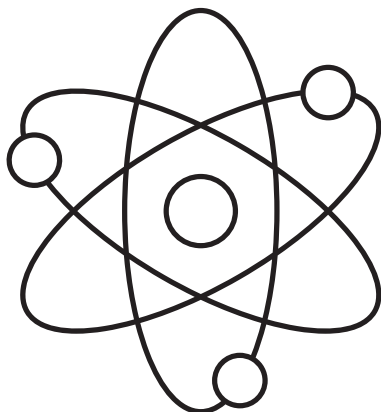


Frenk Klouz



# FIZIKA ELEMENTARNIH ČESTICA

SAŽETI PRIRUČNIK

Prevela  
Jelena Kosovac

■ Laguna ■

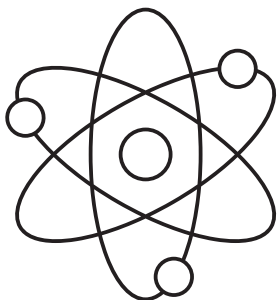
---

---

Naslov originala  
Frank Close  
PARTICLE PHYSICS  
A Very Short Introduction

Particle Physics A Very Short Introduction by Frank Close was originally published in English in 2004. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. IP Laguna is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

Translation copyright © 2019 za srpsko izdanje, LAGUNA



**FIZIKA  
ELEMENTARNIH  
ČESTICA**

SAŽETI PRIRUČNIK

# Sadržaj

Predgovor . . . . .	9
Spisak ilustracija i tabela . . . . .	13
1. Putovanje u središte univerzuma . . . . .	17
2. Koliko su veliko i malo – veliko i malo? . . . . .	31
3. Kako saznajemo od čega su stvari sazdane i šta smo otkrili? . . . . .	45
4. Središte materije . . . . .	61
5. Akceleratori: kosmički i napravljeni . . . . .	77
6. Detektori: kamere i vremeplovi . . . . .	97
7. Prirodne sile. . . . .	121
8. Egzotična materija (i antimaterija) . . . . .	135
9. Odakle potiče materija? . . . . .	153
10. Pitanja za 21. vek . . . . .	165
Dodatna literatura . . . . .	183
Pojmovnik . . . . .	185

## Predgovor

Mi smo sačinjeni od atoma. Sa svakim udahom unesete milion milijardi milijardi atoma kiseonika, što nam daje neku predstavu o tome koliko je svaki atom mali. Svi oni, zajedno s atomima ugljenika u vašoj koži i, zapravo, sa svim ostalim što postoji na Zemlji, stvoreni su u nekoj zvezdi pre otprilike pet milijardi godina. Dakle, sačinjeni ste od materije koja je stara koliko i ova planeta, jednu trećinu stara koliko univerzum, premda je ovo prvi put da su se ti atomi ujedinili na takav način da misle da su vi.

Fizika čestica je nauka koja je pokazala kako je materija stvorena i koja počinje da objašnjava odakle je sve poteklo. U velikim akceleratorima, obično dugačkim nekoliko kilometara, možemo da ubrzamo deliće atoma, čestice kao što su elektroni i protoni, čak i egzotične čestice antimaterije, i međusobno ih sudaramo. Time na jedan kratak vremenski period u malom delu prostora stvaramo intenzivnu koncentraciju energije koja „oživljava“ stanje i prirodu univerzuma kakav je

bio u deliću sekunde posle prvobitnog Velikog praska. Na taj način saznajemo o našem poreklu.

Otkriti prirodu atoma pre sto godina bilo je relativno jednostavno: atomi su sveprisutni u materiji oko nas, a njihove tajne mogle su da se izmame pomoću uređaja smeštenih na običnom stolu. Istražiti kako je materija stvorena sasvim je drugačiji izazov. Uređaj za Veliki prasak ne može da se naruči u naučnim katalogima. Sve moraju da naprave i obave timovi stručnjaka: od osnovnih sklopova koji stvaraju snopove čestica i ubrzavaju ih do brzine svetlosti, sudaraju jedan sa drugim do beleženja rezultata za analizu. To što tako nešto možemo da uradimo predstavlja vrhunac jednog veka tehnološkog razvoja i otkrića. Poduhvat je veliki i skup, ali je jedini način koji poznajemo a da nam omogućava da odgovorimo na tako suštinska pitanja. Tokom tog rada dolazilo je do neočekivanih izuma i stvaranja novih alatki. Antimaterija i sofisticirani detektori čestica sada se koriste za medicinska snimanja, a sistemi za prikupljanje podataka osmišljeni u CERN-u (Evropski centar za nuklearna istraživanja) doveli su do izuma svetske mreže, Interneta – to su samo neke od propratnih pojava proisteklih iz rada u oblasti visokoenergetske fizike

Mnoštvo je primena tehnologije i otkrića do kojih se dospelo istraživanjem u visokoenergetskoj fizici, no cilj kome se težilo nije bio tehnološke prirode. Pokretačka snaga je radoznalost; želja da saznamo od čega smo sačinjeni, odakle to potiče i zašto su zakoni univerzuma tako fino uravnoteženi da smo mi, ljudi, nastali.

Nameravam da vam u ovom sažetom priručniku pružim predstavu o tome šta smo otkrili i da vam izložim neka od najvažnijih pitanja s kojima se suočavamo na početku 21. veka.

## Spisak ilustracija i tabela

1	U unutrašnjosti atoma. . . . .	25
2	Prirodne sile . . . . .	26
3	Poređenja između veličina u proporcijama ljudskog sveta s veličinama nedostupnim našem vidu . . . . .	35
4	Vrednosti koje odgovaraju srazmeri temperature i energije u elektronvoltima . . . . .	41
5	Energija i približne talasne dužine . . . . .	50
6	Posledica udaranja lakih objekata u teške mete i teških objekata u lake mete. . . . .	56
7	Svojstva donjeg i gornjeg kvarka . . . . .	65
8	Kvarkovski spinovi i kako se kombinuju . . . . .	66
9	Beta raspad neutrona . . . . .	70
10	Elementarne čestice materije i njihove antičestice . . . . .	74
11	Prvi uspešan ciklotron, izrađen 1930. godine. . . . . Foto: Nacionalna laboratorija Lorens Berkli	83



Ilustracija: © Gari Hinks

National Laboratory.

Illustration: © Gary Hincks

- 12 Kosmotron u Nacionalnoj laboratoriji  
 Brukhejven u Njujorku . . . . .85  
 Ljubaznošću Nacionalne laboratorije Brukhejven
- 13 Veliki sudarač elektrona  
 i pozitrona u CERN-u . . . . .88  
 © Dejvid Parker/ Science Photo Library
- 14 Tri kilometara (dve milje) dugačak  
 linearni akcelerator u Centru  
 za linearni akcelerator u Stenfordu . . . . .89  
 © Dejvid Parker/ Science Photo Library
- 15 Subatomske čestice slikane  
 u mehurastoj komori u CERN-u . . . . . 102  
 ©, Goronvi Tjudor Džons  
 University of Birmingham/ Science Photo Library
- 16 Tragovi naelektrisanih čestica . . . . . 104  
 © CERN/ Science Photo Library
- 17 W čestica . . . . . 108  
 © CERN/ Science Photo Library
- 18 Trag brzog elektrona beta zraka . . . . . 113  
 © CTR Wilson / Science Museum/ Science & Society  
 Picture Library
- 19 Detektor LEP, i četiri naučnika  
 koji prikazuju srazmere . . . . . 117  
 © CERN
- 20 Tragovi čestica i antičestica  
 prikazani na monitoru računara . . . . . 118  
 © CERN/ Science Photo Library

21	Dodatni trag čestica pojavljuje se na ekranu . . . . .	119
	© CERN/ Science Photo Library	
22	Pravila privlačenja i odbijanja za obojene naboje. . . . .	128
23	Beta raspad preko W . . . . .	131
24	Relativni intenziteti sila kada deluju između fundamentalnih čestica niske energije. . . . .	131
25	a) Barioni sa spinom $1/2$ b) Barioni sa spinom $3/2$ . . . . .	138
26	Spinovi mezona sačinjenih od kvarkova . . . . .	139
27	Mezoni sa spinom 1 koji se lako stvaraju prilikom anihilacije $e + e^-$ . . . . .	142
28	Dominantni slabi raspad kvarkova . . . . .	145
29	Kvarkovi i leptoni . . . . .	147
30	Pretvaranje vodonika u helijum u središtu Sunca . . . . .	157
31	Supersimetrične čestice . . . . .	170
32	Piter Higs . . . . .	176
	© David Parker/Science Photo Library	

Izdavač i autor izvinjavaju se zbog grešaka ili propusta u navedenom spisku. Ako ih kontaktirate, biće više nego spremni da ih isprave prvom prilikom.

## Prvo poglavlje

# Putovanje u središte univerzuma

*Opšti uvod u čestice, materiju i celokupni univerzum*

### **Materija**

Stari Grci su verovali da je sve sačinjeno od nekoliko osnovnih elemenata. Ideja je u suštini bila tačna; pojedinosti su bile pogrešne. Njihovi „zemlja, vazduh, vatra i voda“ sačinjeni su od onoga što danas poznajemo kao hemijske elemente. Čista voda sastoji se od dva elementa: vodonika i kiseonika. Vazduh se sastoji pre svega od azota i kiseonika, uz malo ugljenika i argona. Zemljina kora sadrži većinu od devedeset elemenata koji postoje u prirodi, pre svega kiseonik, silicijum i gvožđe, pomešane s ugljenikom, fosforom i mnogim drugim elementima za koje možda nikada niste čuli, kao što su rutenijum, holmijum i rodijum.

Zastupljenost elemenata u velikoj meri se razlikuje pa, grubo uzevši, po pravilu, oni na koje prvo pomislite spadaju među najčešće, dok oni za koje nikada niste

čuli spadaju među najređe. Zato je kiseonik pobednik: sa svakim udahom unesete milion milijardi milijardi atoma kiseonika, kao što ih udahne i sedam milijardi drugih ljudi na Zemlji, pored nebrojeno mnogo životinja, a kudikamo je više atoma kiseonika unao-kolo koji rade druge stvari. Kada izdišete, ovi atomi se emituju i zarobljava ih ugljenik da bi stvorili molekule ugljen-dioksida, goriva za drveće i biljke. Brojke su ogromne, a imena kiseonika i ugljenika nalaze se u svačijem rečniku. Uporedite ovo s astatom ili francijumom. Čak i ako ste čuli za njih, malo je verovatno da ste imali dodir s ijednim budući da je procenjeno da u Zemljinoj kori ima manje od trideset grama astata, a smatra se da u svakom trenutku postoji najviše dvadeset atoma francijuma.

Atom je najmanji deo elementa koji može da postoji i ipak bude prepoznat baš kao taj element. Skoro svi ovi elementi, kao što je kiseonik koji udišete i ugljenik koji je sastavni deo vaše kože, stvoreni su u unutrašnjosti zvezda pre oko pet milijardi godina, otprilike kada je Zemlja tek bila u procesu nastajanja. Vodonik i helijum još su stariji; vodonik je većinom nastao ubrzo posle Velikog praska obezbeđujući kasnije gorivo za zvezde unutar kojih će biti stvoreni drugi elementi.

Pomislite ponovo na taj udah kiseonika i njegovih milion milijardi milijardi atoma u vašim plućima. To nam daje neku predstavu o tome koliko je svaki atom mali. Drugi način da se stekne predstava o tome jeste da se pogleda tačka na kraju ove rečenice. Mastilo u

njoj sadrži otprilike sto milijardi atoma ugljenika. Da biste golim okom videli jedan od njih, morali biste da uvećate tačku tako da se proteže na sto metara.

Pre sto godina mislilo se da su atomi mali neprobojni objekti, možda poput minijaturnih verzija bilijskih kugli. Danas znamo da svaki atom ima bogat lavirint unutrašnje strukture. U njegovom centru je gusto, kompaktno jezgro odgovorno za atomsku masu i pozitivno naelektrisano. U spoljašnjim oblastima atoma nalaze se sićušne lake čestice poznate kao **elektroni**. Elektron ima negativno naelektrisanje, pa upravo međusobno privlačenje suprotnih naelektrisanja drži negativno naelektrisane elektrone tako da kruže oko pozitivno naelektrisanog jezgra u sredini.

Pogledajmo još jednom interpunkcijsku tačku. Maločas sam rekao da se tačka mora uvećati na dužinu od sto metara da bi se atom mogao videti golim okom. Iako je to ogromno, i dalje je zamislivo. Ali da biste videli atomsko jezgro, ta tačka bi morala da se poveća na 10.000 kilometara: do veličine Zemlje od jednog do drugog pola.

Između kompaktnog jezgra u središtu i udaljenih elektrona koji se vrte oko njega, atomi su uglavnom prazan prostor. To se tvrdi u mnogim knjigama i to jeste istina kada je reč o česticama koje sačinjavaju atom, ali samo je pola priče. Taj prostor je ispunjen poljima električnih i magnetnih sila toliko jakih da bi vas smesta zaustavile ako biste pokušali da uđete u atom. Upravo te sile daju čvrstinu materiji, čak i ako su

njeni atomi navodno „prazni“. Dok ovo čitate, dejstvo ovih sila vas drži na rastojanju od jednog atoma iznad atoma u vašoj stolici.

Koliko god da su snažne ove električne i magnetne sile, tričave su u poređenju s još snažnijim silama koje deluju u jezgru atoma. Poremetite dejstva ovih snažnih sila i moći ćete da oslobodite nuklearnu silu; poremetite električne i magnetne sile i javiće se svakidašnji hemijski i biohemijski efekti života. Ovi već dobro poznati efekti nastaju zahvaljujući elektronima u najudaljenijim delovima atoma, daleko od jezgra. Takvi elektroni u susednim atomima mogu da zamene mesta i time pomognu da se atomi povežu i naprave molekul. Upravo su lutanja tih elektrona ono što dovodi do hemije, biologije i života. U ovoj knjizi ne obrađuju se teme koje se odnose na kolektivno ponašanje mnogih atoma. Upravo suprotno od toga, mi želimo da otputujemo u središte atoma i razumemo šta je u njemu.

## U atomu

Izgleda da je elektron zaista fundamentalan; ako ima ikakvu sopstvenu unutrašnju strukturu, još je nismo otkrili. Jezgro atoma, međutim, sačinjeno je od još drugih čestica, poznatih kao **protoni i neutroni**.

Proton je pozitivno naelektrisan; protoni obezbeđuju celokupno pozitivno naelektrisanje jezgra. Što je

više protona u jezgru, to je veće naelektrisanje jezgra i zauzvrat je više elektrona koji poput satelita mogu da kruže oko njega, a to stvara atom u kom su pozitivna i negativna naelektrisanja u ravnoteži čineći ga u celini neutralnim. Stoga, premda ove intenzivne električne sile deluju duboko unutar atoma našeg tela, mi ih baš i nismo svesni, niti smo sami naelektrisani. Atom najjednostavnijeg elementa, vodonika, sastoji se od jednog protona i jednog elektrona. Jedan element se razlikuje od drugog po broju protona u jezgru. Skup od šest protona obrazuje jezgro atoma ugljenika, gvožđe ima dvadeset i šest a uranijum devedeset i dva protona.

Suprotna naelektrisanja se privlače, a ista se odbijaju. Čudo je što protoni, koji se međusobno odbijaju silom koja se javlja između istih naelektrisanja, uspevaju da ostanu zajedno u granicama jezgra. Razlog je ovaj: kada dva protona dođu u blizak dodir, oni se međusobno snažno povežu silom koja je poznata kao jaka sila. Ova privlačna sila je mnogo jača od električnog odbijanja, pa zato jezgra naših atoma ne eksplodiraju spontano. Ipak, ne možete staviti previše protona preblizu jedan drugome; kad-tad bi remećenje izazvano naelektrisanjem bilo preveliko. To je jedan razlog što postoji najteži prirodni element, uranijum, s 92 protona u svakom jezgru. Smestite zajedno više od 92 protona, i jezgro neće preživeti. Osim uranijuma ima još elemenata visokog stepena radioaktivnosti, kao što je plutonijum, ozloglašen po svojoj nestabilnosti.

Atomska jezgra svih elemenata posle vodonika pored protona imaju i neutrone. Neutron je zapravo neutralna, nenaelektrisana verzija protona. Iste je veličine i ima gotovo istu masu kao proton. Neutroni se međusobno drže istom snagom kao i protoni. Pošto nemaju nikakvo naelektrisanje, ne osećaju nikakve električne poremećaje, za razliku od protona. Posledica toga je da neutroni povećavaju masu jezgra i ukupnu jaku privlačnu silu, čime pomažu da se jezgro stabilizuje.

Kada su neutroni u ovakvom okruženju, na primer kada su deo jezgra atoma gvožđa, mogu nepromenjeni da opstanu milijardama godina. Međutim, udaljen od ovakve kompaktne nakupine, izolovani neutron je nestabilan. Tu deluje jedna slabašna sila, poznata kao slaba sila, a jedan od njenih učinaka jeste da uništi neutron i pretvori ga u proton. To čak može da se dogodi i kad ima previše neutrona smeštenih zajedno s protonima u jezgru, a tada je učinak tog preobražaja da se jezgro jednog elementa promeni u drugi. Ova transmutacija elemenata je uzrok radioaktivnosti i nuklearne sile.

Uvećajte neutron ili proton hiljadu puta i videćete da i oni imaju bogatu unutrašnju strukturu. Kao što roj pčela izgleda kao crna tačka kada se posmatra izdaleka, a izbliza se vidi oblak koji vrvi od energije, tako je i s neutronima ili protonima. Na slici slabe rezolucije izgledaju samo kao tačke, ali kada se gledaju kroz mikroskop visoke rezolucije, otkriva se da su protoni i neutroni nakupine manjih čestica, nazvanih **kvarkovi**.



Razmotrimo poslednji put poređenje s tačkom interpunkcije. Morali smo da je uvećamo na dužinu od sto metara da bismo videli atom, a na prečnik Zemlje da bismo videli jezgro. Da bismo videli kvarkove, morali bismo da je proširimo sve do Meseca, a zatim da je produžimo još dvadeset puta dalje. Ukratko, fundamentalna struktura atoma nadilazi ono što „stvarno“ možemo da predstavimo u mašti.

Barem smo dospeli do osnovnih čestica materije onakvih kakve ih sada poznajemo. Elektroni i kvarkovi su poput slova azbuke prirode, osnovni delići od kojih sve može da se sazda. Ako postoji nešto osnovnije, kao tačke i crte Morzeove azbuke, ne znamo sa sigurnošću šta je to. Spekuliše se da bismo otkrili, ako bismo elektron ili kvark mogli da uvećamo za još milijardu milijardi puta, Morzeovu azbuku u njihovoj osnovi – nalik strunama koje vibriraju u univerzumu, univerzumu za koji se pokazuje da ima više dimenzija od tri prostorne i jedne vremenske, kojih smo obično svesni.

Da li je ovo odgovor ili nije, videće se u budućnosti. Želim da vam ispričam nešto o tome kako smo otkrili elektrone i kvarkove, šta su oni, kako se ponašaju, te s kojim pitanjima se suočavamo.

## **Sile**

Ako su elektroni i kvarkovi nalik slovima, postoje i analogije s gramatikom: pravila koja povezuju slova u

reči, rečenice i književnost. Za univerzum to vezivno tkivo predstavlja ono što nazivamo osnovne sile. Ima ih četiri, a gravitacija je najpoznatija od njih; gravitacija je sila koja upravlja nakupinama materije. Materiju na okupu drži elektromagnetna sila; upravo ona drži elektrone u atomima i povezuje atome jedne s drugim da bi obrazovali molekule i veće strukture. U jezgru i oko njega otkrivamo dve druge sile: slabu i jaku. Jaka sila povezuje kvarkove u male sfere koje nazivamo protoni ili neutroni, a oni su zauzvrat čvrsto upakovani u jezgru atoma. Slaba sila menja jednu vrstu čestica u drugu, kao u određenim oblicima radioaktivnosti. Može da promeni proton u neutron ili obrnuto, što vodi do preobražaja elemenata. Tom prilikom ujedno oslobađa čestice poznate kao neutrini. Neutrini su lake, ćudljive, neutralne čestice koje reaguju samo na slabu silu i na gravitacionu silu. Milioni njih sada prolaze kroz vas. Nastaju kao posledica prirodne radioaktivnosti u stinama ispod vaših nogu, ali većina potiče sa Sunca, gde nastaju u nuklearnim reakcijama u njegovom središtu, a neki čak i od samog Velikog praska.

Kada je reč o materiji na Zemlji, i o većini onoga što možemo da vidimo u kosmosu, ovo je celokupna postavka likova koje ćete upoznati. Da bi sve bilo potaman, potrebni su i elektron i neutrino, te dve varijante kvarkova, poznate kao gornji i donji, koji grade neutrone i protone atomskih jezgara. Četiri osnovne sile potom selektivno deluju na ove elementarne čestice izgrađujući sveukupnu materiju, i naposljetku vas, mene, svet oko nas i većinu vidljivog univerzuma.

Frenk Klouz

# FIZIKA ELEMENTARNIH ČESTICA

Sažeti priručnik

*Za izdavača*

Dejan Papić

*Urednik*

Srđan Krstić

*Lektura i korektura*

Jelka Jovanović, Saša Novaković, Dragoslav Basta

*Stručni konsultant*

Zoran Jakšić

*Slog i prelom*

Saša Dimitrijević

*Dizajn korica*

Snena Karić

*Tiraž*

1500

Beograd 2019.

*Štampa i povez*

Margo-art, Beograd

Izdavač

LAGUNA, Beograd, Resavska 33

Klub čitalaca: 011/3341-711

**www.laguna.rs**

e-mail: info@laguna.rs

CIP – Каталогизација у публикацији -

Народна библиотека Србије, Београд

539.12

КЛОУЗ, Френк, 1945-

Fizika elementarnih čestica : sažeti priručnik / Frenk Klouz ; prevela Jelena Kosovac. - Beograd : Laguna, 2019 (Beograd : Margo-art). - 191 str. : ilustr. ; 20 cm

Prevod dela: Particle Physics / Frank Close. - Tiraž 1.500. - Pojmovnik: st. 185-191. - Bibliografija: str. 183-184.

ISBN 978-86-521-3254-6

a) Физика елементарних честица

COBISS.SR-ID 273596428