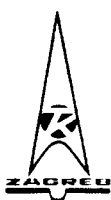


# UDŽBENIK FIZIKE SVEUČILIŠTA U BERKELEYU

PRVI SVEZAK  
MEHANIKA



Naslov originala:

# MECHANICS

## Berkeley Physics Course – Volume 1, Second Edition

### MECHANICS

Copyright © 1973 by McGraw-Hill, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

#### Library of Congress Cataloging in Publication Data

Kittel, Charles.  
Mechanics.

(Berkeley physics course, v. 1)

I. Knight, Walter D., joint author. II. Ruderman, Malvin A., joint author.  
III. Helmholtz, A. Carl, ed. IV. Moyer, Burton J., ed. V. Title. VI. Series.

QC1.B375 vol. 1 [QC125.2] 530'.08s [531] 72-7444  
ISBN 0-07-004880-0

34567890 HDHD 7987

Charles Kittel – Walter D. Knight – Malvin A. Ruderman

PRVI SVEZAK  
MEHANIKA

PREVEO:  
Dr. NIKOLA ZOVKO

TEHNIČKA KNJIGA  
ZAGREB



## PREDGOVOR PREVODIOCA

Ovo je prijevod drugog izdanja prvoga od pet svezaka Berkeleyskog udžbenika, danas najpopularnijeg udžbenika opće fizike na svijetu. Na njegovu stvaranju radila je čitava ekipa istaknutih američkih znanstvenika i pedagoga, a iskušavan je i dotjerivan na više generacija studenata fizike Berkeleyskog sveučilišta. Bitna je odlika udžbenika da odstupa od staromodnih shema i metoda: napisan je u novom duhu koji u potpunosti odražava znanstvenu revoluciju što je prožela fiziku u zadnjih stotinjak godina. Pun raznovrsnih ilustracija, udžbenik je tako pristupačno i jasno napisan da ne umara čitaoca — gotovo da se može čitati kao zabavno štivo, a radi se o kompletnoj klasičnoj mehanici koja je temelj čitave fizike.

U Sjedinjenim Američkim Državama udžbenik je namijenjen koledžima i fakultetima za prve semestre studija. Kod nas se može preporučiti u prvom redu studentima svih prirodoslovnih i tehničkih fakulteta kao dio uvoda u opću fiziku. Smisljeno odabirući gradivo prema vlastitom nahođenju, mogu ga uspješno upotrebljavati također nastavnici i učenici starijih razreda svih srednjih škola koje imaju fiziku na iole naprednijem stupnju. To posebno vrijedi za matematičko-informatičke obrazovne škole.

U Zagrebu, mjeseca siječnja 1981.

*Nikola Zovko*

## PREDGOVOR

Izobrazba studenata u početnim semestrima nastave jedna je od najvažnijih zadaća koju trebaju riješiti današnja sveučilišta. Što se više nastavni kadar usmjerava znanstveno-istraživačkom radu, to se više i češće susreće „pokriveno zapostavljanje nastavnih dužnosti” — kaže filozof Sidney Hook. S druge strane, nove spoznaje i strukture proizašle iz znanstvenog rada upozoravaju na potrebu promjene nastavnih programa. To osobito vrijedi za prirodne znanosti.

Zato sam se sa zadovoljstvom prihvatio pisanja ovog predgovora Berkeleyskom udžbeniku fizike, koji, odražavajući golemu revoluciju fizikalnih znanosti u posljednjih stotinjak godina, predstavlja veliko poboljšanje nastavnih programa u dodiplomskom studiju. Uz financijsku potporu National Science Foundation preko Educational Services Incorporated, na stvaranju Berkeleyskog udžbenika radio je i uložio velike napore čitav niz znanstvenika iz glavnih područja fizikalnih istraživanja. Udžbenik je, osim toga, uspješno iskušao na Kalifornijskom sveučilištu u Berkeleyu na nekoliko generacija studenata. On predstavlja značajan napredak u obrazovanju i nadam se da će biti široko prihvaćen.

Kalifornijsko sveučilište u Berkeleyu sa zadovoljstvom je prihvatilo ulogu domaćina međuuniverzitetnoj grupi koja je s odgovornošću stvarala ovaj novi udžbenik, a posebno nam je drago da je određeni broj naših studenata dobrovoljno surađivao u njegovu iskušavanju i dotjerivanju. Financijska potpora National Science Foundation i suradnja Educational Services Incorporated primljene su s velikom zahvalnošću. Možda najviše dugujemo živom zanimanju što ga je pokazao velik broj fakultetskih nastavnika Kalifornijskog sveučilišta za suradnju u unapređivanju nastavnih programa. Ovdje je studentsko-nastavnička tradicija stara i cijenjena, rad na ovome novom udžbeniku fizike ponovo pokazuje da se ta tradicija još neguje.

*Clark Kerr*

## IZVORNI PREDGOVOR BERKELEYSKOM UDŽBENIKU FIZIKE

Ovaj udžbenik obuhvaća nastavno gradivo prvih dviju godina studija fizike za prirodoslovno i tehničko usmjerenje. Namjera autora bila je izložiti fiziku na način kako je vidi i kako se njome služi fizičar dok se bavi istraživačkim radom u svom području. Pokušali smo načiniti udžbenik koji bi snažno istaknuo temeljne fizikalne zakone. Posebno je važno u pravo vrijeme upoznati studente s idejama teorije relativnosti, kvantne mehanike i statističke fizike, ali na takav način da je na slijedećim godinama studija moguća jednostavna nadgradnja. Usporedno s ovim gradivom studenti trebaju slušati i predavanja iz više matematike.

U SAD se u novije vrijeme uvelike radilo na stvaranju novih fakultetskih udžbenika. Zbog potreba razvoja znanosti i tehnologije te većeg isticanja prirodnih znanosti u srednjoškolskom obrazovanju, i mnogi fizičari su uočili potrebu za bitno novim udžbenicima fizike. Naš udžbenik utemeljen je razgovorom koji su vodili krajem 1961. Philip Morrison (sada na Massachusetts Institute of Technology) i C. Kittel. Ohrabрили su nas John Mays i njegove kolege iz National Science Foundation, te Walter C. Michels ondašnji predsjednik Komisije za dodiplomsku nastavu fizike. Privremeni odbor pod rukovodstvom C. Kittela radio je projekt u početnoj fazi.

U odboru su na početku bili Luis Alvarez, William B. Fretter, Charles Kittel, Walter D. Knight, Philip Morrison, Edward M. Purcell, Malvin A. Ruderman i Jerrold R. Zacharias. Na prvoj sjednici u svibnju 1962. u Berkeleyu načinjen je potpuno nov nastavni program iz fizike. Neki od prvobitnih članova odbora morali su, zbog teških obaveza na drugim mjestima, biti zamijenjeni, tako da je u siječnju 1964. sastavljen odbor kojega su članovi popisani na kraju ovog predgovora. Doprinosi drugih suradnika istaknuti su u predgovorima pojedinih svezaka.

Privremena koncepcija udžbenika i naše oduševljenje za nju bitno su utjecali na konačni sadržaj. Ta je koncepcija obuhvaćala metode i gradivo koje se po našem uvjerenju moglo ispredavati studentima prvih semestara prirodoslovnog i tehničkog usmjerenja. Ni u kojem slučaju nismo namjeravali načiniti udžbenik samo za osobito nadarene studente ili studente koji su već poodmakli u studiju. Namjeravali smo izložiti fizikalna načela na nov i cjelovit način; možda će neki dijelovi gradiva biti novi i nastavnicima koliko i studentima.

Berkeleyški udžbenik fizike ima pet svezaka :

1. Mehanika (Kittel, Knight, Ruderman)
2. Elektricitet i magnetizam (Purcell)
3. Titranja i valovi (Crawford)
4. Kvantna fizika (Wichmann)
5. Statistička fizika (Reif)

Autori svakog sveska imali su punu slobodu u izboru načina i metode izlaganja koji su najbolje odgovarali njihovu gradivu.

Već i sami počeci rada na udžbeniku motivirali su Alana M. Portisa da složi novi fizikalni praktikum, koji se danas odvija pod nazivom Berkeleyški fizikalni praktikum. Kako sam udžbenik ističe fizikalna načela, mnogi predavači bi mogli steći dojam da eksperimentalna fizika nije zastupljena u dovoljnoj mjeri. Praktikum obiluje karakterističnim pokusima i svrha mu je da uravnoteži omjer između teorije i eksperimenta.

Rad na udžbeniku omogućen je materijalnom potporom izravno od National Science Foundation i neizravno od Kalifornijskog sveučilišta. Fondovi su stavljeni na raspolaganje Educational Services Incorporated (ESI) — instituciji s poslovanjem bez zarade, kojoj je osnovna namjena administriranje unapređenja nastavnih programa. Posebnu zahvalnost zaslužuju Gilbert Oakley, James Aldrich i William Jones iz ESI za svoju ugodnu i snažnu podršku. Institucija ESI otvorila je u Berkeleyu ured pod vrlo stručnim vodstvom gospođe Minty R. Maloney. Zadatak je ureda bio da pomogne u radu pri stvaranju udžbenika i praktikuma. Kalifornijsko sveučilište nije službeno u vezi s našim programom, ali nas je neizravno pomoglo na mnogo načina. Za tu pomoć posebno zahvaljujemo dvojici uzastopnih predstojnika Fizikalnog odjela Augustu C. Helmholtzu i Burtonu J. Moyeru, nastavnom i pomoćnom osoblju odjela, Donaldu Coneyu i mnogim drugim na Sveučilištu. Abraham Olshen nam je mnogo pomogao pri rješavanju ranih organizacijskih teškoća.

Vaše ispravke i sugestije uvijek ćemo rado primiti.

Eugene D. Commins  
Frank S. Crawford, Jr.  
Walter D. Knight  
Philip Morrison  
Alan M. Portis

Edward M. Purcell  
Frederick Reif  
Malvin A. Ruderman  
Eyvind H. Wichmann  
Charles Kittel, predsjednik

Berkeley, California  
U siječnju 1965.



## NAPOMENE PREDAVAČIMA

Ovaj svezak namijenjen je, očito, kao udžbenik studentima koji su prošli srednjoškolsku fiziku, imaju neko predznanje iz više analize i slušaju daljnja predavanja. Na Kalifornijskom sveučilištu u Berkeleyu studenti fizike i tehnike počinju s analizom u prvom semestru prve godine, a predmete poput ovog slušaju u drugom semestru, paralelno s daljnjim predavanjima iz analize. Do početka predavanja iz fizike već su odslušali diferencijalni račun i stižu do integralnog računa barem polovicom drugog semestra. Ovakav program zahtijeva dobru suradnju s onima što drže matematičke predmete. Naravno, do tog vremena studenti još nisu prošli diferencijalne jednačbe, pa je nešto gradiva o rješavanju jednostavnih vrsta diferencijalnih jednačbi uključeno u matematičke dopune na krajevima 3. i 7. poglavlja. Samo nekoliko vrsta se susreće u mehanici, pa vjerujemo da će studenti uspjeti naučiti kako se svaka od njih rješava.

Iako su zadaci koje smo uključili u drugo izdanje uglavnom lakši od onih koje smo izbacili, nismo uključivali vrlo jednostavne zadatke. Osnovno je da na njima studenti steknu malo samopouzdanja. Uvjereni smo da će svaki predavač biti u stanju načiniti zadatke po svom nahođenju ili ih barem naći u drugim knjigama. Nema dvojice nastavnika koji će mehaniku predavati na potpuno isti način, pa im upotreba različitih zadataka daje mogućnost da očituju raznolikost. Postoji mnogo dobrih zbirki zadataka koje se mogu korisno upotrijebiti . . .

Ima, naravno, više načina kako da se predaje po ovoj knjizi. Jedan je od njih da se predavanja iz mehanike odvijaju po knjizi kroz dvije godine: u prvoj godini jednostavnije, bez više analize. To bi bio program za manje obrazovne ustanove koje nemaju mogućnosti za predavanja iz oba stupnja mehanike (bez više analize i s njome) u okviru uvoda u opću fiziku.

Čitava knjiga sadrži previše gradiva za normalan predmet uvoda u opću fiziku i očekujemo da nastavnik ni u kojem slučaju ne pokušava sve ispredavati. Mnogi uvodni predmeti ne uključuju specijalnu relativnost, tako da prvih devet poglavlja predstavlja zaokružen uvod u klasičnu mehaniku. Čak i taj dio ako se pokuša čitav pokriti, prevelik je za normalan semestar. Stoga ćemo preporučiti minimum što ga treba pokriti iz svakog poglavlja. Ponekad nije poželjno na početnom stupnju uključivati ikakve zadatke iz elektromagnetizma. Iako je istina da studenti smatraju zadatke iz elektromagnetizma zanimljivim, uvjereni smo da se mogu izostaviti. Mnogi predavači smatraju da im „rezanje” gradiva teško pada, međutim naše je iskustvo da je bolje ispredavati manje a temeljitije nego više a lošije. Naprednije gradivo služi boljim studentima da iskažu svoje sposobnosti, ili onima koji nastavljaju s izučavanjem fizike da nađu štivo koje će ih dalje uputiti.

Prijedimo sada na pojedinosti svakog poglavlja.

**1. poglavlje.** Kao i u prvom izdanju knjige, ovo poglavlje ne sadrži bitni dio studija mehanike, ono predstavlja uglavnom zanimljivo štivo za one sa širim zanimanjem. Za one predavače koji ga uključe, to je dobro mjesto da se pojasni pojam *red veličine*.

**2. poglavlje.** Studenti se upoznaju s vektorima koji su vrlo korisno pomagalo u fizici. Kako je i u tekstu istaknuto, vektorski se produkt može ispustiti skupa s primjerima

magnetskih sila u kojima  $\mathbf{v}$  i  $\mathbf{B}$  nisu međusobno okomiti. Može se nastaviti sve do 6. poglavlja bez vektorskog produkta i tek se tada na nj vratiti. S druge strane, skalarni produkt se često upotrebljava za nalaženje iznosa vektora, a u 5. poglavlju za rad i energiju, pa je krajnje poželjno da se ovdje uvede. Osim toga on omogućuje rješavanje niza zanimljivih zadataka. Odjeljak s vektorskim derivacijama također je koristan, ali se dio koji razmatra jedinične vektore  $\hat{\mathbf{r}}$  i  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  može ispustiti, da bi se uključio mnogo kasnije. Kružno gibanje je, nadamo se, dobar uvod za dinamiku koja dolazi.

**3. poglavlje.** Ovo je veliko poglavlje s mnogo primjena. Newtonovi zakoni izloženi su u uobičajenom obliku: nastavlja se s primjenama drugog zakona. Za skraćeni program ili program bez elektromagnetskih primjena, odjeljak koji se na njih odnosi može se sasvim ispustiti ili se uključuje samo slučaj kada je magnetsko polje okomito na brzinu. Zakon očuvanja impulsa uvodi se preko trećeg Newtonova zakona. Iako nije uvedena prije 5. poglavlja, kinetička energija se spominje pri izučavanju srazova. Većina je studenata čula o njoj u srednjoj školi i neće imati teškoća s njome, ali ako se želi, može se i ispustiti.

**4. poglavlje.** Kao što je već u tekstu istaknuto, ovo poglavlje nije pisano na uobičajen način. Mnogi fizičari nalaze oslonac u uvođenju Galilejevih transformacija, a onima koji namjeravaju proučavati specijalnu relativnost, one predstavljaju dobar uvod u transformacije koordinata. Međutim, ako se radi o studentima nefizičarima i onima s malo vremena, treba ih sasvim ispustiti. Trebalo bi spomenuti ubrzane referentne sustave i prividne sile, ali onoliko koliko se to može naći na nekoliko prvih stranica.

**5. poglavlje.** Uvode se rad i energija, prvo u jednoj, a zatim u tri dimenzije. Skalarni produkt je ovdje doista potreban, ali se od upotrebe linijskog integrala može u svakom slučaju odustati. Potanko se razmatra potencijalna energija. U kraćem programu može se rasprava o konzervativnim poljima ispustiti. To isto vrijedi i za električni potencijal. Međutim, ovo je važno poglavlje i preko njega se ne smije žuriti.

**6. poglavlje.** U ovom se poglavlju ponovo razmatraju srazovi, te se uvodi referentni sustav težišta. Iako je težište važno za kruta tijela i unatoč tome što se taj sustav naveliko upotrebljava, gradivo se može ispustiti ako se radi o skraćenom programu mehanike. Moment impulsa se ne može uvesti bez vektorskog produkta. Studenti su sada već dosegli stupanj kad mogu shvatiti i upotrebljavati vektorski produkt, pa ako je do sada bio izostavljan, treba ga uvesti na ovom mjestu. Većini je studenata očuvanje momenta impulsa blizak dio gradiva.

**7. poglavlje.** Ako studenti imaju teškoća s diferencijalnim jednadžbama, ovdje treba prvo proučiti matematičke dopune. Masa na opruzi i njihalo pristupačni su primjeri oscilatornog gibanja. U skraćenom se programu prosječne vrijednosti kinetičke i potencijalne energije, prigušeno gibanje i prisiljene oscilacije mogu potpuno ispustiti. Bolje studente će zanimati naprednije štivo o neharmoničkom oscilatoru i tjeranom oscilatoru.

**8. poglavlje.** Naše je uvjerenje da je uvod u kruta tijela potreban svim studentima. Predodžbe o momentu sile i kutnom ubrzanju oko zadane osi nisu teške i one povezuju studente sa stvarnim, vidljivim svijetom. Jednostavna obrada giroskopa također je korisna, ali bi u većini programa trebalo ispustiti uvođenje glavnih osi, umnožaka inercije i rotirajućih koordinatnih sustava.

**9. poglavlje.** Zadaci s centralnim silama vrlo su važni. Ako neki nastavnici ne žele potrošiti toliko vremena na izračunavanje potencijala izvan i unutar kuglastih masa, mogu to, naravno, izostaviti. Mogu izostaviti također radijalno integriranje jednadžbe gibanja ako im je to mnogo posla. Ali, naprednije gradivo bi ih trebalo veseliti. Dobar ga se dio može i ispustiti, ali se trud da se uključi — isplati. Problem dvaju tijela i pojam reducirane mase također su važni, međutim, iz skraćenog se programa mogu ispustiti.

**10. poglavlje.** U ovom je poglavlju izloženo nekoliko metoda određivanja brzine svjetlosti. Ta građa nije od bitne važnosti za mehaniku. Vjerujemo da će ona studente zanimati, ali se može preporučiti kao usputno štivo. Zatim dolazi Michelson-Morleyev eksperiment, koji je u okviru programa kao što je ovaj najuvjerljiviji dokaz da je potrebno odstupiti od Galilejevih transformacija. Dopplerov efekt je uveden jer se njime stječu podaci o

golemim brzinama kojima se razilaze daleke zvijezde. Poglavlje završava odjeljkom o brzini svjetlosti kao graničnoj brzini materijalnih tijela i o tome kako otkazuje newtonovska formula za kinetičku energiju. Za one koji nemaju dovoljno vremena za ulaženje u specijalnu teoriju relativnosti i površno čitanje poglavlja moglo bi biti dostatno.

**11. poglavlje.** U ovom se poglavlju izvode jednadžbe Lorentzovih transformacija i primjenjuju na najznačajnija svojstva specijalne relativnosti: kontrakciju duljine i dilataciju vremena. Uvode se transformacije brzina i daju iz toga neki primjeri. Ovo je poglavlje temelj za nekoliko slijedećih, pa mu se, prema tome, treba posvetiti dovoljno vremena.

**12. poglavlje.** Koristeći se rezultatima iz 11. poglavlja pokazuje se nužnost za novom definicijom impulsa i relativističke energije i konačno se dolazi do porijekla čuvene relacije  $E=mc^2$ . Potrebno je istaknuti posljedice tih rezultata na eksperimente s visokoenergetskim česticama i u nuklearnoj fizici viših energija. Na ovom stupnju studenti mogu imati samo grubu sliku, npr. o nuklearnoj fizici; međutim primjeri su tako bliski javnosti da ih je lako predavati. Konačno, u česticama s masom mirovanja jednakom nuli mnogi će znatiželjniji studenti naći neke odgovore.

**13. poglavlje.** Ovdje je razrađen niz primjera iz gradiva obrađenog u prošlom poglavlju. Opet se radi sa sustavom težišta i ističu njegove prednosti. Sve se to može ispustiti u skraćenom programu. Dobro će studente zanimati ovo gradivo pa se ono može preporučiti kao popratno štivo i za druge predmete što obrađuju specijalnu relativnost.

**14. poglavlje.** U posljednjim godinama raste zanimanje za opću relativnost, pa se ovo poglavlje može shvatiti kao most prema udžbenicima iz opće relativnosti. Iako ono nije od bitne važnosti za specijalnu relativnost u uobičajenom smislu, mnoge će studente zanimati razlika između teške i tromе mase, a gotovo da nema studenta koji nije čuo za provjere opće relativnosti.

## NAPOMENE STUDENTIMA

Prva je godina studija fizike najteža. U njoj se uvodi mnogo više novih ideja, pojmova i metoda nego u kasnijim godinama studija. Student koji je jasno shvatio temeljnu fiziku izloženu u ovom svesku uglavnom je prebrodio glavne teškoće pri učenju fizike.

Što da radi student koji ima teškoća pri izradi zadatka i koji čak i poslije drugog čitanja teksta još uvijek ne razumije? Prije svega on se treba ponovo vratiti svojim srednjoškolskim udžbenicima fizike i u njima potražiti ona područja koja mu trebaju. Može se, također, poslužiti i bilo kojim drugim udžbenikom koji mu je pristupačniji od našega. U takvim, jednostavnije pisanim knjigama treba posebno obratiti pažnju izradi zadataka. Treba, naravno, svaki student imati na umu da su njegovi nastavnici najbolji izvor odgovora na njegova pitanja i da su najpozvaniji da mu pomognu da se snađe u gradivu.

Mnogi studenti imaju teškoća s matematikom. Pomoć se može potražiti i u drugim udžbenicima osim onoga koji prati predavanja iz uvoda u višu analizu. Izvrstan pregled više matematike može se naći u sljedećim priručnicima: 1) „Quick Calculus” od Daniela Kleppnera i Normana Ramseya (izdanje: John Wiley and Sons, Inc., New York, 1965). 2) Matematički priručnik za inženjere i studente od I. N. Bronštejna i K. A. Semendjajeva (izdanje: Tehnička knjiga, Zagreb, 2003).



Znak  $\sum_{j=1}^n$  ili  $\sum_j^n$  označuje zbrajanje onoga što stoji iza znaka  $\sum$  preko svih vrijednosti između  $j=1$  i  $j=n$ . Znak  $\sum_{i,j}$  određuje zbrajanje preko indeksa  $i, j$  – dvostruko zbrajanje.

Znak  $\sum'_{i,j}$  ili  $\sum_{i,j} \quad i \neq j$  određuje zbrajanje preko svih vrijednosti indeksa  $i, j$ , osim kad je  $i=j$ .

### Red veličine

Tom se izrekom obično izriče da je nešto „unutar faktora  $10^n$ ”. Slobodno procjenjivanje reda veličine tipično je za rad fizičara i njegov način izražavanja. Iako često pravi teškoće studentima prvih semestara, ta profesionalna navika fizičara izvanredno je korisna. Kažemo npr. da su brojevi 5500 i 2500 reda veličine  $10^4$ . Masa elektrona je u cgs sustavu jedinica reda veličine  $10^{-27}$  g; točna vrijednost je  $(0,910954 \pm 0,000005) \cdot 10^{-27}$  g.

Ponekad kažemo da rješenje za neku veličinu uključuje (točno je do na) članove reda  $x^2$  ili  $E$ . To se iskazuje pomoću  $O(x^2)$  ili  $O(E)$ . Iz toga proizlazi da se članovi u točnom rješenju koji sadrže više potencije (kao što su  $x^3$  ili  $E^2$ ) mogu iz nekih razloga zanemariti u usporedbi sa zadržanim članovima u približnom rješenju.

### Predmeci (prefiksi)

Sljedeća tablica sadrži znakove i numerička značenja nekih često upotrebljivanih predmetaka:

$10^{12}$	T	tera	$10^{-3}$	m	mili
$10^9$	G	giga	$10^{-6}$	$\mu$	mikro
$10^6$	M	mega	$10^{-9}$	n	nano
$10^3$	k	kilo	$10^{-12}$	p	piko

# SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>	<b>6. Očuvanje impulsa</b>	<b>101</b>
1.1. O prirodi	1	6.1. Unutarnje sile i očuvanje momenta	101
1.2. Uloga teorije	1	6.2. Centar masa – težište	102
1.3. Geometrija i Fizika	3	6.3. Sustavi s promjenljivom masom	106
1.4. Invarijantnost	7	6.4. Očuvanje momenta impulsa	108
1.5. Zadaci	8	6.5. Zadaci	115
<b>2. Vektori</b>	<b>15</b>	<b>7. Harmonički oscilator</b>	<b>117</b>
2.1. Jezik i pojmovi: vektori	15	7.1. Tijelo na spiralnoj opruzi	117
2.2. Zbrajanje vektora	16	7.2. Jednostavno njihalo	118
2.3. Množenje vektora	18	7.3. Električki titrajni krug $LC$	122
2.4. Vektorske derivacije	24	7.4. Gibanje sustava pomaknutih iz položaja stabilne ravnoteže	122
2.5. Invarijante	27	7.5. Prosječna kinetička i potencijalna energija	124
2.6. Zadaci	29	7.6. Trenje	124
2.7. Matematičke dopune	30	7.7. Gušeni harmonički oscilator	126
<b>3. Newtonovi zakoni</b>	<b>35</b>	7.8. Tjerani harmonički oscilator	128
3.1. Newtonovi zakoni gibanja	35	7.9. Načelo superpozicije	128
3.2. Sile i jednačbe gibanja	36	7.10. Zadaci	129
3.3. Gibanje čestice u jednolikom gravitacijskom polju	37	7.11. Dodatno štivo	130
3.4. Newtonov zakon opće gravitacije	38	7.12. Matematičke dopune	136
3.5. Električke i magnetske sile na nabijenu česticu: jedinice	39	<b>8. Osnove Dinamike krutih tijela</b>	<b>141</b>
3.6. Očuvanje impulsa	47	8.1. Jednačba gibanja	141
3.7. Dodirne sile; trenje	49	8.2. Moment impulsa i kinetička energija	141
3.8. Zadaci	51	8.3. Moment tromosti	142
3.9. Dodatno štivo	53	8.4. Vrtanja oko nepomičnih osi: vremenska ovisnost gibanja	145
3.10. Matematička dopuna	54	8.5. Vrtanja oko nepomične osi: ponašanje vektora momenta impulsa	149
<b>4. Referentni sustavi: Galilejeva transformacija</b>	<b>59</b>	8.6. Momenti i produkti tromosti: glavne osi i Eulerove jednačbe	149
4.1. Inercijalni i ubrzani referentni sustavi	59	8.7. Zadaci	153
4.2. Apsolutno i relativno ubrzanje	64	<b>9. Sila koja opada s kvadratom udaljenosti</b>	<b>155</b>
4.3. Apsolutna i relativna brzina	67	9.1. Potencijalna energija i sila između točkaste mase i kugline ljuske	156
4.4. Galilejeva transformacija	67	9.2. Potencijalna energija i sila između točkaste mase i pune kugle	157
4.5. Zadaci	72	9.3. Gravitacijska i elektrostatska vlastita energija	159
4.6. Dodatno štivo	74	9.4. Putanje planeta: jednačba i ekscentritet	162
4.7. Matematičke dopune	77	9.5. Zadaci	170
<b>5. Očuvanje energije</b>	<b>79</b>	9.6. Naprednije štivo	171
5.1. Zakoni očuvanja u fizičkom svijetu	79		
5.2. Definicije pojmova	79		
5.3. Konzervativne sile	88		
5.4. Snaga	96		
5.5. Zadaci	96		