

Što se krije u zakonima fizike? – Pedagoško naslijeđe Richarda Feynmana

Vjera Lopac

Zavod za fiziku, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb

Sažetak. Richard Feynman (1918. – 1988.), dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1965., znanstvenu je slavu stekao formulacijom kvantne elektrodinamike i drugim vrhunskim doprinosima u raznim granama teorijske fizike. Čuven je i po Feynmanovim dijagramima kojima se prikazuju složena međudjelovanja među elementarnim česticama. Široka publika upoznala ga je kroz bilješke autobiografskog karaktera kao duhovitog i svestranog zabavljača. Između tih krajnosti otkrivamo savjesnog i temeljitog pedagoga, metodičara i učitelja čija su djela i danas jednako zanimljiva novim generacijama učenika, studenata i nastavnika. Godine 1960., pozvan da sudjeluje u osuvremenjivanju kurikula američke sveučilišne nastave opće fizike, stvorio je novi metodički pristup utemeljen na općim načelima – međudjelovanjima u prirodi, zakonima očuvanja, povezanosti matematike i fizike, simetriji u zakonima fizike te načelima vjerojatnosti i neodređenosti. Iz tog su pristupa proistekle dvije epohalno važne knjige: opsežan udžbenik *The Feynman Lectures on Physics* i zbirka od sedam predavanja održanih 1964. godine na sveučilištu Cornell, objavljenih 1965. pod naslovom *The Character of Physical Law*. Taj je sažeti prikaz temelja suvremene fizike još 1977. objavljen u hrvatskom prijevodu i do danas je doživio nekoliko izdanja. Izlaganje na ovom Simpoziju obuhvatit će najvažnije metodičke ideje tih knjiga i podatke o nekim drugim izvorima važnima za razumijevanje Feynmanovih pedagoških poruka.

Ključne riječi: Feynman, zakoni fizike, opća fizika, temeljna načela fizike, Messengerovi seminari

UVOD

Richard Feynman (1918.–1988.) [1,2] (Slika 1.), američki teorijski fizičar, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1965., karizmatična je osoba u čijim se iskustvima zrcali gotovo cijela povijest civilizacije dvadesetog stoljeća. Znanstvenu je slavu stekao otkrićima u području kvantne elektrodinamike, novom formulacijom kvantne mehanike poznatom kao teorija integrala po stazama i drugim važnim teorijskim doprinosima. Aktivno je pridonio Manhattanskom projektu stvaranja nuklearne bombe, korijenima računalne revolucije, maštovitom bilježenju procesa među elementarnim česticama u poznatim Feynmanovim dijagramima te brizi za nastavu matematike i fizike na svim obrazovnim razinama. Istražujući sigurnost svemirskih putovanja, pokazao je duboku pronicljivost u shvaćanju tehničkih detalja i procjeni rizika tih kompleksnih inženjerskih pothvata. Gotovo sto godina od Feynmanova rođenja i trideset godina nakon njegove smrti, njegovo ime danas je općepoznati pojam, utkan u sve pore suvremene globalne multimedijske kulture. Glavni je junak brojnih knjiga, članaka, filmova i medijskih prikaza. Pod njegovim imenom ili s autorskim potpisom iskusnih biografa i ilustratora o njemu je objavljeno mnoštvo djela. U svojim knjigama Feynman tumači što fizičari znaju o zakonima fizike. Ponekad se služi strogim jezikom matematike, ali često i popularizacijskim stilom prepunim sugestivnih primjera i slikovitih objašnjenja. Ovdje ćemo se posvetiti dvjema knjigama s dubokom pedagoškom namjenom, udžbeniku *The Feynman Lectures on Physics* [3-



SLIKA 1. Richard Feynman, slika preuzeta s mrežne adrese [1]

5] i knjizi *The Character of Physical Law*[6]. Uz osvrt na neke druge naslove[7-10] dat ćemo i presjek kroz Feynmanovu zanimljivu biografiju i životnu filozofiju.

„THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS” – „FEYNMANOVA PREDAVANJA IZ FIZIKE”

Godine 1950. pokrenut je veliki proces osuvremenjivanja nastave fizike u američkim školama. Odlučeno je da se provede reforma školskih kurikula i da se nastavom fizike obuhvati mnogo veći broj učenika srednjih škola. U proteklih se pola stoljeća fizika brzo razvijala, dok su nastavni programi ostali isti i ništa u njima nije upućivalo na golemi napredak fizike i njezinih primjena u suvremenom svijetu. Istodobno je uočeno da je i kurikulum fizike na sveučilištima zastario i da ga treba iz korijenja mijenjati. Nastava se, čak i za buduće fizičare, sastojala samo od seminarskih vježbi na kojima su studenti pod nadzorom asistenata rješavali zakučaste numeričke primjere iz klasične fizike. Vrhunske bi fizičare eventualno susreli tek mnogo kasnije, na poslijediplomskom studiju. Tako je 1960. pokrenuta reforma s ciljem da se predavanja iz opće fizike i pisanje udžbenika prepuste vodećim fizičarima koji bi studentima izravno prenijeli svoje oduševljenje novim pogledom na fiziku. Richardu Feynmanu, koji je već bio poznat po svojim nadahnutim i motivirajućim predavanjima, predloženo je da preuzme nastavu opće fizike na kalifornijskom sveučilištu Caltech. Predavanja koja je Feynman držao studentima dodiplomskih studija na Caltechu između 1961. i 1963. godine objavljena su u tri opsežna sveska pod naslovom *The Feynman Lectures on Physics*[3] (Slika 2.). Uz Feynmana su na izradi udžbenika radili i Matthew Sands i Robert B. Leighton, koji je služeći se bilješkama, fotografijama i magnetoskopskim snimkama predavanja prenio u pisani oblik. Pojedini dijelovi udžbenika tiskani su od 1963. do 1966. godine, a potom je objavljena i prilagođena zbirka zadataka.

Već od prvoga sata nastave bilo je jasno da je dotadašnji pristup okrenut naglavce. O drastičnoj promjeni u pristupu jasno govori sadržaj prve knjige, namijenjene prvoj godini studija. Naslovi nekih od 52 poglavlja prve knjige su *Atomi u gibanju, Veza fizike i ostalih znanosti, Očuvanje energije, Vjerojatnost, Specijalna teorija relativnosti, Prostor-vrijeme* – teme koje se u dotadašnjoj općoj fizici nisu spominjale.

U članku objavljenom 1963. urednik časopisa *American Journal of Physics* W.C. Michels navodi da je „knjiga ne samo izazvala veliko zanimanje kod svih fizičara s kojima je razgovarao, nego je njihovo razumijevanje fizike produbila u tolikoj mjeri da će i oni svoja predavanja u budućnosti značajno promijeniti”[11]. Navodi: “Različiti dijelovi knjige posebno će privući pojedine fizičare, ... preporučujemo ova poglavlja za početno čitanje: *Vjerojatnost* polazi od elementarnog uvoda i preko normalne razdiobe i slučajnih pomaka dolazi do načela neodređenosti; *Prostor-vrijeme* se nadovezuje na poglavlja o specijalnoj relativnosti. Poglavlje *Simetrije u zakonima fizike* jedan je od najboljih elementarnih prikaza toga sadržaja koje smo do sada vidjeli.”

Feynman je od početka naglašavao da živimo u relativističkom i kvantnomehaničkom svijetu, što je prije bilo nepojmljivo u nastavi opće fizike. Odmah je studentima rekao da postoje zajednička načela koja prekrivaju sva područja fizike, ali i to da su ona otvorena prema novim spoznajama. Prve dvije tvrdnje kojima se Feynman obratio studentima glasile su: „O znanosti: Ne zanima nas odakle je došla neka nova ideja – jedini test njezine valjanosti je eksperiment”, i „O atomima: Stvari su sastavljene od mnoštva sitnih čestica promjera od oko



SLIKA 2. Udžbenik *The Feynman Lectures on Physics* (slika preuzeta s mrežne adrese [3])

10^{-8} cm. Te su čestice u stanju neprekidnoga gibanja, a što se brže gibaju, to je toplije. Zajedno su tijesno posložene u veoma kompleksnim uzorcima, ali se odupiru kad ih se pokušava stisnuti još bliže jednu drugoj”[4].

Neposredno nakon izlaska prvoga sveska iz tiska, reakcije su bile ravne nevjerici. Uz divljenje prezentaciji i logici udžbenika, bilo je i sumnji u mogućnost njegove primjene u klasičnim sveučilišnim uvjetima. Smatralo se da je tek na poslijediplomskoj razini moguće u punom opsegu shvatiti smisao Feynmanovog tumačenja opće fizike. Međutim, mnogi bivši studenti fizike, među njima i oni koji su studirali na zagrebačkom Prirodoslovno-matematičkom fakultetu i kojima je u godinama nakon 1970. izvorni Feynmanov tekst bio obvezatna literatura za opću fiziku, uvjerljivo svjedoče kako ih je Feynman potaknuo da shvate i zavole fiziku te da ni s matematičkom stranom nisu imali nikakvih teškoća.

Feynmanov je stil i način predavanja bitno utjecao na generacije srednjoškolskih i sveučilišnih nastavnika fizike. W.C. Michels ističe da „treba shvatiti kako je Feynman u prvom redu ‚instructor's instructor‘ – učitelj učitelj” [11]. U tome je suštinska Feynmanova poruka učiteljima, znanstvenicima i svima koji odlučuju o obrazovnom procesu: visoka znanost i nastava ne smiju se uzajamno isključivati, a svoju znatiželju i oduševljenje kojim istražuju prirodu znanstvenici bi morali znati prenijeti na nove generacije nastavnika i studenata.

„Milenijsko” izdanje udžbenika, doručeno, osuvremenjeno i obogaćeno Feynmanovim osobnim primjedbama i fotografijama s originalnih predavanja, tiskano je 2005. U njemu je ispravljeno 885 grešaka koje su zabilježene tijekom proteklih godina. U predgovoru tom izdanju naglašava se da je dostupna i njegova on-line verzija te da je riječ o vrhunskom primjeru suvremenog elektroničkog izdavaštva, u kojem bi zasigurno i sam Feynman iskreno uživao. Udžbenik je namijenjen u prvom redu studentima, ali mu se može slobodno pristupiti na mrežnoj adresi <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>[4]. Mnogo dodatnih detalja sabrano je u opsežnom dokumentu na stranici <http://www.feynmanlectures.info/>[5]. Spomenimo još da je u anketi časopisa *Discover* godine 2006. Feynmanov udžbenik fizike proglašen jednom od 25 najvećih znanstvenih knjiga svih vremena[12].

„THE CHARACTER OF PHYSICAL LAW” – „OSOBITOSTI FIZIKALNIH ZAKONA”

Nakon uspjeha Feynmanovih predavanja na Caltechu, sveučilište Cornell na kojem je Feynman radio od 1945. do 1949. pozvalo ga je 1964. da održi sedam jednosatnih predavanja o zakonima fizike, u okviru Messengerovih seminara utemeljenih 1924. donacijom bivšeg studenta Hiram Messengera. Britanska televizijska tvrtka BBC predložila je da ih snimi i prikaže na televiziji. Snimku su nakon predavanja pažljivo pregledali i preslušali urednici BBC-a Fiona Holmes i Alan Sleath. Zabilježili su izgovorene riječi i objavili ih 1965. u obliku knjige *The Character of Physical Law*[6], koja je doživjela nezapamćen uspjeh među ljubiteljima znanstveno-popularizacijske literature. Prevedena je na desetke jezika i mnogo je puta nanovo objavljivana. Godine 1977. tiskano je prvo izdanje na hrvatskom jeziku, u izdanju Školske knjige iz Zagreba, pod naslovom *Osobitosti fizikalnih zakona*, u prijevodu Petra Colića i Vjere Lopac, s predgovorom Dubravka Tadića[6]. Dva daljnja izdanja tiskana su 1986. i 1991. Kako je interes za ta predavanja u novije vrijeme sve veći, Školska knjiga priprema izdavanje obnovljenoga i doručena četvrtog izdanja[6]. Posebna je zanimljivost, a za mnoge i svojevrsno iznenađenje, da su video-snimke tih predavanja danas u potpunosti dostupne na internetu. Za svakog zainteresiranog gledatelja one su nezaboravno iskustvo. Od brojnih stranica gdje ih je moguće naći ističemo njihov sjajan prikaz na portalu sveučilišta Cornell, na mrežnoj adresi <http://www.cornell.edu/video/playlist/richard-feynman-messenger-lectures> [13].

Da bismo dočarali Feynmanovo predavačko umijeće i humor kojim su odisala ta predavanja prikazimo ukratko neke detalje iz sedam poglavlja knjige. Kako se u svojim predavanjima

Feynman izravno obraćao publici, u ovom će tekstu neke njegove riječi i izjave biti doslovno preuzete iz prijevoda[6].

U prvom poglavlju *Zakon gravitacije – primjer zakona u fizici* Feynman opisuje zakon općeg privlačenja, prema kojemu sila među tijelima opada s kvadratom udaljenosti. Citiramo: „Tako je iznikla misao da u svemiru postoji opće privlačenje i da se svi predmeti i sva tijela uzajamno privlače. Ako je tako, onda Zemlja mora privlačiti Mjesec baš kao što Sunce privlači planete. No poznato je da Zemlja privlači i obične predmete: jer vi svi čvrsto sjedite na svojim stolicama, iako biste možda žarko željeli lebđjeti u zraku.” ... I dalje: „... što tjera planete da se vrte oko Sunca? U Keplerovo vrijeme neki su ljudi smatrali da iza planeta sjedi anđeo koji maše krilima i gura planet po stazi. Poslije ćete vidjeti da to i nije tako daleko od istine – s tom razlikom što ‚anđeli‘ sjede drukčije okrenuti i guraju planet prema samom Suncu...” Dalje kaže: „Galilej je otkrio veliko načelo, nazvano načelom inercije. ... Slobodno gibanje nema nikakva očita uzroka. Zašto su tijela sposobna da vječno lete po pravcu, to ne znamo. Zakon inercije u svojoj biti ostaje zagonetka. Anđela, doduše, nema, ali slobodno gibanje ipak postoji, i da bismo ga izmijenili, potrebno je primijeniti silu”.

U poglavlju *Povezanost matematike i fizike* Feynman izvodi geometrijski dokaz drugoga Keplerova zakona i zaključuje da „radijvektor planeta u eliptičnoj stazi u jednakim vremenima prebriše jednake površine. ... Gibanje u idućoj sekundi nastaje, dakle, kao rezultat nagodbe između onoga što bi planet htio i onoga što mu naređuje Sunce. Kako bi te površine mogle biti jednake, planet se mora gibati brže kad je bliže Suncu, a sporije kad je daleko od njega.” Ističe: „Pokazat ću vam da matematika nije drugo do sređeno zaključivanje. Tada ćete razumjeti u čemu je ljepota povezanosti tih dviju tvrdnja.”

U poglavlju *Veliki zakoni očuvanja* Feynman opisuje razne zakone očuvanja u fizici, ali najveći naglasak stavlja na očuvanje energije te pruža slikovit primjer iz života. Majka daje svom sinčiću kutiju s 28 kocaka i ostavlja ga samog da se s njima igra. Nakon nekog vremena dolazi i prebroji kocke: opet ih je 28, njihov je broj ostao isti. Drugi puta kada dođe kocaka ima samo 27, a jednu nalazi pod tepihom, dakle zakon očuvanja i dalje vrijedi. Kod treće provjere dvije svoje kocke je donio prijatelj koji se došao s dječakom igrati i kad se one maknu broj je i dalje očuvan. No dječak izmišlja nove nestašluke i baca kocke u kadu ispunjenu vodom. Majka određuje broj potopljenih kocaka prema visini vode u kadi. Dječak je sve maštovitiji pa kocke zatvara u kutiju ili baca kroz prozor. I kaže Feynman: „Želio bih sada analogijom objasniti koje su sličnosti, a koje razlike između ovog primjera i očuvanja energije. Pretpostavimo da ni u jednom slučaju majka nije vidjela kocke. ‚Broj vidljivih kocaka‘ nikad se ne pojavljuje. Majka svaki put računa članove kao što su ‚kocke u kutiji‘, ‚kocke u vodi‘ itd. U slučaju energije, koliko znamo, nema kocaka koje bismo mogli brojiti. Štoviše, kad je riječ o energiji, brojevi koje dobivamo uopće ne moraju biti cijeli. Takvo vam je očuvanje energije.”

U poglavlju *Simetrija u zakonima fizike* Feynman otkriva da „između zakona očuvanja i zakona simetrije postoji duboka povezanost.” Pojam simetrije u fizici znači da se svojstva i posljedice ne mijenjaju kad načinimo neku promjenu u matematičkom obliku zakona. Poslušajmo Feynmana: „Najjednostavnija simetrija te vrste – to je simetrija povezana s prostornim pomakom. To znači: sastavite li bilo kakav uređaj i izvedete li njime neki pokus, a zatim sastavite još jedan takav uređaj i izvedete isto takav pokus na nekome drugome mjestu, u oba ćete slučaja dobiti jednake rezultate. U stvarnosti to nije sasvim točno: sastavim li doista takav uređaj i pokušam li ga pomaknuti za šest metara ulijevo, naići ću na zid i bit će teškoća. Kad se govori o prostornom pomaku, treba uzeti u obzir sve ono što bi moglo izmijeniti uvjete pokusa, i sve to pomaknuti s eksperimentalnim uređajem.” Na kraju Feynman daje i primjere zakona u kojima je simetrija narušena te završava šaljivom pričom o dogovorenom susretu čovjeka s izvanzemaljcem: ali taj je je možda načinjen od antimaterije, pa bi se prilikom rukovanja njih dvojica mogli – uzajamno poništiti!

U poglavlju *Razlika prošlosti i budućnosti* kaže: „Svakome je jasno da se događaji u našem svijetu ne daju obrnuti.” Drugim riječima, ima stvari koje se ne mogu dogoditi naopako.

Međutim, prividna neobrativost prirode ne proizlazi iz neobrativosti osnovnih zakona fizike: Za mali broj čestica, njih četiri ili pet, vidljivo je da je zakon gravitacije obrativ u vremenu, zakoni elektriciteta i magnetizma također. „Ali stvarni predmeti koje susrećemo nisu napravljeni od četiri-pet molekula, već od četiri-pet milijuna milijuna milijuna milijuna molekula. ... Ispustite li šalicu, ona će se razbiti, i koliko god čekali, krhotine se ne će skupiti natrag i šalica vam ne će skočiti u ruku.” Do toga ne će doći – ne zato što je to nemoguće, nego zato što je zbog velikog broja čestica u stvari vjerojatnost za to zanemarivo mala.

U poglavlju *Vjerojatnost i neodređenost – kvantnomehanički pogled na prirodu* Feynman opisuje pokus s dvjema rupicama na zaslonu, posebno smišljen da bi se njime obuhvatile sve neobičnosti i zagonetke kvantne mehanike. „Zapravo se svaki drugi pokus u kvantnoj mehanici može objasniti riječima: „Sjećate li se našeg pokusa s dvjema rupicama?” Pokus se izvodi – ili samo zamišlja – u tri slične izvedbe s dvama otvorima na prvom zaslonu i promatranjem opaženih tragova na drugom zaslonu. Na otvore se usmjere najprije puščana zrna, zatim vodeni val i na kraju snop elektrona. Puščana će zrna proći ili kroz jedan ili kroz drugi otvor i slika na drugom zaslonu bit će običan zbroj slika koje bismo dobili za svaki otvor posebno. Valovi će prolaziti istodobno kroz dva otvora pa će na zaslonu biti interferentna slika. U trećem ćemo primjeru dobiti različite rezultate ovisno o tome gledamo li otvore izdaleka ili ih osvjetlimo fotonima kako bismo bolje vidjeli i lakše prebrojali čestice koje prolaze kroz jedan ili drugi otvor. „Elektroni su vrlo osjetljivi. Kada gledate nogometnu loptu i vidite kako se ljeska na suncu, to je ne smeta, od toga se njezina staza ne će promijeniti. Ali ako svjetlost pada na elektron, gurnut će ga s puta, i umjesto da napravi jedno, elektron će napraviti nešto drugo” – tako Feynman opisuje neodređenost ugrađenu u kvantnu fiziku i ponašanje prirode u mikrosvijetu.

U poglavlju *U potrazi za novim zakonima* Feynman se pita: kako postupiti ako želimo otkriti nešto novo? Moramo nagađati vodeći računa o onome što već znamo, ali i biti otvoreni prema neočekivanome. „Ono što nam doista treba, to je mašta, ali mašta u pouzdanoj luđačkoj košulji”. Za nove zakone potrebni su i novi eksperimenti s česticama sve većih i većih energija. Hoće li se napokon sve doznati, pa će se konačno istraživanja u cijelosti usmjeriti u praktične primjene? Ili će zakoni prirode dopustiti otkrivanje pojava u sve manjim djelićima prostora? Hoće li budućnost izbrisati granicu između fizike i kozmologije? Danas imamo dokaze koji potvrđuju da se to i događa, a Feynmanovo djelo time otkriva i svoju proročansku dimenziju.

RICHARD FEYNMAN – DOSLJEDNOST PUNA SUPROTNOSTI

I na kraju, ne možemo ostati samo na pedagoškim zaslugama, a da ne kažemo nešto o ljudskim osobinama Richarda Feynmana. Za mnoge objavljene knjige i biografske podatke zahvalnost dugujemo Ralphu Leightonu i Feynmanovoj djeci Carlu i Michelle. Među brojnim izvorima treba istaknuti knjige s autobiografskim obilježjima *Vi se sigurno šalite gospodine Feynman!*[7] i *Što te briga što drugi misle?*[8]. Mnoštvo podataka i detalja o Feynmanovom životu može se naći na mrežnim stranicama[1] i [2] te u biografskom djelu *Genius – the life and science of Richard Feynman*, autora Jamesa Gleicka[9]. Da interes za Feynmana u širokoj javnosti i dalje raste svjedoči i nedavno objavljeno djelo Jima Ottavianija i Lelanda Myricka *Feynman*[10] – na preko 250 stranica gotovo sve što je napisano o Feynmanu iskazano je u obliku stripa. Ovaj prikaz završit ćemo podsjećanjem na zanimljivosti, tipične iako ponekad i kontradiktorne, koje su obilježile Feynmanov životni put.

U mladosti, kao učenik i student, Feynman je bio usredotočen samo na matematiku i fiziku. Jezične je zadaće pisao loše, engleski ga uopće nije zanimao; i kasnije je njegove pisane tekstove trebalo pažljivo popravljati. Usprkos tome, autor je velikog broja knjiga, ali mnogo toga što je objavljeno pod njegovim imenom zapisi su drugih osoba prema njegovom pričanju ili predavanjima. Smatrao je da su umjetnička djela precijenjena, da se u zakonima fizike krije više

ljepote nego u onome što primamo osjetima vida i sluha i s profinjenim osjećajem za estetiku. Ipak, u zrelih se godinama posvetio učenju slikanja i stvorio vrijedne crteže i slike. Iako bez ikakva formalnoga glazbenog obrazovanja, bio je smatran kompletnim glazbenikom, jer je javno nastupao na bongo bubnjevima i svirao brazilski narodni instrument frigdeiru.

Na temelju sjećanja na vlastito djetinjstvo i poticaje koje je dobio od oca, smatrao je da su oduševljenje znanjem i interes za znanost posebna privilegija, nešto što treba steći već u najranijoj dobi. Tvrdio je i da je smisao zakona fizike teško objasniti nekome tko nije vješt u matematici. A ipak je velik dio života posvetio tumačenju ljepote koja se krije u zakonima fizike, čak je govorio kako matematičke simbole u jednadžbama zamišlja u raznim bojama.

U oblikovanju i ocjenjivanju nastavnih metoda posebno je inzistirao na učenju s punim razumijevanjem. Smatrao je da se do rezultata može doći na razne načine i da ne treba strogo propisivati postupke rješavanja. Bio je zaprepašten kad se u stvarnosti, posebno u Brazilu, susreo s učenjem napamet i s ukorijenjenim metodama mehaničkog memoriranja.

Dosljedno je naglašavao da nije važno kako se neka pojava ili zakon zovu nego da je najvažnije da ih razumijemo. Ali svjestan da je nemoguće uspostaviti komunikaciju bez dogovorenog nazivlja, često se znao našaliti sa strogim nastavnicima koji „ne bi dopustili da se kaže ‚izvagati Zemlju‘ nego bi se moralo reći ‚izmjeriti masu Zemlje‘”. Na drugom mjestu tvrdi da se „masa mijenja tijekom gibanja” ali dodaje da je ipak „važno kako ste pri tome definirali masu”[6].

Iako je sam bio pedantan i svestran matematičar, protivio se uvođenju simbola i naziva iz teorije skupova u osnovnoškolske nastavne programe, jer se, napisao je, „gotovo nikada ne pojavljuju u bilo kakvim tekstovima iz teorijske fizike, inženjerstva, poslovne matematike, kompjuterskog dizajna ili na drugim mjestima gdje je potrebna matematika. Ne vidim nikakve potrebe ni razloga da se to objašnjava ili podučava u školama”[14].

Ideje iz fizike s lakoćom je znao preoblikovati u matematički oblik. Matematiku koja mu je trebala u fizici često je sam reproducirao ili izmišljao, umjesto da se služi poznatim udžbenicima. Fascinantno je da je istodobno imao istančan osjećaj za realne eksperimentalne situacije, počevši od kućnog laboratorija i radioamaterskih uređaja koje je gradio u djetinjstvu, pa do sudjelovanja u Rogersovoj komisiji o katastrofi Challengera 1986. kad je pred inženjerima NASA-e i ostalim članovima komisije pokusom zorno pokazao zbog čega je došlo do nesreće[8,15].

Život su mu sudbinski obilježile prva supruga Arline (koja je vrlo mlada umrla od neizlječive bolesti) i treća supruga Gweneth koja ga je pratila kako u godinama najveće slave tako i u teškim danima terminalne bolesti. No jedno veliko razdoblje, za koje je karakterističan njegov boravak u Brazilu, obilježeno je burnim i neobuzdanim društvenim životom. S time je naglo prekinuo, zaključivši da će mu takav život oštetiti mozak – koji mu je ipak bio najvrjedniji.

Osuđivao je što fizičari energiji pristupaju neusklađeno, kao da nije riječ o istoj veličini: „Moralo bi ih biti stid što tako postupaju s energijom, što je mjere na trideset i šest različitih načina i što joj daju svakakva imena. Zar nije besmisleno da se energija mjeri kalorijama, ergima, elektronvoltima, kilopondmetrima, džulima, britanskim toplinskim jedinicama, kilovatsatima, toliko toga za posve istu stvar?” I dalje: „Moglo bi se barem vjerovati da se danas vrhunska elita teorijske fizike služi zajedničkom jedinicom, ali ne: naći ćete članaka gdje se energija mjeri u stupnjevima Kelvina, u megaciklima, a sada i u jedinicama fermi⁻¹, što im je najnoviji izum. Svatko tko želi dokaz da su fizičari ljudi kao i svi drugi, lako će ga naći u svim tim različitim jedinicama za mjerenje energije”[6]. Istodobno je i sam nedosljedan: u svojem prvom predavanju za studente naglašava da je veličina atoma oko 10⁻⁸ cm[4], i još se ponegdje u predavanjima služi metarskim sustavom; a onda opet u mnogim njegovim tekstovima nailazimo na stope, inče, funte, unce i razne druge neusklađene mjerne jedinice.

I napokon, čovjek će se zapitati: jesu li zbilja teorijski fizičari – a prije svega i sam Feynman – toliko iznad svih priznatih ljudskih osobina, ili su, kako on kaže, „ljudi kao i svi drugi”?

Pustimo ga da sam odgovori, u pismu jednom od brojnih studenata koji su mu se obraćali i molili ga za savjet: „Svoju osobnost ne ćete moći razviti samo kroz fiziku – morate uključiti i druge dijelove života!”[16].

ZAKLJUČAK

U trenucima kad se bliži stota obljetnica Feynmanova rođenja, trideseta obljetnica njegove smrti i četrdeset godina od prvog objavljivanja njegove knjige *Osobitosti fizikalnih zakona* na hrvatskom jeziku[6], željeli smo upoznati nastavnike s Feynmanovim iznimnim ljudskim osobinama i njegovim zaslugama za preokret u pristupu nastavi prirodnih znanosti, posebno matematike i fizike. Važno je naglasiti da su njegova izvorna inspirativna predavanja o osobitostima zakona fizike sada u potpunosti dostupna na internetu[13] i da ih svakako treba u cijelosti pogledati. Dostupan je i kompletan udžbenik *The Feynman Lectures on Physics*[5], neiscrpan izvor ideja o tome kako treba predavati fiziku. Teme o Feynmanovu životu i djelu preplavile su sve suvremene medije, od filmova i televizijskih serija, preko stripa do brojnih video-prikaza na internetu. Na hrvatskom jeziku objavljene su i popularne knjige autobiografske naravi[7,8], s mnogo zanimljivih detalja za ljubitelje znanosti svih uzrasta. Sigurni smo da će to brojnim učenicima i studentima dati poticaj da za svoj životni poziv odaberu prirodoslovna i inženjerska zanimanja.

LITERATURA

1. Richard P. Feynman, Wikipedia, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman (6.3.2017.)
2. D. Silverman: *Richard Feynman – A Life of Many Paths*; URL: <https://www.physics.uci.edu/~silverma/RichardFeynman.pdf> (6.3.2017.)
3. R.P. Feynman, R.B. Leighton i M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, 1., 2. i 3. svezak, Addison–Wesley, Boston 1964.; prerađeno i prošireno izdanje 2005.; URL: https://en.wikipedia.org/wiki/The_Feynman_Lectures_on_Physics (6.3.2017.)
4. *The Feynman Lectures on Physics*, California Institute of Technology, URL: <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/> (6.3.2017.)
5. *The Feynman Lectures on Physics New Millennium Edition*, URL: <http://www.feynmanlectures.info/> (6.3.2017.)
6. R.P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, 1965.; Penguin Random House, 1994.;
7. R.P. Feynman, *Osobitosti fizikalnih zakona*, s engleskoga preveli Petar Colić i Vjera Lopac, Školska knjiga, Zagreb, 1. izdanje: 1977.; 2. izdanje: 1986.; 3. izdanje: 1991., 4. izdanje: u pripremi
8. R.P. Feynman, *Surely You Are Joking, Mr. Feynman!*, W.W. Norton & Company, New York – London 1985.; R.P. Feynman, *Vi se sigurno šalite, gospodine Feynman!*, s engleskoga prevela Tatjana Jambrišak, Izvori, Zagreb 2007.
9. R.P. Feynman, *What Do You Care What Other People Think?*, W.W. Norton & Company, New York – London 1988.; R.P. Feynman, *Što te briga što drugi misle?*, s engleskoga preveo Miro Labus, Mozaik knjiga, Zagreb 2010.
10. James Gleick, *Genius – The Life and Science of Richard Feynman*, Pantheon Books, New York 1992.
11. Jim Ottaviani i Leland Myrick, *Feynman – a graphic novel*, First Second, New York 2011.
12. W.C. Michels, *Feynman on Physics*, American Journal of Physics **31**, 883 (1963)
13. *Discover*, Science for the Curious, URL: <http://discovermagazine.com/2006/dec/25-greatest-science-books> (6.3.2017.)
14. *Richard Feynman Messenger Lectures*, CORNELLCAST, Cornell University, 1964., URL: <http://www.cornell.edu/video/playlist/richard-feynman-messenger-lectures> (6.3.2017.)
15. R.P. Feynman, *New Textbooks for the New Mathematics*, Engineering and Science **28**, 8 (1965)
16. *Challenger Crash O-Ring*, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=6Rwcbn19c0> (6.3.2017.)
17. *An Interview with Michelle Feynman*, Basic Feynman, URL: <http://www.basicfeynman.com/qa.html> (6.3.2017.)