

# Glava 1

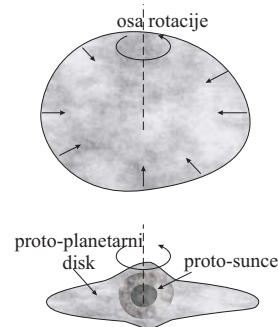
## Atmosfera

### 1.1 Nastanak planetarne atmosfere

Atmosfera<sup>1</sup> Zemlje je relativno tanak sferni gasoviti omotač koji gravitacija drži uz Zemlju. U postupku analize Zemljine atmosfere i ljudskog uticaja na nju korisno je prvo shvatiti kako je Zemlja uopšte dobila atmosferu i kako se ona menjala sa vremenom.

#### 1.1.1 Nastanak Sunčevog sistema

Najpoznatija teorija o nastanku Sunčevog sistema je poznata pod nazivom Kant-Laplasova hipoteza magline. Ovu hipotezu je prvi predložio filozof Emanuel Svedenberg 1734. godine a 1755. godine je Kant detaljnije razvio. Sličan model je 1796. godine predložio i Pjer-Simon Laplas dajući mu čvršću matematičku osnovu. Osnovna ideja ove hipoteze je da je Sunčev sistem nastao pre oko 4,6 milijardi godina gravitacionim kolapsom oblaka hladnog međuzvezdanog gasa i prašine (magline) koji je vršio sporo rotaciono kretanje. Inicijalni oblak je bio prečnika nekoliko svetlosnih godina a pretpostavlja se da je udarni talas koji je došao sa obližnje supernove u oblaku kreirao oblasti koje su bile malo gušće od ostalih i koje su inicirale njegov gravitacioni kolaps i kolaps odgovarajućih oblasti od kojih su kasnije



Slika 1.1: Kolaps oblaka gasa i prašine u zvezdu i protoplanetarni disk.

<sup>1</sup>Naziv atmosfera je kovanica dve grčke reči:  $\alpha\tau\mu\sigma$  (para) i  $\sigma\phi\alpha\iota\rho\alpha$  (lopta).

nastala nebeska tela.<sup>2</sup>

Maglina predstavlja izolovan sistem u kome stoga važe svi poznati zakoni održanja. Između ostalog se održava i moment impulsa, tako da, što je poluprečnik oblaka manji, njegova rotacija se odvija većom brzinom<sup>3</sup> (kao što se brzina rotiranja klizača na ledu povećava kada priljubi ruke uz telo). Gravitaciono privlačenje, od strane centralnog masivnijeg dela magline, je jednako zastupljeno po svim pravcima, tj. izotropno. Obzirom da svi delovi magline rotiraju oko iste ose rotacije, kao posledica njihovog ubrzanog kretanja, na njih deluje centrifugalna sila zadata relacijom

$$F = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r, \quad (1.1)$$

gde je  $m$  masa posmatranog dela magline koji se nalazi na rastojanju  $r$  od ose rotacije. Sa  $v$  je označena njegova periferijska brzina dok je  $\omega$  ugaona brzina koja je ista za sve deliće magline. Kako je  $r$  manje za deliće koji su bliže osi rotacije, centrifugalna sila u potpunosti uravnotežava gravitaciju samo za deliće oblaka koji se nalaze u ekvatorijalnoj ravni (pod pravim uglom u odnosu na osu rotacije). Iznad i ispod te ravni ova sila je manja i ne može da spreči materiju da se sažima ka ekvatorijalnoj ravni tako da oblak rotirajuće materije poprima oblik diska (slika 1.1).

Opisanim postupkom je u centru magline nastalo zgušnjenje koje se naziva protosunce. Pri daljem kolapsu materije protosunca ova oblast je počela još brže da rotira (opet kao posledica zakona održanja momenta impulsa). Tokom kolapsa je gravitaciona potencijalna energija čestica gasa prelazila u njihovu kinetičku energiju što je izazvalo brže kretanje delića oblaka. Učestaliji sudari čestica oblaka su dovela do povećanja njegove temperature. To je naravno bilo bilo najizraženije u centru oblaka jer se tamo, po smislu ovog procesa, nalazi najveći deo mase oblaka.

Planete su formirane istim mehanizmom od protoplanetarnih diskova koji su sadržali prašinu i gasove. Više temperature na mestu gde su se nalazili unutrašnji protoplanetarni diskovi su dovele do toga da su oni ostali bez lako isparljivih supstanci (gasova i leda) i dovele su do nastanka planeta Zemljinog/stenovitog, odnosno terestričnog tipa. Sa druge strane, niže

---

<sup>2</sup>Nastanak oblasti koje su bile gušće od drugih je pri tome od ključne važnosti. Ukoliko bi maglina bila potpuno homogena njeno zgušnjavanje bi se takođe vršilo ravnomerno pa u tom slučaju ne bi bio moguć nastanak Sunca i planeta.

<sup>3</sup>Moment impulsa je jednak proizvodu momenta inercije  $I$  i ugaone brzine  $\omega$ , tako da je zakon održanja momenta impulsa iskazan relacijom  $I\omega = const$ . Iz nje sledi da, pri smanjenju momenta inercije koji je određen raspodelom masa oko ose rotacije (proporcionalan kvadratu njihove udaljenosti od ose rotacije), raste ugaona brzina.

temperature na mestima gde su se nalazili spoljašnji protoplanetarni diskovi su dovele do formiranja planeta Jovijanskog tipa (Jupiterovog/gasovitog). Unutrašnje planete su formirane u polu tečnom stanju, i usled toga su sadržale malu količinu vode i gasova.

### 1.1.2 Veliko bombardovanje

Period od pre 3,8 do 4,6 milijardi godina za planete Zemljinog tipa (Merkur, Venera, Zemlja i Mars) je poznat kao period njihovog *velikog bombardovanja* od strane preostalog čvrstog materijala iz protoplanetarnog diska. Pretpostavlja se da je u tom periodu, usled sudara sa protoplanetom veličine Marsa, sa Zemlje izbačen i materijal od koga je nastao Mesec.

Ovaj period bombardovanja terestričnih planeta je na njihovu atmosferu imao i pozitivne i negativne efekte. U toku bombardovanja, većina vode i mnogi drugi isparljivi elementi, važni za razvoj života (ugljenik, azot, fosfor, ...) su isparili i otišli sa terestričnih protoplaneta. Isto se desilo i sa prvobitnom atmosferom Zemlje koja je u tom periodu bilo sastavljena u najvećem meri od vodonika i helijuma. Međutim, u isto vreme, visoke temperature izazvane tim bombardovanjem su dovele do stvaranja nove makar i nestabilne, atmosfere terestričnih planeta.

Kad je prošao period velikog bombardovanja količina vode, azota, ugljenika i ostalih elemenata, se povećala usled sudara sa kometama i asteroidima. Neke komete i asteroidi su takođe posedovale i organski materijal koji je bio važan za kasnije formiranje života na Zemlji. Više od 10 000 tona organskog materijala godišnje je u tom periodu dospevalo na Zemlju. Kao rezultat bombardovanja i toga što su vulkani izbacivali gasove, rana atmosfera terestričnih planeta je sadržala velike količine ugljen dioksida, vode (bilo u formi okeana, leda na površini ili vodene pare u atmosferi) i azota. Iz tog razloga je, u tom razdoblju evolucije, atmosfera Zemlje imala pritisak oko 60 puta veći od današnjeg, i u osnovi se sastojala od CO<sub>2</sub>.

U to vreme je luminoznost Sunca iznosila oko 70% sadašnje luminoznosti. Luminoznost zvezde je fizička veličina koja predstavlja količinu elektromagnetne energije koje ona izrači u jedinici vremena. SI jedinica je prema tome vat a današnja luminoznost Sunca iznosi  $L_{\odot} = 3,846 \times 10^{26}$  W. To znači da je tada na planete dolazila manja količina energije zračenja. Svejedno, temperatura na njihovim površinama je bila veća nego danas usled izraženijeg efekta staklene bašte<sup>4</sup> izazvanog velikom količinom CO<sub>2</sub> i vodene pare u

---

<sup>4</sup>Efekat staklene bašte je pojava dodatnog zadržavanja toplote u atmosferi slični kao što se dešava u staklenim baštama. Zbog njegove važnosti ovom efektu će kasnije biti posvećena veća pažnja.

njihovoj atmosferi.

### 1.1.3 Modifikacija primordijalnih atmosfera terestričnih planeta

Da vidimo sada kako su primordijalne (prvobitne) atmosfere terestričnih planeta postale onakve kakve jesu danas. Postoje tri važna fizička procesa koja su se, u manjoj ili većoj meri, odigrala na svim terestričnim planetama i jedan važan biološki proces koji se, koliko mi znamo, odigrao samo na Zemlji.

Fizički procesi su:

- Reakcija u kojoj  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Mg}^{+2}, \text{Ca}^{+2} \rightarrow$  daje ugljenične (krečnjačke) sedimentne stene,

- Disocijacija  $\text{H}_2\text{O}$  pod dejstvom ultraljubičastog zračenja.  $\text{H}_2\text{O} + \text{UV foton} \rightarrow \text{H}_2, \text{H}, \text{OH}, \text{ i } \text{O}$ .  $\text{H}_2$  i  $\text{H}$  napuštaju atmosferu, dok  $\text{O}$  i  $\text{OH}$  reaguju sa materijalom na površini planete i stvaraju okside.

- Odlazak delova atmosfere u kosmos

Biološki proces je fotosinteza:

- $\text{CO}_2 + \text{ sunčeva svetlost} \rightarrow \text{O}_2 + \text{organska jedinjenja}$ .

### Venera

Primordijalnu atmosferu Venere su činili:

- $\text{CO}_2 \sim 90P_a$  (gas),
- $\text{H}_2\text{O} \sim 450P_a$  (tečnost i gas) i
- $\text{N}_2 \sim 3P_a$  (gas).<sup>5</sup>

Proračuni pokazuju da je Venera verovatno imala okeane u ovom ranom stadijumu svog razvoja za razliku od današnje situacije kada je njena površina veoma suva i topla. Razlog je što je tada, kao što je napomenuto, Sunce bilo manje luminozno pa je manje energije dolazilo na Veneru. Drugo, rana Venera je verovatno imala relativno debeo sloj oblaka punih vode. Oni su, sa jedne strane, zadržavali infracrveno zračenje sa Venere i time zagrevali površinu planete ali su takođe i reflektovali kratkotalasno zračenje sa Sunca nazad i time stvarali toplotni balans na njenoj površini. Posledica toga je relativno niska temperatura rane Venere (oko  $100^\circ\text{C}$ ) koja je omogućila

---

<sup>5</sup>U ovim izrazima je sa  $P_a$  označena vrednost standardnog atmosferskog pritiska na Zemlji  $P_a = 101325 \text{ Pa}$ . Treba obratiti na različito pisanje jedinice za pritisak Paskal=Pa i (atmosferskog) pritiska  $P_a$  kao fizičke veličine. Fizičke veličine se naime označavaju iskošenim slovima (kurzivom) a jedinice se obavezno pišu uspravnim slovima.

formiranje okeana i veoma vlažne atmosfere. Na taj način je na Veneri dominirao "vlažni" efekat staklene bašte jer su temperaturu određivali oblaci vodene pare. Danas na Veneri nema vode, nema ni oblaka vodene pare pa ni negativne povratne sprege koju oni izazivaju.

Kako se  $\text{CO}_2$  iz atmosfere rastvarao u vodi kondenzovanoj u oblacima, padavine su smanjivale njegovu količinu u atmosferi i dovele do formiranja sedimentnih krečnjačkih stena u okeanima. Proračuni pokazuju da se, usled toga, pritisak  $\text{CO}_2$  na Veneri smanjio od 90 do  $1P_a$  u tom periodu (prvih milijardu godina). Ti uslovi međutim nisu bili stabilni jer je Venera gubila veoma brzo vodu iz atmosfere usled disocijacije izazvane ultraljubičastim zračenjem. Kada je izgubila vodu, okeani su se isušili, a  $\text{CO}_2$  sadržan u ugljeničnim sedimentnim stenama se reciklirao u atmosferi kao posledica vulkanskih aktivnosti. Na taj način je pritisak  $\text{CO}_2$  u atmosferi vraćen na početnu vrednost. Kako je  $\text{CO}_2$  veoma moćan gas staklene bašte, temperatura površine Venere je narasla do sadašnjih 750 K.

#### 1.1.4 Mars

Primordijalna atmosfera Marsa se sastojala od:

- $\text{CO}_2 \sim 10P_a$  (gas),
- $\text{H}_2\text{O} \sim 50P_a$  (tečnost i gas), i
- $\text{N}_2 \sim 0,3P_a$  (gas).

Rezultati posmatranja Marsa letelicom Viking, sedamdesetih godina prošlog veka, kao i savremena istraživanja (uključujući podatke koje su poslala dva rovera) ukazuju na to da je Mars posedovao tečnu vodu u formi jezera i reka u veoma ranim stadijumima razvoja. To ukazuje da je njegova atmosfera bila mnogo gušća od današnje pa je i temperatura bila mnogo viša od njene današnje srednje vrednosti  $-60^\circ\text{C}$ . Količina  $\text{CO}_2$  sugeriše da je njegov atmosferski pritisak bio oko 10 puta veći od  $P_a$ . Ta vrednost je dovoljna da, čak i na rastojanju na kome je Mars i sa malom luminoznošću Sunca, izazove značajan efekat staklene bašte koji je temperaturu Marsa držao znatno iznad temperature ključanja vode. Postojanje tečne vode na površini Marsa, uključujući mogućnost postojanja velikog okeana na njegovoj severnoj hemisferi ukazuje na postojanje aktivnog hidrološkog ciklusa. Današnja geološka istraživanja površine Marsa uz pomoć rovera pokazuju da je voda na Marsu bila jako kisela a u takvim uslovima krečnjačke stene ne mogu da se formiraju. I zaista, krečnjačke stene do sada nisu pronađene ni na jednom delu površine Marsa. Sa druge strane, usled slabe gravitacije i ultraljubičaste disocijacije, Mars je izgubio veći deo svoje primordijalne atmosfere. Veći deo vode na Marsu je izgubljen u prvih nekoliko milijardi godina. Kako je

Mars mala planeta, njena unutrašnjost se hladila brže od Venere i Zemlje, usled čega su vulkanske aktivnosti na njemu mnogo ranije prestale čime je prestao i značajan izvor gasova u atmosferi. Svi ti procesi su doveli do toga da danas Mars ima suhu, hladnu i veoma tanku atmosferu.

## Zemlja

Atmosfera mlade Zemlje je bila sastavljena od:

- $\text{CO}_2 \sim 60P_a$  (gas),
- $\text{H}_2\text{O} \sim 300P_a$  (tečnost i gas) i
- $\text{N}_2 \sim 2P_a$  (gas).

Zemlja je u početku imala debelu ugljen-dioksidnu atmosferu (pritiska oko  $60P_a$ ) a veliki deo njene površine je bio prekriven okeanima. Zemlja je međutim na većoj udaljenosti od Sunca nego što je to Venera pa se, usled tadašnje manje luminoznosti Sunca, samo mala količina vode nalazila u obliku vodene pare. Tako je i danas mnogo veći deo vode na Zemlji u tečnom i čvrstom agregatnom stanju. Zbog velike količine  $\text{CO}_2$  u atmosferi, Zemlja je bila topla. Kiše su iz atmosfere donosile  $\text{CO}_2$  na površinu Zemlje usled čega su se formirale krečnjačke sedimentne stene a nivo  $\text{CO}_2$  u atmosferi se u velikoj meri smanjio. Život se na Zemlji razvio veoma rano, prvi dokazi potiču od pre 3,8 milijardi godina, što odgovara kraju velikog bombardovanja. Sa nastankom prvih fotosintetičkih bakterija, cijanobakterija, pre oko 3,2 milijarde godina, počinje da se više  $\text{CO}_2$  konvertuje u biomasu i da se u atmosferu oslobađa kiseonik. Time je efekat staklene bašte na Zemlji smanjen u velikoj meri. Istovremeno je međutim luminoznost Sunca porasla tako da je temperatura površine Zemlje ostala stabilna. Količina kiseonika je, aktivnošću cijanobakterija rasla a današnji nivo je dostigla pre oko 2,1 milijardu godina. Atmosfera bogata kiseonikom je dovela do stvaranja stratosferskog ozonskog sloja koji je zaštitio niže slojeve atmosfere od UV zračenja. Time je minimizirana UV disocijacija vode i Zemlja je bila sposobna da zadrži većinu vode koju je posedovala. Isparavanje atmosfere u kosmos je u slučaju Zemlje uvek bilo mnogo manje značajno nego za Mars s obzirom na to da je na površini Zemlje uticaj gravitacije izraženiji.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup>U formalnom smislu se ova razlika iskazuje različitim vrednostima tzv. druge kosmičke brzine, tj. brzine koju treba da ima telo da bi napustilo gravitaciono polje datog nebeskog tela.

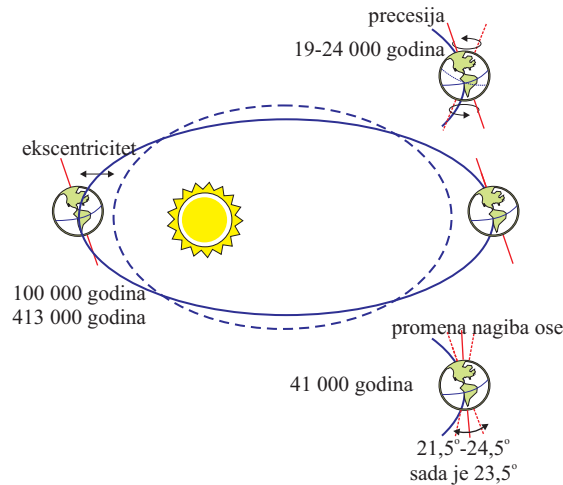
### 1.1.5 Evolucija klime na Zemlji i nastanak ledenih doba

Kao što je poznato Isak Njutn je uveo zakone kretanja i gravitacije primenom kojih su mogle da se odrede orbite po kojima se planete kreću u gravitacionom polju Sunca. Takođe je, na osnovu ovih zakona moguće odrediti i uticaj drugih planeta i satelita na orbitu posmatrane planete. Položaj i oblik orbite Zemlje, kao i način njenog kretanja oko Sunca određuju i klimatske uslove na Zemlji a oni su se sa vremenom menjali. Obično se smatra da je Milutin Milanković otkrio cikluse u kojima su se te promene dešavale ali to nije tačno. On nije otkrio ni trajanja tih ciklusa već ih je na pravi način superponirao jedne na druge i povezo sa variranjem klime na Zemlji koje je otkriveno u okviru paleoklimatologije i, do Milanovića, nije bilo na pravi način objašnjeno.<sup>7</sup> Ispostavilo se naime da su u poslednjih pola miliona godina na Zemlji vladala duga ledena doba (glacijali) praćena kratkim toplijim periodima (interglacijalima). Interglacijali su se događali približno svakih 100,000 godina. Taj period se naziva Milankovićev ciklus.

Kao što je već rečeno, postoji dovoljno dokaza da su tečna voda i umerena temperatura postojale na Zemlji odavno. Tako se tragovi postojanja vode nalaze u sedimentnim stenama starim oko 3,8 milijardi godina. Taj podatak je u suprotnosti sa astrofizičkim modelima evolucije Sunca prema kojima je Sunce tada imalo luminoznost 75% manju od današnje jer je tako niska luminoznost morala da dovede do potpunog zaleđivanja vode na površini Zemlje. To je

poznato pod nazivom *paradoks slabog mladog Sunca*. Kao što je već izneto, rešenje ovog paradoksa verovatno leži u efektu staklene bašte izazvanog visokom koncentracijom CO<sub>2</sub> i vodene pare u atmosferi rane Zemlje.

Na Zemlji ne postoje tragovi globalne glacijacije/ledenog doba do pre



Slika 1.2: Milankovićevi ciklusi.

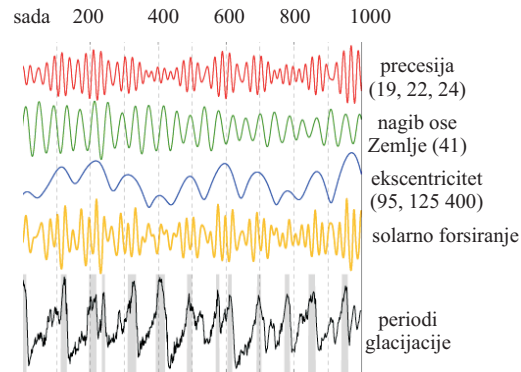
<sup>7</sup>Klimatskim promenama tokom čitave Zemljine prošlosti se bavi paleoklimatologija. U okviru paleoklimatologije se koriste podaci koji se nalaze u ledenim pokrivačima polova, u godovima, sedimentima i stenama a nalazi tog tipa su upućivali na određenu periodičnost.

oko 2,5 milijardi godina dok je upravo veoma važna karakteristika klime na Zemlji u toku poslednjih milijardi godina ponavljanje globalnih ledenih doba koja karakteriše globalno zaleđivanje. Ukoliko se na Zemlju primeni princip ravnoteže energije koja na nju dolazi i one koja ona emituje ispostavlja se da klima ima dva ravnotežna stanja: jedno odgovara toploj i vlažnoj klimi u kakvoj sada uživamo i drugo koje odgovara hladnoj klimi karakterističnoj za ledena doba. Klima na Zemlji je, prema tome, prelazila iz jednog u drugo ravnotežno stanje.

Početak ledenih doba je verovatno izazvan kombinacijom uzroka sa Zemlje i van nje. Spoljni uzroci su u vezi sa količinom i distribucijom solarnog zračenja koje dolazi na Zemlju. Ciklične promene u upadnom solarnom zračenju su izazvane: (i) promenama u obliku i ekscentricitetu orbite Zemlje (period promene je oko 105 000 godina), (ii) promenama u nagibu Zemljine ose rotacije u odnosu na ravan orbite/ekliptike (period oko 41 000 godina) i (iii) precesijom perihela (najbliža tačka na putanji oko Sunca) orbite Zemlje (period oko 22 000 godina).

Prvi efekat, promena ekscentriciteta orbite (otkrio ga je J. Kepler 1609. godine) se dešava na pseudocikličan način, sa periodom od oko 110 000 godina. Veći ekscentricitet rezultira manjom količinom solarnog zračenja koje dolazi na Zemlju. Ova promena iznosi samo oko 0,2% tog zračenja. Kada je ekscentricitet najizraženiji seonska razlika primljene toplote je 20% a sada iznosi oko 7%. Ove varijacije se odvijaju na skali od oko 40 000 godina.

Promena nagiba Zemljine ose rotacije u odnosu na ravan orbite (otkrio je J. Pilgrim, 1904. god.), u rasponu od  $21,5^\circ$  do  $24,5^\circ$ , se odvija sa periodom od 41.000 godina. Kada je nagib veći, razlika godišnjih doba na višim geografskim širinama je izraženija iako nema promene u ukupnom zračenju koje Zemlja prima sa Sunca. Promena nagiba ima mali uticaj na ekvatoru, a veliki na polovima. Porastom nagiba za  $1^\circ$  ukupna primljena energija hemisfere leti se poveća za 1%.



Slika 1.3: Milankovićeve ciklusi u poslednjih 1 000 000 godina. Sve brojke na graficima predstavljaju hiljade godina.



Precesiju ose rotacije Zemlje je otkrio još Hiparh, 130. godine pre nove ere. Ona se odvija sa periodom od oko 19 000 do 24 000 godina. Precesija utiče na orijentaciju ose a ne na njen nagib. Tako će kroz 11 000 godina Zemljina osa, koja je sada usmerena ka Severnjači (Polaris) biti usmerena ka zvezdi Vega u sazvežđu Lira. Posledica složenog kretanja Zemlje je da se ravnodnevnicе ne događaju uvek istog datuma.<sup>8</sup>

Svi efekti zajedno ukazuju na to da se osunčanost površine Zemlje menjala periodično što je dovelo do toga da su leta bila malo hladnija a zime malo toplije (za oko stepen-dva). Usled toga zimski snegovi leti nisu stizali da se istope a tokom zime je bilo više padavina. Kumulativni efekat je da su se snegovi sa planina polako spuštali u doline i vremenom ih potpuno pokrili.

## 1.2 Struktura Zemljine atmosfere

Gustina atmosfera Zemlje opada rapidno sa visinom, merenja pokazuju da se 90 % mase nalazi u prvih 20 km, a 99.9 % u prvih 50 km. Debljina atmosfere (od površine Zemlje do međuplanetarnog prostora) iznosi oko 1000 km. Pri tome treba imati u vidu da je prelazak iz atmosfere u kosmički prostor blag i neprekidan. U poređenju sa poluprečnikom Zemlje (oko 6400 km), 99.9 % atmosfere se nalazi u prstenu debljine 0.8 % poluprečnika Zemlje. Posledica toga je da je atmosfera u pogledu skoro svih karakteristika veoma anizotropna. Na primer temperatura opada sa visinom stopom 6 K/km (u prvih 15 km), dok je najjači horizontalni gradijent temperature (javlja se pri toplim ili



Slika 1.4: Sav vazduh na Zemlji prikazan kao lopta poluprečnika oko 1000 km (pri standardnim uslovima).

<sup>8</sup>Kada je sastavljao svoj katalog zvezda Hiparh je primetio nešto vrlo neobično. Zvezde se nisu nalazile na onom mestu na nebu na kom su ih ranije videli i locirali Haldejci. Sve zvezde su bile premeštene u stranu, kao da se čitavo nebo pomerilo iz svog nekadašnjeg položaja. Zapravo položaj je promenila Zemlja, malo se nakrivila u stranu. Hiparh je zaključio da je do ove promene položaja došlo usled kretanja tačaka presecanja ekliptike i nebeskog ekvatora. Ova pojava se dešava zbog toga što Zemlja nema oblik pravilne kugle. Ona je na polovima spljoštena tako da je pojas ekvatora malo ispupčen. Pošto je Zemlja nagnuta u odnosu na ravan ekliptike i u odnosu na ravan Mesečeve putanje Sunce i Mesec nejednako privlače deo ekvatorskog ispupčenja koji je okrenut ka njima i deo ispupčenja koji se nalazi sa druge strane. Zbog ovoga Zemljina osa ne ostaje nepomična već se i sama kreće projektujući po nebeskoj sferi kružnicu.

hladnim frontovima) oko 0,05 K/km. Daleko od površine Zemlje, izoplete<sup>9</sup> su skoro horizontalne i atmosfera se sastoji od horizontalnih slojeva. U suštini atmosfera se deli na slojeve koje karakteriše odgovarajuća temperatura (ili isti trend njene promene). Svaki sloj nosi naziv "sfera" sa odgovarajućim predmetkom ispred a granica između slojeva se naziva "pauza" sa predmetkom koji potiče od donjeg sloja atmosfere.

### 1.2.1 Slojevi atmosfere

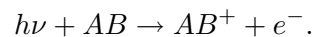
Slojevi atmosfere su:

- troposfera (0-10 km). Ovo je najniži sloj atmosfere i sadrži oko 80 % njene mase. Skoro sve vremenske (meteorološke) promene se dešavaju u atmosferi. U troposferi se nalaze oblaci a temperatura joj skoro linearno pada tako da na njenom vrhu iznosi oko  $-50^{\circ}\text{C}$ .

- Stratosfera (10-50 km). Iznad tropopauze temperatura počinje da raste poovo i na visini od oko 50 km temperatura je oko  $+10^{\circ}\text{C}$ . U gornjem delu stratosfere se nalazi ozon - važan molekul za opstanak živog sveta na Zemlji jer "filtrira" štetni deo UV zračenja.

- Mezosfera (50-85 km). Iznad stratopauze temperatura pada naglo do oko  $-80^{\circ}\text{C}$ . To je najhladnija oblast u atmosferi.

- Jonosfera (100-200 km). To je intenzivno jonizovana oblast atmosfere u kojoj temperatura ponovo raste naglo. Solarno UV zračenje jonizuje molekule atmosfere



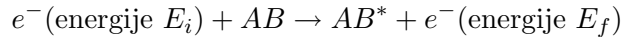
Jonosfera reflektuje radio talase a ona je takođe oblast u kojoj se stvara aurora/polarna svetlost na višim geografskim širinama, i to aurora borealis (na severnoj polulopti) i aurora australis (na južnoj polulopti). Intenzivno vidljivo i UV zračenje nastaje usled elektronskih (ili protonskih) sudara sa



Slika 1.5: Slojevi atmosfere.

<sup>9</sup>Linije ili površi na kojima neka fizička veličina ima istu vrednost. Npr. izobare (isti pritisak) ili izoterme (ista temperatura).

molekulima



gde AB može da bude O<sub>2</sub> ili N<sub>2</sub>. Energija  $\Delta E = E_i - E_f$  koju je izgubio elektron, pobuđuje molekul AB u stanje AB\*. Kada se on vraća u osnovno stanje oslobađa se viška energije emitujući foton frekvencije  $\nu$ , čija je energija  $h\nu = \Delta E$ . Često se jonosfera smatra delom narednog sloja koji se naziva termosfera.

- Termosfera (200-500 km). Temperatura raste rapidno sa visinom usled zagrevanja od strane Sunca ali i dosta varira u zavisnosti od doba dana, stepena solarne aktivnosti i geografske širine. Varijacije temperature su između 400 i 2000°C. Minimum temperature je kada Sunce izlazi a maksimum oko 14.00. Pritisak je međutim veoma nizak ( $10^{-11} P_a$  na visini od oko 500 km), i veoma slabo provodi toplotu jer je retka. Naziva se još i gornja atmosfera.

- Egzosfera (500 do 1 000 km). Vodonik i helijum su glavni sastojci a njihovi atomi i molekuli su retki i lako mogu da odu u kosmos.

- Magnetosfera (iznad 1 000 km). U ovoj oblasti Zemljino magnetno polje interaguje sa solarnim vetrom i zarobljava naelektrisane čestice (elektrone i pozitrone) u takozvanom Van Alenovom pojasu. Magnetosfera je otkrivena 1958. godine kada je satelit Explorer 1 izmerio magnetno polje na tim visinama.

### 1.2.2 Sastav atmosfere

U troposferi, stratosferi i mezosferi, mehanizmi mešanja održavaju odnos N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> u iznosu 4:1. Zbog tog konstantnog odnosa ova tri sloja se nazivaju jednim imenom *homosfera*. Na visini iznad 100 km (mezopauza) odnos N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> se menja i postaje funkcija visine. Iz tog razloga se slojevi iznad ovoga nazivaju *heterosfera*.

Atmosfera sadrži i određenu količinu gasova u tragovima čija koncentracija zavisi od visine. Najvažniji gasovi tog tipa su:

- ozon - uglavnom se nalazi u stratosferi (koja se zbog toga ponekad zove ozonosfera) na visini od 20-30 km
- voda - promenljive koncentracije unutar homosfere,
- ugljen dioksid - važan gas staklene bašte koji se uglavnom nalazi u gornjem sloju tropofere (čini 0,03% atmosfere).

U suštini se može reći da se atmosfera sastoji od:

- gasova koji su postojani i nalaze se u određenim međusobnim srazmerama

- aerosola - to su črste i tečne čestice nastale u prirodnim i industrijskim procesima (čestice prašine, dima, morske soli, ...) čiji udeo u atmosferi je promenljiv

- vodene pare čija koncentracija je takođe promenljiva.

Stoga, kad se govori o sastavu atmosfere misli se na suv vazduh bez aerosola i vodene pare. Osnovne komponente suvog vazduha u jedinici zapremine su: 78,1% azota, 20,9% kiseonika, 0,9% argona, 0,03% ugljen dioksida, 0,002% neona, 0,0005% helijuma, 0,0001% metana, manje od toga ima kripton, vodonika, azotnih oksida, ozona i ksenona.

### 1.2.3 Atmosfera kao idealni gas

Ukoliko se pretpostavi da je atmosfera idealni gas za nju važi jednačina stanja

$$PV = n_m RT, \quad (1.2)$$

gde je  $n_m$  broj molova gasa. Broj molova se može izraziti preko količnika mase gasa  $m$  i njegove molarne mase  $M$ . Ovaj izraz se preko gustine gasa može pisati kao

$$P = \rho \frac{RT}{M}. \quad (1.3)$$

Kako je atmosfera u stvari smeša gasova, za svaki od njih će važiti relacija analogna relaciji (1.2). Prema Daltonovom zakonu parcijalnih pritisaka,<sup>10</sup> ukupni pritisak u atmosferi će biti jednak

$$P = P_1 + P_2 + \dots = RT \frac{\rho_1}{M_1} + RT \frac{\rho_2}{M_2} + \dots. \quad (1.4)$$

Kako se svi gasovi koji čine atmosferu nalaze u istom "sudu", tj. u istoj zapremini, zbir parcijalnih gustina će biti jednak ukupnoj gustini atmosfere, tj.  $\rho_1 + \rho_2 + \dots = \rho$ , a ukupni pritisak je

$$P = P_1 + P_2 + \dots = RT \rho \sum_i \frac{\rho_i}{\rho M_i} = RT \rho \sum_i \frac{x_i}{M_i}. \quad (1.5)$$

Sa  $x_i$  je u ovom izrazu označena takozvana specifična masa/maseni udeo koji predstavlja odnos mase datog gasa i ukupne mase atmosfere, tj.

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho} = \frac{\frac{m_i}{V}}{\frac{m}{V}} = \frac{m_i}{m}.$$

<sup>10</sup>Pritisak smeše gasova koji se nalaze u nekom sudu je jednak zbiru njihovih parcijalnih pritisaka - tj. pritisaka koje bi stvarao svaki gas za sebe kada bi bio sam u sudu.

Ukoliko se preko izraza

$$\frac{1}{M_{sr}} = \sum_i \frac{x_i}{M_i}, \quad (1.6)$$

uvede prosečna molarna masa atmosfere, jednačina stanja je

$$P = \frac{\rho RT}{M_{sr}}. \quad (1.7)$$

### 1.2.4 Promena pritiska sa visinom

Amosferski pritisak je posledica težine gasova koji čine atmosferu odnosno (gravitacione) sile kojom ih Zemlja privlači. Njihova gustina međutim opada sa visinom što izaziva i analognu promenu pritiska. Neka je sa  $\rho(z)$  označena gustina atmosfere na visini  $z$  iznad niova mora. Nadalje će biti smatrano da se ubrzanje Zemljine teže ne menja rapidno sa visinom.<sup>11</sup> Ukoliko se posmatra sloj atmosfere debljine  $\Delta z$  i površine poprečnog preseka  $S$  (slika 1.6) pritisak atmosfere će na njegovoj donjoj strani biti  $P$  a na gornjoj  $P + \Delta P$ . Ukoliko se pretpostavi da nema vertikalnog kretanja delova vazduha onda će posmatrani deo vazduha biti u statičkoj ravnoteži odakle sledi da su sile koje deluju na njega, po vertikali, u potpunoj ravnoteži  $PS = mg + (P + \Delta P)S$ . Ukoliko se masa dela vazduha u zapremini  $\Delta V = S\Delta z$  izrazi preko gustine, prethodni izraz postaje

$$PS = \rho g S \Delta z + (P + \Delta P)S, \quad (1.8)$$

što nakon sređivanja daje

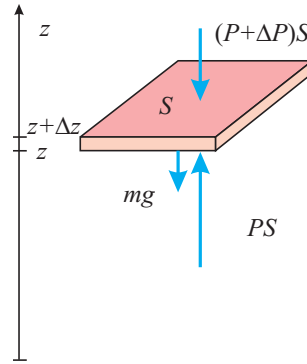
$$\Delta P = -\rho g \Delta z, \quad (1.9)$$

gde znak minus izražava činjenicu da se pritisak vazduha smanjuje sa visinom.

Ukoliko atmosferu smatramo idealnim gasom svuda iste temperature  $T$ , prethodna relacija, na osnovu (1.7) dobija oblik

$$\Delta P = -\frac{P}{RT} M_{sr} \rho g \Delta z. \quad (1.10)$$

<sup>11</sup>Ubrzanje Zemljine teže se ipak menja sa visinom ali je ova promena mnogo sporija nego što je promena gustine atmosfere pa se zato može zanemariti.



Slika 1.6: Na neki sloj vazduha deluju po vertikali sile atmosferskog pritiska ali i sila Zemljine teže.

Ova relacija važi i za diferencijalno male promene visine  $dz$  u analognom obliku

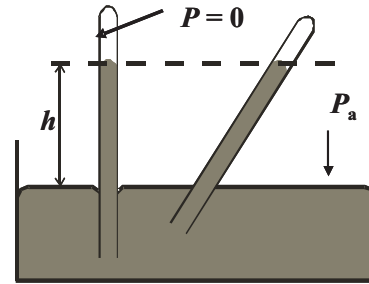
$$dP = -\frac{P}{RT} M_{sr} \rho g dz, \quad (1.11)$$

iz koga se standardnim metodama više matematike može pronaći zavisnost pritiska od visine.<sup>12</sup> Dobija se

$$P = P_0 e^{-\frac{M_{sr} g}{RT} z}. \quad (1.12)$$

Prilikom dobijanja prethodne formule su pretpostavljene dve stvari koje nisu sasvim tačne. Jedna je da je se temperatura atmosfere ne menja sa visinom a druga da je i  $M_{sr}$  konstantno. Iako ni jedno ni drugo nije potpuno tačno zaključci koji slede na osnovu dobijenih formula ne odstupaju mnogo od izmerenih rezultata.

Dobijena jednačina (1.12) pokazuje kako se menja pritisak atmosfere sa visinom. Faktor  $P_0$  je pri tome pritisak na nivou mora. Vrednost ovog pritiska je prvi izmerio Toričeli 1643. godine izjednačavajući ga sa hidrostatičkim pritiskom živinog stuba u cevi. Dobio je da on iznosi  $P_0 = P_a = 101325 \text{ Pa}$ , što približno odovara sili od  $10^5 \text{ N}$  koja deluje iznad svakog kvadratnog metra Zemljine površine. Sva živa bića koja žive na površini Zemlje su evolucijom dizajnirana tako da ovaj pritisak, iako relativno veliki, ne osećaju. Iz tog razloga se ovom rezultatu nije mnogo verovalo sve dok 1657. godine Oto von Gerike, gradonačelnik Magdeburga nije demonstrirao njegovu veličinu u čuvenom ogledu sa poluoptyama (prečnik poluoptye je bio oko 40 cm). Iz ovih poluoptye je vakuum pumpom izvukao vazduh, tako da je na njih nakon toga delovao samo atmosferski pritisak priljubljujući ih jedne uz druge. Nakon toga ni uz pomoć konja nije bilo moguće razdvojiti poluoptye.



Slika 1.7: Toričelijevo merenje atmosferskog pritiska.

<sup>12</sup>Potrebno je prvo razdvojiti promenljive i nakon toga izvršiti integraciju

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{M_{sr} g}{RT} \int_0^z dz,$$

odakle se dobija  $\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{M_{sr} g}{RT} z$ .

Ako se malo pažljivije pogleda izraz (1.12) lako se uočava da veličina  $\frac{RT}{gM_{sr}} = H$  ima dimenzije dužine. Ovakvo uvedena veličina  $H$  se naziva visinska skala i ona je karakteristika date atmosfere jer zavisi od njene temperature, sastava i vrednosti ubrzanja teže.<sup>13</sup>

Da bi se uočio značaj veličine  $H$  zgodno je napraviti procenu njene vrednosti. Kako se naša atmosfera sastoji u najvećem meri od azota (oko 80%) i kiseonika (oko 20%) čije su molarne mase 28 i 32 g/mol respektivno, specifične mase su im 0,755 i 0,231. Na osnovu toga je srednja molarna masa čestica koje čine vazduh 28,96 g/mol. Kako je prosečna temperatura atmosfere u troposferi (u kojoj se nalazi najveći deo atmosfere) 288 K za visinsku skalu se dobija

$$H = \frac{8,31 \text{ J/mol K} \cdot 288\text{K}}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 28,96 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}} = 8400 \text{ m} = 8,4 \text{ km},$$

Planeta	Glavni sastojci	$M_{sr}$ [g/mol]	$g$ (N/m <sup>2</sup> )	$T$ (K)	$H$ (km)
Zemlja	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	29	9,81	288	8,4
Mars	CO <sub>2</sub>	44	3,73	210	10,6
Venera	CO <sub>2</sub>	44	8,88	700	14,9
Jupiter	H <sub>2</sub>	2	26,20	160	25,3

Tabela 1.1: Karakteristike atmosfere raznih planeta.

što otprilike predstavlja visinu Mont Everesta. Na osnovu formule (1.12) koja može da se piše u obliku  $P = P_0 e^{-\frac{z}{H}}$  se vidi da je  $H$  visina na kojoj atmosferski pritisak opadne  $e$  puta odnosno na oko 2/3 početne visine.<sup>14</sup> To znači da se oko 2/3 mase atmosfere nalazi na visini do visine Mont Everesta.

<sup>13</sup>Iako je izraz (1.12) izveden na primeru Zemljine atmosfere on, u istom obliku, važi i za pritisak atmosfere bilo kog nebeskog tela kod koga u dovoljnoj meri važe pretpostavke koje su uvedene prikrom izvođenja izraza.

<sup>14</sup>Podsetimo se da je  $e = 2,718$ , odnosno Neperov broj koji predstavlja i osnovu prirodnih logaritama.



Slika 1.8: Oglend Oto fon Gerikea izveden u Magdeburgu.

Potrebno je primetiti i direktnu zavisnost visinske skale od temperature atmosfere. To znači da, kada je vreme hladno, visinska skala je manja, tj. pritisak opada brže sa visinom. Usled toga su izobare oko polova na manjoj visini nekog na ekvatoru. U tabeli 1.1 su uporedno prikazane karakteristike atmosfera nekih planeta sa njihovim visinskim skalama.

### 1.2.5 Promena temperature sa visinom u nižim slojevima atmosfere

U nižim slojevima atmosfere temperatura opada sa visinom na pravilan način. Zakon ove promene se može dobiti na osnovu dosadašnjih rezultata. Pošto se taj deo atmosfere uglavnom zagreva odozdo tj. zračenjem sa zagrejane površine Zemlje prirodno je da njena temperatura opada sa visinom.

Da bi se odredila ova zavisnost potrebno je analizirati šta se dešava sa nekom, relativno malom, zapreminom suvog (prisustvo vodene pare u značajnoj meri menja osobine gasa) vazduha, koji se, konvekcijom kreće uvis. Prilikom podizanja uvis, posmatrana zapremina se širi i hladi. Smatrajući da je njeno vertikalno kretanje dovoljno brzo, što je u troposferi uvek zadovoljeno, može da se zanemari njeno zagrevanje od strane Sunca. Kako je sem toga vazduh slab provodnik toplote, termodinamički procesi koji se dešavaju u njemu su *adijabatski*.<sup>15</sup>

Prema prvom zakonu termodinamike je količina toplote koju sistem razmeni sa okolinom  $\Delta Q$ , povezan sa promenom njegove unutrašnje energije  $\Delta U$  i radom koji pri tome izvrši sistem  $\Delta A$ , relacijom

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A. \quad (1.13)$$

Promena unutrašnje energije sistema se može zapisati kao  $\Delta U = mc_V \Delta T$ , gde je  $m$  masa date zapremine gasa a  $c_V$  njegova specifična toplotna kapacitivnost pri konstantnoj zapremini. Rad koji sistem izvrši je  $\Delta A = P\Delta V$  a za adijabatske procese je  $\Delta Q = 0$ , tako da gornja relacija postaje

$$mc_V \Delta T = -P\Delta V. \quad (1.14)$$

Za adijabatske procese važi relacija  $PV^\gamma = \text{const}$  gde je  $\gamma = c_P/c_V$ , odnos specifičnih toplotnih kapacitivnosti gasa pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini, odakle se dobija da je  $P\Delta V = -V\Delta P/\gamma$ .<sup>16</sup>

<sup>15</sup>Adijabatski procesi u takvi procesi prilikom kojih posmatrani sistem ne razmenjuje toplotu sa okolinom.

<sup>16</sup>Ovaj izraz se lako dobija nakon diferenciranja izraza  $PV^\gamma = \text{const}$ .



Prethodni izraz na osnovu toga postaje

$$mc_V \Delta T = \frac{1}{\gamma} V \Delta P, \quad (1.15)$$

a uzimanjem u obzir izraza (1.9) se svodi na

$$mc_V \Delta T = -\frac{c_V}{c_P} V \rho g \Delta z. \quad (1.16)$$

Odavde se konačno za adijabatsku promenu temperature suve atmosfere sa visinom ( $\Gamma$ ) dobija

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = \Gamma = -\frac{g}{c_P}. \quad (1.17)$$

Uzimanjem u obzir da je za suvi vazduh  $c_P = 1005 \text{ J/(kg K)}$ , dobija se da je  $\Delta T/\Delta z = -0,01 \text{ K/m}$ .

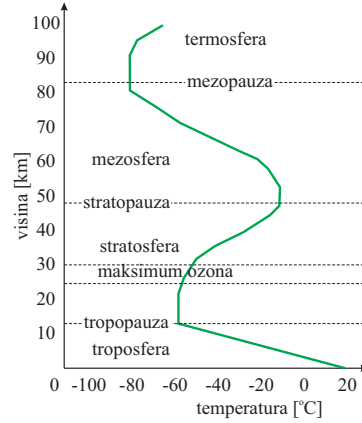
Iz jednačine (1.16) sledi da će na visini od 10 km (gornja granica troposfere) temperatura biti za oko 100 K manja od temperature na površini Zemlje što je skoro duplo veće smanjenje od izmerenog (50 do 60 K). Razlika u izračunatom i izmerenom postoji usled toga što je račun urađen za suv vazduh. Vazduh nikada nije suv, na svakoj temperaturi sadrži određenu količinu vodene pare. Kada se vazduh izdiže i hladi, vodena para se kondenzuje usled čega se oslobađa latentna toplota kondenzovanja koja podiže temperaturu viših slojeva troposfere.

### 1.2.6 Brzina napuštanja atmosfere i njen sastav

Čestice gasova koji čine atmosferu Zemlje se zadržavaju u njoj usled delovanja Zemljine teže (gravitacione sile) na njih. Sa druge strane čestice atmosfere, kao i čestice bilo kog gasa, se kreću haotično to jest brzinama koje se razlikuju po pravcu, smeru i intenzitetu. Ukoliko se atmosfera i dalje smatra idealnim gasom, te brzine su raspodeljene u skladu sa Maksvelovom raspodelom. Njen analitički oblik je

$$\frac{\Delta N(v)}{\Delta v} = 4\pi N \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}. \quad (1.18)$$

a grafički je predstavljena na slici 1.10. U gornjem izrazu je sa  $m$  označena masa jednog molekula, a  $\Delta N(v)$  je broj molekula čija brzina se nalazi u intervalu brzina  $v$ ,  $v + \Delta v$ . Na slici 1.10 su prikazane i tri karakteristične

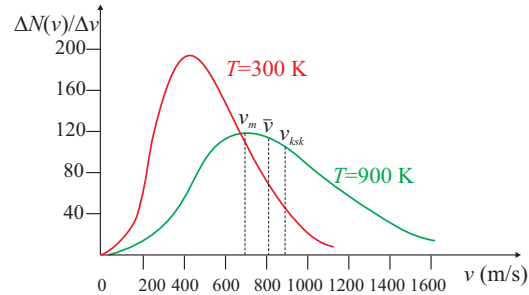


Slika 1.9: Skica promene temperature atmosfere sa visinom.

brzine svake raspodele: brzina  $v_m$  pri kojoj raspodela ima maksimum koja se stoga zove *najverovatnija brzina*, *srednja brzina* molekula gasa  $\bar{v}$  i koren iz srednje vrednosti kvadrata brzine  $v_{kss}$ :

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad v_{kss} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (1.19)$$

Na slici 1.10 su prikazane dve raspodele za različite temperature. Maksimum raspodele se pri porastu temperature gasa pomera na desno, što znači da raste broj molekula sa većim brzinama a time i njihova srednja brzina (kao i  $v_m$  i  $v_{kss}$ ). Krive su asimetrične što je posledica činjenice da je najmanja moguća brzina 0,



dok za gornju vrednost brzine, u principu, ne postoji gornja granica. Treba primetiti i da raspodela molekula po brzinama zavisi i od mase. Na datoj temperaturi, broj molekula sa brzinama koje su veće od neke zadate vrednosti je to veći što je manja masa molekula gasa. Posledica je da će u datoj smeši gasova procenat bržih molekula biti veći za molekula manje mase (npr.  $H_2$  i  $He$ ).

Veoma jednostavna analiza bacanja tela sa površine Zemlje pokazuje da će efekat zavistiti od početne brzine tela (slika 1.11). Ukoliko je brzina izbacivanja tela jednaka takozvanoj prvoj kosmičkoj brzini  $v_1 = \sqrt{gR}$ ,<sup>17</sup> telo neće pasti nazad na Zemlju već će postati njen veštački satelit. Primetimo da u ovom izrazu ne figuriše masa tela. Za Zemlju ( $R = 6,38 \times 10^6$  m) je vrednost ove brzine 7,91 km/s. Baca li se telo sve većom i većom brzinom, njegova putanja će se sve više deformisati u odnosu na kružnu, tako da će ono u jedom momentu postati slobodno. U tom momentu je ukupna mehanička energija tela (zbir kinetičke i gravitacione potencijalne energije) jednaka nuli.<sup>18</sup> Najmanja početna brzina koja mu je pri tome potrebna (da bi postalo slobodno) se naziva druga kosmička brzina  $v_2$ . Kinetička energija

<sup>17</sup>Na telo, koje se tad kreće po kružnoj orbiti deluju gravitaciona sila i inercijalna centrifugalna sila a iz njihove međusobne jednakosti na orbiti sledi izraz za prvu kosmičku brzinu.

<sup>18</sup>Primetimo da je pri kretanju po orbiti, telo vezano za planetu/Zemlju i da njegova ukupna energija nije jednaka nuli.

tela mase  $m$  koje se izbacuje brzinom  $v_2$ , troši se na vršenje rada protiv gravitacione sile Zemlje. Rad se pri tome vrši na putanji koja počinje na rastojanju  $R$  od centra Zemlje pa formalno do beskonačnosti, jer je tek na jako velikim rastojanjima od Zemlje, njeno polje praktično jednako nuli. Druga kosmička brzina se prema tome dobija iz uslova održanja mehaničke energije primenjenog na početno stanje na površini Zemlje i finalno na jako velikoj udaljenosti od nje na kojoj su i kinetička i potencijalna energija jednake nuli

$$\frac{mv_2^2}{2} + \frac{-\gamma mM}{R} = 0 + 0, \quad (1.20)$$

iz koga se za traženu brzinu dobija

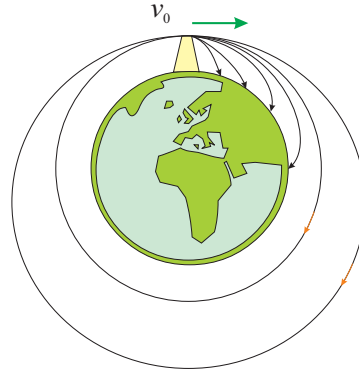
$$v_2 = \sqrt{\frac{2\gamma M}{R}}. \quad (1.21)$$

Kako je ubrzanje Zemljine teže na površini Zemlje jednako  $\gamma M/R$ , druga kosmička brzina je povezana sa prvom kosmičkom brzinom sledećom relacijom

$$v_2 = \sqrt{2}v_1, \quad (1.22)$$

pa joj je vrednost  $v_2 = 11,2 \text{ km/s} = 11200 \text{ m/s}$  (oko 34 puta veća od brzine zvuka u vazduhu). Ni ova brzina ne zavisi od mase tela već samo od karakteristike nebeskog tela - njegovog poluprečnika i ubrzanja gravitacije.

Kako druga kosmička brzina ne zavisi od mase tela ona je jednaka i za raketu koja se lansira ali i za molekule. Da li u Zemljinoj atmosferi ima molekula čija je brzina makar jednaka drugoj kosmičkoj brzini i koji su prema tome sposobni da je napuste? Prema Maksvelovoj raspodeli ih svakako ima a njihova količina može okvirno da se proceni ako se, za datu vrstu molekula, izračuna najverovatnija brzina  $v_m$  prema izrazu (1.19). Za temperaturu od 288 K, za glavne konstituente atmosfere se tako dobija  $v_m(\text{O}_2) = 387 \text{ m/s}$  i  $v_m(\text{N}_2) = 414 \text{ m/s}$ . Dobijeni rezultati su mnogo manji od druge kosmičke brzine za Zemlju što znači da većina molekula azota i kiseonika nemaju dovoljno veliku brzinu da napuste njeno gravitaciono polje. Za vodonik i helijum, koji su manje mase, se dobija  $v_m(\text{H}_2) = 1550 \text{ m/s}$  i  $v_m(\text{He}) = 1094$



Slika 1.11: Rezultat bacanja tela sa Zemlje zavisi od njegove početne brzine.

m/s. Dobijene su značajno veće brzine a iz njihovog poređenja sa drugom kosmičkom brzinom vidimo da postoji značajna verovatnoća da neki od molekula ovog tipa imaju brzinu veću od nje. Što je gas lakši više njegovih molekula će imati dovoljno veliku brzinu da napuste Zemljino gravitaciono polje. Kako brzine (1.19) zavise i od temperature, u višim slojevima atmosfere, gde je temperatura veće od 288 K, biće i veća verovatnoća da lakši molekuli steknu brzinu dovoljnu za napuštanje atmosfere. To je jedan od procesa koji je trajao od momenta nastanka atmosfere do danas i koji je u značajnoj meri uticao na njen sastav.

### 1.2.7 Vreme života molekula u atmosferi

Iako je prosečan sastav atmosfere manje-više isti, molekuli koji je čine učestvuju u raznim procesima tako da usled njih jedni odlaze iz atmosfere dok drugi dolaze u nju. Poznavanje ovih procesa i dužine njihovog trajanja je podatak koji je ponekad veoma bitno poznavati, pogotovu ako je reč o molekulima koji su polutanti (zagađivači). Za karakterizaciju dužine boravka molekula u atmosferi se uvodi veličina koja se zove *vreme života* koje se obično označava sa  $\tau$  i definiše izrazom

$$\tau = \frac{m_{sr}}{F_{sr}} \quad (1.23)$$

gde je  $m_{sr}$  srednja masa datog gasa u atmosferi a  $F_{sr}$  je srednji dolazni/odlazni fluks gasa izražen u kg/s.

Ukoliko  $\tau$  ima malu vrednost molekuli datog gasa egzistiraju kratko u atmosferi. Razlozi mogu da budu ili da je (i) reaktivan pa neće stići da se homogeno rasporedi po atmosferi ili da (ii) učestvuje u nekom ciklusu (npr. hidrološki ciklus tj. ciklus cirkulisanja vode između hidrosfere, litosfere i atmosfere, u kome je vreme života molekula oko 10 dana).

Na osnovu vrednosti vremena života molekula u atmosferi, njeni konstituenti se dele na tri kategorije:

- permanentni sastojci - kod njih je  $\tau$  veoma veliko (reda veličine milion godina), npr. u slučaju  $N_2$ ,  $O_2$  i retkih gasova tipa  $CO_2$
- semipermanentni -  $\tau$  je reda veličine meseca i godina, npr.  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ , CFC jedinjenja, i
- varijabilni sastojci kod kojih je  $\tau$  reda dana i nedelje, npr. ozon  $O_3$  (ima ciklus u stratosferi),  $H_2$  (ciklus se odigrava u troposferi),  $SO_2$  i  $H_2S$  (kisele kiše),  $NO_2$ ,  $NH_3$  (izduvni gasovi atumobila) ali i deo azotnog ciklusa.

### 1.2.8 Ciklusi i količina glavnih elemenata u atmosferi

U zavisnosti od toga o kome se elementu radi postoje sumporni, ugljeni i azotni ciklus u kojima se odvija njihovo kruženje. Cikluse je zgodno opisati tako što se prvo definišu izvori, zatim hemijske transformacije u kojima učestvuju data supstanca i na kraju načini smanjenja njene koncentracije.

#### 1. Azotni ciklusi

Većina azota u atmosferi je u obliku gasovitog  $N_2$ . On je uglavnom inertan (izvesna količina  $N_2$  se konvertuje u azotne okside usled električnih pražnjenja). Međutim azot u obliku  $NH_3$  (amonijak) ili  $NO_x$  (azotni oksidi) se transformiše u ciklusima.

1.1 Amonijačni ciklus. Izvori su biološki raspad materijala.  $NH_3$  je povezan za kruženjem vode jer je rastvorljiv u vodi. Procenjuje se da se godišnje proizvede 113-244 Tg (Tg=teragram= $10^{12}$  g). Iz vazduha se izdvađa kao vlažna depozicija jer se rastvara u kiši i kao suva depozicija (kao amonijak).

1.2  $NO_x$  ciklus. Glavni izvor ovog oksida u atmosferi je bakteriološka dekompozicija nitrata ali je značajan i doprinos industrije. Koncentracija u atmosferi se uglavnom smanjuje kao vlažna depozicija ( $NO_3$  - rastvara se u kiši), i kao suva depozicija ( $NO$ ,  $NO_2$ ). Ukupna masa koja se prenese tokom ovog ciklusa iznosi oko 100 Tg po godini.

2. Sumporni ciklus. Glavni izvor sumora je  $H_2S$  (iz raspada organske materije i vulkana,  $SO_2$  i  $SO_4^{2-}$  iz industrije, iz mora i manje količine iz vulkana i erozije). Količina se smanjuje suvim deponovanjem kao  $SO_2$  i vlažnim deponovanjem (kisele kiše) a ukupna količina je oko 144 Tg po godini.

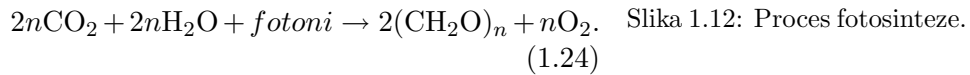
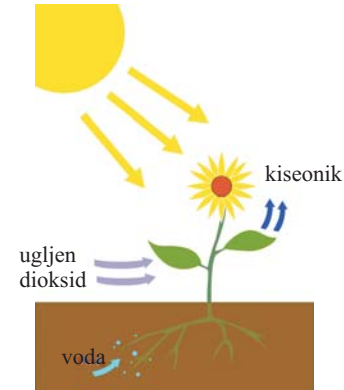
3. Ugljeni ciklus. Postoje tri ciklusa zasnovana na  $CH_4$  (metan),  $CO$  (ugljen monoksid) i  $CO_2$  (ugljen dioksid). Prva dva imaju uglavnom biološke izvore. Treći je kombinacija prirodnih i veštačkih izvora. I  $CH_4$  i  $CO_2$  su gasovi staklene bašte. Izvori  $CO_2$  su procesi sagorevanja (prirodnog i veštačkog), disanje i raspad organske materije. Količina u atmosferi se smanjuje u procesu fotosinteze u kome biljke, uz pomoć svetlosti stvaraju šećer i kiseonik. Okeani i sedimentne stene vezuju ugljenik iz vazduha.

### 1.2.9 Fotosinteza sa stanovišta fizike

Vegetacija je esencijalni deo biosfere, interesantan i po tome što interaguje sa njom. Važnost biljaka za atmosferu je 1772. godine Džozef Prisli demonstrirao ogledom u kome su u jednoj posudi bili zajedno miš i nana, u drugoj samo nana a u trećem samo miš. Pokazalo se da su jedino u prvom slučaju nana i miš mogli da prežive jer je miš dišući apsorbovao  $O_2$  i izbacivao  $CO_2$

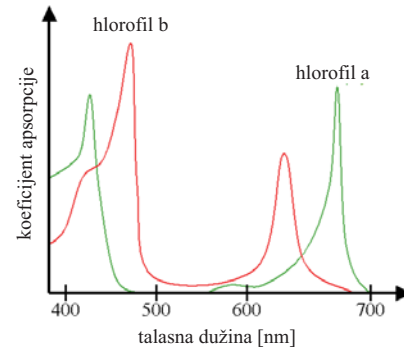
dok je nana vršila fotosintezu apsorbujući  $\text{CO}_2$  a stvarajući  $\text{O}_2$ .

Danas znamo da je fotosinteza proces u kome biljke, alge i neke bakterije koristeći energiju Sunčevog zračenja i od ugljen dioksida i vode sintetišu hranu oslobađajući kiseonik. Ovaj proces se odvija zahvaljujući hlorofilu-zelenom pigmentu biljaka sposobnom da apsorbuje svetlost. Hlorofil se nalazi u hloroplastima (organelama-delovima ćelija). U osnovi procesa fotosinteze je reakcija koja je endotermna, tj. da bi se odvijala potrebna joj je solarna energija. Formalno, ova reakcija može da se zapiše u obliku



Interesantno je da ne može svetlost bilo koje talasne dužine da izazove fotosintezu. Deo svetlosti Sunca se tako odbija o lišće dajući mu zelenu boju. Neke druge talasne dužine se apsorbuju i zagrevaju lišće dok fotosintezu najefikasnije izaziva crvena boja. Osim nje, u procesu mogu da učestvuju takođe i plava, narandžasta i žuta boja.

Postoji više vrsta hlorofila: hlorofil a je glavni pigment fotosinteze i sadrže ga sve zelene biljke koje obavljaju proces fotosinteze, hlorofil b se nalazi u višim biljkama i zelenim algama, hlorofil c imaju mrke alge a hlorofil d je pigment crvenih algi. Eksperimenti su pokazali da hlorofili apsorbuju svetlost u plavom (430-490 nm) i crvenom (630-760 nm) delu spektra.



Slika 1.13: Apsorpcioni spektar hlorofila a i hlorofila b.

Kada molekul hlorofila apsorbuje svetlosni kvant (foton) prelazi iz osnovnog u pobuđeno (ekscitirano) stanje. U ovom procesu zapravo dolazi do pre raspodele elektrona tako da je on u višem energijskom stanju u kome je molekul nestabilniji. U pobuđenom stanju može da bude veoma kratko vreme pa dolazi do deekscitacije. Viška energije molekul može da se oslobodi deekscitacijom u osnovno stanje ali i tako što će neko jedinjenje koje se nalazi blizu u tom trenutku primiti ovaj elektron, što se u procesu fotosinteze

i dešava.

Da bi došlo do reakcije fotosinteze sa jednim molekulom  $\text{CO}_2$  potrebna je energija od  $E = 2,34 \times 10^{-18} \text{ J} = 14,6 \text{ eV}$ . Maksimalna apsorpcija u zelenim listovima biljaka se odvija za hlorofil a na talasnoj dužini  $\lambda_a = 680 \text{ nm}$  a za hlorofil b na  $\lambda_b = 644 \text{ nm}$ . Obe talasne dužine padaju u crveni deo spektra. Enerija jednog fotona talasne dužine  $\lambda_a$  je

$$E_a = h\nu_a = \frac{hc}{\lambda_a} = 2,92 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,83 \text{ eV},$$

dok je energija fotona talasne dužine  $\lambda_b$

$$E_b = h\nu_b = \frac{hc}{\lambda_b} = 3,08 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,93 \text{ eV}.$$

Prosečan broj fotona talasne dužine  $\lambda_a$  potrebnih da se dostigne energija  $E$  potrebna za reakciju je

$$\frac{E}{E_a} = \frac{2,34 \times 10^{-18} \text{ J}}{2,92 \times 10^{-19} \text{ J}} = 8,$$

dok je u slučaju fotona talasne dužine  $\lambda_b$

$$\frac{E}{E_b} = \frac{2,34 \times 10^{-18} \text{ J}}{3,08 \times 10^{-19} \text{ J}} = 7,60.$$

Dugo je bila misterija zašto se proces fotosinteze, opisan relacijom (1.24) odigrava sa skoro 100% efikasnošću u transferu solarne energije u hranu, tj. uz veoma male toplotne gubitke. Istraživanja koja su izvršena u laboratoriji u Berkliju publikovana 2007. godine su pokazala da je ključ u kvantnoj prirodi ovog procesa usled koga se on odvija skoro trenutno pa praktično nema vremena da se dese značajniji energetske gubici.

### 1.2.10 Atmosferske aerosoli

Atmosferske aerosoli su tečne ili čvrste čestice koje lebde u vazduhu (npr. prašina). Izvori aerosola su

- sagorevanje - šumski požari i industrija,
- reagovanja gasova (sufati i nitrati),
- usitnjavanje i raspršivanje čvrstih tela (vetar i voda erodiraju stene),
- raspršivanje soli iz morske vode i
- vulkani.

Tipične koncentracije su  $10^3$  čestica u  $\text{cm}^3$  (iznad okeana),  $10^4$  čestica u  $\text{cm}^3$  (iznad tla),  $10^5$  čestica u  $\text{cm}^3$  (iznad gradova). Veličina im se kreće od

oko 1 nm u slučaju kolekcije nekoliko stotina molekula do 10  $\mu\text{m}$  u slučaju najvećih čestica. U zavisnosti od veličine čestica, aerosoli se dele na:

1. Sitna ili Aitkenova jezgra prečnika manjeg od 0,1  $\mu\text{m}$ . Većina čestica sposobnih da budu centri kondenzacije u vazduhu. Kada nastanu broj im se jako smanjuje uzled Braunovog kretanja i koagulacije u kojima daju veće čestice. Ovaj tip jezgara čini oko 20% mase aerosola.

2. Velika jezgra (prečnika između 0,1-1  $\mu\text{m}$ . Iako su manje brojna od Aitkenovih jezgara ipak čine oko 50% mase aerosola. Brzina njihovog padanja kroz atmosferu je još uvek manja od sposobnosti da se izdižu što ih održava u atmosferi, ali im je koncentracija iznad oblaka mnogo manja jer su odlični centri kondenzacije za kapi kiše.

3. Džinovska jezgra (prečnika većeg od 1  $\mu\text{m}$ . Iako su veoma retka čine oko 30% mase aerosola. Obično ih stvara fina prašina koju podiže vetar kada prelazi iznad suvih površina. Kao i velika jezgra i džinovska su efikasni centri kondenzovanja. Atmosferu od njih lako čisti kiša.

### 1.2.11 Kisele kiše

Termin *kisela kiša* se odnosi na kišu ili bilo koju drugu padavinu koja je zagađena sumpor dioksidom, azotnim oksidima ili nekim drugim hemijskim jedinjenjima usled kojih je kiselost padavine biti manja od uobičajene. Kiselost neke supstance se određuje na snovu njene pH vrednosti<sup>19</sup> koja predstavlja meru koncentracije vodonikovih jona u rastvoru. pH se definiše u stvari kao negativan logaritam aktivnosti vodonikovih jona u rastvoru. Aktivnost vodonikovih jona je proporcionalna njihovoj koncentraciji i jednaka je koncentraciji pomnoženoj odgovarajućim koeficijentom ali za razmatranja koja će ovde biti prezentovana nije neophodno razlikovati ove dve veličine. Prema tome, pH se definiše izrazom

$$\text{pH} = -\log_{10}([H^+(aq)])$$

u kome je sa  $[H^+(aq)]$  predstavljena koncentracija vodonikovih jona u vodenom rastvoru izražena u mol/l odnosno mol/dm<sup>3</sup>.

Za čistu vodu su koncentracije  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}^+$  jona međusobno jednake a na temperaturi od 25°C njihov proizvod iznosi

$$[H^+(aq)][OH^-(aq)] = 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{dm}^3$$

---

<sup>19</sup>Ne postoji opšta saglasnost oko značenja skraćenice pH između predloga da to bude "potential of hydrogen", "power of hydrogen" i nečeg trećeg.



odakle se dobija da je u tom slučaju pH ovakvog (neutralnog) rastvora

$$\text{pH} = -\log_{10}([H^+(aq)]) = -\log_{10}(10^{-7}) = -(-7) = 7.$$

Ukoliko se pri određivanju pH dobije da je  $\text{pH} < 7$  to znači da u rastvoru ima više  $H^+$  jona pa se on naziva kiselim a u suprotnom  $\text{pH} > 7$  sledi da će u njemu biti više  $OH^-$  jona pa je on bazan.

Nezagađena kiša je po svojoj prirodi kisela jer atmosfera sadrži u sebi kiseli oksid (ugljen dioksid) koji se rastvara u vodi (kapima kiše) i daje kao produkt ugljenu kiselinu. Posledica toga je da je kiselost kišnice oko 5,6. U slučaju da je kiselost kiše ispod ove vrednosti ona se smatra *kiselom*, tj. zagađenom. Izvori kiselih kiša mogu da budu prirodni i veštački. Prirodni izvori su npr. vulkanske erupcije a veštački industrijsko sagorevanje fosilnih goriva i izduvni gasovi motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Pri tome se stvaraju sumpor dioksid i azotni oksidi koji se zatim konvertuju u sumpornu i azotnu kiselinu. Kisele kiše često izazivaju štetu daleko od svojih izvora.

Vrednost pH koeficijenta u kiselim kišama se kreće obično u intervalu između 4 i 4,5. Iako je ova vrednost samo malo manja od pH neutralnih rastvora treba imati u vidu da je pH skala logaritamska pa ove vrednosti odgovaraju 40 puta većoj koncentraciji kiselina.



Slika 1.14: Šuma oštećena kiselim kišama.