje srednje vrednosti, te da teži nuli kada broj tih merenja neograničeno raste. Drugim rečima srednja vrednost se, uprkos neizbežnog rastura pojedinačnih rezultata definisanog prirodom situacije i opisanog korenom iz srednjeg kvadratnog odstupanja pojedinačnih rezultata od srednje vrednosti, bar u principu može dobiti potpuno tačno, tj. **srednja vrednost u principu nije statistička veličina**. U praksi, međutim, smanjenje slučajnih grešaka povećanjem broja merenja ima smisla samo donekle. Uvek je bolje, kad god se to može, smanjiti stvarni rastur pojedinačnih rezultata.

Uzroci postojanja rastura pojedinačnih rezultata dele se na delimično reducibilne i ireducibilne. Delimično reducibilni potiču od konačne reproducibilnosti stanja mernih instrumenata (ponekad zvanom preciznošću instrumenata) kao i od slučajnosti interakcije sa okolinom, odnosno od stabilnosti eksperimentalnih uslova, i sl. Ireducibilni su suštinski neuklonjivi a potiču od diskretne strukture materije i neizbežnih fluktuacija koncentracije njenih elementarnih entiteta, kao i od kvantnomehaničkog verovatnostnog karaktera mikrosveta koji se svodi na klasični determinizam samo za srednje vrednosti veličina koje su realizovane beskonačnim brojem reprezentacija, što se inače naziva statističkim determinizmom (nije bez interesa činjenica da se spoznaja ovih opštih osobina svih merenja poklapa ustvari sa spoznajom fundamentalnih osobina prirode). Drugim rečima, merenja visoke osetljivosti neizbežno osećaju večiti i neuklonjivi nemir mikrosveta ali se on može usrednjiti u makroskopski determinizam principijelno proizvoljno visoke tačnosti.

Bez obzira na to o kojoj se vrsti **eksperimentalne greške** radilo, sistematskoj, slučajnoj, ili o obe, njeno postojanje ekvivalentno je iskazu da svaki rezultat merenja može biti predstavljen **samo konačnim brojem sigurnih cifara**; pridruživanje greške jedini je način da kvantitativno opišemo kvalitet rezultata merenja. Broj sigurnih cifara rezultata merenja može se identifikovati sa **tačnošću rezultata** i jednak je redu veličine recipročne relativne greške, odnosno količnika greške i samog rezultata (relativna greška reda procenta znači dve sigurne cifre, reda promila tri, reda ppm šest, reda 10^{-8} osam, itd.). Ostale cifre rezultata, nikad više od dve dodatne, prekrivene su eksperimentalnom greškom koja se najčešće citira simetrično u odnosu na samu vrednost rezultata. Tačniji rezultat, dakle, prosto znači da smo odredili uži interval vrednosti u kome cenimo da se stvarni rezultat, sa određenom verovatnoćom, nalazi. Smanjenje grešaka, odnosno povećanje tačnosti našeg empirijskog kvantitativnog poznavanja prirode osnovna je tendencija celokupne eksperimentalne nauke. Dobar deo novih spoznaja leži u još uvek nesigurnim ciframa rezultata merenja; naše znanje evoluiralo dobrim delom kroz evoluciju tih rezultata. Tu se nalaze novi, nepoznati efekti "višeg reda", tu će se pokazati eventualna nesavršenost našeg tekućeg teorijskog razumevanja prirode. Naš raniji iskaz o ceni smanjenja grešaka sada možemo preformulisati i reći da **ono što u merenjima košta jesu nove sigurne cifre rezultata**. Već posle ovog kratkog razmatranja osnovnih osobina eksperimentalnih grešaka, tj. uzroka ograničene tačnosti merenja, možemo videti da je jedna od osnovnih neuklonjivih komponenti greške uslovljena ograničenom tačnošću kalibracije, odnosno lošom reprodukcijom etalona. U istu kategoriju uzroka spada i eventualna nestabilnost tako materijalizovane jedinice mere. Nijedno merenje, očigledno, ne može imati manju grešku od one koja je diktirana tačnošću reprodukcije korišćenih etalona. Ovaj nas elementarni zaključak baca u srž problema izbora sistema jedinica i njihovih realizacija.

Problem sistema jedinica star je koliko i sam problem merenja. Sistem jedinica zapravo i ne mora da bude nikakav sistem; sasvim je moguće za svaku merljivu veličinu potpuno nezavisno i proizvoljno definisati neku jedinicu i pri tom se jedino rukovoditi mogućnošću realizacije te jedinice, mogućnošću njene reprodukcije i mogućnošću upoređivanja sa njom. Zahvaljujući postojanju indirektnih merenja u kojima se data veličina uopšte i ne meri već se preko važećih relacija njena vrednost izračunava iz vrednosti direktno merenih veličina koje simultano opisuju stanje istog sistema, međutim, moguće je nezavisno i proizvoljno odabrati jedinice samo za ograničeni broj veličina dok će jedinice ostalih veličina preko teorijskih ili definicionih relacija biti od njih zavisne. Veličine čije jedinice nezavisno biramo nazivamo *osnovnim* ili *bazisnim* a za one druge čije su jedinice onda jednoznačno određene preko prirodnih zakona kažemo da su *izvedene*. Zavisnost jedinice izvedene veličine od osnovnih određuje se "dimenzijom" veličine koja je monom formiran proizvodom simbola osnovnih veličina (ili njihovih jedinica) podignutih na odgovarajuće stepene. Vreme za prvi racionalni izbor sistema jedinica sazrelo je tek kada je dovoljan broj relacija među merljivim karakteristikama prirode bio čvrsto ustanovljen (unutar mehanike) i možda nije slučajno što je ono koincidiralo sa Francuskom revolucijom; sa vremenom u kome je učinjen pokušaj da se sve oblasti života dovedu u sklad sa onim što se u tom prosvećenom dobu smatralo najpozitivnijim saznanjima.

Prirodnim tokom stvari kao bazisne veličine i tada su se nametnule one koje su nam oduvek i perceptivno i intuitivno bile najbliže: dužina, masa (zapravo težina) i vreme, koje su i najpogodnije za mehaniku, a njihove jedinice, koje su uvek birane u skladu sa antropomorfnim principima i u tom prvom sistemu jedinica ostale su bliske svetu čovekovih čula. Već tada je, međutim, komisiji koja je dobila zadatak da reši ovaj važan problem i koja je bila sastavljena od najboljih umova Francuske toga doba, na čelu sa genijalnim Laplasom, bilo sasvim jasno da je bitno da se etaloni bazisnih veličina izaberu tako da budu što reproducibilniji, što stabilniji i što dostupniji.

Uprkos tome što je vreme verovatno najapstraktnija fizička veličina ipak se već tada jasno osećalo da sa njim tog problema nema. Jedinica vremena bila je oduvek definisana preko periodičnih astronomskih pojava koje su ili inercijalnog ili gravitacionog porekla (dan i godina) te su dovoljno fundamentalne da ono malo nefundamentalnih disipativnih procesa (razna trenja i plime) nije na nivou tadašnje tačnosti merenja kratkih intervala vremena ("čuvanja vremena", odnosno interpolacije dugačkih astronomskih intervala) tog doba predstavljalo ozbiljnu smetnju. Potpuna i večita samerljivost "ritmova kucanja" svih fundamentalnih procesa tada poznatih, a vreme *de facto* i nije ništa drugo do izraz stalnosti te samerljivosti, odnosno kanoničnosti fizičkih zakona, izgledala je apsolutna. Sasvim je druga situacija bila sa masom i dužinom. Kako se ispostavilo, problem etaloniranja mase, koji onda nije bio zadovoljavajuće rešen, nije to ni dan danas. Sa dužinom je, međutim, učinjen pokušaj da se veže za neki fundamentalni sistem ili proces. Korišćenje dužine sekundnog klatna bila je divna ideja vezivanja za gravitacionu interakciju ali se varijacija gravitacionog ubrzanja na površini Zemlje pokazala prevelikom. To je u svakom slučaju bila prva uočena mogućnost da se povežu etaloni za vreme i dužinu. Umesto toga usvojena je jedinica dužine vezana za oblik Zemlje bliska dužini sekundnog klatna (razlog što je ubrzanje zemljine teže u tim jedinicama približno jednako π^2 !) a jednaka desetomilionitom delu kvadranta pariskog meridijana. Pristupilo se koliko mukotrpnom i dugotrajnom toliko i čuvenom triangulacionom merenju dužine dela tog meridijana od Denkerka do Barselone (sl.1).

Uprkos ogromnom uloženom trudu i dotad neprevaziđenoj tačnosti merenja, ili baš zahvaljujući tome, shvaćeno je da je takvim načinom nemoguće obezbediti željenu tačnost reprodukcije pa je za etalon dužine proglašen, na osnovu tog merenja takođe pod Laplasovim rukovodstvom izrađen, sada već opštepoznati "arhivski metar".

Sl.1. Šema triangulacije dela pariskog meridijana od 1792 godine.

Neki od trouglova mereni su i do 170 puta! Dužina baze kod Melena (zadebljana linija) bila je jedina direktno merena u starim jedinicama, hvatima (1 hvat=1,949 m). Za nju je vezana cela mreža odakle je konačno dobijena veza: 1 m (10^{-7} deo kvadranta) = 0,513074 hvata. Da steknemo ideju o fantastičnoj tačnosti tog merenja izvedenog usred krvavog haosa Francuske revolucije recimo da je po današnjim merenjima desetomilioniti deo kvadranta pariskog meridijana samo za 0,2 mm duži od tada određenog metra, tj. da je ceo kvadrant dugačak 10 001 954,5 "arhivskih metara" umesto unapred zamišljenih 10 000 000 m !

Put od tog prvog sistema jedinica i njihovih etalona do današnjeg sistema jedinica i etalona jedna je od najzanimljivijih priča iz istorije čovečanstva, priča čije su niti nerazmrsivo upletene u fino tkanje ne samo egzaktnih nauka već i svih drugih oblasti savremene civilizacije. O mnogim zanimljivim aspektima te priče biće u ovom zborniku više reči. Mi ćemo se ovde ograničiti na još samo jednu stranu tog problema koja je direktno povezana sa našim krajnjim ciljem - rasvetljavanjem uloge tačnosti merenja u razvoju egzaktnog poznavanja prirode. Za te potrebe recimo da se tačnost reprodukcije različitih etalona danas kreće od minimalnih 10^{-8} do maksimalnih 10^{-14} pa čak i više, pri čemu se ova najveća tačnost opet ostvaruje kod etalona vremena, odnosno učestanosti, koji je vezan sa fundamentalnim procesima emisije elektromagnetnog zračenja iz atoma te je uvek potpuno reproducibilan i stabilan sa tendencijom daljeg povećanja stabilnosti do fantastičnih 10^{-18} . Ovo ima ogroman praktični značaj jer omogućava široku diseminaciju etalona maksimalne tačnosti putem radija i izvanredno pogodnu transformaciju u električne veličine. (Zahvaljujući tome svako domaćinstvo danas za beznačajnu sumu novca može da ima sat koji, kako kaže reklama, "ne greši više od jedne sekunde za milion godina"!).

Ova izvanredna tačnost u reprodukciji etalona sa jedne strane rezultirala je iz, a sa druge strane uslovila, celokupno stanje naše današnje naučnotehničke civilizacije. Ni ne pokušavajući da raspletemo to nerazmrsivo klupko uzajamnih uticaja pogledajmo neke važne posledice tako jako podignute tačnosti merenja na jednu oblast gde je ona od suštinskog značaja. Ovde imamo u vidu određivanje brojnih vrednosti takozvanih **fundamentalnih** (ili univerzalnih) **fizičkih konstanti**. Fundamentalne konstante su, kako im ime kaže, veličine koje se zbog nečega mogu smatrati osnovnijim i važnijim od ostalih i čije se vrednosti ne menjaju ni pod kakvim uslovima. U tu kategoriju ubrajaju se inače prilično raznovrsne veličine. Po nekim klasifikacijama sve ove konstante, kojih ima nekoliko desetina različitog "stepena fundamentalnosti", mogu se podeliti na tri osnovne grupe:

tip A: **osobine pojedinih elementarnih čestica**: mase mirovanja, električni naboji, sopstveni momenti impulsa, magnetni momenti, itd;

tip B: **veličine koje karakterišu čitave klase fizičkih pojava**: konstante koje opisuju intenzitete fundamentalnih interakcija: gravitacione, elektromagnetne, jake, itd;

tip V: **univerzalne konstante**, koje ulaze u univerzalne zakone prirode: brzina svetlosti, Plankova konstanta, itd.

Ono što je svim ovim raznorodnim veličinama zajedničko, međutim, jeste činjenica da su to veličine o kojima **ne znamo ništa**. Njihove brojne vrednosti, koje se iz ogromnog mnoštva raznovrsnih eksperimentalnih situacija mogu odrediti ili direktnim merenjem ili indirektnim zadovoljenjem teorijskih jednačina u kojima se one javljaju kao nepoznati dimenzionalni koeficijenti između direktno merljivih veličina (uglavnom pri opisu atomskih i subatomskih pojava), ne mogu se niotkud *a priori* predvideti, ni *a posteriori* razumeti ili teorijski objasniti. Za njih, jednostavno rečeno, nema mesta u našoj slici prirode; svo naše neznanje nalazi se u njima. Ako njih, međutim, primimo kao **datost** onda nam celokupno naše eksperimentalno i teorijski sistematizovano poznavanje prirode ustanovljava (a možda bar delom i objašnjava) pravilnosti po kojima funkcioniše veoma veliki njen deo. Filozofski gledano, potreba za kreatorom time je svedena na potrebu za **kreatorom fundamentalnih konstanti**.

Iz izuzetnog statusa ovih veličina sledi potreba da se njihove brojne vrednosti (izražene u sistemu jedinica koji je u tekućoj upotrebi) eksperimentalno upoznaju što se najbolje može. Celokupni arsenal sveg ljudskog znanja, mašte i dovitljivosti stavljen je u službu njihovog upoznavanja. Prelazeći preko detalja te priče koja je proizvod vrhunskog intelektualnog angažmana mnogih hiljada ljudi-godina rezimirajmo samo njene krajnje rezultate kako nam danas izgledaju. U tu svrhu u tabeli I date su SI vrednosti samo onih konstanti, ili njihovih kombinacija, koje su najbitnije za naše dalje izlaganje.

Kao prvo, ustanovljeno je sa visokom tačnošću da su fundamentalne konstante zaista i univerzalne, odnosno da su njihove vrednosti dobijene iz merenja i opisivanja sistema i pojava iz naizgled sasvim disparatnih oblasti (kao što su optika, elektricitet, magnetizam, atomska fizika, nuklearna fizika, fizika elementarnih čestica, elektrohemija, kvantna hemija, itd.) međusobno konzistentne. Aktuelne vrednosti konstanti, naime, i jesu dobijene usaglašavanjem vrednosti iz svih mogućih merenja (zadovoljavajući tzv. princip najmanjih kvadrata) te i predstavljaju onaj jedinstveni skup vrednosti koji simultano na najbolji mogući način teorijski zadovoljava celokupni univerzum eksperimentalnih podataka o prirodi. Ovo ima neprocenjivo dubok smisao. To, naime, predstavlja glavni i

neoboriv logički dokaz da je naše poznavanje prirode, na nivou postignute eksperimentalne tačnosti, dobro. Kroz ovo se, takođe, direktno manifestuje potpuno jedinstvo i prirode i naše slike o njoj i krepí naša vera u neku buduću sintezu svih znanja u jedinstvenu "magičnu formulu". Svaki dalji komentar bi verovatno samo razvodnio ove iskaze koji predstavljaju mogući klimaks velike avanture koju nazivamo savremenom civilizacijom.

Kao drugo, već sama visoka tačnost sa kojom su konstante poznate govori mnogo o suštini ustrojstva prirode. Ovo ćemo najbolje ilustrovati na konkretnim primerima konstanti koje opisuju osobine elementarnih čestica. Iz visoke tačnosti poznavanja ovih osobina kod čestica iste vrste, iako je ona ograničena na "samo" šest do najviše jedanaest sigurnih cifara, proističe naše principijelno uverenje da je svaka od ovih osobina kod čestica iste vrste apsolutno identična, tj. da je data osobina kod svih članova jedne vrste *ista do na beskonačno mnogo decimala*. Iako za ovo, jasno, *nikada* nećemo imati potpun dokaz naša slutnja da je tako dovoljno je jaka da se može smatrati uverenjem.

TABELA I

Vrednosti odabranih fundamentalnih konstanti (1986.godine) u SI i NAT sistemu

Ime	Simbol	SI vrednost	Jedinica	Rel. gr. (ppm) *	NAT vrednost	Jedinica
Brzina svetlosti u vakuumu	c	299 792 458	m/s	tačno	1	c
Planckova konstanta ($h/2\pi$)	\hbar	1.054 572 66(63)e-34	Js	0.60	1	\hbar
Masa elektrona	m	9.109 389 7(54)e-31	kg	0.59	1	m
Elementarno naelektrisanje	e	1.602 177 33(49)e-19	C	0.30	1	e
Komptonova talasna dužina(\hbar/mc)	λ_C	3.861 593 23(35)e-13	m	0.089	1	\hbar/mc
Borov magneton ($e\hbar/2m$)	μ_B	927.401 54(31)e-26	J/T	0.34	1/2	$e\hbar/m$
Kvant magnetnog fluksa ($h/2e$)	Φ_0	2.067 834 61(61)e-15	Wb	0.30	π	\hbar/e
Džozefsonov odnos ($2e/h$)	J	4.835 976 7(14)e-14	Hz/V	0.30	$1/\pi$	e/\hbar
Kvantna Holova otpornost (h/e^2)	R_H	25812.8056(12)	Ω	0.045	2π	\hbar/e^2
Masa protona	m_p	1.672 623 1(10)e-27	kg	0.59	1836.1527	m
Gravitaciona konstanta	γ	6.672 59(85)e-11	$\frac{m^3}{kg s^2}$	128	1.75e-45	$\hbar c/m^2$
Električna konstanta	ϵ_0	8.854 187 817e-12	F/m	tačno	$137.036/4\pi$	$e^2/\hbar c$
Permeabilnost vakuuma ($1/\epsilon_0 c^2$)	μ_0	$4\pi e-7$	N / A^2	tačno	$4\pi/137.036$	$\hbar c/(ec)^2$

*) Budući da su ovo stvarno konstante (v. tekst) pretpostavljamo da ove greške potiču od svega ostalog osim od stvarnih varijacija samih konstanti!

Ovakav zaključak suštinski je različit od onog u kome bi se smatralo da su opservirane vrednosti osobina elementarnih čestica ustvari samo srednje vrednosti njihovih distribucija koje su eventualno uže od trenutno dostignute eksperimentalne tačnosti. Na

ovaj način i pitanje kvantifikacije tih osobina postaje diskutabilno. U odnosu na šta, recimo, izraziti veličinu naelektrisanja neke elementarne čestice kada su sve koje su "naelektrisane" naelektrisane apsolutno istom količinom elektriciteta, tzv. elementarnim naelektrisanjem, i kada do sada (uprkos teorijskim predviđanjima) nije nađeno da je iko naelektrisan drugačije. Drugim rečima, osobina koju nazivamo naelektrisanjem, i koju definišemo samo operaciono preko sila između čestica, se može posedovati ili ne posedovati i ništa treće. Tu se, ustvari, i nema šta da kvantifikuje te je elementarno naelektrisanje kao stvoreno za jedinicu naelektrisanja sa beskonačno mnogo postojećih apsolutno identičnih realizacija, idealnih etalona. Svaka makroskopska količina elektriciteta tada je prosto celobrojni umnožak ove jedinične, što zbog njene malosti za iole veće količine praktično prelazi u kontinuum realnih brojeva.

Slična mada ne identična situacija je i sa još nekim fundamentalnim konstantama. I masa mirovanja slobodne elementarne čestice je u principu idealna jedinica mase sa savršenim etalom, pitanje je jedino masu koje čestice uzeti kao jediničnu. Kako sada izgleda elektron nema nikakvu substruktuuru i ima najmanju masu mirovanja te je najprirodniji kandidat. No, doza prozvoljnosti u izboru ostaje. To nas nikad potpuno ne zadovoljava jer će vrednosti "izvedenih" konstanti koje sadrže masu opet biti proizvoljne. Još jedan principijelni problem sastoji se u zavisnosti mase (i inercijalne i gravitacione) od toga sa čim i kako ova interaguje - masa se, recimo, smanjuje za iznos proporcionalan energiji veze, čak i u svakoj mernoj interakciji.

Sledeća konstanta koja je u ovom kontekstu zanimljiva je Plankova konstanta čija je vrednost jednaka kvantu i momenta impulsa i dejstva. Sopstveni momenti impulsa čestica, koji su njihove inherentne i neuništive karakteristike kao što su masa i naelektrisanje, jednake su ili celobrojnim ili polucelim umnošcima Plankove konstante. Drugačije vrednosti momenta impulsa, čak ni kada se radi o orbitnom kretanju, nisu moguće (za makroskopska tela i kretanja ovo opet praktično prelazi u kontinuum). Time i Plankova konstanta postaje potencijalni idealni etalon a moment impulsa pogodna bazisna veličina.

Poslednja konstanta koju ćemo posmatrati, iako je ona možda trebalo da bude prva, biće brzina svetlosti. Ta je veličina po mnogo čemu izuzetna. Osim što je to brzina prostiranja elektromagnetnog zračenja u vakuumu koja ne zavisi od stanja kretanja ni emitira zračenja ni onoga ko tu brzinu meri to je i najveća granična brzina u prirodi. (Prethodne tri veličine: naelektrisanje, masa i moment impulsa u diskutovanim konstantama imale su predstavnike najmanjih mogućih vrednosti - svojih kvanata - dok ovde imamo predstavnika najveće moguće vrednosti). Ta stalnost brzine svetlosti, koja je još uvek neshvaćena (postulirana) osnova teorije relativnosti, kandiduje je kao apsolutni etalon za brzinu. U postojećem sistemu jedinica (SI) ona je već i prihvaćena kao etalon, ali ne za brzinu (koja tu i nije bazisna veličina) već praktično kao etalon za dužinu. Visoka tačnost etalona za vreme kombinovana sa stalnošću brzine svetlosti (čija je vrednost u SI proglašena za *tačnu*) dovela je dotle da je postalo jasno da čuvanje jedinice dužine više nije neophodno i da se ona uvek može reprodukovati kao dužina koju svetlost pređe za definisani interval vremena (ovo se ionako već dugo koristi kao metod za merenje dužine a uz pojavu stabilnih lasera je svakako i među najtačnijim). Tako je brzina svetlosti za sada jedina fundamentalna konstanta koja je preuzela ulogu etalona i ona se *više neće meriti*.

Sada kada nam je ovde grubo skicirani razvoj i dostignuti stepen poznavanja prirode obezbedio gornja gledišta o fundamentalnim konstantama to je, čini se, razuman put koji

potencijalno očekuje i ostale etalone. Tri diskutovane konstante, (e, m, h), mogu principijelno da posluže istoj svrsi. To bi, između ostalog, promenilo postojeću neracionalnu situaciju u kojoj su jedinice osnovnih veličina birane proizvoljno pa vrednosti univerzalnih konstanti imaju slučajne brojne vrednosti koje zavise od izbora tih jedinica i samim tim nemaju nikakvog smisla. Kao etalone ne bismo imali efemerne asocijacije elementarnih entiteta koji su teško reproducibilni i nestabilni, što dovodi do fluktuacija eksperimentalnih vrednosti za ono za šta smo uvereni da je konstantno, već bi etaloni bili suštinski stalni a glavni deo fluktuacija rezultata merenja poticao bi od stvarnih fluktuacija onoga što se meri.

Gornji program je, jasno, samo idejno vrlo primamljiv a praktično se, zbog operacionih nepovoljnosti, gotovo ne može realizovati. U toku je, međutim, realizacija nečega što nije daleko od ovdje izloženog idealnog plana. Ispostavlja se, naime, da postoji niz takozvanih makroskopskih kvantnih efekata (Džozefsonovi efekti, kvantni Holov efekt, itd.) koji predstavljaju prirodne pojave čije su merljive karakteristike određene datim kombinacijama fundamentalnih konstanti te da se putem njih one mogu lako da materijalizuju i posluže kao etaloni. Oni se mogu korelirati i sa učestanošću što bitno olakšava realizaciju i podiže upotrebnu vrednost (recimo etaloniranje napona i sl.). U budućnosti, dakle, možemo očekivati da ćemo prirodu, na jedan ili drugi način, ipak meriti i upoznavati u većito nepromenljivim jedinicama njenih fundamentalnih entiteta i osobina. To će, nesumnjivo, omogućiti napredak u nove do sada nesigurne cifre rezultata našeg empirijskog poznavanja prirode i dalju evoluciju čovekovog intelekta u oblast jednoznačnog poimanja sveta.

U nadi da smo bar delimično ispunili očekivanja provocirana naslovom i da smo na čitaoca preneli bar deo uzbuđenja koje neizbežno prati proces kvantitativnog upoznavanja pravilnosti po kojima priroda funkcioniše naša bi priča ovim finalnim krešćendom mogla i da se završi.

* * *

Za one kojima, međutim, ovo nije bilo dovoljno, sledi neobavezna kadenca u kojoj ćemo demonstrirati neke osobenosti posmatranja prirode u sistemu jedinica zasnovanom na fundamentalnim konstantama (tzv. prirodni sistemi).

Prvi ovakav sistem uveo je još 1906. godine Maks Plank (Plankov apsolutni sistem). Čim je Ajnštajn 1905. oživotvorio "njegovu" konstantu shvatio je Plank da su vrednosti fundamentalnih konstanti, koje su se u to vreme tek rađale, samo refleks nekog još dubljeg ustrojstva prirode te je pokušao da na osnovu tih vrednosti zaključi nešto o ultimativnim osobinama materije. Njegov sistem kao jedinične veličine ima gravitacionu konstantu, brzinu svetlosti, Plankovu konstantu i Bolcmanovu konstantu (γ , c, h, k). Sledeći prirodni sistem pojavio se sa razvojem teorije atomske strukture (Hartrijev atomski sistem) i za jedinice ima masu elektrona, Plankovu konstantu i elementarno naelektrisanje (m, h, e). Formulacija kvantnih teorija koje su i relativistički invarijantne dovela je do uvođenja novog prirodnog sistema, sistema kvantne teorije polja, u kome su jedinične veličine Plankova konstanta, brzina svetlosti i masa neke elementarne čestice (h, c, m).

Prirodni sistem koji ćemo mi malo detaljnije prodiskutovati (zovimo ga skraćeno NAT, od "natural") imaće četiri osnovne veličine: brzinu (v), moment impulsa (Λ), masu (M) i

naelektrisanje (Q) sa jedinicama jednakim brzini svetlosti, Plankovoj konstanti, masi elektrona i elementarnom naelektrisanju (c, h, m, e). Takav je sistem u potpunosti ekvivalentan sistemima koji u oblasti mehanike i elektrodinamike kao osnovne veličine imaju uobičajene dužinu (L), masu (M), vreme (T) i struju (I), kao što je slučaj i sa SI. Da se ta ekvivalentnost pokaže potrebno je i dovoljno pokazati da je determinanta stepena dimenzija u uzajamnoj transformaciji bazisa dvaju sistema po apsolutnoj vrednosti jednaka jedinici. Kako je

$$v = L^1 M^0 T^{-1} I^0, \quad \Lambda = L^2 M^1 T^{-1} I^0, \quad M = L^0 M^1 T^0 I^0, \quad Q = L^0 M^0 T^1 I^1,$$

lako je videti da je taj uslov zadovoljen.

U tabeli II date su dimenzije nekih izabranih veličina izražene u NAT sistemu preko njihovih novih jedinica. Tim novim jedinicama dali smo nazive koji treba nedvojbeno da nam kažu o kojoj se veličini radi a u poslednjoj koloni su i vrednosti tih novih jedinica izražene u SI jedinicama za istu veličinu. Iz ove tabele i iz poslednje dve kolone tabele I u kojima su date vrednosti fundamentalnih konstanti izražene u NAT sistemu vidi se nekoliko njegovih zanimljivih osobina:

1. Konstante interakcija (gravitacione i elektromagnetne) izražene su u jedinicama koje osim odgovarajućeg naboja (mase i naelektrisanja) sadrže i brzinu svetlosti i Plankovu konstantu te potencijalno zadovoljavaju i kvantne i relativističke teorije tih interakcija.

2. Postoji potpuna simetrija između električnih i magnetnih pojava koja se odlikava kroz simetriju električne i magnetne konstante. Konstanta fine strukture $\alpha_{SI} = \mu_0 c e^2 / 2h = 1/137.036$ javlja se prirodno kao brojna vrednost konstante interakcije u niskoenergetskom limesu, na primer, u NAT sistemu (neracionalizovanom) Kulonov zakon glasi:

$$F(sil) = \alpha_e \frac{Q_1(el)Q_2(el)}{[r(duz)]^2}$$

a Bio-Savarov:

$$dB(magind) = \alpha_m \frac{I(struj)dl(duz) \sin \varphi}{[r(duz)]^2}.$$

gde je $\alpha_e = 1/137.036hc / (2\pi e^2)$ i $\alpha_m = 1/137.036hc / [2\pi (ec)^2]$. Konstanta gravitacione interakcije, zbog proizvoljnosti jedinice mase, i dalje ima proizvoljnu brojnu vrednost!

3. Makroskopski kvantni efekti, odnosno pojave u kojima se ispostavlja da su mnoge makroskopske veličine u suštini kvantovane, ne dolaze kao iznenađenje jer su prirodne jedinice tih veličina upravo jednake (ili proporcionalne) njihovim kvantima (recimo otpornost, magnetni fluks, itd.).

TABELA II

Jedinice izabраниh veličina u NAT sistemu i veza sa SI jedinicama

simbol veličine	naziv jedinice	dimenzija veličine	približna vrednost u SI jedinicama	komentar
v	1 brz	c	3e8 m/s	
M	1 mas	m	9.1e-31 kg	
Λ	1 mimp	\hbar	1.05e-34 J.s	
Q	1 el	e	1.6e-19 C	
l	1 duž	\hbar/mc	3.86e-13 m	
T	1 vrem	\hbar/mc^2	1.29e-21 s	
E	1 energ	mc^2	8.2e-14 J (511 keV)	
f	1 frek	mc^2/\hbar	7.77e20 Hz	
a	1 ubrz	mc^3/\hbar	2.33E29 m/s ²	
F	1 sil	m^2c^3/\hbar	0.212 N	
I	1 struj	emc^2/\hbar	124.4 A	
V	1 nap	mc^2/e	511 kV	
R	1 otp	\hbar/e^2	4108 Ω	
ϵ	1 elpolj	$m^2c^3/e\hbar$	1.32e18 V/m	1 elpom/1 elpolj = $e^2/\hbar c$ = jedinica ϵ_0
D	1 elpom	$e(mc/\hbar)^2$	1.076e6 C/m ²	1 elpolj / 1 magpolj = \hbar/e^2 = 1 otp ("impedansa vakuuma")
H	1 magpolj	$e(mc^{3/2}/\hbar)^2$	3.22e14 A/m	1 elpolj / 1 magind = c = 1 brz
B	1 magind	$m^2c^2/e\hbar$	4.41e9 T	1 magind / 1 magpolj = $\hbar c/(ec)^2$ = jedinica μ_0
C	1 kap	e^2/mc^2	3.13e-25 F	
L	1 ind	\hbar^2/me^2c^2	5.3e-18 H	
μ	1 magmom	$e\hbar/m$	1.85e-23 Am ²	
Φ	1 magfluks	\hbar/e	6.6e-16 Vs	
f/V	1 Džozef	e/\hbar	1.52e15 Hz/V	
M	1 magpol	ec	4.8e-11 Am	

4. Od posmatranih fundamentalnih konstanti konstante interakcija i mase čestica ostaju kao one kojima se vrednosti moraju eksperimentalno određivati. Ali ne samo to; to ostaju i jedine konstante kojima se teorijski može tražiti poreklo odnosno veza sa nekim drugim, eventualno još fundamentalnijim veličinama. Onim konstantama koje sada imaju jedinične vrednosti više se ni ne mogu tražiti eksperimentalne vrednosti a time ni teorijska objašnjenja za te vrednosti! Da li, konačno, mogućnost uspostavljanja ovakvog sistema i znači da među tim konstantama i nema nikakvih veza (između recimo c, h, e) i da njihove vrednosti i nemaju nikakvog smisla, ili nas ovakav pristup unapred lišava mogućnosti da nađemo uzroke zbog kojih je, na primer, $c=299\,792\,458$ m/s ili $e=1.602\,e-19$ C? Neka nam bude dozvoljeno da ovu finalnu temu ostavimo bez razrešenja.

LITERATURA

1. *Mere na tlu Srbije kroz vekove*, SANU, Beograd, 1974,
2. *Metrology at the Frontiers of Physics and Technology*, Int.School Enrico Fermi, Course CX, Torino, 1989,
3. B.W.Petley: *The Fundamental Constants and the Frontier of Measurement*, Hilger, Bristol, 1985,
4. *Kvantovaja metrologija i fundamentalnije konstanti*, Sbornik statei, Mir, Moskva, 1981
5. *Uspehi Fizičeskih Nauk*, **129**(1979)281,
6. R.Fleischmann, *Z.Phys.* **129**(1951)377,
7. E.R.Harrison, *Physics Today*, Dec. 1972, p.30,
8. D.J.Gross, *Physics Today*, Dec. 1989, p.9,
9. J.M.LevyLeblond: On the Conceptual Nature of Physical Constants, *Riv. Nuovo Cimento* **7**(1977)187,
10. E.R.Cohen and J.W.M.Du Mond: Our Knowledge of Fundamental Constants, *Rev.Mod.Phys.*, **37**(1965)537,
11. P.W.Bridgman: *Dimensional Analysis*, Yale Univ. Press, NewHaven, 1931,
12. S.Yiftah: *Constantes fondamentales des theories physiques*, GauthierVillars, Paris, 1956,
13. *Sveske Fizičkih Nauka*, god.III, br.2, 1990, (Oznake, jedinice, nazivi i fundamentalne konstante u fizici)
14. I.V.Aničin: *Obrada rezultata merenja*, Fizički Fakultet, Beograd, 1990.