
IVAN ANIČIN

POJAM VREMENA U FIZICI

Pojam vremena nam je sigurno jedan od najbližih a istovremeno i jedan od najzagonetnijih pojmova (u ovo se bez sumnje uverio svako ko je pokušao da ga definiše!). Ni u fizici, kao što će se videti, situacija nije različita. Ovo izlaganje je nužno suviše kratko, ali će čitalac koji se bude dublje zainteresovao naći na kraju spisak osnovne literature, koja je inače o ovom pitanju prilično obimna ali ipak ne onoliko koliko bi to moglo i trebalo da bude.

Za nas je veoma bitna činjenica da je pojam vremena jedan od retkih pojmova koji se u pokušaju da objektivno opišemo Prirodu koristi u gotovo identičnom značenju u kome se koristi u svakodnevnom životu. Drugim rečima, ovaj je pojam u fiziku preslikan direktno onako kako ga intuitivno shvatamo i osećamo. No, kakvo je to naše intuitivno shvatanje pojma vremena?

Traganje za ishodištem pojma vremena — „intuicionizam”

Osećaj o vremenu ne dobijamo preko nekog direktnog i specijalizovanog čula već se on formira u svesti u komplikovanom procesu koordiniranja informacija koje pritiču od svih čula. Pri tom smo u stanju da jasno definišemo dve klase stavova: prvi su vezani za termine „ranije” i „kasnije”, ili „pre” i „posle”, a drugi za termin „trajanje”. Značenja upravo ovih termina su nam intuitivno jasna i naš se osećaj vremena izražava samo kroz ove dve klase stavova. Razumno je pretpostaviti da su ovi aspekti intuitivnog pojma vremena rezultat preslikavanja određenih osobina Prirode u našu svest. Kojih?

Tipični iskazi: „Ovde kao da je vreme stalo” ili „Sat mi je stao”, očigledno slede otuda što se stanje sistema koji posmatramo ne menja. Osećaj o proticanju vremena vezan je, dakle, za promenu, smenjivanje stanja, datog sistema. U statičkom svetu u kome nema promene nema ni vremena (fotografija, recimo, upravo na takav

način „zaustavlja vreme“)! Ali ni svaka promena ne obezbeđuje mogućnost osećanja vremena; svet u kome bi se svi procesi periodično ponavljali takođe bi bio bez vremena, svaki ciklus identičan je sa ma kojim drugim, promene *de facto* ipak nema. Promene u našem svetu očigledno nisu ovakve vrste.

Naš veliki interes za problem vremena vezan je za neoborivu činjenicu da svi mi „starimo“: da počev od rođenja prolazimo kroz definisanu sukcesiju stanja koja nas, konačno, dovodi do stanja „smrti“ — stanja iz koga samo religija pokušava, bezuspešno, da nas spase. Ovaj je tok stanja živih organizama prvi Prirodni zakon koji smo upoznali, i to upoznali na najdrastičniji mogući način, iskusili ga na sebi samima. To je zakon u pravom smislu te reči; pravilo od koga nema izuzetka. Ova usmerena sukcesija stanja koju preživljavaju živi organizmi upravo nam i definiše intuitivni pojam vremena — usmerenog i neumitnog. Intuitivno tumačimo da starimo zato što „vreme prolazi“, *tempus fugit*; smatramo da nam svaki novi trenutak vremena donosi novo stanje. Vreme shvatamo kao poseban entitet nezavisan od svih pojava u Prirodi koji svojim tokom na misteriozan način diktira tempo promena koje pratimo.

Fizika, međutim, kao što će se videti, u suštini smatra da ovakav tok vremena ne postoji. Ne smatramo da novi trenuci vremena donose nova stanja sistemima, već da ova nova stanja definišu nove trenutke vremena — ne postoji promena zato što vreme teče, već „vreme teče“ zato što postoji promena! Pri tom ne ma kakva promena, već ona koja se sastoji u usmerenoj, jedno-smernoj, sukcesiji stanja. Radna definicija vremena se, ipak, u potpunosti poklapa sa „intuicionističkom“ definicijom. Prva potiče od Njutna i glasi: „Apsolutno, pravo i matematičko vreme, ili trajanje, teče glatko i jednako po svojoj sopstvenoj prirodi i nezavisno od ma čega spoljašnjeg.“

Merenje vremena — „operacionalizam“

Problem merenja vremena automatski je isto toliko kompleksan kao i problem njegove definicije. Kada kažemo: „Ostarilo sam za jedan dan“ pod tim podrazumevamo da je naš organizam preživeo određenu sukcesiju stanja dok se „nebeski svod jedanput okrenuo oko Zemlje“ ili Sunce opet izašlo na istom mestu. Tako je to, po predanju, otkako je sveta i veka. Rotacija Zemlje koja nam po osećanju izgleda uniformna, hladna i neosetljiva na to što nam odbrojava dane, meri dužinu trajanja naših života. Ovaj periodični proces nam i služi kao izvorna metrika vremenske sukcesije stanja, kao kvantita-

tivna i operacionalistička (pa i definiciona) mera proticanja vremena. Rotacija Zemlje i jeste naš prvi sat. U definisanju jedinice vremena i odgovarajućeg „sata” se i sastoji njegova operacionalistička definicija.

Vreme i mogućnost formulisanja zakona Prirode

Kada možemo smatrati da poznamo Prirodu ili, opet drugim rečima, u čemu se sastoji glavni zadatak fizike?

Upravo ova naša jaka vezanost za pojam vremena dovela je do sledeće formulacije osnovnog zadatka fizike: naći zakon promene stanja sistema u funkciji vremena, uz date početne i granične uslove. Treba, znači, naći zavisnost varijable koja karakteriše stanje sistema (operaciono je definisana) od vremena. Ovaj se pristup naziva determinističkim i, bio tzv. dinamički (pravi) ili statistički, danas predstavlja krajnji domet u opisivanju Prirode. On nam pruža moć predviđanja i prošlosti i budućnosti.

Apstraktno vreme u jednačinama, zakonima, fizike je nezavisna varijabla u biunivoknoj korespondenciji sa kontinuumom realnih brojeva. Odgovarajuće osobine skupa realnih brojeva su: a) potpuno je uređen; od dva realna broja jedan je manji a drugi veći, što odgovara pojmovima ranije i kasnije, i b) gust je; ako postoje dva realna broja između njih, uvek postoji i treći; to odgovara kontinuiranom toku vremena i omogućava primenu infinitezimalnog računa, odnosno kauzalno tumačenje pojava. Zakonitost koja vlada datim sistemom, dakle, poznamo kada smo u stanju da iz poznate vrednosti neke veličine Y koja karakteriše stanje sistema u nekom trenutku vremena t_0 matematičkim putem dobijemo vrednost te iste veličine Y u nekom drugom trenutku vremena t_1 , i to vrednost koja će se u tom trenutku vremena merenjem zaista i dobiti.

Prelazeći na eksperiment, varijabla t postaje vreme mereno satom. Sat je, pak, samo specifičan fizički sistem u kome se stanja uniformno smenjuju. Ukratko, ustanovljavanje ili provera fizičkog zakona sastoji se u poređenju brzina promena stanja u dva sistema od kojih je jedan, sat, standardizovan. Pri tom valjanost ovako ustanovljenih Prirodnih zakona verificira valjanost celog pristupa, ceo sistem je potpuno konzistentan! To znači da uvek uspevamo da reprodukujemo isti vremenski interval, odnosno da nam satovi uvek kucaju istim ritmom i da se za satom definisan interval vremena naša veličina Y , uz iste uslove, promeni uvek na isti način (pod ovo potpuno potpadaju i statistički zakoni). Ovaj značajan zaključak ćemo sada dalje razviti.

Homogenost vremena — kanoničnost Prirodnih zakona

Biće korisno da malo detaljnije pogledamo koje od fizičkih sistema danas zovemo satovima — meračima vremena. To su:

a) Najprirodniji i najočigledniji sistem koji regularno menja stanja i tako definiše metriku sukcesije događaja koju zovemo „tokom vremena“ jeste Zemlja sa svojom jednodnevnom (24-časovnom ili 86400-sekundnom) rotacijom i smenom dana i noći koju i intuitivno (verovatno preko fizioloških, cirkadijalnih procesa) osećamo kao regularnu. Ovako definisanu jedinicu vremena zovemo jedinicom Univerzalnog vremena. Proces koji se pri tom koristi je inercijalni.

b) Fiksiramo ravan koju, recimo, Jupiter opisuje kružeći oko Sunca. Vreme između dva uzastopna prolaska Zemlje kroz ovu ravan (s iste strane) zovemo jedinicom Efemernog vremena. Ovaj se proces odvija pod dejstvom gravitacione interakcije.

c) Zbog raspada beta tricijuma (jednog od izotopa vodonika) njegova se početna masa u datom uzorku smanjuje. Kada ova masa dostigne polovinu početne vrednosti kažemo da je protekla jedna jedinica Nuklearnog vremena (u ovom slučaju 12 godina). Ovaj se proces (raspad) odvija pod dejstvom *slabe interakcije*.

d) U atomu cezijuma postoji prelaz između dva izuzetno tanana stanja osnovnog stanja. Meri se učestanost (radio) zračenja emitovanog pri ovom prelazu. Period ovog zračenja definiše jedinicu Atomskog vremena (0,000000001 sekunda). Proces koji se koristi kao sat ovaj se put odvija pod dejstvom elektromagnetne interakcije.

Mehaničke satove, recimo, ovde nismo uključili jer nisu fundamentalni; ritam njihovog „kućanja“ lako se menja.

Bitno je da se ispostavilo da svi ovi sistemi koje smo definisali kao fundamentalne satove svoja stanja menjaju uvek u istom ritmu, istim tempom; da postoji večita samerljivost između jedinica vremena definisanih svakim od njih — da je odnos jedinica vremena definisanih različitim satovima uvek isti! Dok se masa tricijuma u ma kom uzorku, ma gde i ma kada, smanji na polovinu dotle Zemlja 12 puta prođe kroz ravan Jupitera i pri tom se 4380 puta okrene oko svoje ose, a elektromagnetni talas emitovan iz atoma cezijuma načini 10^{18} oscilacija — mi na Zemlji tada kažemo: „Prošlo je 12 godina!”

Ovo opravdava naš intuicionistički stav i dozvoljava nam da kažemo da svi ovi sistemi definišu (i mere) jedan isti, opšteprožimajući tok vremena koji se može poistovetiti sa Njutnovim apsolutnim vremenom (zbog relativističkih efekata ovo je tačno sve dok u odnosu na sistem sata mirujemo). Sledi da je svejedno kojim satom i kada u opštem toku istorije Vasiona vršimo otkrivanje i proveru zakona, rezultat će uvek, uz iste uslove, biti isti. Fizičaru u principu ne treba sat već samo hronometar — važna mu je samo reprodukcija vremenskog intervala u kome se pojava odvija a ne i smeštanje pojave u celu jednosmernu tekuću skalu vremena. Fizičaru nije važno kada radi i kojim hronometrom „meri vreme” — svi su trenuci vremena među sobom ravnopravni. Ova se osobina Prirode naziva homogenošću vremena¹⁾ i očigledno je ekvivalentna tvrdnji da su sve osobine Prirode večite i nepromenljive — fizičke konstante i zakoni su stalni. Priroda je, znači, u suštini „bezvremenska” i apsolutno kanonizirana; *tempus fugit* u ovom kontekstu nema nikakvog smisla.²⁾ Samo zahvaljujući tome, jasno, uopšte i možemo da je spoznamo, a u toj sasvim uspešnoj spoznaji je, što može da zvuči paradoksalno, pojam vremena bio veoma plodotvoran. Otkud to da se u jednom suštinski nepromenljivom svetu pojam vremena, koji implicira njegovu usmerenu promenu, uopšte može definisati?

Tempus fugit — „Strele vremena”

Odgovor na postavljeno pitanje je, dok se ne zahteva objašnjenje uzroka ovakvog ponašanja, veoma jednostavan. Upravo ti strogi i večiti zakoni Prirode takvi su da materiji diktiraju usmerenu promenu stanja, — promene koje materija u makroskopskoj skali doživljava pod pritiskom ovih zakona su jednosmerne, ireverzibilne. Relativne brzine svih promena pri tom su, pod istim uslovima, uvek iste, i tu činjenicu mi interpretiramo kao proticanje neumitnog i opšteprožimajućeg toka vremena.

Fizika poznaje nekoliko specifičnih velikih Prirodnih zakona koji uzrokuju „proticanje vremena”, koji dovode do toga da fizički sistemi preživljavaju ireverzibilne sukcesije stanja. Počev od Edingtona i Rajhenbaha odomaćeno je da se kaže da ovakvi procesi definišu „strelu vremena”. Alternativno, i egzaktnije, kaže se da

¹⁾ Iz homogenosti vremena matematički proizlazi jedan od najnekorumpiranih Prirodnih zakona — zakon o održanju energije.

²⁾ Postoji, međutim, mogućnost da se neke fizičke konstante, iako veoma sporo, ipak vremenom menjaju. To bi odgovaralo „kašnjenju” ili „žurenju” odgovarajućeg fundamentalnog sata. (Začetnik ove, kasnije veoma razrađivane ideje, je Dirak.)

su ovi procesi asimetrični u odnosu na inverziju vremena — dozvoljena im je samo jedna sukcesija stanja, dok se druga u Prirodi ne opaža. Opišimo ukratko tri važne strele vremena.

a) Statistička (termodinamička) strela vremena istorijski je definisana prva. Ako pojedinačno posmatramo elementarne konstituente materije dolazimo do zaključka da su to bezvremenski entiteti. Atomi i molekuli potpuno su reverzibilni sistemi. Ako dva atoma prežive elastičan sudar i taj proces snimimo na film pa film pustimo naopako dobićemo događaj koji je isto toliko verovatan kao i onaj izvorni. Razliku između ovakve dve projekcije filma ne možemo ni opaziti. Snimimo li, međutim, ma koji makroskopski proces, recimo prosto mešanje dve tečnosti, obrnuta projekcija pokazuje proces koji se u Prirodi ne odvija (setimo se smeha koji uvek prati obrnutu projekciju filma). I tako makrosistemi, mada su sastavljeni isključivo od elemenata koji unutar njih preživljavaju reverzibilne procese, kao celine preživljavaju samo ireverzibilne procese. Na taj način oni i definišu usmeren tok — strelu vremena.

Jedna od funkcija koje u statističkoj fizici definišu stanje sistema jeste i entropija. Ona je prosta kvantitativna mera verovatnoće ostvarenja datog stanja sistema. Što je sistem u verovatnijem stanju to mu je i entropija veća. Otud je shvatljivo da sistemi spontano teže stanjima veće entropije, verovatnijim stanjima. Verovatnija stanja su, pak, ona koja su konfiguraciono uniformnija, odnosno haotičnija. Ovaj rezultat statističke fizike govori da Priroda ne trpi uredenost, svaki ureden sistem spontano teži haotičnijem stanju, stanju veće entropije. Brzina kojom se težnja ka uniformnoj distribuciji unutar sistema ostvaruje zavisi od konkretnih uslova u sistemu. Kada se jednom stanje maksimalne entropije ostvari sistem više ne doživljava ništa. On samo fluktuirá oko ovog, takozvanog ravnotežnog stanja, i to tim slabije što je „makroskopičniji“. Vreme u njemu prestaje da teče! Tek otvaranjem prema nekom drugom sistemu koji se nalazi u nekom drugačijem stanju tok vremena ponovo se uspostavlja; opet počinje ireverzibilni proces uspostavljanja ravnoteže, ovaj put između ova dva sistema. Na sličan način, crpenjem energije iz nekog drugog sistema, u datom sistemu mogu da se odvijaju i procesi koji su praćeni smanjenjem entropije, uredenost tog sistema može i da raste. Međutim i tada entropija oba sistema uzeta zajedno ipak raste iz stanja u stanje, — stepen uredenosti koji se ostvaruje u jednom sistemu manji je od stepena neuredenosti koji se ostvaruje u onom koji obezbeđuje potrebnu energiju. Kažemo da

se sistem kome entropija opada „hrani negativnom entropijom” čiji je izvor onaj drugi sistem čija entropija raste.

„Proticanje vremena” je, dakle, s ovog gledišta posledica spontane težnje materije za uniformnom distribucijom. Ritam promena koje se pod pritiskom ove težnje (zakona koji nazivamo drugim principom termodinamike) odvijaju pri tom „otkucavaju” fundamentalni, bezvremenski procesi — oni određuju metriku vremena definisanog porastom entropije makrosveta.

b) Elektromagnetna strela vremena proističe iz činjenice da svaka naelektrisana čestica u proizvoljnom ubrzanom kretanju uvek samo emituje elektromagnetno zračenje (fotone), mada zakoni elektrodinamike dozvoljavaju i rešenje koje opisuje obrnut proces, proces u kome bi se elektromagnetno zračenje iz okolnog prostora koncentrisalo na naelektrisanju. Ovakav se obrnut proces, međutim, ne opaža; elektromagnetni procesi su ireverzibilni, sa definisanom usmerenom sukcesijom stanja, i definišu sopstvenu strelu vremena.

c) Kosmološka strela vremena. Iz podataka koje danas posedujemo o Vasioni sledi da:

— Vasiona sadrži veoma veliki broj samostalnih izvora energije (galaksija koje sačinjavaju zvezde) koji su homogeno i izotropno distribuirani, i

— Vasiona dostupna posmatranju evoluirala. Galaksije se izotropno međusobno udaljuju brzinama koje su tim veće što je udaljenost među njima veća. Ovo širenje Vasiona inače predviđa i klasična Njutnova teorija i Ajnštajnova opšta teorija relativnosti.

Širenje Vasiona predstavlja proces koji može da definiše sopstvenu strelu vremena. Ako, naime, poznajemo dva različita rastojanja između istih galaksija tada znamo da je manje od njih mereno pre onog drugog — ovo „pre” sada u terminima kosmološke strele vremena.

Ove tri strele vremena koje mogu da budu odgovorne za postojanje usmerenog toka vremena lako je konvencijom „odapeti u istom smeru”. Pitanje je, međutim, nisu li one na neki način i suštinski povezane; na primer, nije li samo jedna od njih nezavisna i primarna a da ostale iz nje proističu? Ovakvo povezivanje zahtevalo bi poznavanje dubokih veza između, na prvi pogled, potpuno distinktnih pojava. Samo postojanje veza označavalo bi postojanje tananog jedinstva i preciznog balansa između svih pojava u Prirodi, impliciralo bi važenje specifičnog „superdeterminizma” kome ništa ne bi smetalo što bi u suštini bio statistički. Ispri-

čajmo, opet u najkraćim crtama, jednu od mogućih priča koje pokušavaju da izvedu ovakvu sintezu. Pri tom treba obratiti pažnju na krućijalnu ulogu gravitacije.

Jedinstvo Prirode — Pokušaji sinteze

Pretpostavimo da teorija „velike eksplozije” dovoljno verno opisuje istoriju Vasiona. Po njoj istoriju Vasiona možemo da trasiramo do oko 15 milijardi godina unazad, do trenutka u kome se materija Vasiona nalazila u stanju izvanredne gustine i temperature, u stanju Gamovljevog „ilema”, koktela elementarnih čestica i zračenja. Posle velike eksplozije poćinje širenje materije Vasiona, u skladu sa statističkom, elektromagnetnom i kosmološkom strelom vremena. Pogledajmo prvo do kakve bi situacije došlo da se Vasiona ne širi, da je stacionarna. Danas sve više vlada ubeđenje da bi u tom slučaju, pre ili kasnije, svakako i došlo do nekad predviđene — na osnovu principa o porastu entropije, „toplotne smrti Vasiona”, ravnotežnog stanja maksimalne entropije u kome bi svi procesi, pa i tok vremena, stali (Bolcmanova fluktuaciona hipoteza smatra se krajnje neverovatnom). Širenje Vasiona, međutim, preko pojave „crvenog pomaka” obezbeđuje degradaciju energije zračenja, ćini je beskonaćnim termodinamićkim ponorom i sprećava dostizanje ravnoteže. Da, međutim, nema gravitacije, Vasiona bi ipak ostala mrtva, — proces hlaćenja primordijalne materije trajao bi, istina, beskonaćno dugo, ali bi to bio i ostao svet uniformno distribuirane sve hladnije materije i zraćenja. Gravitacija, pak, predstavlja jedinu težnju suprotnu težnji za uniformnom distribucijom materije u makrorazmerama, ona u širećoj Vasioni obezbeđuje formiranje agregacija materije uprkos trima navedenim strelama vremena, i predstavlja beskonaćni izvor „negativne entropije”. Pod njenim uticajem formiraju se zvezde i galaksije, u zvezdama dolazi do ponovnog zagrevanja materije i njene termonuklearne evolucije, rezultujuća svetlost sa zvezda predstavlja izvor energije koji na planetama održava dovoljno dugo makroskopske sisteme u stanju niske entropije — toliko dugo da su ovi u stanju da spoznaju Prirodu i da eventualno postanu kvalitativno nov faktor koji distribuira energiju i entropiju Vasiona! Ekspanzija Vasiona kombinovana sa efektima gravitacije tako predstavlja ultimativni razlog evolucije materije i postojanja usmerenog toka vremena, odnosno održavanja njegovih strela.

Možda je najbolje da ove zaključke ostavimo bez komentara. Napomenimo samo da sličnih pokušaja sinteze u novoj fizićkoj praksi ima sve više.

U našem izlaganju mnoge bitne elemente vezane za pojam vremena uopšte nismo pominjali. Na prvom mestu to su poznati rezultati relativističkih teorija, za njima slede stavovi kvantne teorije, zatim pojam takozvane mikroskopske strele vremena vezan za narušavanje simetrije vremena u slabim interakcijama, tu je i mogućnost postojanja „hronona” — kvanta vremena, itd. Od tema direktnije vezanih za naše izlaganje nismo govorili o izuzetnom ponašanju ekstravaganantnih gravitaciono kolabiranih objekata, takozvanih „crnih rupa”. Ukoliko postoje, ovi objekti učestvuju isključivo u ireverzibilnim procesima i predstavljaju jedina mesta u Vasioni gde se odvija obrnut tok energije od normalnog (energija iz okolnog prostora isključivo utiče u objekt). Mogućnost postojanja prostorno-vremenskih singulariteta takođe je vezana za njihovo postojanje. No, sve ovo je već sasvim druga priča.

Ponašanje materije u svakom lokalitetu i svakom vremenu, kao i u svakoj skali, verovatno je definisano i uzajamno korelirano sa stanjem i ponašanjem celokupne materije u Vasioni. Jedna od osnovanijih indikacija da ovo može da bude tačno jeste upravo i mogućnost definisanja opšteprožimajućeg toka vremena kome smo i posvetili ovoliko pažnje.

LITERATURA:

1. L. R. Heath: *The Concept of Time*, Univ. of Chicago Press, 1936.
2. M. F. Cleugh: *Time and its Importance in Modern Thought*, Methuen, London, 1937.
3. H. Reichenbach: *The Direction of Time*, Univ. of Calif. Press, Berkeley, 1956.
4. R. Schlegel: *Time and the Physical World*, Dover, New York, 1961.
5. J. T. Fraser, ed.: *The Voices of Time*, G. Braziller, New York, 1966.
6. T. Gold and D. L. Schumacher, eds.: *The Nature of Time*, Cornell Univ. Press, Ithaca, 1967.
7. *Le Temps et la Pensée Physique Contemporaine*, Dunod, Paris, 1968.
8. A. M. Мостепаненко: *Проблема универсальности основных свойств пространства и времени*, Наука, Ленинград, 1969.
9. J. T. Fraser, F. C. Haber and G. H. Müller, eds.: *The Study of Time*, Springer Verl. Heidelberg, 1972.
10. P. C. W. Davies: *The Physics of Time Asymmetry*, Surrey Univ. Press, 1974.
11. D. Layzer, *Sci. Am.*, Dec. 1975, p. 56.
12. B. Gal-Or, *Found. of Physics*, 6 (1976), 407, 623.