

Janez Strnad

DO NEWTONOVIH ZAKONOV

Ob tristoletnici
"Principov"

7

PRESEK

DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SRS LETNIK 14. 1986-87

VSEBINA

Do Newtonovih zakonov	353
Začetki fizike	354
Kaj je telo?	355
O gibanju	356
Enakomerno gibanje	357
Enakomerno pospešeno gibanje	358
Prosto padanje	359
O raziskovalnih metodah	360
Mačka miško, miš pšeničko	362
Streljanje v vodoravni smeri	363
Zemlja v središču vesolja	365
Zemlja se giblje okoli Sonca	366
Galilei kot zagovornik Kopernikove slike	368
Kako je meril Galilei?	370
Kako je računal Galilei?	370
Keplerjevi zakoni	371
Pogledi na gibanje pred Newtonom	373
Trki	374
Newtonova pot do Principov	376
Newtonovi zakoni	378
Današnji pogled na Newtonove zakone	379
Principi	379
Newtonova mehanika	380
Pogled nazaj	383

1. stran ovitka. (slika 10). 54 metrov visoki poševni stolp v Pisi. Galilei je v letih 1589 do 1592 učil na univerzi v Pisi, a tedaj je še priznaval Aristotelov pogled na svet. Zato ni spuščal kamnov s poševnega stolpa, kakor je trdil njegov učenec Vincenzo Viviani dvanajst let po njegovi smrti. Do enačb za prosto padanje je Galilei prišel okoli leta 1604 v Padovi. Pozneje jih je preveril s poskusi s kroglicami na klanecu.

4. stran ovitka:

Slika 31. Naslovna stran *Principov*. Dovoljenje za tiskanje je dobila knjiga 5. julija 1686, zaradi denarnih težav pa se je tiskanje zavleklo. Naposled je astronom Edmund Halley, ki mu je Kraljeva družba poverila nadzor nad tiskanjem, sam plačal tiskarske stroške. Dobrih tristo izvodov je bilo dotiskanih sredi leta 1687. Do leta 1691 je izdaja pošla. Še za Newtonovega življenja sta izšli leta 1713 in leta 1726 novi izdaji v latinskem originalu, po njegovi smrti leta 1729 pa je Andrew Motte izdal angleški prevod *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*.

DO NEWTONOVIH ZAKONOV

Sredi leta 1987 bomo praznovali tristoletnico Newtonove knjige *Principia mathematica philosophiae naturalis* (Matematična načela naravoslovja). Nekateri jo imajo sploh za najpomembnejšo dosedanjo knjigo. Zares je temeljna knjiga fizike, pa tudi zunaj nje je bilo čutiti njen močan vpliv.

Knjižica *Do Newtonovih zakonov* poskuša kratko orisati delo glavnih Newtonovih predhodnikov, Newtonovo pot do *Principov* in njihovo vsebino. Pri tem se bežno ozre tudi v filozofijo fizike.

Knjižica je namenjena tudi osnovnošolcem, zato jo sestavljajo kratka poglavja, ki med seboj niso tesno povezana. Pri mladih bralcih poskuša zbuditi zanimanje za fiziko in doseči, da bi se morda kdo od njih odločil zanjo. Fizi-
kov namreč vse bolj primanjkuje.

Del besedila, ki ga zajema knjižica, je izhajal v nadaljevanjih v Pionirskem listu. Začetno zamisel za pisanje je dal namreč Božo Kos, ki je kot fizik vrsto prispevkov v Pionirskem listu poživil z duhovitimi risbami. Obseg besedila se je s časom večal, tako da naposled knjižica ni mogla zajeti vsega. Zato v njej tudi ni nekaterih slik in risb. Zahvaljujem se profesorju Marjanu Hribarju, ki je kritično prebral rokopis.

V Ljubljani, februarja 1987

J.S.

ZAČETKI FIZIKE

Prevladuje mnenje, da so starogrški filozofi prvi poskusili dojeti dogajanja v naravi z razumom. Pri tem so se lahko oprli na zasnove takega gledanja v Egiptu in Medrečju. Nekateri izmed njih so postavljali na prvo mesto izkušnje pri opazovanju dogajanja v naravi. Med temi kaže omeniti Aristotela (slika 1) v 4. stoletju pred našim štetjem. Drugi so zapostavljali izkušnje in stavili na čisto misel, kot Platon v 5. in 4. stoletju, ali na števila, kot Pitagora v 6.

Po zatonu antike so se filozofi za nekaj časa čisto odvrnili od narave in v okviru *sholastike* gojili za današnje pojme precej prazno razpravljanje. Toda nekateri prodorni duhovi so uvideli brezplovnost tega početja in so opozarjali, da lahko spoznavamo naravo samo po izkušnjah pri opazovanju pojavov in pri poskusih. Od pripadnikov teh *empiristov* ne smemo spregledati Angleža Rogerja Bacona (slika 2) v 13. stoletju. Po njegovem prepričanju naj bi filozofija zajemala predvsem iz narave ob poskusih in hkratnem opiranjju na matematiko in naj bi koristila ljudem. Misliti je treba v prvi vrsti na množino, ne na kakovost. Njegove zamisli o usmeritvi k proučevanju narave, poskusih in o rabi matematike so za dolgo časa ostale zgolj lep načrt.

Slika 1. Aristotel (384 do 322 pred našim štetjem), Platonov naslednik in eden od najznamenitejših filozofov vseh časov. Z enim pogledom je zajel veselje, poezijo, moralo, teologijo. Njegova slika narave je sicer slonela na opazovanje, a ne na podrobnem opazovanju ali celo merjenju in tudi ne na matematiki. Njegov pogled je prevladoval skoraj dve tisočletji, vse do Galilejevega časa. (desno)



Slika 2. Roger Bacon (1214 do 1294) je poudaril pomen poskusov in matematike pri spoznavanju narave, čeprav sam ni bil ne eksperimentator ne matematik. Proučeval je leče in morda ima zasluge za uvedbo naočnikov. (levo)

V 17. stoletju mu je sledil soimenjak Francis Bacon, ki pa ni bil z njim v sorodu. Predlagal je izvajanje poskusov v preglednih in preprostih okoliščinah in to, kar dandanes imenujemo osnovna raziskovanja. Na eni strani so bile njegove zamisli podobne Rogerjevim, na drugi pa ni uvidel pomena matematike. Kljub temu slišite dostikrat oba Bacona imenovati v isti sapi.

V renesansi so se pogledi obrnili nazaj k antiki in s tem k človeku in naravi. Za ta čas je značilen razvoj meščanstva na račun obrti, trgovine in denarništva, potovanja z odkritji novih dežel in izum tiska. Galileo Galilei, ki ga mnogi imajo za prvega fizika novega časa in ki je živel v Pisi, Padovi in Firencah, na koncu 16. in v 17. stoletju, je bil otrok pozne renesanse. Ukvarjal se je z vsemi vejami tedanje fizike: s proučevanjem gibanja teles, posebno prostega padanja, z opazovanjem neba z daljnogledom, z merjenjem temperature, optiko, akustiko.

Galilei je pripravil pot Isaacu Newtonu, ki je živel v Angliji v 17. in 18. stoletju. Newton je postavil prvo fizikalno teorijo — *mehaniko* ali nauk o gibanju teles, ki velja še dandanes. Tudi Newton je bil vsestranski fizik.

KAJ JE TELO?

Dandanes se malokdo čudi, ko govorimo v fiziki od vsega začetka o *telesih*. Toda pot do tega pojma je bila dolga. Sholastični filozofi so se pred stoletji prepirali, kaj je prvobitno, konkretni, posamični predmet ali splošno, bistvo. Eni so bili prepričani, na primer, da so prvobitni otipljivi stoli in pridemo do splošnega pojma s tem, da odmislimo nepomembne podrobnosti in obdržimo splošne lastnosti otipljivih stolov. Drugi so trdili, da je prvobitna splošna misel in da so otipljivi stoli samo njena uresničitve. Nekateri skrajni zagovorniki prve inačice pa so celo zagotavljali, da je splošni pojem samo ime, ki nastane v našem mišljenju in pomaga pri urejanju vtisov.

Za temi različnimi mnenji zaslutimo različen odnos do tega, kako spoznavamo naravo in kakšno vlogo imajo pri tem izkušnje. Filozofi še dandanes razpravljajo o tem. Fizikov pa vprašanje ne vznemirja več dosti, saj vedo, da lahko pridejo do splošnega pojma na osnovi opazovanj ali na osnovi enačbe. Zanimivo je kvečjemu s šolskega gledišča: psihologi, ki jih zanima poučevanje, sodijo, da otrok najprej spozna posebno in šele pozneje lahko posplošuje. Tako lahko splošne pojme usvojijo šele učenci, ki so dosegli določeno starost.

Nam je potreben še en korak: mislimo na vse stole, žoge... in odmislimo vse nepomembne podrobnosti, pa pridemo do splošnega, zelo širokega pojma telo. Telo je Sonce, Zemlja, Luna, drug planet, gora, hiša, avtomobil, biljardna

krogla, zrno graha, kapljica vode, pa tudi oblak ali vrtinec vode v strugi. Skratka, telo je vsak del snovi, ki ga lahko vsaj v mislih ločimo od okolice. Zastopnik skrajnega prepričanja, da je splošni pojem samo ime, je bil William iz Ockhama na Angleškem v 13. stoletju. S poudarkom je branil svoja stališča in zahteval, da naj ne uvajajo dodatnih, nepotrebnih pojmov: "Ne pomnožuj števila pojmov brez potrebe." To je ponavljal tako zavzeto in pri tem vztrajal tako ostro, da je zahteva še dandanes znana kot *Ockhamova britev*. Ockhamova britev je bila močno orožje proti brezplodnemu razpravljanju. Nanjo so se sklicevali številni fiziki, ko so iskali najpreprostejši mogoči opis pojavov v naravi.

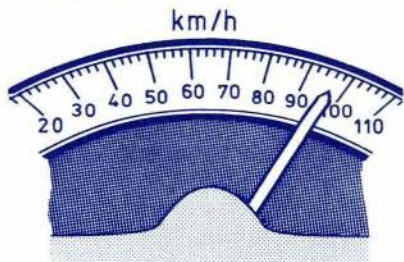
O GIBANJU

Telesa v okolici se ne razlikujejo samo po velikosti, obliki, barvi, ampak tudi po gibanju. Nekatera mirujejo, druga se gibljejo. Čebele letajo poleti s cveta na cvet, voda teče v strugi, avtomobili vozijo iz Ljubljane v Maribor. Čebele, deli vode in avtomobili se gibljejo, cvetovi, obala in mesta pa ostajajo tam, kjer so bili.

Sveta ne bi bilo, če ne bi bilo teles. Nekdaj so se spraševali, ali je gibanje enako pomembno kot telesa. Če ne bi bilo gibanja, se s časom ne bi nič spreminjalo. Ali ste že gledali film, ki se je zaustavil? Danes bi bilo popolnoma enako kot včeraj in jutri — kot v Trnuljčičinem gradu pred prihodom kraljeviča. Ali bi sploh lahko ločili včeraj od danes in jutri? Ali bi sploh obstajal čas?

Med gibanjem se spreminja lega čebele, dela vode, avtomobila glede na cvetove, drevje na obali, mesta. Če ne bi bilo teles v okolici, sploh ne bi mogli reči, da se telesa gibljejo. Poleg lege moramo navesti še čas, če želimo opisati gibanje. Ura pokaže, da je avtomobil ta hip ob prvem kilometrskem kamnu, 1 minuto pozneje pa ob drugem v razdalji 1 kilometra, 2 minuti pozneje ob tretjem v razdalji 2 kilometra ...

V avtomobilu je posebna naprava, ki kaže, ali se avtomobil giblje ali ne. Ta *merilnik hitrosti* naravnost meri hitrost. Nekako torej ugotavlja hkrati razdaljo



Slika 3. Merilnik hitrosti naravnost pokaže trenutno hitrost avtomobila.

in čas. Ima kazalec, ki se nagiba od 0 preko 20, 40, 60 kilometrov na uro (slika 3).

Za čas potrebujemo en sam podatek, za opis lege pa v splošnem ne zadostuje en sam podatek. Poleg razdalje moramo podati še smer z dvema koto- ma ali tri odseke na med seboj pravokotnih koordinatnih oseh. To velja tudi za hitrost, pospešek in silo. Tukaj se omejimo, če je le mogoče, na gibanje po premici, pri katerem štejemo tudi glede lege z enim samim podatkom.

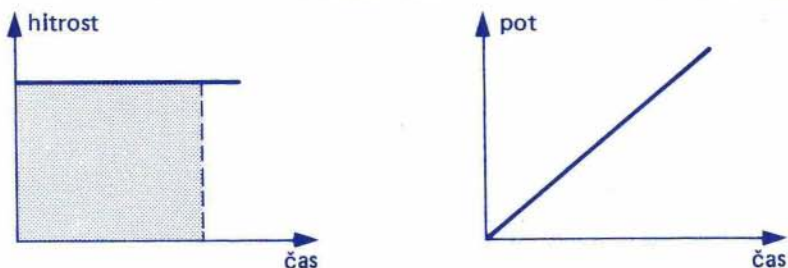
Bežno omenimo še eno razliko med časom in krajem. V kraju lahko gremo iz Ljubljane v Maribor in nazaj v Ljubljano. V času pa lahko gremo samo od danes proti jutri, ne pa nazaj proti včeraj.

ENAKOMERNO GIBANJE

Gibanje — potovanje, ples, šport — popestri življenje. Za začetek se zanimajmo za najpreprostejše gibanje. To je *enakomerno gibanje po ravni črti*, ki ga opiše- mo z enim samim podatkom. Vzemimo, da se avtomobil pelje po popolnoma ravni cesti: od enega do drugega kilometrskega kamna porabi 1 minuto: 1 kilo- meter — 1 minuta, 1 kilometer — 1 minuta ... Merilnik hitrosti v njem kaže 60 kilometrov na uro. Kazalec je nepremičen, ne odkloni se ne v levo ne v desno.

To, da se hitrost ne spreminja, lahko ponazorimo s sličico. Na vodoravno črto nanašamo čas, na navpično pa hitrost. Gibanje z nespremenljivo hitrostjo kaže vodoravna črta pri tej hitrosti. *Pot*, kakor imenujemo prevoženo razdaljo, pa narašča. V drugi sličici, v kateri nanašamo na vodoravno črto čas, na navpi- čno pa pot, kaže gibanje nagnjena črta. (slika 4).

Telesa, ki se gibljejo enakomerno po ravni črti, se med seboj razlikujejo po večji ali manjši hitrosti. Kaj pa gibanje s hitrostjo 0? Seveda, to je *mirovanje*.



Slika 4. Hitrost in pot v odvisnosti od časa pri enakomernem gibanju po ravni črti. Hitrost se ne spreminja, pot pa s časom enakomerno narašča. Pot dobimo kot ploščino pod črto, ki podaja hitrost v odvisnosti od časa.

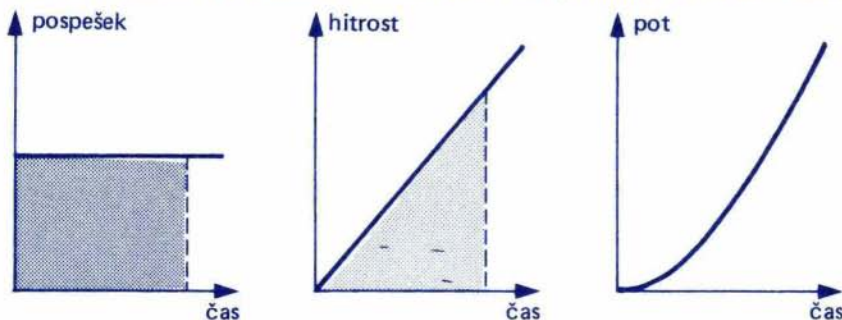
Tako smo opisali mirovanje kot poseben primer gibanja, kot gibanje s hitrostjo 0.

"Počakajte malo," boste rekli, "kje pa je pri enakomernem gibanju po ravni črti kakšna pestrost?" Prav imate. Enakomerno se gibajoči avtomobil se giblje venomer. Kako naj vstopimo vanj in izstopimo iz njega? Radi bi potovanje začeli in ga končali, radi bi se vrteli pri plesu in poskočili pri športu. To dosežemo le pri bolj zapletenem gibanju.

ENAKOMERNO POSPEŠENO GIBANJE

Enakomerno pospešeno gibanje je samo malo bolj zapleteno kot enakomerno gibanje. Pri enakomernem pospešenem gibanju po ravni črti narašča hitrost enakomerno s časom. Hitrost ima pri enakomerno pospešenem gibanju takšno vlogo kot pot pri enakomernem gibanju. Kaj pa ima pri enakomerno pospešenem gibanju takšno vlogo kot hitrost pri enakomernem? *Pospešek*. Pospešek, ki se pri enakomerno pospešenem gibanju ne spreminja, pove, kolikšna je sprememba hitrosti v eni minuti. Pomislimo na avtomobil, ki spelje z mesta. Če najprej miruje in mu hitrost v 1 minuti naraste na 1 kilometer na minuto, je njegov pospešek $1 \text{ kilometer/minuta.minuta} = 1 \text{ kilometer/minuta}^2$, to je 1 kilometer na minuto na kvadrat.

Kako je s potjo pri enakomerno pospešenem gibanju? Vzemimo, da je hitrost najprej nič, po 1 minuti naraste na 1 kilometer na minuto, po 2 minutah na 2 kilometra na minuto ... Ker se hitrost spreminja, izračunamo pot s



Slika 5. Pospešek, hitrost in pot v odvisnosti od časa pri enakomernem pospešenem gibanju po ravni črti. Pospešek se ne spreminja, hitrost s časom enakomerno narašča, pot pa narašča sorazmerno s kvadratom časa. Hitrost dobimo kot ploščino pod črto, ki podaja pospešek v odvisnosti od časa, pot pa — kot na sliki 4 — kot ploščino pod črto, ki podaja hitrost v odvisnosti od časa.

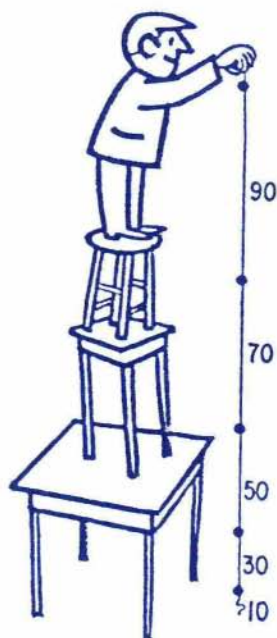
povprečno hitrostjo. Povprečna hitrost je v prvi minuti ($0 + 1$ kilometer na minuto) : $2 = 0,5$ kilometra na minuto, v prvih dveh minutah ($0 + 2$ kilometra na minuto) : $2 = 1$ kilometer na minuto ... Pot po prvi minuti je tedaj $0,5$ kilometra na minuto krat 1 minuta = $0,5$ kilometra, pot po drugi minuti 1 kilometer na minuto krat 2 minuti = 2 kilometra ... Pot narašča dokaj hitro. V dveh minutah naraste na 4-kratno vrednost poti v 1. minuti, v treh na 9-kratno... Pravimo, da je pot sorazmerna s kvadratom časa (slika 5). Prirastki poti so v razmerju $(4 - 1):(9 - 4):(25 - 9) \dots = 3:5:7 \dots$, to je v razmerju lihih števil.

PROSTO PADANJE

Avtomobili speljujejo z mesta približno enakomerno pospešeno. Pri prostem padanju pa navadno ni traba dodati "približno". Kamen, ki ga spustimo, se giblje enakomerno pospešeno. Hitrost narašča enakomerno s časom, pot, to je višina, za katero pade, pa sorazmerno s kvadratom časa. Za peresce bi veljalo to le, če ne bi bilo zraka.

O enakomernem pospešenem padanju se ni težko prepričati. Na vrstico privežemo kovance v razmikih po 10 cm, 30 cm, 50 cm... in nato vrstico v navpični legi, ko je spodnje krajišče kakih 10 cm od tal, spustimo. Zaslišimo enakomeren niz udarcev: pok — pok — pok ... (slika 6).

Prvi je prosto padanje tako pojasnil Galileo Galilei na začetku 17. stoletja. To je bil tudi prvi zgled za enakomerno pospešeno gibanje. Galilei je razmišljal o tej in oni možnosti in naposled uvidel, da pri prostem padanju hitrost narašča enakomerno s časom in višina sorazmerno s kvadratom časa. Tega ni mogel naravnost preskusiti, zato ni imel dovolj natančnih ur.



Slika 6. Uteži, ki jih privežemo na navpično vrstico v medsebojnih razmikih po 10 , 30 , 50 , 70 centimetrov, udarjajo na tla v enakomernih časovnih razmikih, ko vrstico spustimo. To nas prepriča, da je prosto padanje enakomerno pospešeno gibanje.

Pomagal si je s podobnim gibanjem: marmornate kroglice je pustil, da so se kotalile po malo nagnjeni z žametom prevlečeni deski. Desko je ovil z vrvice v razmikih, ki so si navzdol po klancu sledili v razmerju 1 : 3 : 5 ..., in zaslišal enakomeren niz udarcev, ko je kroglica preskakovala vrvice. Menda je enakomernost udarcev nadzoroval z ritmičnim petjem.

Pozneje je naravnost preveril, da je pot kroglice na klancu sorazmerna s kvadratom časa. Ko se je kroglica začela gibati, je odprl cevko, iz katere je tekla voda, in ko je kroglica dosegla željeno pot, je cevko zaprl. Stehtal je vodo, ki se je natekla iz cevke, in tako dobil podatek o času.

O RAZISKOVALNIH METODAH

Velika Galilejeva (slika 8) zasluga je v tem, da se je omejil na vprašanje "Kako?" in se ni spraševal "Čemu?", kakor so se v glavnem spraševali dotlej. Aristotel je na primer menil, da ima kamen nekakšen namen priti na svoje naravno mesto spodaj, kot ga ima človek, ki se želi vrniti domov. Galilei ni razmišljal tako, ampak je samo ugotovil, da pada kamen enakomerno pospešeno (slika 9).

Poleg tega je G. Galilei obravnaval vedno samo določen pojav v kolikor mogoče preglednih okoliščinah, na primer prosto padanje, pri katerem je lahko

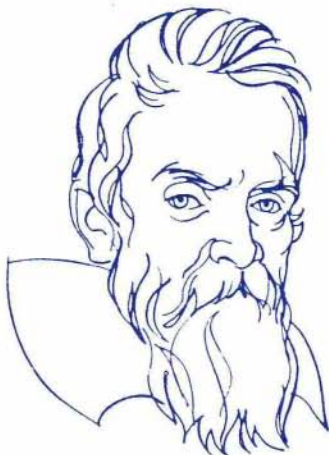


Slika 7. G. Galilei (stoji na sredi slike) kaže v Pisi poskus s kotaljenjem kroglic po klancu (olje Giuseppa Bezzuolija). Na desni sedi Giovanni de' Medici, guverner Livorna, ki si je prizadeval odstraniti Galileja z univerze v Pisi. Galilei je namreč slabo ocenil stroj za poglobljanje morja v пристanišču v Livornu, za katerega je naredil načrt guverner. V resnici Galilei še ni odkril zakona za prosto padanje in gibanje kroglic po klancu, dokler je poučeval v Pisi.

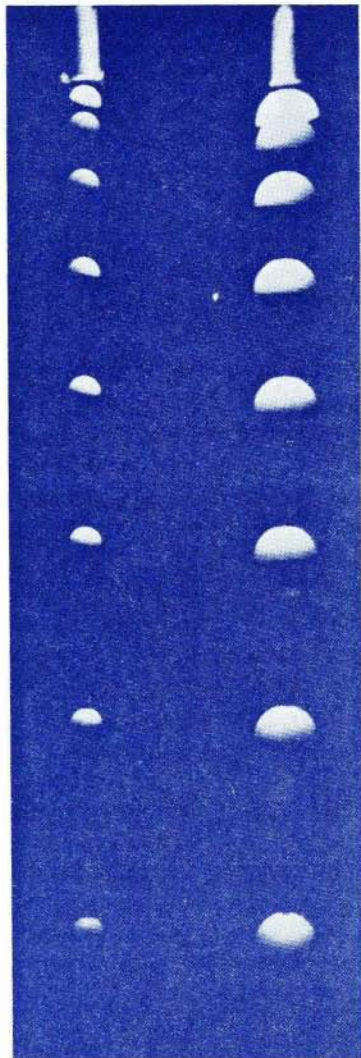
zanemaril zračni upor. Ni začel kar povprek s poskusi, ampak je najprej postavil domnevo, premislil, kaj je smiselno opazovati, meril in nato primerjal izide z napovedmi domneve. Tako je prišel na misel, da bi namesto prostega padanja opazoval kotaljenje kroglic (slika 9). Nekaterih poskusov pa sploh ni naredil, dovolj je bilo, da si jih je zamislil.

Galilei se svojih korakov najbrz ni zavedal do te mere, kakor jih poudarja-

Slika 8. Galileo Galilei (1564 do 1642), prvi pravi fizik novejšega časa. Ne da bi dokončal študij na univerzi, je postal univerzitetni učitelj v rojstnem kraju Pisi. Pozneje je prešel na univerzo v Padovi in je nato postal matematik na dvoru toskanskega nadvojvode v Firencah. Ukvarjal se je z astronomijo in z vsemi vejami tedanje fizike: mehaniko, akustiko, toploto, optiko. Pred cerkvenim sodiščem v Rimu je moral leta 1633 preklincati nauk o gibanju Zemlje in je zadnja leta življenja preživel v hišnem priporu, kakor bi rekli dandanes. Kljub temu pa so on in drugi Kopernikovi pristaši ovrgli Aristotelov pogled na vesolje in na naravo. (spodaj)



Slika 9. Pri prostem padanju za majhno višino ni mogoče zaslediti razlike med padanjem manjše in večje kroglice. Slika je narejena s stroboskopom, lučjo, ki se na kratko posveti v enakih časovnih razmikih. (desno)



mo dandanes. I. Newton se jih je zavedal bolj, saj je v uvodu *Principov* postavil načrt. Po opazovanju nekaterih primerov je treba ugotoviti sile med telesi in to posplošiti. S splošnim zakonom je mogoče dobiti napovedi za vse pojave svoje vrste in dobljene izide primerjati z merjenji. Newtonu so nekateri sodobniki očitali, da delovanja telesa na telo po praznem prostoru ni mogoče pojasniti fizikalno. Branil se je, da si ne izmišlja domnev, ampak le opisuje gibanje teles.

Dandanes ne postavljamo splošnih načrtov za odkrivanje novih zakonov narave. S posploševanjem opazovanj, z *indukcijo*, ni mogoče zajeti vseh pojavov v naravi. Bolje je postaviti domnevo in iz nje izpeljati, to je dobiti z *dedukcijo*, rezultate in te primerjati z opazovanji in merjenji. Če vedno neusmiljeno zavračamo vse, kar ne ustreza, je ta *hipotetično-deduktivni način* pogosto uspešen. Povedano nas opozarja, da fiziki ne iščejo resnice, ampak le svoje slike, *modele*, poskušajo prilagoditi vse obsežnejšim izkušnjam.

MAČKA MIŠKO – MIŠ PŠENIČKO ...

Od Galilejevih časov gojimo fiziko, da bi naravo razumeli, se pravi, uredili in povezali pojave v njej v skladno celoto, in znali napovedovati izide pojavov in poskusov. Pri tem se je fizika razvijala od preprostega do manj preprostega. V takem vrstnem redu naj bi jo sprejemal tudi posameznik.

Dandanes se z elektronsko stoparico, ki meri stotine sekunde, ni težko z merjenjem prepričati, da je višina prostega padanja sorazmerna s kvadratom časa. Namesto kamna uporabimo železno telo v obliki kaplje, ki ga pred poskusom zadržuje elektromagnet. Ko prekinemo tok po magnetu in začne telo padati, se sproži stoparica. Ko telo zadene vzvod, se stoparica zaustavi. Če je vzvod 1 meter pod elektromagnetom, traja padanje 45 stotin sekunde. Vzvod premikamo gor in dol in se prepričamo o sorazmernosti višine s kvadratom časa. Tako določimo *pospešek prostega pada* 9,8 metra na sekundo na kvadrat.

Pri natančnem merjenju pri padanju z večje višine moramo upoštevati zračni upor. Pri padanju s 54 metrov visokega poševnega stolpa v Pisi (slika 10 - glej prvo stran ovitka), bi 50-kilogramska železna krogla s premerom 12 centimetrov zadela tla, ko bi bila polkilogramska železna krogla s premerom 5 centimetrov še 90 centimetrov nad tlemi. Polkilogramska železna krogla bi že zadela tla, ko bi bila enako velika 40-gramska lesena krogla še 14 metrov nad tlemi.

Pri še natančnejšem merjenju moramo upoštevati, da se krogla ne giblje natančno proti središču Zemlje, ampak se zaradi njenega vrtenja odkloni proti vzhodu. Leta 1902 so na harvardski univerzi pri skoraj tisoč poskusih s pada-

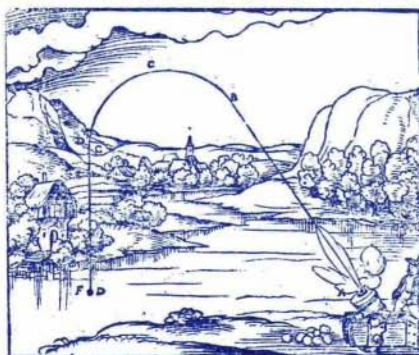
njem iz višine 23 metrov namerili za odklon proti vzhodu v povprečju 1,5 milimetra, kolikor napovedujejo računi. Opazili pa so tudi odklon proti jugu v povprečju 0,05 milimetra. Ali je šlo pri slednjem za nenatančnost pri merjenju ali za kaj drugega, tudi poznejša merjenja niso mogla pojasniti. Značilno za fiziko je to, da pri vse natančnejšem merjenju prej ali slej naletimo na nerešena vprašanja.

STRELJANJE V VODORAVNI SMERI

Kako se giblje izstrelak, ki ga izstrelimo s hriba v vodoravni smeri? Odgovor je od nekdaj zanimal vojake. Aristotel je v 4. stoletju pred našim štetjem trdil, da bi se sicer morala gibati puščica navpično navzdol. Ko jo izstrelimo v vodoravni smeri, pa jo zrak sili, da se giblje še nekaj časa v vodoravni smeri. Arabski učenjak Avicena je v 11. stoletju trdil, da se izstrelak najprej giblje vodoravno, nato pa se nenadoma začne gibati navpično navzdol. Albert Saški je v 14. stoletju zagotavljal, da je sicer tako, a da je prehod od vodoravnega gibanja k navpičnemu postopen (slika 11).

Prvi je *vodoravni met* pojasnil Galileo Galilei v prvi tretjini 17. stoletja. Pri poskusih s kotaljenjem kroglic je opazil, da se kroglica zakotali v nasprotni klanec skoraj do višine, s katere jo je spustil na prvem klancu (slika 12, slika 13). Po vodoravni podlagi bi se torej morala kroglica kotaliti enakomerno v nedogled (slika 14).

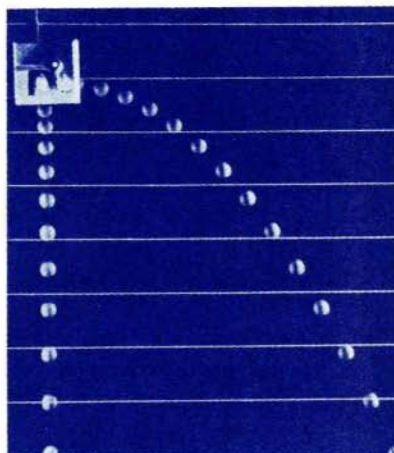
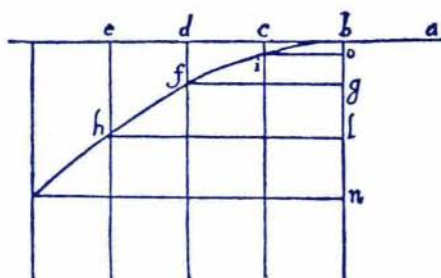
Po tej izkušnji razstavimo gibanje pri vodoravnem metu na gibanje v vodoravni in na gibanje v navpični smeri. Prvo je enakomerno, drugo enakomerno pospešeno prosto gibanje. Zamisel, da gibanje v vodoravni smeri ne prizadene gibanja v navpični, je Galilei preveril s poskusom. V trenutku, ko je sunil kroglico v vodoravni smeri, je spustil drugo, da je začela prosto padati. Obe kroglici



sta sočasno udarili ob vodoravna tla, slišati je bilo en sam pok.

Pri vodoravnem metu razdalja od izhodišča v vodoravni smeri narašča ena-

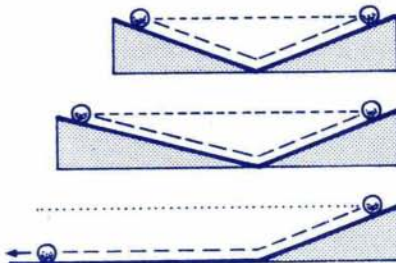
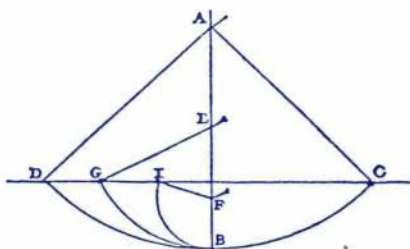
Slika 11. Risba iz leta 1582 kaže, kako so si tedaj predstavljali pot izstrelka: premo gibanje poševno navzgor (od A do B), prehodni del (od B do D) in navpično padanje (od D do F).



Slika 12. Galilejeva risba iz *Discorsov* kaže pot telesa pri vodoravnem metu: enakomerno gibanje v vodoravni smeri in enakomerno pospešeno gibanje navpično navzdol.

Slika 13. Gibanje kroglice pri vodoravnem metu in kroglice, ki je istočasno začela padati. Stroboskopski posnetek kaže, da se višina obeh kroglic spreminja s časom enako. Iz tega izhaja, da gibanje v vodoravni smeri pri vodoravnem metu ne vpliva na gibanje v navpični smeri.

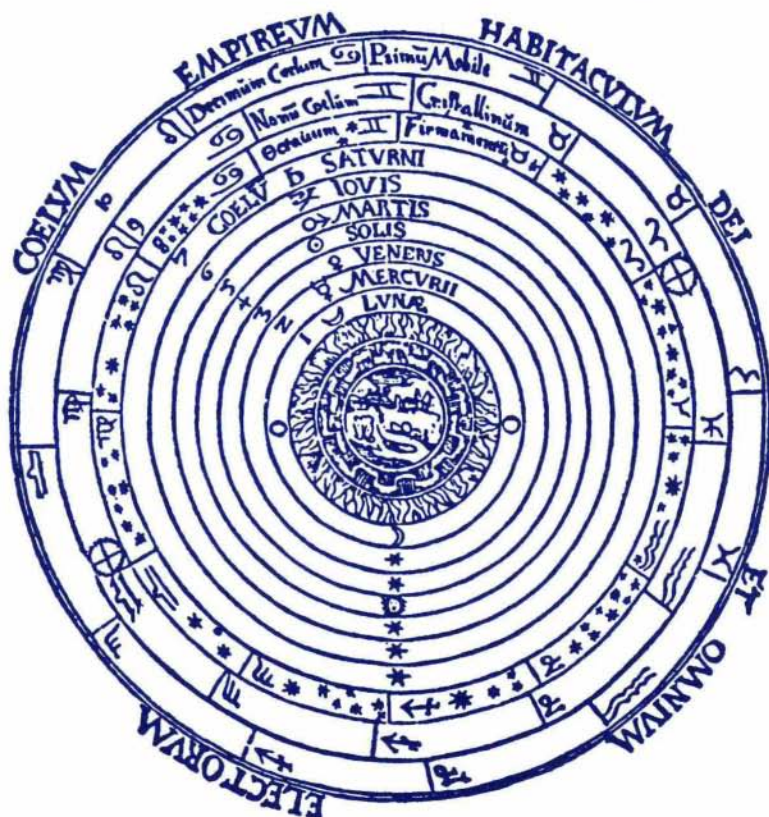
komerno s časom, razdalja od izhodišča v navpični smeri pa sorazmerno s kvadratom časa. Iz tega izhaja, da narašča globina sorazmerno s kvadratom razdalje v vodoravni smeri. Krivuljo, po kateri se giblje telo pri vodoravnem metu, imenujemo *parabolo*.



Slika 14. Risba nihala iz Galilejevih *Discorsov*. Kroglica doseže enako višino na obeh straneh, četudi ovira na eni strani navidez skrajša dolžino vrvice (a). Kroglica, ki se kotali po klancu, doseže na nasprotnem klancu domala enako višino. To velja tudi, če je nasprotni klanec bolj položen. Če bi nasprotni klanec izravnali, bi se kroglica gibala v nedogled (b). Po tej poti in z ugotovitvijo o gibanju v vodoravni smeri pri vodoravnem metu se je Galilei približal zakonu o vztrajnosti. Vendar se ni dokopal do tega zakona, ki pravi, da se samo sebi prepuščeno telo giblje enakomerno po ravni črti.

ZEMLJA V SREDIŠČU VESOLJA

V srednjem veku je veljala *geocentrična slika*, po kateri miruje Zemlja v središču vesolja, okoli nje pa se gibljejo Luna, Merkur, Venera, Sonce, Mars, Jupiter, Saturn (slika 16). Luna in bolj oddaljena telesa so se zdela popolnoma drugačna kot Zemlja in telesa na njej. Za vesoljska telesa naj bi bilo značilno enakomerno kroženje. Krog je veljal že od nekdaj za najpopolnejšo krivuljo in enakomerno gibanje po njem za edino gibanje, ki se lahko v nedogled ponavlja. Samo redki posamezniki se s to sliko niso strinjali. Aristarh, ki je deloval v Aleksandriji v 3. stoletju pred našim štetjem, in nekateri drugi antični astro-



Slika 16. Geocentrična slika iz knjige, ki je izšla leta 1539. V središču vesolja je Zemlja, okoli nje krožijo, pritrjeni vsak na svojo kristalno kroglo Luna, Merkur, Venera, Sonce, Mars, Jupiter in Saturn. Vse to obdaja krogla zvezd stalnic.

nomi so predlagali sliko, v kateri Sonce miruje in se giblje Zemlja okoli njega. Aristarh je prišel na to misel najbrž zaradi tega, ker je ocenil razdaljo od Zemlje do Lune in Sonca in ugotovil, da je Sonce precej večje kot Zemlja. S to sliko je vzel Zemlji središčno lego in naredil iz nje enega izmed planetov. Zato so ga obtožili krivoverstva.

Da njegova slika ni prodrla, nas ne sme začuditi. V osnovi ji nasprotuje vsakdanje mišljenje in govorjenje, saj pravimo: "Sonce vzhaja" in "Sonce zahaja". Kako naj bi se težka in nerodna Zemlja sploh lahko gibala? Vesoljska telesa so imeli za mnogo lažja, sestavljena iz petega elementa, medtem ko so telesa na Zemlji sestavljali štirje elementi: zemlja, voda, zrak in ogenj.

V 2. stoletju je aleksandrijski astronom Klavdij Ptolemej izpopolnil geocentrično sliko, tako da je bilo mogoče dokaj natančno napovedovati lego planetov. Računi pa so bili zapleteni in so vsebovali veliko podatkov, ki so jih morali od časa do časa prilagoditi, če so hoteli dobiti zanesljive napovedi.

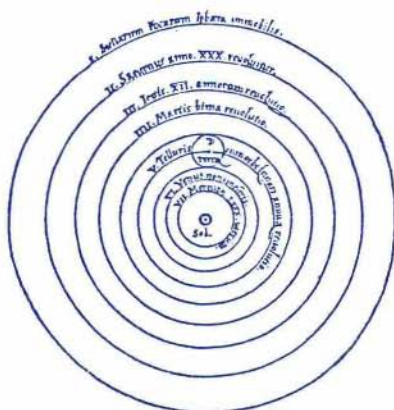
ZEMLJA SE GIBLJE OKOLI SONCA

Nikolaju Koperniku (slika 17) se je zdelo Ptolemejevo računanje v geocentrični sliki skregano z mislijo o urejenosti vesolja. Na vsak način se je želel vrniti h kroženju. Iz starih virov je povzel sliko, po kateri se gibljejo planeti Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter in Saturn okoli Sonca, Luna pa okoli Zemlje (slika 18). Zemlja se v 24 urah zavrti okoli svoje osi in v $365 \frac{1}{4}$ dneh obkroži Sonce. Prvo je dnevno, drugo pa letno gibanje.



Slika 17. Nikolaj Kopernik (1473 do 1543) je bil rojen v poljskem Torunju. Študiral je tudi v Italiji, v Bologni, Ferrari in Padovi pravo in medicino. Po vrnitvi v domovino se je naselil v Fromborku (Frauenburgu). Ves čas se je ukvarjal z astronomijo in leta 1512 izdal *Comentariolus* (Komentarček). V letu njegove smrti je izšlo njegovo veliko delo *De revolutionibus orbium coelestium* (O vrtenju nebesnih krogel).

Slika 18. Kopernikova heliocentrična slika Osončja. Okoli Sonca krožijo planeti Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter in Saturn, Luna pa kroži okoli Zemlje. (levo)



Slika 19. Naslovna stran Kopernikovega dela *De revolutionibus orbium coelestium* (O vrtenju nebesnih krogel) iz leta 1543.



Razdalja planetov od Sonca v enotah razdalje Zemlje od Sonca

planet	Kopernikov rezultat	današnja vrednost
Merkur	0,38	0,387
Venera	0,72	0,723
Zemlja	1,00	1,00
Mars	1,52	1,52
Jupiter	5,22	5,20
Saturn	9,17	9,54
Uran*		19,18
Neptun*		30,06
Pluton*		39,44

* V Kopernikovem času še neznan.

Po podatkih iz Ptolemejevih računov je Kopernik izračunal razdalje planetov od Sonca. Tega prej v geocentrični sliki sploh ni bilo smiselno storiti. Ugotovil je, da z naraščajočo razdaljo planetov od Sonca narašča tudi njihov obhodni čas okoli Sonca. Razen te urejenosti pa nova, *heliocentrična slika* ni prinesla kake velike prednosti. Z njo je bilo mogoče napovedati lego planetov na nebu le z dodatnimi privzetki in podatki, ki jih ni bilo dosti manj kot v Ptolemejevem računu.

Leta 1543, v letu njegove smrti, je izšla znamenita knjiga *O gibanju nebesnih krogel* (slika 19). S kroglami je mislil kristalne kroglice, na katere naj bi bila pripeta vesoljska telesa. V nepodpisanem predgovoru, ki ga Kopernik najbrž ne bi odobril, je neki njegov znanec opozoril, da knjiga obravnava zgolj domneve. Po začetnem poglavju, ki je podalo preprosto in prepričljivo heliocentrično sliko, sta se v preostalem delu, namenjenem astronomom, zgubila preprostost in prepričljivost. Astronomi tedaj v Kopernikovem delu niso videli česa prelomnega. Kakor prej Ptolemej, jim je ponujal Kopernik računske predpise za določanje planetnih leg. Tudi drugi delu niso nasprotovali, četudi se morda niso z njim strinjali. Le počasi se je uveljavljala slika, ki jo je zagovarjalo.

GALILEI KOT ZAGOVORNIK KOPERNIKOVE SLIKE

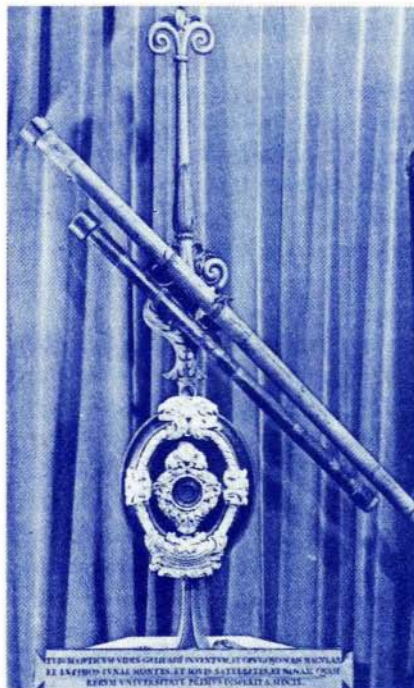
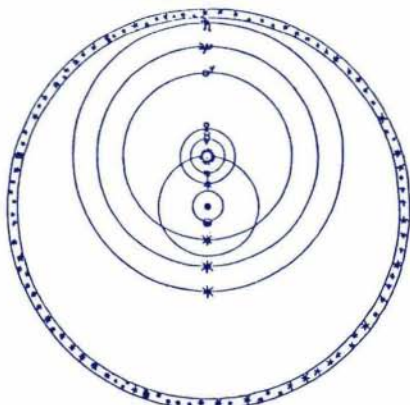
Galileo Galilei je prvi usmeril daljnogled (slika 20), nizozemsko novotarijo, v nebo. Pri planetu Veneri je opazil podobne mene kot pri Luni: prvi krajec, polno luno, zadnji krajec, mlaj. Odtlej je postal goreč zagovornik Kopernikove heliocentrične slike. Zagotavljal je, da so vesoljska telesa iz podobne snovi kot Zemlja in telesa na njej. Luna je skozi daljnogled dajala vtis osvetljene kamnite kroglice. Kometi in pege na Soncu, ki jih je tudi opazil, so ga še utrjevali v mnenju, da vesolje ni nespremenljivo, ampak se v njem dogajajo spremembe.

V resnici pa za gibanje Zemlje ni navajal posebno prepričljivih razlogov. Zares Venerinih men ni bilo mogoče pojasniti v stari geocentrični sliki. Toda pojasniti jih je bilo mogoče s kompromisno sliko Tycha Braheja. Ta danski astronom je nazadnje delal v Pragi. Po njegovi sliki, ki se je tisti čas precej uveljavila, se je Sonce gibalo okoli Zemlje, a drugi planeti so se gibal okoli Sonca (slika 21).

Galilejev glavni razlog pa je bil popolnoma zgrešen. Plimo in oseko je pojasnjeval s seštevanjem hitrosti pri dnevnem vrtenju Zemlje in pri njenem letnem kroženju okoli Sonca. Pri tem se je skliceval na pojav, ki ga je opazil na barkah, s katerimi so prevažali vodo v Benetke. Ko se je barka zaustavljala,

Slika 20. Galilejeva daljnogleda (desno)

NOVA MVNDANI SYSTEMATIS HYPOTYPOSIS AB
AUTHORE NUPER ADINUENTA, QUA TUM VETUS ILLA
PTOLEMAICA REDUNDANTIA & INCONCINNITAS,
TUM ETIAM RECENS COPERNICANA IN MOTU
TERRÆ PHYSICA ABSURDITAS, EXCLU-
DUNTUR, OMNIAQUE APPAREN-
TIIS CÆLESTIBUS APTISSIME
CORRESPONDENT.



Slika 21. Brahejeva slika Osončja iz leta 1588, začasni kompromis med geocentrično in heliocentrično sliko. Okoli Zemlje krožita Luna in Sonce, okoli Sonca pa krožijo planeti Merkur, Venera, Mars, Jupiter in Saturn.

se je dvignila gladina vode na premcu, ko je začela pluti, pa se je dvignila gladina na krmi.

Čeprav je Galilei dosegel veliko in ga štejemo za prvega pravega fizika novejšega časa, ni mogel v celoti zavreči starih pogledov. Po kotaljenju kroglic po vodoravni podlagi in po enakomernem gibanju izstrelka v vodoravni smeri pri vodoravnem metu je slutil, da se samo sebi prepuščeno telo giblje enakomerno. Toda nekako je vztrajal pri misli, da to za vesoljska telesa ne velja in da ta sama sebi prepuščena — krožijo.

KAKO JE MERIL GALILEI?

Veliko fizikov je bilo prepričanih, da Galileo Galilei ni mogel meriti časa natančneje kot na sekundo. Niso verjeli njegovi trditvi, da pri sto poskusih z enakomerno pospešenim gibanjem ni zasledil večjega odmika kot desetino srčnega utripa. Srčnemu utripu ustreza manj kot sekunda in desetini manj kot desetina sekunde. Zaradi tega so mislili, da Galilei poskusov, o katerih je pisal, ni naredil, ampak si jih je samo zamislil. Kot kaže, to zares velja za nekatere poskuse. Toda proučevanje Galilejevih zapiskov je pokazalo, da je pri drugih poskusih presenetljivo natančno meril čas.

Pri tem ni uporabljal tedaj običajne in nenatančne vodne ure, ampak nekakšno stoparico. Iz posode je iztekla voda v nižjo posodo skozi tanko cevko. Galilei je s prstom držal cevko zaprto in jo odprl v trenutku, ko je začel opazovati gibajoče se telo. Zaprl jo je, ko ga je nehal opazovati. Z maso vode, ki se je natekla v nižjo posodo, je določil čas. Poskus so pred leti ponovili z napravami, ki so bile na voljo Galileju, in ugotovili, da je tako z nekaj vaje zares mogoče meriti še manj kot desetino sekunde.

V Galilejevih časih ni bilo pravih enot za merjenje časa in dolžine. Astro-nomska sekunda za merjenje v laboratoriju ni bila pripravna. Za dolžino pa je bilo kar preveč enot: laket je imela v vsakem italijanskem mestu drugačen po-men. Galilei je vpeljal svoje enote: *tempo* (ime so si izmislili sedanji raziskovalci Galilejevih rokopisov) je meril $1/92$ sekunde in *punto* je meril 0,94 milimetra. Oboje je blizu najmanjšega časa in najmanjše dolžine, ki ju je bilo tedaj mogoče meriti.

KAKO JE RAČUNAL GALILEI?

V svojem življenju Galilei ni zapisal nobene enačbe v današnjem smislu. Pomagal si je z razmerjem celih števil. Če je višina pri prostem padanju sorazmerna s kvadratom časa in če rabi telo za padanje z višine h_1 čas t_1 , pade v času t_2 z višine h_2 $(t_2/t_1)^2$. Zato ga ni zanimal pospešek prostega pada, kakor nas zanima dandanes.

Zdi pa se, da bi ga Galilei lahko zapisal, če bi želel. Poleg prostega padanja in vodoravnega meta se je namreč ukvarjal tudi z gibanjem nihala. Delal je poskuse z $9\frac{1}{3}$ metra dolgim nitnim nihalom in nameril za čas gibanja od skrajnega odklona do prehoda skozi ravnovesno lego — dandanes pravimo temu četrto nihanje — 141 tempov, to je 1,53 sekunde. Dandanes naračunamo 1,65 sekunde, to je 7 odstotkov več.

Dalje sklepamo takole. Ker je pri prostem padanju višina sorazmerna s časom, potrebuje telo za padanje z višine $2h$ $\sqrt{2}$ -krat tolikšen čas kot za padanje z višine h . Tudi četrta nihaja pri nihalu z dolžino $2h$ traja $\sqrt{2}$ -krat toliko časa kot četrta nihaja pri nihalu z dolžino h . Četrta nihaja nihala z dolžino $2h$ pa je $\pi/(2\sqrt{2})$ časa, ki ga rabi telo za padanje z višine h . Kvadrat tega razmerja je $\pi^2/8$.

Galilei ni poznal števil $\sqrt{2}$ in π . Tudi se zdi, da je svoji enoti za čas tempo in za dolžino punto vpeljal zato, ker sta mu zaradi računanja z razmerji celih števil ustrezali čim manjši enoti. Presenetljivo pa je, da je v njegovih enotah pospešek prostega pada zelo blizu $\pi^2/8$. Zdi se, da se tega ni zavedel. V naših enotah ustreza temu $g = (\pi^2/8 \text{ punto})/(\text{tempo})^2 = 1,23,0,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}/(\frac{1}{92} \text{ s})^2 = 9,78 \text{ m/s}^2$ ali okrajšano $9,8 \text{ m/s}^2$.

KEPLERJEVI ZAKONI

Da se Galileo Galilei ni mogel povsem odtrgati od starih pogledov, priča tudi njegov odnos do Keplerjevih zakonov. Čeprav si je z Johannesom Keplerjem (slika 22) dopisoval, jih v svojih delih ni omenil niti z besedico. Kot Galilei je tudi Kepler stal z eno nogo v preteklosti. Ukvarjal se je z astrologijo, čeprav je strankam zabičeval, da je poleg horoskopa pomemben tudi značaj. Njegovo življenje je sploh bilo zelo razgibano. Imel je težave v družinskem življenju, preganjali so ga zaradi vere, mater je komaj iztrgal iz rok krvnikov, da je niso zažgali na grmadi kot čarovnico. Ob tem je opazoval lege planetov in zelo vestno obdeloval podatke, ki jih je zbral njegov učitelj Tycho Brahe.

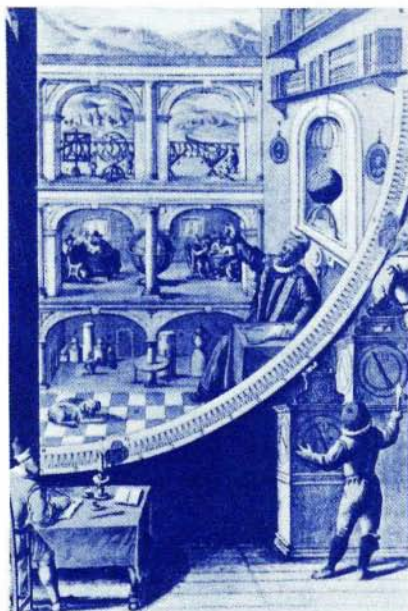
Brahe si je zgradil kovinske in zidane naprave, s katerimi je kolikor mogoče natančno določal lege planetov na nebu (slika 23). Daljnogleda tedaj še niso poznali. Od Ptolemejevih časov se natančnost pri določanju lege planetov



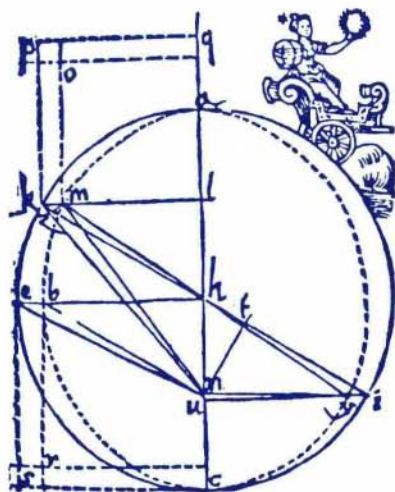
Slika 22. Johannes Kepler (1571 do 1630). Po študiju na univerzi v Tübingenu je postal univerzitetni učitelj na univerzah v Linzu in Gradcu in naposled sodelavec in naslednik Tycha Braheja v Pragi. V Pitagorovem duhu si je prizadeval odkriti ubranost sveta. V knjigi *Astronomia nova* (Nova astronomija) je leta 1609 objavil svoja prva dva zakona, v knjigi *De harmonice mundi* (O harmoniji sveta) leta 1619 pa — v nekoliko prikriti obliki — tretji zakon.

ni dosti izboljšala. Kopernik sploh ni bil posebno več opazovalec in ni meril natančneje kot Ptolemej. Šele Tycho Brahe je precej natančneje določal lego planetov, posebno Marsa, kot so to zmogli njegovi predhodniki.

Kepler je računsko obdelal te podatke, vendar je pri tem naletel na težavo. Če je vzel, da Mars kroži okoli Sonca, so izračunane lege nekoliko odstopale od izmerjenih. V tistih časih so večinoma tolikšno odstopanje kar spregledali. Kepler pa ga ni; računal je, dokler se niso računi zadovoljivo ujemali z opazovanji. Toda zato se je moral odpovedati krogu. Planet se giblje po *elipsi*, Sonce miruje v njenem gorišču (slika 24). Zveznica od Sonca do planeta opiše v enakih časih enake ploščine. Kvadrat obhodnega časa planeta je sorazmeren s



Slika 23. Brahejev zidni kvadrant. Tycho Brahe (1546 do 1601) je dobil leta 1576 od danskega kralja otok Hven v Oresundu, kjer si je zgradil zvezdarno. Zavzeto je opazoval gibanje planetov tako natančno, da v dvajsetih letih ni naredil večje napake od 2 kotnih minut. To so mu omogočile številne nove naprave. Znamenit je bil zidni kvadrant, s katerim je natančno določil višino vesoljskih teles nad obzorjem v smeri sever–jug. Brahe, ki se je na otoku Hven vedel kot pravi vladar, se je po sporu s kraljem leta 1597 preselil v Prago.



Slika 24. Keplerjeva risba Marsove eliptične poti okoli Sonca (črtkano). Sonce (n) je v enem od gorišč elipse. V resnici se Marsova pot mnogo manj razlikuje od kroga, kakor kaže risba. Velika os elipse je samo za 5% večja kot mala os.

kubom njegove povprečne razdalje od Sonca. Tako je nazadnje urejenost, ki jo je spoznal Kopernik, postavil na trdno osnovo.

Preskus tretjega Keplerjevega zakona

planet	velika polos	obhodni čas	kub velike polos	kvadrat obhodnega časa
	a	t_0	a^3	t_0^2
Merkur	0,387	0,240	0,058	0,058
Venera	0,723	0,615	0,378	0,378
Zemlja	1,000	1,000	1,000	1,000
Mars	1,52	1,88	3,51	3,53
Jupiter	5,20	11,86	140,6	140,7
Saturn	9,54	29,46	868,3	867,9
Uran	19,18	84,01	7056	7058
Neptun	30,06	164,8	27160	27160
Pluton	39,44	247,7	61350	61360

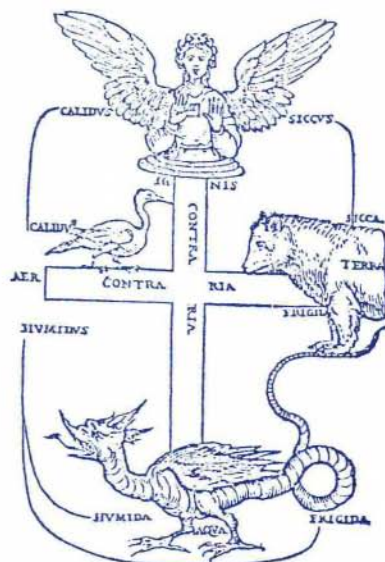
POGLEDI NA GIBANJE PRED NEWTONOM

Aristotel je v 4. stoletju pred našim štetjem poskušal zajeti z enim pogledom naravo in človeške dejavnosti. Zemeljski svet mu je bil sestavljen iz štirih elementov: zemlje, vode, zraka in ognja (slika 25), vesoljska telesa pa iz posebne- ga, petega elementa. Po naravnem redu je Zemlja v sredi, ker je iz najtežjega elementa, zemlje. Zemlja torej miruje v središču vesolja. Pri naravnem gibanju težijo telesa tja, kjer jim je mesto v naravnem redu: težki kamen pada navzdol, lahki ogenj se dviga navzgor. Telesa padajo tem hitreje, čim težja so. Obstaja pa še vsiljeno gibanje, na primer gibanje voza po vodoravni cesti. Vsiljeno gibanje mora vzdržati nenehno delovanje zunanjega vzroka: voz mora vleči konj, če naj se giblje. Da izstreljena puščica ne pade takoj navpično navzdol, je kriv zrak, ki jo sili, da se giblje naprej, potem ko smo jo izstrelili.

Nekaterim Aristotelovim trditvam, posebno zadnji, so že zgodaj ugovarja- li. Pariški filozof Jean Buridan je v 14. stoletju vpeljal pojem *impetusa*. Puščica prejme od loka nekaj — impetus, zaradi česar se giblje vodoravno. Toda impe- tus slabi in puščica preide v navpično padanje. V impetusu smemo videti pred- hodnika poznejše gibalne količine.

Galilei je v mladih letih sledil Aristotelu, a je pozneje odklonil njegove

Slika 25. Stara risba – "starodavna periodna preglednica elementov" – kaže štiri elemente ogenj (ignis), zrak (aer), vodo (aqua) in zemljo (terra) ter njihove lastnosti. Ogenj je vroč (calidus) in suh (siccus), zrak vroč in vlažen (humidus), voda vlažna in hladna (frigida) in zemlja hladna in suha. Nasprotni lastnosti ležita na nasprotnih straneh.



nazore. Ugotovil je, da padajo vsa težka telesa enako hitro. Pri tem je odmisli zračni upor, česar Aristotel ni mogel storiti, ker po njegovem mnenju ni mogel obstajati vakuum. Aristotelovi pogledi so bili med seboj bolj usklajeni, kakor pogosto mislimo. V tekočini padajo težje kroglice zares hitreje kot lažje.

Galilei iz enakomernega kotaljenja kroglic po ravni podlagi in enakomernega gibanja v vodoravni smeri pri vodoravnem metu ni izvedel splošnega sklepa. To je storil Rene Descartes. Kot filozof je zagotavljal, da vsaka stvar (gibanje, oblika) vztraja v svojem stanju, dokler tega ne spremeni zunanji vzrok. Gibanje se torej nadaljuje v ravni črti.

TRKI

Že Rene Descartes (slika 26) je poskušal odkriti zakone gibanja z obravnavanjem trkov, pri katerih prideta telesi v neposreden dotik. V prvi polovici 17. stoletja je obravnaval popolnoma neprožni trk, pri katerem se telesi sprimeta in imata po trku enako hitrost, in prožni trk. Izhajal je iz svoje trditve o ohranitvi gibanja. Od osmih obdelanih zgledov so le trije pravilni. Descartes je spregledal to, da ima hitrost poleg velikosti tudi smer. Dandanes pravimo, da je sicer mislil na ohranitev gibalne količine, a ni upošteval njene smeri. Descartes je zatrjeval, da je mogoče pojasniti vse pojave s pritiskom in trki. Gibanje pla-



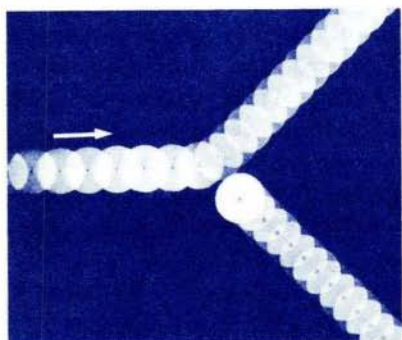
Slika 26. René Descartes (1596 do 1650) je bil bolj matematik in filozof kot fizik. Posebno je znan po analitični geometriji. V fiziki je obravnaval trke in pri tem upošteval ohranitev gibalne količine, ki pa ji ni priredil smeri. V astronomiji je trdil, da poganjajo planete okoli Sonca nekakšni vrtinci. (spodaj)



Slika 27. Christian Huygens (1629 do 1695) je po študiju na univerzi v Leidenu uspešno rešil vprašanje trkov in napisal knjigo o urah na nihalo (1673). Med leti 1666 in 1683 je živel v Parizu, na starost pa se je vrnil na Nizozemsko. (zgoraj)

netov je primerjal z gibanjem deščic v vrtincu vode. Vlogo vode naj bi imel pri tem eter, nekakšna rahla snov iz zelo drobnih delcev, ki naj bi nastali, ko so se večji delci z nenehnim gibanjem v vrtincu obrusili.

Londonska akademija je naročila poskuse s trki in razpisala nagradno nalogo o njih, ker se je zavedala pomena trkov za pot do zakonov gibanja. V letih



Slika 28. Prožni trk hitre ploščice z enako mirujočo ploščico na stroboskopskem posnetku. Dandanes kažemo take poskuse na zračni plošči, na kateri piha zrak iz drobnih odprtin. Ploščice se gibljejo po zračni blazini, tako da ne moti trenje.

1668 in 1669 je dobila pravilne odgovore Johna Wallisa, Christopherja Wrena in Cristiana Huygensa (slika 27). Najbolj splošen je bil Huygensov. Danes rečemo, da je Huygens (slika 28) upošteval izrek o ohranitvi gibalne količine in priredil gibalni količini smer. Dopolnil je Galilejevo slutnjo o količini, ki so jo pozneje vpeljali kot potencialno energijo. Galilei je namreč ugotovil, da je kvadrat hitrosti kroglice pri gibanju po klancu sorazmeren z višino, za katero se spusti.

Huygens je leta 1673 objavil pomembno delo o urah na nihalo. V njem je izračunal tudi nihajni čas fizičnega nihala. Tako pravimo telesu, ki ne spremeni oblike in ki je vrtljivo okoli vodoravne osi.

Huygens se je namenil pojasniti gibanje po Descartesovih smernicah, a je dosegel več. Mehaniko je naslonil na matematiko, tako da je ni bilo mogoče več obvladati samo z vsakdanjim pogovornim jezikom in o njej zgolj brezplodno razpravljati.

NEWTONOVA POT DO PRINCIPOV

Isaac Newton (slika 29) je bil rojen leta 1643, leto po Galilejevi smrti. Kot otrok je bil slaboten in so ga poslali v šole menda predvsem zato, ker se ni zdel zmožen kmečkega dela. Leta 1665 je dosegel v Cambridgu naslov magistra in se namenil ostati na univerzi. Toda izbruhnila je kuga in za več kot leto dni so univerzo zaprli. Ta čas je Newton preživel na domači kmetiji in je osamljen veliko razmišljal.

V tistem času naj bi se mu posrečila tri pomembna odkritja. Odkril naj bi infinitezimalni račun*, sestavo bele svetlobe iz mavričnih barv (slika 30) in gravitacijski zakon. Misel na gravitacijski zakon naj bi se mu porodila, ko je opazil jabolko, ki je padlo z jablane. Zakaj padajo telesa na Zemlji vedno navpično? Zakaj Luna ne pade? Naposled naj bi zapisal gravitacijski zakon, po katerem se telesi privlačita s silo, ki je sorazmerna z maso enega in drugega telesa in obratno sorazmerna s kvadratom razdalje. Prava zgodba o nastanku gravitacijskega zakona je precej bolj zapletena. Najbrž je Newton na domači kmetiji razmišljal o gibanju planetov in o svetlobi, saj so o tem razmišljali domala vsi tedanji fiziki. Morda ga je takrat zadeva pritegnila in je dobil tudi že začetne misli. Do dokončne rešitve pa je trajalo še precej časa.

* Infinitezimalni račun vključuje odvajanje in integriranje funkcij. Z odvodom določimo, na primer, točke, v katerih doseže funkcija največjo ali najmanjšo vrednost, z določenim integralom pa, na primer, izračunamo ploščino lika, ki ga omejujejo odsek krivulje, to je slike funkcije, ordinati robnih točk in odsek abscisne osi.



Slika 29. Isaac Newton (1643 do 1727) je bil rojen v Woolsthorpu in je študiral na univerzi v Cambridgeu. Po končanem študiju je ostal kot učitelj na univerzi. Njegovi uspehi ne zajemajo samo mehanike, ampak segajo tudi v optiko in toploto. Veliko se je ukvarjal še z alkimijo in mistiko. Petdesetleten je doživel živčni zlom. Nekateri mislijo, da je šlo pravzaprav za zastrupitev z živim srebrom ali s talijem pri alkimističnih poskusih. Pozneje v fiziki ni več delal. Kot predstavnik univerze je postal član parlamenta pod Viljemom III. Hodil je na vsa zasedanja, čeprav se ni nikoli prijavil k besedi. Kandidiral je tudi za parlament za časa kraljice Ane, a ni bil izvoljen, pač pa mu je kraljica podelila plemiški naslov. Že prej je postal čuvar in nato ravnatelj državne kovnice. Od leta 1703 do smrti je bil predsednik Kraljeve družbe. (zgoraj)

Slika 30. Newtonov zrcalni daljnogled. O njem je leta 1672 predaval Kraljevi družbi in kmalu nato bil izvoljen za njenega člana. Daljnogled je izdelal, da bi se izognil barvastim robovom pri gledanju skozi lečni daljnogled. Poznejša raziskovanja v tej smeri so ga pripeljala do odkritja, da belo svetlobo sestavljajo mavrične barve.



Leta 1684 sta Newtona v Cambridgeu obiskala matematik in arhitekt Christopher Wren in astronom Edmund Halley kot člana akademije znanosti. Newton je postal njen član, ko je izdelal zrcalni daljnogled. Pripovedovala sta mu, da ne najdejo odgovora na vprašanje: Kako se giblje telo, na katerega deluje privlačna sila, ki je obratno sorazmerna s kvadratom razdalje. Newton je takoj odgovoril, da se giblje po elipsi in da je to tudi dokazal. Dokaza pa ni mogel predložiti, ker ga je bil založil. Gosta sta mu prigovarjala, naj zadevo objavi. Newton je nerad objavljaj, ker se je po objavah že nakajkrat zapletel v spore s svojimi kritiki. Toda to pot se je, kot kaže, zavedal pomena svojega odkritja in je začel pisati sestavek o gibanju teles.

NEWTONOVI ZAKONI

V uvodu *Principov* (slika 31) je Isaac Newton najprej zapisal zakone za gibanje, ki jih imamo dandanes za *osnovne zakone mehanike*. *Prvi zakon* ali *zakon vztrajnosti* je povzel po Reneju Descartesu: telo se giblje po ravni črti enakomerno ali miruje, če nanj ne delujejo druga telesa. *Drugi zakon* je Newtonova zamisel na osnovi predlogov nekaterih drugih fizikov: sprememba gibalne količine je sorazmerna s silo in ima smer te sile. *Tretji zakon* ali *zakon o vzajemnem učinku* (zakon o akciji in reakciji) je Newtonova izvirna zamisel: če deluje prvo telo na drugo s silo, deluje drugo telo na prvo z enako veliko silo v nasprotni smeri. Šele tretji, zadnji del *Principov* vsebuje *gravitacijski zakon*: drobno telo privlači drugo drobno telo s silo, ki je sorazmerna z maso prvega in z maso drugega telesa in obratno sorazmerna s kvadratom razdalje.

Newton je odkril vse zakone na en mah, ko je obravnaval gibanje planetov. Izhajal je predvsem iz drugega Keplerjevega zakona, ki ga drugi raziskovalci tedaj niso dosti uporabljali. Planet bi se gibal enakomerno, če nanj ne bi delovalo Sonce. Če bi delovala na planet zelo kratkotrajna, a zelo močna sila proti središču Sonca, bi se odklonil proti Soncu. Ta postopek je večkrat ponovil in dobil za pot planeta iz ravnih odsekov sestavljeno črto. Naposled je vzel, da Sonce deluje na planet neprekinjeno in dobil za pot planeta gladko krivuljo — elipso. Za gibanje po tej krivulji je veljal drugi Keplerjev zakon, da v enakih časih zveznica Sonca s planetom opiše enake ploščine, če je sila sorazmerna s spremembo gibalne količine.

Newton je v uvodu vpeljal maso kot mero za množino snovi. Pri telesu, ki ga vsega sestavlja enaka snov, je kar sorazmerna s prostornino. Seveda tedaj še ni bilo sedanje enote za maso, kilograma. *Gibalno količino* je dobil, ko je pomnožil maso telesa in njegovo hitrost. Enako kot hitrost ima tudi gibalna količina velikost in smer. Silo je vpeljal kot količino, ki meri delovanje telesa na drugo telo. Tudi zanjo še ni bilo sedanje enote, *newtona*, ki nosi svoje ime prav na čast Isaacu Newtonu.

Isaac Newton je živel v zelo razgibanem času bojev med parlamentom in kralji. Po tem, ko so leta 1649 obglavili Stuarta Karla I, je bila Anglija nekaj časa republika pod Oliverjem Cromwellom. Leta 1660 so obnovili kraljevino pod katolikom Karlom II. Njegovega naslednika Jakoba II so pregnali v nekrvavi revoluciji, tako imenovani *slavni revoluciji*, leta 1688 in postavili na prestol protestanta Viljema III. Temu je sledila leta 1700 kraljica Ana. Parlament je z dogovori omejil kraljeve pravice in z ločitvijo zakonodaje in izvršilne oblasti postavil temelje sodobni državi.

DANAŠNJI POGLED NA NEWTONOVE ZAKONE

Še dandanes ni zamrla razpava o tem, ali je prvi zakon potreben ali ne. Zagovorniki misli, da ni potreben, opozarjajo, da ga vsebuje drugi zakon: če je sila enaka nič, je enaka nič sprememba gibalne količine in s tem hitrosti. Hitrost se torej ne spremeni, se pravi, da se telo giblje enakomerno po ravni črti ali miruje (ko je hitrost enaka nič). Toda prvi zakon v resnici določa pogoje, v katerih velja drugi zakon. Preden uporabimo drugi zakon, moramo poskrbeti za razmere, v katerih bi se telo gibalo enakomerno po ravni črti ali mirovalo, če nanj ne bi delovalo nobeno drugo telo.

Newton je svoj drugi zakon zapisal v nepopolni obliki. Moral bi pravzaprav reči, da je sila enaka spremembi gibalne količine, deljeni s kratkim časom, v katerem sprememba nastane. Sprememba gibalne količine je enaka spremembi hitrosti, pomnoženi z maso. Sprememba hitrosti, deljena s kratkim časom, v katerem nastane, pa ni nič drugega kot pospešek. Tako lahko izrečemo drugi Newtonov zakon v obliki, v kateri se ga učimo v šoli: silo da pospešek, pomnožen z maso.

Ali je to definicija za silo ali za maso? Ne eno ne drugo. To je zakon narave, ki ga poskusi podprejo (ali ovržejo). Če definiramo enoto za maso, pa lahko iz njega razberemo enoto za silo. To možnost izberemo, ker se masa telesa ne spremeni, če mu nič snovi ne dodamo ali je odvzamemo. Enota za maso je *kilogram* in iz tega sledi enota za silo: kilogram krat meter, deljeno s sekundo na kvadrat, to je *newton*. Enota za pospešek je namreč meter, deljen s sekundo na kvadrat.

PRINCIPI

V prvem delu *Principov* je I. Newton uporabil svoj drugi zakon za telo, ki se giblje pod vplivom sile, usmerjene proti središču in obratno sorazmerne s kvadratom razdalje. Telo se giblje po elipsi, če ima dovolj majhno hitrost, po hiperboli, če ima dovolj veliko, in po paraboli v mejnem primeru. Poseben primer gibanja po elipsi je gibanje po krogu. Po krogu se giblje telo s stalno velikostjo hitrosti, a gibanje je vseeno pospešeno. Sila, ki deluje na telo pravokotno na njegovo hitrost, spreminja le smer hitrosti, ne pa njeno velikost.

Presenetljivo je, da Newton v *Principih* ni uporabil svojega infinitezimalnega računa, ampak stari geometrijski način dokazovanja. Ni gotovo, da je to delal zato, da mu ne bi bilo treba objaviti infinitezimalnega računa. Morda je hotel narediti le knjigo dostopnejšo bralcem, za katere bi bil infinitezimalni

račun še dodaten trd oreh.

V drugem delu *Principov* je Newton obdelal gibanje telesa v ravni črti pod vplivom upora, to je sile, ki ima nasprotno smer kot hitrost in je odvisna od hitrosti. Najprej je vzel, da je upor sorazmeren s hitrostjo, in nato, da je sorazmeren s kvadratom hitrosti. Obdelal je tudi gibanje tekočine, še posebej vrtince. Želel je pokazati, da gibanja planetov ne morejo poganjati nekakšni vrtinci, kakor je zagotavljal Descartes. Descartes je namreč trdil, da lahko deluje telo na drugo telo le, če se telesi dotikata, in ni dopuščal možnosti, da deluje Sonce na planet s silo po praznem prostoru.

Tretji del *Principov* z naslovom *O sistemu sveta* je I. Newton namenil gravitacijskemu zakonu. Obravnaval je gibanje planetov in Lune. Med pisanjem osnutka za *Principe* je po drugem zakonu uvidel, da je sila Sonca na planet sorazmerna z maso planeta. Toda Sonce je telo kot planet (le da ima večjo maso). Masa Sonca mora nastopati v izrazu za silo enakopravno z maso planeta. Od te ugotovitve, ki je vodila do gravitacijskega zakona, je bil samo korak do ugotovitve, da deluje Zemlja na Sonce, če deluje Sonce na Zemljo, in do tretjega zakona. Tako se je Newton dokopal do spoznanja, da velja prvi Keplerjev zakon samo približno. V gorišču elipse ni Sonce, ampak težišče Sonca in planeta. Tudi drugi planeti delujejo na opazovani planet. Samo Sonce in planet smemo obravnavati le, če zanemarimo delovanje vseh drugih planetov. Astronom John Flamsteed je zelo natančno opazoval gibanje Saturna in ugotovil, da zares vpliva na njegovo gibanje Jupiter, ko sta planeta blizu drug drugega.

NEWTONOVA MEHANIKA

I. Newton je v tretjem delu *Principov* podrobno proučil gibanje Lune. Spoznal je, da povzroča plimo gravitacija Lune in v manjši meri gravitacija Sonca. Galilei pojava seveda ni mogel pojasniti, saj še ni poznal gravitacijskega zakona. Poleg tega je Newton pojasnil, zakaj opisuje zemeljska os plašč stožča, in sicer ga opiše enkrat v slabih 26000 letih. To *precesijo* povzroča gravitacija Sonca in Lune, ker Zemlja ni krogla, ampak je na polih nekoliko sploščena. Zemljska os okoli plašča stožča malo kima, in sicer traja en nihaj slabih 19 let. To *nutacijo* povzroča gravitacija Lune. Luna se namreč ne giblje okoli Zemlje natančno v isti ravnini kot Zemlja okoli Sonca. Poleg tega se vrtilna os Zemlje ne ujema natančno z njeno geometrijsko osjo (slika 32).

S *Principi* je I. Newton postavil skoraj na mah veličastno zgradbo mehaniko, ki so jo njegovi nasledniki le tu in tam dogradili. Čisto na začetku je napisal splošno navodilo, kako naj fizik proučuje naravo. Z opazovanjem in posplo-



Slika 32. Precesija in nutacija Zemlje. Pri precesiji opiše zemeljska os v okoli 26 000 letih plašč stožca, ker deluje Sonce na izbočeni del Zemlje na ekvatorju (a). Pri nutaciji zemeljska os kima s periodo 18,6 leta, ker se os vrtenja ne pokriva povsem z geometrijsko osjo Zemlje in ker Luna ne kroži okoli Zemlje v isti ravnini kot Zemlja okoli Sonca (b).

...Newton, ti si našel edino pot, mogočo v tvojem času za človeka s tvojo znanstveno ustvarjalnostjo in močjo misli. Pojme, ki s jih ustvaril, še sedaj uporabljamo v fiziki, čeprav tudi vemo, da moramo namesto njih uporabiti druge, bolj odmaknjene od neposrednega poskusa, če stremimo h globljemu razumevanju medsebojnih zvez ...

V spomin si moramo priklicati podobo tega bleščečega genija, ki je Zahodu pokazal pot mišljenja, eksperimentalnega raziskovanja in izdelovanja naprav kot nihče drug prej ali poslej. Newton ni samo ustvaril genialnih metod, on je v svojem času popolnoma obvladal vse izkustveno gradivo in je bil izredno pronicljiv pri iskanju matematičnih in fizikalnih dokazov. Zaradi vsega tega zasluži naše najvišje spoštovanje. Toda njegova osebnost ga označuje bolj, kot sledi iz njegovih zaslug, saj ga je usoda postavila na prelomno točko človeškega razvoja. Da bi se tega zavedli, se spomnimo, da pred Newtonom ni bilo sistema fizikalne vzročnosti, ki bi odražal globlje poteze zunanjega sveta.

A. Einstein ob proslavi dvestoletnice
Newtonove smrti 1927

Tema naravo in njene zakone je krila.

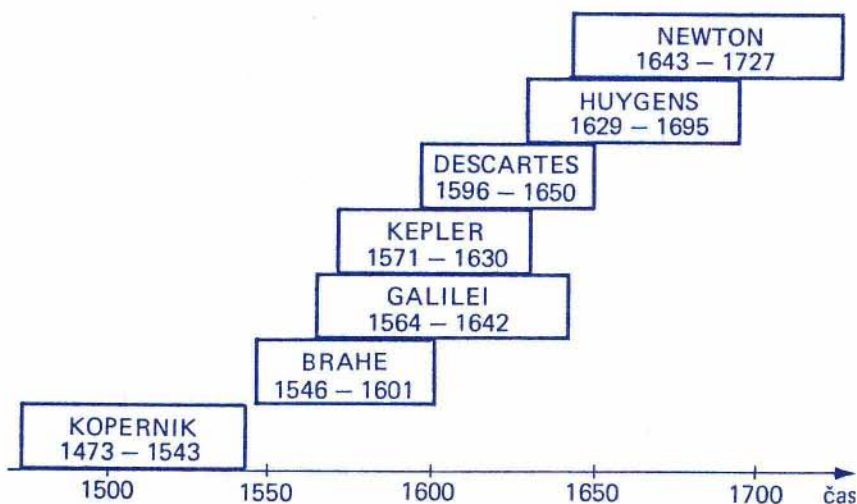
Bog reče: "Naj Newton bo" in vse je svetloba oblila.

*
A. Pope

* Alexander Pope je bil angleški pesnik (1688 – 1744).

Newtonova mehanika je bila prva fizikalna teorija in velja še dandanes. Zdaj postavljamo teorijam stroge zahteve: Teorija mora zajeti vse pojave kake vrste, na območju veljavnosti ne sme nasprotovati merskim izidom, njeni deli se morajo skladati med seboj in z drugimi teorijami, po možnosti naj napove pojave, ki jih ob njenem nastanku še nismo poznali, in naj vodi do novih teorij. Poleg tega mora biti čim bolj preprosta. Newtonova mehanika ustreza tem zahtevam. V tristo letih niso zasledili enega samega primera na območju veljavnosti, ki bi nasprotoval njenim napovedim.

Kljub temu se je pogled na Newtonovo teorijo močno spremenil. Ko je začela svojo zmagovito pot — v Angliji prej kot na evropski celini, so jo imeli za teorijo za vse pojave. Kot taka je imela velikanski vpliv na pogled na svet. Toda s časom se je pokazalo, da ne moremo z njo zajeti vseh pojavov v naravi, na primer svetlobo, elektriko in magnetizem. V našem stoletju so jo še močnejše omejili. Odpove pri hitrostih, ki niso zelo majhne v primeri s svetlobno hitrostjo. Na tem območju jo nadaljuje *posebna teorija relativnosti* iz leta 1905. Odpove pri delcih iz sveta atomov. Na tem območju jo nadaljuje *kvantna mehanika* iz leta 1926. Gravitacijski zakon ne velja čisto natančno, nadaljuje ga Einsteinova *splošna teorija relativnosti* iz leta 1916.



Slika 39. Čas življenja I. Newtona in mož, ki so mu pripravili pot do *Principiov*.

Dandanes obravnavamo tri Newtonove zakone kot osnovo mehanike ločeno od gravitacijskega zakona, s katerim neodvisno od njih za poseben primer izračunamo silo med telesoma. Navadili smo se na misel, da se telo, na katero ne deluje nobena sila, giblje enakomerno po ravni črti ali miruje. K temu so pripomogle tudi izkušnje z gibanjem teles v vakuumu, kjer ni upora, in v primerih, ko se znebimo trenja, na primer z zelo dobrimi ležaji ali z "zračno blazino". Aristotel ni mogel imeti podobnih izkušenj in ni mogel prepoznati trenja in upora. Zato je trdil – z današnjimi besedami – da mora delovati na telo sila, če naj se telo giblje s stalno hitrostjo.

Newton je že videl globlje od Aristotela. A pomagati si je moral z gibanjem vesoljskih teles, pri katerem ni ne trenja ne upora in je mogoče preprosto ugotoviti, katero telo deluje na opazovano telo. Ob tem je poenotil teorijo gibanja vesoljskih teles in teorijo gibanja teles na Zemlji. S tem je odpravil mejo, ki so jo videli Aristotel in njegovi somišljeniki med Zemljo in vesoljem. Poenotenja te vrste so značilni spremljevalci bistvenih odkritij v fiziki.

Nazadnje pribijmo še enkrat, da Newton ne bi mogel odkriti svojih zakonov in gravitacijskega zakona, če se ne bi mogel opreti na podrobna opazovanja in merjenja. Nekateri od učiteljev, ki se posebej ukvarjajo s predstavami učencev, mislijo, da imajo učenci, dokler jih šola "ne pokvari", na gibanje domala Aristotelove poglede. Šele šola jim privzgoji, kolikor uspe, Newtonove poglede. Mnogi učenci mislijo, da je sila povezana s hitrostjo, ne s pospeškom, in da je enakomerno kroženje enakomerno, ne pospešeno gibanje. Zdi se, da je Aristotelov pogled povezan s površnim, zgolj kvalitativnim opazovanjem, Newtonov pogled pa zahteva podrobno, kvantitativno sliko.

Razvoj pogledov na gibanje

Aristotel, ... tudi Kepler	Buridan, ... tudi Galilei	Descartes, Huygens	Newton
ostro ločil naravno gibanje od vsiljenega	gibanje poganja impetus	vzrok spremembe je trk	vzrok spremembe je sila drugega telesa
gibanje je proces in potrebuje vzrok		gibanje je stanje, njegova sprememba potrebuje vzrok	

UREDNIŠKI ODBOR: Vladimir Batagelj (bistrovidec), Dušica Boben (pisma bralcev, stavljenje teksta), Pavla Ranzinger (astronomija), Martin Čopič, Franci Forstnerič (matematika), Bojan Golli (tekmovanja – naloge iz fizike), Pavel Gregorc, Andrej Kmet, Damjan Kobal, Jože Kotnik, Edvard Kramar (odgovorni urednik), Sandi Klavžar in Matija Lokar (računalništvo), Gorazd Lešnjak (tekmovanja – naloge iz matematike), Peter Petek (naloge bralcev, premisli in reši), Tomaž Skulj, Ivanka Šircelj (jezikovni pregled), Miha Štalec (risbe), Marjan Hribar (fizika), Ciril Velkovrh (urednik, nove knjige, novice).

Dopise pošiljajte in list naročajte na naslov: Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS – Podružnica Ljubljana – Komisija za tisk, Presek, Jadranska c. 19, 61111 Ljubljana, p.p. 64, tel. (061) 265 – 061 / 53, št. žiro računa 50101–678–47233. Naročnina za šolsko leto 1986/87 je za posamezna naročila 1000.– din, za skupinska naročila pa 800.–, posameznik na številka 250.– din/200.– din.

List sofinancirajo Izobraževalna, Kulturna in Raziskovalna skupnost Slovenije
Ofset tisk Časopisno in grafično podjetje DELO, Ljubljana
© 1987 Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS – 859

ISSN 0351–6652

PRESEKOVA KNJIŽNICA

Izdaja Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS
Odgovorni urednik Edvard Kramar

27.

Janez Strnad
DO NEWTONOVIH ZAKONOV
Ob tristoletnici Principov

Jezikovni pregled Ivanka Šircelj
Stavek Dušica Boben
Slike Miha Štalec
Tiskarske korekture in oprema Ciril Velkovrh
Urednik Ciril Velkovrh

© 1987 DMFA SRS – 859

Pri izdaji te številke **PRESEKA** je sodelovalo
GRADBENO PODJETJE SCT – Ljubljana
v okviru proslavljanja štiridesetletnice obstoja.



PRESEKOVA KNJIŽNICA

3. Prosen M., ASTRONOMSKA OPAZOVANJA, 1978
4. Strnad J., ZAČETKI SODOBNE FIZIKE – Od elektrona do jedrske cepitve, 1979
5. Strnad J., RELATIVNOST ZA ZAČETNIKE, 1979
6. Landau L.D., Rumer J.B., KAJ JE TEORIJA RELATIVNOSTI, 1979
7. Križanič F., UKROČENA MATEMATIKA, 1981
8. Ranzinger P., PRESEKOVA ZVEZDNA KARTA, 1981
9. Strnad J., ZAČETKI KVANTNE FIZIKE – Od kvanta do snovnega valovanja, 1982
10. Kuščer I., ENAJSTA ŠOLA IZ FIZIKE – Čuda se kažejo ob vsakem koraku, 1982
11. Zajc P., TEKMUJMO ZA VEGOVA PRIZNANJA – Zbirka rešenih nalog iz matematike za učence petih in šestih razredov osnovnih šol, 1982
13. Zajc P., TEKMUJMO ZA VEGOVA PRIZNANJA – Zbirka rešenih nalog iz matematike za učence sedmih razredov osnovnih šol, 1983
14. Zajc P., TEKMUJMO ZA VEGOVA PRIZNANJA – Zbirka rešenih nalog iz matematike za učence osmih razredov osnovnih šol, 1983
16. Šporer Z., OH, TA MATEMATIKA, 1984
23. Strnad J., JOŽEF STEFAN – Ob stopetdesetletnici rojstva, 1985
25. Ranzinger P. in dr., NAŠE NEBO IN ZEMLJA 1987 – Astronomske efemeride. Potresi. Umetni sateliti, 1986
26. Vidav I., JOSIP PLEMELJ – Ob dvajsetletnici smrti, 1987
27. Strnad J., DO NEWTONOVIH ZAKONOV – Ob tristoletnici Principov, 1987

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *J. S. NEWTON*, *Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos*
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc. PRÆSES.*
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostant Vena-
les apud Sam. Smith ad insignia Principis Walliæ in Cœmiterio
D. Pauli, aliosq; nonnullos Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.