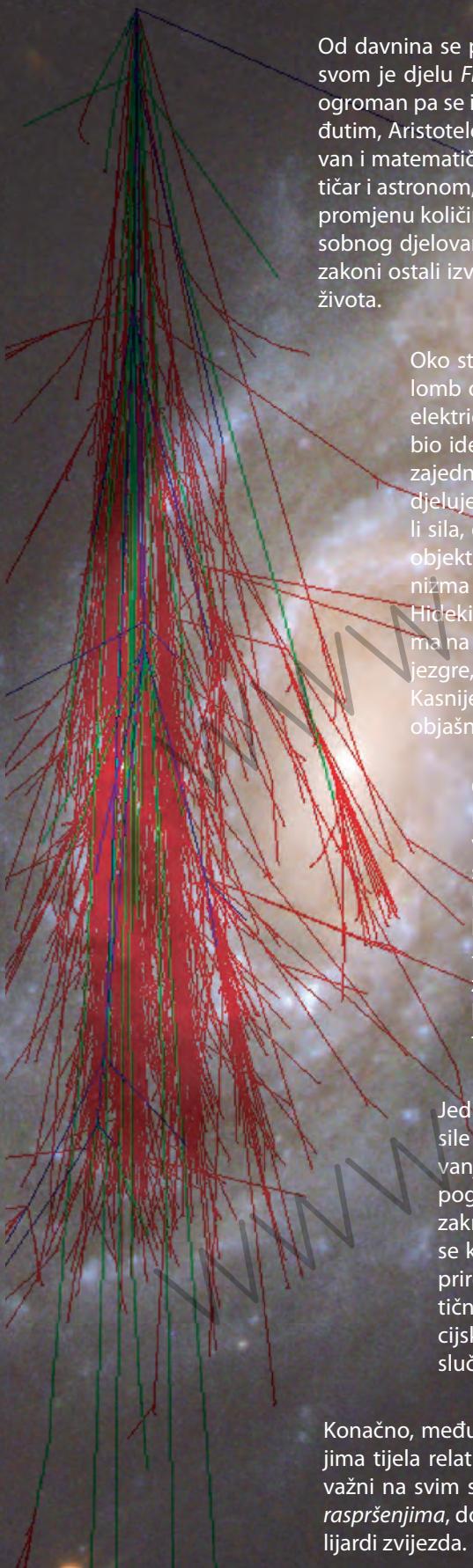


# 1

## Temeljna međudjelovanja u prirodi

- 1.1.** Još o konceptu sile
  - 1.1.1.** Sila
  - 1.1.2.** Polje
  - 1.1.3.** Potencijal
- 1.2.** Četiri temeljna međudjelovanja
  - 1.2.1.** Gravitacijsko međudjelovanje
  - 1.2.2.** Elektromagnetsko međudjelovanje
  - 1.2.3.** Slabo međudjelovanje
  - 1.2.4.** Jako međudjelovanje
- 1.3.** Primjene zakona očuvanja: sudari
  - 1.3.1.** Elastični sudar
  - 1.3.2.** Neelastični sudar



Od davnina se pojam sile koristio kao uzrok nekog djelovanja. Grčki filozof Aristotel u svom je djelu *Fizika* govorio o sili prije gotovo 2400 godina. Aristotelov utjecaj bio je ogroman pa se i njegov opis sile u gibanju tijela održao nevjerojatna dva tisućljeća. Međutim, Aristotelovo tumačenje uloge sile bilo je iz temelja pogrešno. Znanstveno ispravan i matematički precizan opis sile prvi je dao Isaac Newton, engleski fizičar, matematičar i astronom, prije nešto više od 300 godina. Drugi Newtonov zakon definira silu kao promjenu količine gibanja, a Newtonov opći zakon gravitacije koristi silu za opis međusobnog djelovanja masivnih tijela, primjerice Sunca i planeta. Do danas su Newtonovi zakoni ostali izvrstan opis gibanja makroskopskih tijela pod uvjetima iz svakodnevnog života.

Oko sto godina nakon Newtona francuski je fizičar Charles Augustin de Coulomb opisao električnu силу, privlačnu ili odbojnu силу između tijela koja nose električni naboј. Zanimljivo je da je matematički oblik Coulombovog zakona bio identičan Newtonovom općem zakonu gravitacije. To je govorilo nešto o zajedničkoj prirodi sila, ali još nije bilo jasno što je zapravo sila i na koji način djeluje. Posebno je zanimljivo postalo pitanje djelovanja na daljinu. Djeluje li sila, gravitacijska ili električna, trenutačno na udaljene objekte i kako jedan objekt "zna" masu ili naboј drugog, udaljenog objekta? Prvi prijedlog mehanizma sile, odnosno načina na koji sila zapravo djeluje, dao je japanski fizičar Hideki Yukawa 1935. godine. Yukawa je nuklearnu силу, силу koja drži jezgru atoma na okupu, objasnio kao izmjenu čestica. Protoni i neutroni, dijelovi atomske jezgre, privlače se tako da međusobno izmjenjuju druge čestice, medijatore. Kasnije je ideja medijatora, čestica prijenosnika sile, uspješno iskorištena za objašnjenje drugih sila.

Od svih sila u prirodi samo su četiri osnovne ili temeljne sile: elektromagnetska, jaka, slaba i gravitacijska. Zapravo ih češće zovemo međudjelovanjima. Tri od četiri temeljna međudjelovanja (elektromagnetsko, jako i slabo) danas razumijemo kroz model izmjene čestica, takozvani Standardni model. Vrlo pojednostavljeno: elektromagnetsko je međudjelovanje loptanje fotonima, česticama svjetlosti, između elektrona ili kvarkova - dijelova protona i neutrona. Ako se kvarkovi loptaju česticama koje nazivamo gluonima, tada njihovo međudjelovanje nazivamo *jakim*. Ako se kvarkovi i elektroni dobacuju česticama koje nazivamo W i Z-bozonima, tada međudjelovanje nazivamo *slabim*.

Jedino se gravitacijsko međudjelovanje ne uklapa u ovaj model tumačenja sile kroz izmjenu čestica. Trenutačno najbolji opis gravitacijskog međudjelovanja je Einsteinova opća teorija relativnosti, o kojoj će biti riječi u idućem poglavljju ove knjige. Opća relativnost je geometrijski opis gravitacije: masa zakrivljuje prostor, a gibanje druge mase kroz taj zakrivljeni prostor očituje se kao gravitacijsko privlačenje. Tako sva četiri temeljna međudjelovanja u prirodi imaju mehanizam djelovanja koji je moguće razumjeti. Nestalo je mistično djelovanje na daljinu. Utjecaj dugodosežnih međudjelovanja, gravitacijske i elektromagnetske sile, širi se kroz prostor konačnom brzinom. U oba slučaja riječ je o brzini svjetlosti, koja će biti ključna tema idućeg poglavљa.

Konačno, međudjelovanja obično proučavamo kroz sudare, izdvojene događaje u kojima tijela relativno kratkotrajno i relativno snažno djeluju jedno na drugo. Sudari su važni na svim skalama: od mikrovijeta elementarnih čestica, gdje ih obično zovemo *raspršenjima*, do makrovijeta galaksija, gdje se stupaju ogromni skupovi od stotina milijardi zvijezda.

## 1.1. Još o konceptu sile

### Ključni pojmovi

- sila
- polje
- potencijal
- potencijalna energija
- međudjelovanje
- gravitacijsko međudjelovanje
- elektromagnetsko međudjelovanje
- slabo međudjelovanje
- jako međudjelovanje
- sudar
- očuvanje količine gibanja
- očuvanje energije
- elastični sudar
- neelastični sudar



Isaac Newton (1643.–1727.), engleski fizičar, matematičar i astronom te jedan od najutjecajnijih znanstvenika u povijesti, u svojem slavnom djelu *Principia Mathematica*, objavljenom 1687. godine, formulirao je opće zakone gibanja i opći zakon gravitacije te tako postavio temelje fizike za budućnost. Newton je u fiziku uveo pojam sile kao uzroka promjene gibanja. Također je poznat po važnim dostignućima u matematici i optici.

Riječima opisujemo ideje. Količina riječi i ideja koje poznajemo i, još važnije, sposobnost pridruživanja tih riječi idejama određuje naše razumijevanje jezika i vještina komunikacije. Isto tako, broj fizikalnih pojmoveva i fizikalnih koncepata te sposobnost njihovog povezivanja određuju naše razumijevanje prirodnih pojava.

Za razliku od jezika, gdje su veze riječi i ideja većinom jednostavne, u fizici je povezanost pojmoveva i koncepata često vrlo složena. Poznavanje sadržaja ili značenja pojma koji koristimo u svakodnevnom govoru može biti od pomoći pri učenju fizike, no nije ni približno dovoljno za spoznavanje koncepta koji se krije iza fizikalnog pojma.

U ovom ćemo poglavlju detaljnije razmotriti fizikalni koncept sile. Izvan fizike imenicu sila (engl. *force*) koristimo za označavanje pojave koja uzrokuje neko djelovanje. Siliti znači tjerati nekoga ili nešto na promjenu djelovanja. U tom se smislu pojam sile koristio od davnina. Prvi poznati zapis u kojem se pojam sile koristi u fizikalnom kontekstu potječe od Aristotela, velikog grčkog filozofa iz doba antike. U jednoj od svojih knjiga, naslovljenoj *Fizika*, Aristotel je govorio o sili kao uzroku gibanja. S današnjeg gledišta, Aristotelovo je poimanje sile bilo potpuno pogresno.

Na temelju opažanja gibanja tijela kroz sredstvo, primjerice vodu ili zrak, Aristotel je zaključio da je za svako gibanje potrebna sila te da se tijelo giba jedino ako na njega djeluje sila. Prirodno stanje svakog tijela, smatrao je Aristotel, je mirovanje, što znači da tijelo na koje ne djeluje sila mora mirovati. Tek je slavni engleski znanstvenik Isaac Newton, dva tisućljeća nakon Aristotela, ispravno povezao silu i gibanje. Sila ne uzrokuje gibanje, kako je tvrdio Aristotel, nego *promjenu gibanja*. To je jezično mala, ali konceptualno ogromna razlika. Newton je ispravno shvatio da tijelo na koje ne djeluje sila miruje ili se giba jednoliko po pravcu – prvi Newtonov zakon. Newton je za opis gibanja koristio veličinu koju danas nazivamo količinom gibanja te je matematički definirao silu kao vremensku promjenu te količine gibanja – drugi Newtonov zakon. Newtonovi zakoni donijeli su ispravno shvaćanje veze sile i gibanja, no bili su i mnogo važniji od toga. Oni su odigrali presudnu ulogu u dalnjem razvoju fizike. Moderno shvaćanje fizikalnog pojma sile ne razlikuje se znatno, u temeljnim postavkama, od Newtonovog koncepta sile. Naravno, danas o silama znamo neizmjerno više od Newtona, no i dalje koristimo pojam sile kao uzroka promjene gibanja. S druge strane, koncept sile obogaćen je na razne načine. Znamo, primjerice, da sila ne djeluje trenutačno na daljinu, nego se djelovanje jednog tijela na drugo širi konačnom brzinom – *brzinom svjetlosti*, koja će biti tema idućeg poglavlja. Isto tako znamo da postoje samo četiri temeljne sile te da se na mikroskopskom nivou sila može shvatiti kao loptanje *mediatorima* – česticama prenositeljima sile. Na kraju, jednu od četiri temeljne sile, gravitaciju, Einstein je objasnio kao zakriviljenost prostor-vremena, o čemu će također biti riječi u idućem poglavlju ove knjige. Time je pojam sile neraskidivo povezan s pojmovima prostora i vremena, temeljnim pojmovima fizike, a koncept sile obogaćen više nego ikada prije.

## Zanimljivosti



### Razlika između fizike i matematike

Drugi Newtonov zakon često se navodi kao dinamička definicija sile. Gledano matematički, veličina  $F$  može se shvatiti kao zamjena ili supstitucija za veličinu  $\Delta p/\Delta t$ . U tom je smislu sila samo skraćeni zapis za promjenu količine gibanja. No, možemo li to tako gledati?

Postoji znatna razlika između fizike i matematike. Matematičke jednadžbe mogu opisivati manje ili više od onoga što postoji u stvarnom svijetu. U matematici izraz  $F = \Delta p/\Delta t$  naprsto pokazuje vezu triju varijabli  $F$ ,  $p$  i  $t$ . U fizici isti izraz može biti definicija, što u ovom slučaju nije, može biti i prirodni zakon koji pokazuje duboku vezu koncepta sile i koncepta količine gibanja, što ovdje jest. S druge strane, matematičke jednadžbe često mogu imati rješenja od kojih su neka realizirana u prirodi, a neka nisu. U tom je smislu matematika bogatija od fizike.

Pogledajmo to na dva primjera.



### Primjer 1

Tijelo bacimo s visine 2,2 m, okomito prema dolje, početnom brzinom od  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Za koje vrijeme tijelo padne na tlo? Radi jednostavnosti, uzmimo da je  $g = 10 \text{ ms}^{-2}$ . Iz jednadžbe za put pri jednolikom ubrzanim gibanju,

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2,$$

dobit ćemo kvadratnu jednadžbu  $5t^2 + t - 2,2 = 0$ , čija su rješenja  $t_1 = 0,2 \text{ s}$  i  $t_2 = -2,2 \text{ s}$ . Prvo rješenje,  $0,2 \text{ s}$ , odgovor je na naše pitanje. To je ono što bismo dobili mjerjenjem. Za drugo rješenje obično kažemo da je nefizikalno. Matematika opisuje još nešto što u stvarnom svijetu ne opažamo.

### Primjer 2

Ohmov zakon (struja je razmjerna naponu, a obrnuto razmjerna otporu) možemo zapisati na tri matematički ekvivalentna načina:  $I = U/R$ ,  $U = IR$  i  $R = U/I$ . U matematici možemo reći:

- $I$  je funkcija od  $U$  i  $R$ ,
- $U$  je funkcija od  $I$  i  $R$  te
- $R$  je funkcija od  $U$  i  $I$ .

U fizici su samo prve dvije tvrdnje točne, ali treća nije:  $R$  nije funkcija od  $U$  i  $I$ , odnosno otporne ovisi o naponu i struci. Otpor je u ovom slučaju konstanta koja ovisi o geometrijskim i fizičkim svojstvima vodiča. Matematički izraz  $R = U/I$  opisuje i svijet u kojem možemo neovisnim izborom napona i struje podešiti otpor vodiča na vrijednost  $U/I$ . Međutim, to nije svijet u kojem mi živimo.

#### 1.1.1. Sila

Pojmovi sile i mase korišteni su davno prije Newtona, u različitim kontekstima. Međutim, Newton je bio prvi koji ih je povezao s ispravnim fizikalnim konceptima sile i mase. Od Newtonovog doba do danas ti su koncepti proširivani i nadograđivani, no temelji su im ostali isti: masa je mjera za tromost tijela, a **sila** je vanjski uzrok *promjene gibanja*. Podsjetimo se i pojmovea tromosti i gibanja: tromost je svojstvo tijela da se opire promjeni gibanja, a gibanje je mijenjanje položaja tijela u odnosu na drugo tijelo.

**Sila je vanjski uzrok promjene gibanja.**

Silu i masu Newton je povezao drugim zakonom:

$$\vec{F} = m \vec{a},$$

koji je zapravo samo poseban slučaj u kojem je masa konstantna, ne mijenja se s vremenom. Općenito, drugi Newtonov zakon je

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t},$$

gdje je  $\vec{p}$  količina gibanja,  $\vec{p} = m\vec{v}$ .

Drugi Newtonov zakon obično nazivamo dinamičkom definicijom sile. Newton je, međutim, silu koristio i u općem zakonu gravitacije, kojim je opisao privlačenje dviju masa čija su središta na udaljenosti  $r$ .



Charles Coulomb (1736.–1806.), francuski fizičar, prvi je postavio matematički izraz za električnu силу, силу измеđu dva točkasta naboja, što danas nazivamo Coulombovim zakonom. Njemu u čast jedinica SI za električni naboј nosi naziv *kulon*. Kao što je masa izvor gravitacijske sile, tako je električni naboј izvor električne sile. Obje sile, Newtonova gravitacijska i Coulombova električna, mijenjaju se na isti način: opadaju s kvadratom udaljenosti.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

U Newtonovo vrijeme, a ni kasnije, sve do Einsteina, nije bilo jasno postoji li veza između dinamičke i gravitacijske sile. Nije bilo jasno čak ni to jesu li masa iz drugog zakona (troma masa) i masa iz zakona gravitacije (teška masa) isto svojstvo tijela.

### 1.1.2. Polje

Newtonova teorija gravitacije nije nudila nikakvo objašnjenje o tome kako gravitacijska sila zapravo djeluje. Ona nije ukazivala na prirodu sile, odnosno na moguće medijatore (prenositelje) sile. Pretpostavljalo se, stoga, da gravitacija djeluje trenutačno, bez obzira na daljinu. Ta pretpostavka nazvana je djelovanjem na daljinu. S vremenom je postajalo sve jasnije da je djelovanje na daljinu nezadovoljavajući koncept koji vodi u kontradikcije. Einsteinova posebna teorija relativnosti, kojoj je posvećeno sljedeće poglavlje ove knjige, pokazala je da trenutačno djelovanje na daljinu nije moguće.

Važan početni korak, koji je s vremenom doveo do razumijevanja prirode sile, bio je uvođenje ideje **polja**. U slučaju gravitacijske sile, koncept polja je ovakav: masa promijeni prostor oko sebe na takav način da na neku drugu masu, dovedenu u taj prostor, djeluje sila ovisna o jakosti polja. Općenito, polje je fizikalna veličina pridružena svakoj točki prostora. Važno je primijetiti da gravitacijsko polje postoji i bez prisustva one druge mase.

**Polje je fizikalna veličina pridružena svakoj točki prostora.**

Jakost polja u nekoj točki i sila na drugu masu u toj točki matematički su povezani. Ako je  $m$  masa tijela čije nas gravitacijsko polje zanima, a  $m_0$  probna masa dovedena na udaljenost  $r$ , tada je gravitacijska sila među njima:

$$F = G \frac{m \cdot m_0}{r^2}.$$

Jakost gravitacijskog polja je sila na probnu masu,  $\gamma = \frac{F}{m_0}$ , jednaka:

$$\gamma = G \frac{m}{r^2}.$$

Električnu silu, privlačnu ili odbojnju silu između tijela koja nose električni naboј, opisao je francuski fizičar Charles Augustin de Coulomb. Matematički oblik Coulombove električne sile identičan je, do konstante proporcionalnosti, Newtonovom općem zakonu gravitacije.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Ako je  $q$  električni naboј tijela čije nas električno polje zanima, a  $q_0$  probni naboј doveden na udaljenost  $r$ , tada je električna sila među njima:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2}.$$

Jakost električnog polja je sila na probni naboј,  $E = \frac{F}{q_0}$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

Na sličan se način svaka sila može povezati s poljem. Engleski kemičar i fizičar Michael Faraday prvi je shvatio da polje nije samo matematička konstrukcija, nego fizikalni objekt koji nosi energiju. Na kraju, važno je znati da je Faraday inspiraciju za svoju teoriju polja pronašao u atomskoj teoriji hrvatskog fizičara, matematičara, astronoma i filozofa Ruđera Boškovića.

### 1.1.3. Potencijal

Ponekad se polja mogu izraziti na matematički drugačiji način, koji nazivamo potencijalom, a taj je način često i jednostavniji. **Potencijal** je, dakle, fizikalna veličina koja je povezana s poljem. Tipični su primjeri gravitacijski potencijal:

$$\varphi_{\text{grav}} = -G \frac{m}{r}$$

i električni potencijal.

$$\varphi_{\text{el}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

**Potencijal je fizikalna veličina koja je matematički povezana s poljem.**

Iz gravitacijskog i električnog potencijala relativno je lako izvesti gibanja masivnih tijela, za gravitacijski potencijal i električni nabijenih tijela, za električni potencijal. Nadalje, te je potencijale vrlo jednostavno povezati s potencijalnom energijom. **Potencijalna energija** je ona energija koja ovisi o položaju tijela u prostoru. Misli se isključivo na prostor u kojem postoji polje, odnosno potencijal.

**Potencijalna energija je energija koja ovisi o položaju tijela u prostoru.**

Gravitacijska potencijalna energija je umnožak mase i gravitacijskog potencijala druge mase.

$$E_p^{\text{GRAV}} = -G \frac{m_1 m_2}{r}$$

Isto tako, električna potencijalna energija umnožak je naboja i električnog potencijala drugog naboja.

$$E_p^{\text{EL}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$

## Napomena



Onima koji žele saznati više o međudjelovanjima preporučujemo knjige:

- Abdus Salam:

### **Ujedinjenje temeljnih sila prirode**

- Steven Weinberg:

**Upotrazi za konačnom teorijom:** znanstvena potraga za konačnim zakonima prirode

- Richard Feynmann:

### **Osobitosti fizikalnih zakona**

- Harald Fritzsch:

### **Kvarkovi: pratvar našega svijeta**

- Frank Close:

### **Svemirska lukovica: kvarkovi i priroda svemira**

- Ivan Supek:

**Ruđer Bošković:** vizionar u prijelomima filozofije, znanosti i društva

## 1.2. Četiri temeljna međudjelovanja

Razmatranje sila svodi se na proučavanje uzajamnog djelovanja dvaju tijela. Čak i u slučajevima kad je u igri mnoštvo tijela problem možemo svesti na razmatranje pojedinog tijela i njegove okoline - svih ostalih tijela kao vanjskog sustava. Uzajamno djelovanje dvaju tijela nazivamo **međudjelovanjem** ili interakcijom (engl. *interaction*). Međudjelovanje je drugi naziv za silu.

**Međudjelovanje je uzajamno djelovanje dvaju tijela.**

Postoje različita međudjelovanja u prirodi, no sva se ona mogu svesti na samo četiri temeljna međudjelovanja: gravitacijsko, elektromagnetsko, slabo i jako. Ponekad se kaže da postoji samo tri temeljna međudjelovanja: gravitacijsko, elektroslabovo i jako. Zapravo, fizičari pretpostavljaju da postoji samo jedno jedino temeljno međudjelovanje, koje se pod određenim uvjetima odražava na različite načine.

U pozadini priče o temeljnim međudjelovanjima leži bit same fizike – objasniti mnoštvo naizgled različitih prirodnih pojava na jedinstven način. U području temeljnih međudjelovanja takva se težnja naziva velikim ujedinjenjem. Teoriju koja pokušava ujediniti temeljna međudjelovanja nazivamo *teorijom velikog ujedinjenja* (engl. *grand unification theory*, GUT) ili *teorijom svega* (engl. *theory of everything*, TOE).

Veliko ujedinjenje još se nije postiglo, no fizičari vjeruju da je težnja za njime opravdana. To proizlazi iz dosadašnjeg razvoja fizike. Newton je sveo gravitaciju nebeskih tijela i zemaljsku gravitaciju na jedinstvenu opću gravitaciju. Maxwell je ujedinio elektricitet, magnetizam i optiku u jedinstvenu teoriju elektromagnetizma. Konačno, elektromagnetizam i slaba sila ujedinjeni su u jedinstvenu elektroslabu silu, o čemu će biti riječi u nastavku ovog poglavlja.

### 1.2.1. Gravitacijsko međudjelovanje

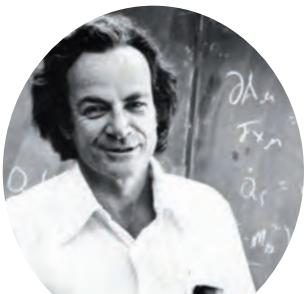
Gravitacija je prirodna pojava privlačenja tijela koje imaju masu. Zbog gravitacije postoji *sila teže* – sila kojom Zemlja privlači sva tijela u blizini svoje površine. Pod djelovanjem sile teže tijela koja ispustimo padaju *ubrzano* prema površini Zemlje. Iznos tog ubrzanja jednak je za sva tijela, bez obzira na njihovu masu. To je važna činjenica, koju je prvi spoznao Galileo Galilei početkom 17. stoljeća. Do tada je bilo prihvaćeno Aristotelovo (pogrešno) vjerovanje da masivnija tijela dobivaju veće ubrzanje. Takav Aristotelov stav, kod mnogih ljudi prisutan i danas, proizašao je iz iskustva padanja tijela kroz zrak, gdje zbog otpora zraka postoji dodatna sila – sila trenja.

Galileijev rad bio je temelj za Newtonovu opću teoriju gravitacije. Newton je spoznao da se sva masivna tijela privlače te da je iznos te privlačne sile razmjeran masama tijela, a obrnuto razmjeran udaljenosti središta masa:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

gdje je  $G$  konstanta proporcionalnosti koju nazivamo *gravitacijskom konstantom*.

Danas znamo da je gravitacijska sila, odnosno **gravitacijsko međudjelovanje**, jedno od četiri temeljna međudjelovanja u prirodi. Gravitacijski međudjeluju sva tijela koja imaju masu. Dakle, masa je izvor gravitacijskog međudjelovanja.



Richard Feynman (1918.–1988.), američki fizičar i dobitnik Nobelove nagrade za fiziku 1965. godine, razvio je teoriju kvantne elektrodinamike, mikroskopskog opisa elektromagnetskog međudjelovanja koje se temelji na Yukawinoj ideji izmjene čestica. U kvantnoj elektrodinamici se međudjelovanje, primjerice dvaju elektrona, opisuje izmjenom fotona – bezmasenih čestica svjetlosti. Feynman je Nobelovu nagradu podijelio sa Schwingerom i Tomonagom.

Gravitacijsko međudjelovanje jedno je od četiri temeljna međudjelovanja u prirodi. Gravitacijski međudjeluju sva tijela koja imaju masu.

Najbolji opis gravitacijskog međudjelovanja koji trenutačno postoji je *Einsteinova opća teorija relativnosti*. Opća teorija relativnosti je geometrijski opis gravitacije. Einstein je otkrio da masa zakrivilje prostr-vrijeme, a gibanje druge mase kroz taj zakriviljeni prostor očituje se kao gravitacijsko privlačenje. O općoj teoriji relativnosti bit će nešto više riječi u sljedećem poglavlju.

### 1.2.2. Elektromagnetsko međudjelovanje

Francuski fizičar Charles Augustin de Coulomb prvi je matematički opisao električnu silu, privlačnu ili odbojnu silu između tijela koja nose električni naboј. Kao i kod Newtonovog općeg zakona gravitacije, električna je sila proporcionalna iznosima električnih naboja, a obrnuto proporcionalna međusobnoj udaljenosti naboja:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

gdje je  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  konstanta proporcionalnosti, a  $\epsilon_0$  električna permitivnost vakuuma.

Početkom 19. stoljeća, u nizu eksperimenata koje su proveli Oersted, Ampère i Faraday, shvaćena je veza elektriciteta i magnetizma. Danski fizičar i kemičar Oersted otkrio je da električna struja stvara magnetsko polje. Engleski fizičar i kemičar Faraday otkrio je da magnetsko polje stvara električnu struju. Francuski fizičar i matematičar Ampère matematički je opisao razne pojave elektriciteta i magnetizma. Na temelju njihovih rezultata, škotski je teorijski fizičar i matematičar James Clerk Maxwell ujedinio sve pojave elektriciteta, magnetizma i optike u cjelovitu teoriju *elektromagnetizma*.

Danas znamo da je **elektromagnetsko međudjelovanje** jedno od četiri temeljna međudjelovanja u prirodi. Elektromagnetski međudjeluju sva tijela koja imaju električni naboј. Naboј je, dakle, izvor elektromagnetskog međudjelovanja.

Elektromagnetsko međudjelovanje jedno je od četiri temeljna međudjelovanja u prirodi. Elektromagnetski međudjeluju tijela koja imaju električni naboј.

Kao što smo već spomenuli, Faraday je shvatio da polje nije samo matematička konstrukcija, nego fizikalni objekt koji nosi energiju. Maxwell je kasnije pokazao da elektromagnetsko polje ne nosi samo energiju, nego i količinu gibanja, kao čestica. Konačno, Einstein je predložio kvant, najmanju jedinicu elektromagnetskog polja, koju je nazvao fotonom (česticom svjetlosti).

Koncept fotona i koncept izmjene čestica, koji će biti opisan malo kasnije, poslužili su za razvoj *kvantne elektrodinamike* (engl. *quantum electrodynamics*, QED), najpreciznije teorije elektromagnetskog međudjelovanja. Ključnu ulogu u razvoju kvantne elektrodinamike imali su američki fizičari Richard Feynman i Julian Schwinger te japanski fizičar Sin-Itiro Tomonaga.



Ruđer Bošković (1711.–1787.), hrvatski fizičar, matematičar, astronom i filozof, rođen je u Dubrovniku, a djelovao u Francuskoj, Engleskoj i Italiji kao jedan je od posljednjih univerzalnih umova europske humanističke tradicije. U svojem genijalnom djelu *Theoria Philosophiae Naturalis*, objavljenom 1763. godine, predložio je poseban oblik sile među atomima, što se kasnije pokazalo iznimno plodonosnom idejom. Stoga se smatra pretečom teorije atoma, a njegov je rad izravno utjecao na razvoj ideje polja u fizici. Bošković je bio najistaknutiji hrvatski znanstvenik svojega doba, a zacijelo i uopće. Njegovo ime nosi jedan od kratera na Mjesecu te najveći hrvatski znanstveni institut, Institut Ruđer Bošković.

### 1.2.3. Slabo međudjelovanje

Newtonov koncept sile imao je od samog početka velik utjecaj na razvoj mnogih područja fizike. I više od toga, Newtonova je mehanika potakla nastanak novog pogleda na svijet, nazvanog *mehanicizmom*. Prema mehanicizmu, sve se prirodne pojave mogu objasniti mehaničkim zakonima. Ta se ideja pokušavala primijeniti svagdje: od atoma do cijelog svemira. Engleski politički filozof Thomas Hobbes nastojao je mehaničkim zakonima objasniti čak i društvo.

Newtonova mehanika oduševila je i Ruđera Boškovića, koji je na njoj utemeljio svoju slavnu atomsku teoriju. Bošković je smatrao da sile među najmanjim česticama tvari moraju s udaljenošću mijenjati ne samo iznos, nego i smjer. Sila koja je na velikim udaljenostima odbojna, može na manjim udaljenostima čestica postati privlačna pa na još manjim udaljenostima ponovo odbojna. Bila je to revolucionarna ideja u doba kad su bile poznate samo gravitacijska i električna sila, koje s udaljenošću nisu mijenjale svoj smjer.

Novozelandski fizičar Ernest Rutherford je početkom 20. stoljeća da je atom uglavnom prazan prostor. Rutherfordovi eksperimenti pokazali su da se svaki atom sastoji od negativno nabijenog omotača i srušne pozitivno nabijene jezgre. Nedugo nakon toga otkriveno je da i atomska jezgra (nukleus) ima svoju unutarnju građu. Čestice koje grade jezgru nazvane su *nukleoni*. Postoje dvije vrste nukleona: pozitivno nabijeni *protoni* i neutralni *neutroni*. Iz ovih spoznaja proizlazi očito pitanje: što to drži jezgru na okupu? Električna odbojna sila među protonima mnogo je jača od privlačne gravitacijske sile. Dakle, mora postojati još neka sila.

Nova sila, koja drži nukleone u jezgri, nazvana je *nuklearnom silom*. Za razliku od električne i gravitacijske sile koje su dugodosežne, teorijski beskonačnog dosega, nuklearna je sila kratkodosežna, privlačno djeluje

#### Primjer 1

Usporedite gravitacijsku i Coulombovu silu između dva protona.

#### Rješenje:

Gravitacijska sila je  $F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_p^2}{r^2}$ , gdje je  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{kg}^{-2}$ .

Coulombova sila je  $F_c = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2}$ , gdje je  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2}$ .

Omjer dviju sila je  $\frac{F_c}{F_g} = \frac{k \frac{e^2}{r^2}}{G \frac{m_p^2}{r^2}} = \frac{k \left( \frac{e}{m_p} \right)^2}{G}$

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2}}{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{kg}^{-2}} \left( \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \right)^2$$

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38}}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2,789 \cdot 10^{-54}}$$

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{9 \cdot 2,56 \cdot 10^{36}}{6,67 \cdot 2,789} = 1,24 \cdot 10^{36}.$$

Odbojna Coulombova električna sila veća je od privlačne gravitacijske sile čak 36 redova veličine. Zato je u svijetu elementarnih čestica gravitacijska sila zanemariva. Ona postaje važna tek za električki neutralna makroskopska tijela velike mase.

samo na čestice koje su dovoljno blizu jedna drugoj. Osim toga, na vrlo maloj udaljenosti postaje odbojna, kao što je predviđao Bošković. U suprotnom bi sve čestice stopila u jednu točku.

Priču o atomima i atomskim jezgrama nastaviti ćemo na kraju četvrtog razreda. Ovdje možemo još reći da su detaljnija istraživanja nuklearne sile pokazala da se radi o *rezidualnoj* sili. To znači da nuklearna sila nije temeljna sila, nego je ostatak (reziduum) neke druge, temeljne sile. Otkrivene su dvije takve sile, odnosno međudjelovanja: slabo i jako. Međusobno se razlikuju po vrstama čestica na koje djeluju.

Prije 1970. godine se smatralo da su protoni i neutroni *elementarne čestice*, čestice koje nemaju unutrašnju strukturu. Onda su otkrivene čestice unutar čestica, prvo bitno nazvane partoni (engl. *part*, dio), a kasnije kvarkovi. Svaki se nukleon, proton ili neutron, sastoji od tri kvarka. Drugu kategoriju elementarnih čestica, kojoj pripada elektron, nazivamo leptonima. Svu tvar oko nas, a tako i nas same, grade samo dvije vrste elementarnih čestica: kvarkovi i leptoni. **Slabo međudjelovanje**, jedno od četiri temeljna međudjelovanja u prirodi, povezuje kvarkove i leptone. Medijatori (prenositelji) slabog međudjelovanja su teške čestice koje nazivamo *W i Z-bozonima*.

Slabo međudjelovanje jedno je od četiri temeljna međudjelovanja. Slabo međudjeluju elementarne čestice: leptoni i kvarkovi.

Tri teorijska fizičara, Abdus Salam, Sheldon Glashow i Steven Weinberg, pokazala su da su slabo i elektromagnetsko međudjelovanje, pod određenim uvjetima, zapravo ista vrsta međudjelovanja, koje nazivamo *elektroslabim međudjelovanjem*. Za svoj su rad Salam, Glashow i Weinberg 1979. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziku. Postojanje elektroslabog međudjelovanja eksperimentalno je potvrđeno u CERN-u (Europskom laboratoriju za fiziku čestica), za što su 1984. godine Nobelovu nagradu dobili Carlo Rubbia i Simon van der Meer.

#### 1.2.4. Jako međudjelovanje

Istraživanje nuklearne sile, sile koja drži na okupu protone i neutrone u atomskoj jezgri, dovelo je do otkrića općenitog mehanizma temeljnih sile. Prvi prijedlog mehanizma sile ili načina na koji sile zapravo djeluju, dao je japanski fizičar Hideki Yukawa 1935. godine. Yukawa je objasnio nuklearnu silu kao izmjenju čestica. Predložio je da se nukleoni "loptaju" hipotetskim česticama, koje su kasnije nazvane *pioni*. Pione je kasnije otkrio britanski fizičar Cecil Frank Powell, za što je dobio Nobelovu nagradu 1950. godine.

Kasnije se pokazalo da nuklearna sila nije temeljna sila, no ideja medijatora, čestica prijenosnika sile, uspješno je iskorištena za objašnjenje temeljnih sile, odnosno međudjelovanja. Već smo spomenuli medijatore elektromagnetskog međudjelovanja - fotone i medijatore slabog međudjelovanja - W i Z-bozone. **Jako međudjelovanje**, koje leži u pozadini nuklearne sile, ima za medijatore *gluone* (engl. *glue*, ljepilo), a djeluje između kvarkova. Kvarkove na okupu unutar nukleona drži izmjena gluona.

Jako međudjelovanje jedno je od četiri temeljna međudjelovanja. Jako međudjeluju elementarne čestice kvarkovi.



Hideki Yukawa (1907.–1981.), japanski fizičar, predložio je 1935. godine novu teoriju nuklearne sile, sile među protonima i neutronima u atomskoj jezgri, utemeljenu na izmjeni čestica. Za svoj je rad Yukawa 1949. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku.