

# Integracija atmosferskih procesa i koncepata u redovitu nastavu fizike

---

Jakišić, Dora

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:710453>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Dora Jakišić

INTEGRACIJA ATMOSFERSKIH PROCESA I  
KONCEPATA U REDOVITU NASTAVU  
FIZIKE

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

**Dora Jakišić**

Diplomski rad

**Integracija atmosferskih procesa i  
konceptata u redovitu nastavu fizike**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Danijel Belušić

Suvoditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Sanjin Benić

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2023.

*Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Danijelu Belušiću na pomoći i savjetima pri pisanju rada,*

*svojim roditeljima na golemoj podršci i beskrajnoj ljubavi tijekom cijelog obrazovanja i najboljim prijateljima i kolegama zbog kojih je studiranje bilo jedno prekrasno poglavlje u mom životu!*

## Sažetak

Cilj ovog rada je povezivanje i uvođenje koncepata iz fizike atmosfere u redovitu nastavu fizike osnovnih i srednjih škola. Rad može poslužiti kao svojevrsan vodič i dodatna literatura za nastavnike fizike koji bi željeli određene teme, koje se obrađuju u nastavi, povezati s pričama iz područja fizike atmosfere te na taj način učenicima približiti gradivo i učiniti ga zanimljivijim.

Atmosfera se ponaša kao idealan plin te je povezana sa širokim rasponom fizikalnih procesa i područja za koje postoji niz primjera koji se mogu uvesti u redovitu nastavu fizike. Na samom početku rada prikazana je atmosfera općenito – njen nastanak, sastav i podjela.

Drugi dio sadrži opis elemenata vremena i klime. Na samom početku definiran je pojam zračenja, kao i pojam Sunčevog zračenja i atmosfere te je objašnjen prijenos topline na Zemlji. Na taj način bi se učenicima približilo gradivo o elektromagnetskom zračenju, idealnom crnom tijelu i zakonima zračenja, raspršenju i lomu svjetlosti te zakonu refleksije. U radu je prikazano i nekoliko eksperimenata vezanih za prijenos topline na Zemlji koji se mogu izvesti na nastavi. U nastavku slijedi prikaz još nekoliko meteoroloških elemenata – tlaka, vlage, oblaka i oborina koji su međusobno povezani hidrološkim ciklusom, odnosno kruženjem vode na Zemlji. Detaljnije je objašnjen nastanak oblaka, a posebice oblaka termičke konvekcije uz korištenje znanja o adijabatskim procesima i idealnom plinu. Uz priče iz atmosfere o navedenim meteorološkim elementima, učenici će učiti o agregatnim stanjima, unutarnjoj energiji čestica, prvom zakonu termodinamike i termodinamičkim sustavima i procesima, jednadžbi stanja plina te hidrostatičkoj ravnoteži.

Ključne riječi: fizika atmosfere, nastava fizike, zračenje, voda u atmosferi

# **Integration of atmospheric processes and concepts into physics school program**

## **Abstract**

The aim of this study is to connect and introduce atmospheric physics concepts into regular elementary and secondary school physics classes. This study can serve as a guidebook and additional literature for physics teachers who would like to connect regular class topics with stories from the field of atmospheric physics in order to make physics lessons more understandable and more interesting for students.

The atmosphere behaves like an ideal gas and is associated with a wide range of physical processes for which there is a number of examples that can be introduced into regular physics classes. At the very beginning of this study the atmosphere is shown in general - its origin, structure and classification.

In the second part, a description of the elements of weather and climate is given. Firstly, the concept of radiation is defined, as well as the concept of solar radiation and the atmosphere. Also, heat transfer on Earth is explained. Through these topics, students would be introduced to electromagnetic radiation, the ideal black body and the laws of radiation, scattering and refraction of light and the law of reflection. The study also presents several experiments related to the transfer of heat on Earth that can be performed in class and which would further familiarize students with the physics school material. Continuing, there is description of few more meteorological elements - pressure, moisture, clouds and precipitation. They are all connected by hydrological cycle which presents circulation of water on Earth. The formation of clouds, especially clouds of thermal convection, is explained in more detail with the use of knowledge about adiabatic processes and ideal gas. Along with stories from the atmosphere about the aforementioned meteorological elements, students will learn about aggregate states, internal energy of particles, the first law of thermodynamics and thermodynamic systems and processes, gas equation and hydrostatic equilibrium.

Key words: atmospheric physics, physics school program, radiation, water in atmosphere

## Sadržaj

<b>1</b>	<b>Popis obuhvaćenih tema iz nastave fizike .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Općeniti prikaz atmosfere.....</b>	<b>6</b>
3.1	<i>Evolucija atmosfere .....</i>	<i>6</i>
3.2	<i>Sastav atmosfere .....</i>	<i>8</i>
3.3	<i>Podjela atmosfere po visini .....</i>	<i>9</i>
3.3.1	<i>Troposfera .....</i>	<i>10</i>
3.3.2	<i>Tropopauza.....</i>	<i>10</i>
3.3.3	<i>Stratosfera i stratopauza .....</i>	<i>11</i>
3.3.4	<i>Mezosfera i mezopauza .....</i>	<i>11</i>
3.3.5	<i>Termosfera i egzosfera.....</i>	<i>12</i>
3.3.6	<i>Ionosfera.....</i>	<i>12</i>
<b>4</b>	<b>Elementi vremena i klime .....</b>	<b>13</b>
4.1	<b>Zračenje.....</b>	<b>14</b>
4.1.1	<i>Sunčevo zračenje .....</i>	<i>19</i>
4.1.2	<i>Sunčevo zračenje i atmosfera .....</i>	<i>22</i>
4.1.3	<i>Prijenos topline na Zemlji .....</i>	<i>34</i>
4.2	<b>Voda u atmosferi .....</b>	<b>44</b>
4.2.1	<i>Vlaga zraka .....</i>	<i>45</i>
4.2.2	<i>Oblaci i magla .....</i>	<i>48</i>
<b>5</b>	<b>Zaključak.....</b>	<b>62</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>63</b>

## 1. Popis obuhvaćenih tema iz nastave fizike

Niže su navedene pojedine nastavne teme i pojmovi iz nastave fizike koji su obuhvaćeni ovim diplomskim radom. Budući da rad povezuje fiziku atmosfere kao područje proučavanja i samu nastavu fizike, ovaj popis služi kao orijentir kroz poglavlja kako bi se pregledno mogli iščitati koncepti kojima se bavimo u nastavi fizike, a koji su usko povezani s obrađenim temama iz fizike atmosfere. \*

### 4.1 Zračenje

- Elektromagnetski valovi.....14
- Elektromagnetski spektar.....14
- Opis vala (valna duljina, frekvencija).....15
- Idealno crno tijelo i zakoni zračenja (Wienov zakon, Stefan – Boltzmannov zakon, Planckov zakon).....16
- Intenzitet zračenja.....16

#### 4.1.1 Sunčevo zračenje

- Kruženje Zemlje oko Sunca.....19
- Intenzitet zračenja.....20

#### 4.1.2 Sunčevo zračenje i atmosfera

- Raspršenje svjetlosti.....24
- Refrakcija (lom) svjetlosti.....25
- Zakon refleksije.....27

#### 4.1.3 Prijenos topline na Zemlji

- Kondukcija.....34
- Konvekcija.....36

### 4.2 Voda u atmosferi

- Agregatna stanja.....44

#### 4.2.1 Vlaga zraka

- Kinetička energija kaotičnog gibanja čestica.....45
- Latentna toplina.....45
- Tlak.....45

#### 4.2.2 Oblaci i magla

- Varijable stanja.....53
- Unutarnja energija.....53
- Prvi zakon termodinamike.....54
- Termodinamički sustavi i procesi (izobarni, izohorni, izotermni, adijabatski) ...54
- Jednadžba stanja plina.....55
- Specifični toplinski kapacitet.....55
- Hidrostatska ravnoteža.....57

---

\* Napomena: navedeni brojevi stranica označavaju mjesto na kojem se određena nastavna tema ili pojam u radu pojavljuje po prvi put.



## 2. Uvod

Ono čime se bavi fizika atmosfere dio je ljudske svakodnevnice i upravo sam zbog toga prepoznala važnost meteoroloških i klimatskih tema. Svi smo svjesni činjenice da djeca u osnovnim i srednjim školama rijetko prepoznaju da se opisanim konceptima zapravo bavi fizika, točnije geofizika. Jedan dio toga uči se na nastavi geografije i kemije, no smatram da bi se dosta toga moglo integrirati u redovitu nastavu fizike. Ovaj rad može biti koristan nastavnicima fizike jer osim samih atmosferskih tema obuhvaća i koncepte koji se uče u školi, i samim time može dati razne ideje kako bi se fizika atmosfere mogla integrirati u nastavu. Mnogo je toga što može na dobar način biti ispričano i demonstrirano pomoću raznih učeničkih pokusa i projekata, te bi na taj način učenici lakše mogli shvatiti neke zahtjevnije fizikalne koncepte. Budući da je sve popraćeno jednadžbama, stvorio bi se i dobar materijal za dodatnu nastavu fizike i učenike koji žele znati nešto više. Cilj ovog rada je prikazati neke od koncepata i procesa u fizici koji bi učenike motivirali za daljnje proučavanje, kao i za sam interes o važnim znanstvenim i društvenim pitanjima današnjice.

Od početaka pa sve do danas, čovjek na razne načine ovisi o vremenu i promjenama u atmosferi. Stari Grci su prije više od 2500 govorili o povezanosti i učinku prirode na zdravlje ljudi. Tako je Hipokrat, antički liječnik, u djelu „O zraku, vodi i tlu“ pisao o utjecaju klime na zdravstveno stanje naglašavajući kako liječnik u prognozi i terapiji mora uzimati u obzir lokalne klimatske čimbenike kao i veliki značaj utjecaja vjetrova [1]. Zanimljivo je da je na priobalju u vrijeme Dubrovačke Republike postojalo pravilo da se u vrijeme južine ne donose odluke te su čak i presude za zločine počinjene za vrijeme iste bile blaže. Danas osjetljivost na promjenu vremena poznajemo pod pojmom *meteoropatija*.

Nadalje, milijuni ljudi diljem svijeta koji se bave poljoprivredom svakodnevno prate vremensku prognozu. Ona je od velike važnosti jer pomoću točnog i preciznog predviđanja vremena, mogu se izbjeći ili smanjiti veće štete. Suša, tuča, snijeg ili pak velike količine kiše pojave su koje uvelike mogu utjecati na poljoprivredne kulture. Dobro predviđanje daje vremena da se čovjek pripremi na razne aktivnosti.

Upozori li se pravovremeno na maglu, olujna nevremena, mećave i druge opasne pojave, mogu se spriječiti i automobilske ili brodske nesreće. Također, o vremenu kao primarnom faktoru ovisi i let zrakoplova. Na to hoće li se zrakoplov spustiti na željenu lokaciju ili će pak morati produžiti u iduću zračnu luku utječe jak vjetar, oluje i sl.

Meteorološki podaci također su važni za građevinare i arhitekte. Uzmu li se razni meteorološki parametri u obzir pri planiranju naselja, kvaliteta stanovanja se može uvelike povećati, kao i sama sigurnost života. Primjerice, valja voditi računa o smještaju industrijskih pogona, gustoći i visini zgrada, strukturi i položaju naselja itd. Recimo, predjeli uz rijeke koji su okruženi brdima, zbog slabog provjetravanja mogu ljeti biti iznimno vrući, a zimi prilično hladni, vlažni i magloviti. Takva područja zato nisu pogodna za izgradnju naselja, kao ni područja izložena poplavama [2].

Meteorološki činitelji neizbježan su faktor pri gospodarenju vodama. O njima u velikoj mjeri ovisi izgradnja i upotreba vodoprivrednih objekata. Većina hidroloških elemenata poput vodostaja, protoka, nanosa, kemijskog sastava vode, vodnih valova, promjena riječnog korita, izravna su posljedica atmosferskih stanja i pojava i teško da se mogu protumačiti bez korištenja meteoroloških podataka [2].

Uz vode, važno je spomenuti i vjetar kao jedan od meteoroloških elemenata. Vjetar utječe na rad vjetroelektrana te na njihovu izgradnju i projekte razvoja. Stoga, u planiranje izgradnje ključno je angažirati meteorologa koji će kvalitetno analizirati značajke vjetra [3].

Naveli smo neke od još mnoštva primjera gdje stanja i pojave iz atmosfere utječu na život ljudi. Isto tako, tu je i obrnuta situacija gdje čovjek utječe na atmosferu. Kao glavni primjer valja spomenuti ekološku problematiku, pobliže – onečišćenje zraka. Ljudi svojim ponašanjem na lokalnoj i globalnoj razini ugrožavaju kvalitetu zraka, samim time i kvalitetu života na Zemlji. Naravno da postoje i prirodni izvori onečišćenja poput prirodnih isparavanja, pustinjske prašine nošene vjetrom, plinova iz močvara, vulkanskog pepela, itd., ali za umjetne je izvore odgovorna ljudska aktivnost. Tu bismo ubrojili onečišćenje uzrokovano proizvodnjom toplinske i električne energije, potom radom industrija, spaljivanjem otpada, različita ispušna goriva i sl. [4]. Onečišćenje zraka uz to što ugrožava zdravlje ljudi, negativno se odražava i na promjene u tlu, vodi, te kvaliteti života biljaka i životinja.

Ipak, ono o čemu se najviše priča posljednjih godina su klima i klimatske promjene. Tome u prilog ide i činjenica da je Nobelova nagrada za fiziku 2021. godine prvi put u povijesti dodijeljena znanstvenicima iz područja geofizike – trojcu koji je doprinio razumijevanju promjene klime na Zemlji. Američko-japanski znanstvenik Syukuro Manabe i Nijemac Klaus Hasselmann dobili su nagradu “za fizikalno modeliranje klime na Zemlji, određivanje varijabilnosti i pouzdane projekcije globalnog zagrijavanja”, a Talijan Giorgio

Parisi “za otkriće odnosa između neuređenosti i fluktuacija u fizikalnim sustavima od atomskih do planetarnih razmjera” [5].

Mnogo se fizike nalazi i iza priče o ozonu, ozonskim rupama i efektu staklenika. Enormno povećanje broja oboljelih od raka kože, prisustvo sve više kompanija koje proizvode kreme za sunčanje sa „SPF“ zaštitom – sve su to posljedice razrjeđivanja ozonofere što vodi do pojačanja UV zračenja koje može biti štetno za život na Zemlji.

### 3. Općeniti prikaz atmosfere

Da bismo mogli pričati o procesima koji se događaju u fizici atmosfere, prvo ćemo opisati kako je atmosfera evolucijski nastala i kako se razvijala od početaka sve do danas. Potom valja definirati sam pojam atmosfere i reći od čega se sve sastoji te prikazati njenu podjelu.

Vidjet ćemo da se Zemljina atmosfera u prvih nekoliko stotina milijuna godina uvelike razlikovala od atmosfere kakvu danas promatramo. Zemljina atmosfera je produkt dugog evolucijskog procesa koji je započeo postankom Zemlje prije 4.6 milijardi godina. Pomoću astronomskih proučavanja Sunčevog sustava i raznih podataka koje su geolozi dobili iz analize meteora, stijena i fosila, danas imamo smislene, iako nepotpune scenarije o podrijetlu atmosfere [6].

Atmosfera okružuje cijelu Zemlju kao relativno tanka ovojnica plinova i sićušnih čestica. U stvari, 99% mase atmosfere je u sloju do 30 – 35 km, što je otprilike 0.25% Zemljinog promjera. Kada bismo napravili analogiju Zemlje i jabuke, atmosfera bi zapravo bila poput tanke opne jabuke. Taj tanki sloj je upravo nešto što je nužno za život i savršeno funkcioniranje fizikalnih i bioloških procesa na Zemlji. Atmosfera štiti organizme od izloženosti opasnim stupnjevima ultraljubičastog zračenja. Također sadrži plinove potrebne za procese održavanja života kao što su stanično disanje i fotosinteza, te opskrbljuje vodom sav živući svijet [6].

#### 3.1 Evolucija atmosfere

Planet Zemlja, kao i Sunce i čitav Sunčev sustav, nastali su, kako se vjeruje, iz ogromnog oblaka prašine i plinova unutar Mliječne staze. U početku, Zemlja je bila nakupina prašine i meteorita okružena plinovitim slojem većinom vodika i helija. Plinovitog kisika nije bilo. Milijunima godina, Zemljina je masa rasla nagomilavanjem svemirske prašine koju je kupila za sobom putujući kroz svemir. Bombardiranje meteoritima uzrokovalo je zagrijavanje Zemlje i njezine atmosfere otjeravši većinu izvornih plinova.

Zemlja je postala geološki aktivna kada su vulkani počeli izbacivati van velike količine lave, pepela i različitih plinova. Tad, kao i sada, glavne su plinske emisije vulkana

bile vodena para, ugljikov dioksid i ponešto dušika. Slobodni kisik bio je izrazito odsutan iako je bio kombiniran s drugim elementima u različitim kemijskim spojevima kao što je ugljikov dioksid. Milijuni godina vulkanske aktivnosti proizveli su gustu atmosferu bogatu ugljikovom dioksidom i dušikom. Intenzivna Sunčeva radijacija u gornjem je sloju atmosfere uzrokovala da se vodena para rastavi na osnovne dijelove, što je doprinijelo tome da se barem mala količina kisika pojavi u ranoj atmosferi. Također je radioaktivni raspad izotopa kalija (kalij-40) u stijenama Zemljine kore dodao inertni plin argon atmosferi koja je evoluirala.

Ova rana atmosfera bila je deset do dvadeset puta gušća nego današnja. Obilje ugljikovog dioksida značilo je višu površinsku temperaturu od one koju mjerimo danas jer ugljikov dioksid usporava gubitak Zemljine topline u svemir. Numerički modeli koji govore o ovoj ranoj atmosferi kažu da je prosječna temperatura tada bila između 85 °C i 110 °C. Ova faza drevne Zemljine atmosfere vjerojatno je trajala nekoliko stotina milijuna godina.

Slijedilo je formiranje mora i stvaranje života dok je atmosfera nastavljala evoluirati. Prije oko 3.8 milijardi godina, vulkanska je aktivnost opala i Zemljina se atmosfera počela hladiti. Hlađenje je uzrokovalo da se dio vodene pare kondenzira u oblake, dok je kiša stvorila prve rijeke, jezera i mora. Ciklus kruženja vode na Zemlji tada je mogao započeti. U tim morima, prvi primitivni oblici života pojavili su se prije 3.5 milijarde godina te je započeo proces fotosinteze pojavom prvih morskih biljaka. Jedan od produkata fotosinteze je kisik koji se otpuštao u atmosferu. Tijekom sljedećih nekoliko milijuna godina, kisik je postao drugi najzastupljeniji atmosferski plin nakon dušika. Koncentracija ugljikovog dioksida za to vrijeme u atmosferi je značajno opala. Fotosinteza je uklonila jedan dio, ali se ipak velika količina ugljikovog dioksida otopila u morima. Morski organizmi su upotrijebili jedan dio tog otopljenog ugljikovog dioksida pri stvaranju svojih ljuski, te nakon što bi uginuli, njihovi ostaci su ostajali akumulirani kao sediment na oceanskom tlu. Vremenom su ti sedimenti pretvoreni u karbonatne stijene poput vapnenca. Ciklus ugljika je time završen, i tek mali dio ugljikovog dioksida postao je dio atmosferskih plinova.

Atmosfera je, kao što je već rečeno, postala veoma bogata kisikom. Kisik se u gornjim dijelovima atmosfere više pojavljivao u atomskoj (O), nego dvoatomskoj formi (O<sub>2</sub>). Ultraljubičasto Sunčevo zračenje uzrokovalo je fotodisocijaciju O<sub>2</sub> na njegove sastavne dijelove (O). Dva atoma kisika mogla su se jedino rekombinirati u slučaju sudara s nekim trećim atomom ili molekulom [6]. Na taj način nastaje molekula ozona (O<sub>3</sub>) s tri atoma

kisika. Tim procesima postupno se stvarao i ozonski omotač koji ne dopušta štetnim UV zrakama sa Sunca da dođu do Zemlje i prouzroče štete organizmima na našem planetu. Ozon je, dakle, omogućio daljnji razvoj života na Zemlji.

### 3.2 Sastav atmosfere

Atmosfera je smjesa plinova koja obavija Zemlju. 99% mase atmosfere zbijeno je zbog sile teže u donjih 30 – 35 km, te je ona najgušća uz samu Zemljinu površinu. Vrijeme i klimu oblikuju fizička svojstva, procesi i pojave u troposferi čija debljina varira ovisno o geografskoj širini. Dio atmosfere, posebno na malim visinama, nazivamo zrakom [2].

Do sto kilometara iznad morske razine, atmosfera se sastoji od smjese plinova koji su uglavnom jednoliko izmiješani s malim količinama vodene pare koncentrirane skoro u potpunosti u prvih 10 – 15 km. Količina vodene pare u atmosferi je neravnomjerno raspoređena. Smjesu plinova u atmosferi bez vodene pare nazivamo *suhim zrakom*. *Vlažnim zrakom* nazivamo svaku smjesu suhog zraka s vodenom parom. Vlažni zrak ima manju gustoću od suhog zraka.

Osim plinova iz tablice 1, atmosfera također sadrži male količine kondenzirane materije – tekuća voda i led u obliku oblaka i oborina, kao i još manje čestice u krutom i tekućem stanju koje nazivamo *aerosoli* i koje su najviše koncentrirane u najnižih 10 – 15 km atmosfere [7]. One lebde i nošene su zračnim strujama. Prirodni aerosol jednim je dijelom svemirska prašina, a većim dijelom dolazi sa Zemljine površine kao prašina s tla, kristalići morske soli, čestice iz vulkanskih erupcija, pelud, virusi, bakterije i sl. Kao rezultat ljudskih djelatnosti postoji i štetan dio aerosola (promet, tvornice, požari i sl.) [2].

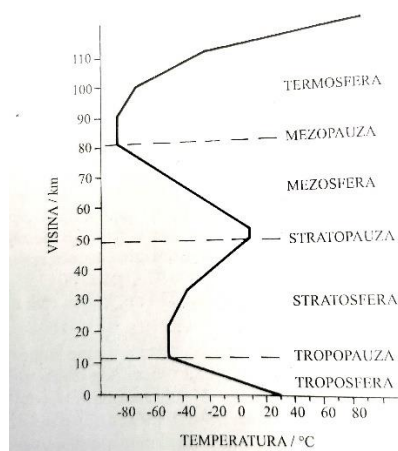
Preko 99.9% mase suhog zraka sastoji se od smjese triju plinova – dušika, kisika i argona. U tablici 1 nalaze se i ostali sastojci suhog zraka kao i njihovi volumni udjeli [2].

Plin		Obujmeni udjel (%)
dušik	N <sub>2</sub>	78,084
kisik	O <sub>2</sub>	20,946
argon	Ar	0,934
ugljik-dioksid	CO <sub>2</sub>	~ 0,033
neon	Ne	0,001 800
helij	He	0,000 524
metan	CH <sub>4</sub>	0,000 165
kripton	Kr	0,000 100
vodik	H <sub>2</sub>	0,000 050
dušik-dioksid	NO <sub>2</sub>	0,000 031
ksenon	Xe	0,000 009
ozon	O <sub>3</sub>	< 0,000 010

Tablica 1 Sastav suhog zraka (Penzar i sur., 1996)

### 3.3 Podjela atmosfere po visini

Promatramo li vertikalnu strukturu atmosfere, možemo je podijeliti po temperaturi na nekoliko koncentričnih slojeva. Dijeli se na četiri glavna sloja i tri prijelazna. Najniži sloj je troposfera i proteže se do 20 km u visinu. Debljina joj nije prostorno stalna, što ćemo opisati u sljedećem paragrafu. Iznad troposfere nalazi se tropopauza debljine 1 – 2 km gdje je temperatura konstantna. Zatim stratosfera do nekih 50 km te iznad nje stratopauza, također s konstantnom temperaturom poput tropopauze. Mezosfera se proteže na 50 do 80 km nadmorske visine, iznad koje je mezopauza i gdje je minimum temperature u atmosferi (-90 °C). Iznad 90 km nalazi se termosfera gdje je zrak veoma rijedak i gdje su velike dnevne oscilacije u temperaturi. Iznad termosfere dolazi do bježanja molekula zbog slabog utjecaja Zemljinog gravitacijskog polja i taj se dio atmosfere često naziva egzosfera. Na slici ispod možemo vidjeti shematski prikaz promjene temperature u atmosferi s visinom [2].



Slika 3.1 Promjena temperature s visinom u atmosferi (Penzar i sur., 1996)

### 3.3.1 Troposfera

*Troposfera* je najniži sloj atmosfere. Debljina joj se mijenja ovisno o geografskoj širini, pa je tako najdeblja na ekvatoru gdje se proteže do 20 km. Na umjerenim geografskim širinama ( $45^\circ$ ) ide do 11 km, a na polovima tek do 8 km. Ona obuhvaća 80% mase atmosfere – sadrži svu vodenu paru, oblake i oborinu. Dakle, u troposferi se događaju gotovo svi procesi koji određuju vrijeme. Niži su dijelovi troposfere pod utjecajem površine Zemlje, zbog čega se troposfera odozdo grije a odozgo hladi ( $\partial T/\partial z < 0$ , gdje je  $T$  temperatura, a  $z$  visina).

Troposfera ima tri sloja. Prvi sloj, koji se proteže do otprilike dva metra nadmorske visine, zove se *prizemni sloj*. Na tom području mikroklima je određena sastavom i oblikom tla. To je i razlog zbog kojeg se sva meteorološka mjerenja obavljaju malo iznad tog sloja. Također, u prizemnom su sloju velike promjene u temperaturama između dana i noći.

*Planetarni granični sloj* nalazi se na visini između 2 m i 1.5 km, ovisno o dijelu dana i godišnjem dobu. U ovom sloju dolazi do vrtloženja zraka zbog zagrijavanja podloge i pridnenog trenja – sloj zraka pri tlu je veće temperature što uz vjetar pogoduje tome da se zrak komeša u svim smjerovima.

U *slobodnoj troposferi*, koja se nalazi iznad 1.5 km visine, dolazi do velikog pada temperature:  $\partial T/\partial z = -6.5 \text{ K km}^{-1}$ .

### 3.3.2 Tropopauza

Strmi pad temperature u troposferi završava *tropopauzom*. U tropopauzi je temperatura konstantna, što je usko povezano s oskudicom vertikalnog strujanja u stratosferi: sva konvektivna uzlazna strujanja prestaju u tropopauzi i iznad nje. Kako i frontalna podizanja također tu završavaju, gotovo svi oblaci su ograničeni na visinu tropopauze. Debljina tropopauze je 1 do 2 km i karakteriziraju je oblaci *cirusi*. Također, zbog ciklonalne aktivnosti u ovom pojasu, obično dolazi do pojave *mlaznih struja* (nekoliko kilometara debeo i tisuće kilometara dug pojas vrlo jakih vjetrova [8]) gdje je brzina vjetrova veća od  $90 \text{ km h}^{-1}$ . Temperatura u tropopauzi na polovima je  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ , dok je na ekvatoru  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ .



### 3.3.3 *Stratosfera i stratopauza*

*Stratosfera* se nalazi iznad tropopauze i seže do skoro 50 km u visinu. U najvišim dijelovima stratosfere, temperatura je ponovo slična onoj pri tlu jer se ona odozgo grije, odnosno u gornjoj stratosferi vrijedi da je  $\partial T/\partial z > 0$ . U stratosferi prevladavaju horizontalni vjetrovi. U donjoj stratosferi do 25 km visine temperatura je približno konstantna i tu gotovo pa i nema vertikalnog miješanja zraka. Često u donji dio stratosfere ulazi i onečišćenje koje se zbog nedostatka tog vertikalnog miješanja zraka tu može zadržati čak i godinama.

Na području od 20 do 30 km proteže se *ozonosfera* gdje je koncentracija ozona maksimalna. Ozon upija UV zračenje koje dolazi sa Sunca i koje je štetno za život na Zemlji. Zbog toga je važno da u ozonosferu dospiju što manje količine onečišćujućih tvari koje pospješuju razaranje ozona.

*Stratopauza* je prijelazni sloj između stratosfere i mezosfere koji počinje na približno 50 km visine. Temperatura je u ovom sloju konstantna, te zbog apsorpcije UV zračenja iznosi otprilike 0 °C.

### 3.3.4 *Mezosfera i mezopauza*

Iznad stratopauze prostire se *mezosfera* na visini od 50 do 80 km. Mezosfera se grije odozdo tako da na tom području nailazimo na nagli pad temperature. Na visini od 80 km, temperatura je između -70 °C i -80 °C.

*Mezopauza* se nalazi iznad mezosfere, na visini od 80 do 90 km gdje je temperatura konstantna. Temperatura u mezosferi je ujedno i najniža u cijeloj atmosferi i iznosi -90 °C. Tu nastaju i noktilucentni oblaci koji su najbolje vidljivi nakon sumraka (otuda i naziv „noktilucentni“ ili „noćni svijetleći oblaci“), a pretpostavlja se da su nastali od vulkanske prašine.

### 3.3.5 Termosfera i egzosfera

*Termosfera* je dio atmosfere koji se nalazi na visinama 90 do 800 km. U termosferi, gdje je zrak veoma rijedak, dolazi do naglog rasta temperature. Razlike u temperaturama između dana i noći su velike, gdje je noću  $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dok danju naraste čak do  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tako visoke temperature posljedica su upijanja ultraljubičastih zraka sa Sunca. Upijanje UV zraka vrše molekule i atomi kisika i dušika [9].

Iznad termosfere dolazi do bježanja molekula zbog slabog utjecaja Zemljinog gravitacijskog polja. Taj dio se naziva *egzosfera* koja je zapravo vanjski dio atmosfere. Temperatura je viša od  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a u višim slojevima može ići čak iznad  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.6 Ionosfera

Važno je spomenuti i *ionosferu* koja se nalazi uglavnom unutar termosfere, od 80 km visine pa naviše. Ovo područje je dobilo ime po visokoj koncentraciji iona. *Ion* je čestica koja ima električni naboj. Visokoenergetska solarna radijacija koja upada na gornji dio atmosfere izbacuje elektrone iz atoma kisika i dušika te ih ostavlja kao pozitivno nabijene ione. Najviša koncentracija iona nalazi se u donjem dijelu termosfere.

Iako uvjeti gornje atmosfere ne utječu uvelike na svakodnevno vrijeme, ionosfera je važna za radioprijenose na velike udaljenosti. Ioni reflektiraju radiovalove i time produžuju domet prijenosa radiovalova. Radiosignali putuju duž ravnih linija i odbijaju se između Zemljine površine i ionosfere. Zbog mnogih refleksija radiosignali mogu putovati po cijeloj Zemlji [6]. Ionosfera je područje u kojem se pojavljuje polarna svjetlost.

#### 4. Elementi vremena i klime

Prije nego krenemo opisivati vremenske i klimatske elemente, valja prvo definirati meteorologiju i vrijeme kao i klimu i klimatologiju.

*Meteorologija* ili *vremenoslovlje* (grč. μετεωρολογία: naučavanje o nebeskim pojavama [10]) je znanost koja proučava atmosferske fenomene i njihovo ponašanje tijekom vremena. Sastavni je dio geofizike, znanosti koja proučava fizikalne pojave i procese na Zemlji. Osnovno čime se meteorologija bavi jeste ispitivanje sastava atmosfere, njena podjela, proučavanje pretvaranja raznih oblika energije u atmosferi nastalih Sunčevim zračenjem, promatranje toplinskih odnosa, kruženja vode u atmosferi, gibanja zraka, zatim sastavljanje vremenskih izvješća i prognoze, analiziranje umjetnog djelovanja na vrijeme i drugo.

Stanje atmosfere u nekom trenutku nad nekim mjestom određeno je meteorološkim elementima. Skup svih vrijednosti tih elemenata izmjerenih i opaženih na nekom mjestu u nekom trenutku jest *vrijeme*. Meteorološki elementi su zračenje, temperatura, tlak, vjetar, vlaga, oborina i oblaci [11]. U ovom radu opisat ćemo neke od navedenih elemenata.

*Klima* je definirana kao prosječno stanje vremena nad nekim mjestom u određenom vremenskom periodu. Taj je period dulji niz godina (30 god.). Pri tome se uzimaju u obzir i ekstremna vremenska odstupanja. Važno je da klima mora biti specificirana i za mjesto i za vremensko razdoblje. Primjerice, zime u Europi su danas znatno blaže nego prije, klima Hrvatske nije ista kao klima Švedske i sl. Vremenski ekstremi su važni aspekti klimatskih mjerenja. Stoga, dnevna vremenska izvješća obično uključuju najniže i najviše temperature izmjerene određenog datuma. Također, pri klimatskim pregledima, na račun tih ekstrema, određeni mjeseci ili godine definiraju se kao najhladniji, najtopliji, najsuši, najvlažniji i sl. Recimo, poljoprivrednike ne zanima samo prosjek količine oborina u nekom vremenskom periodu, već i točno kada će očekivati sušu i koliko će ona trajati [6].

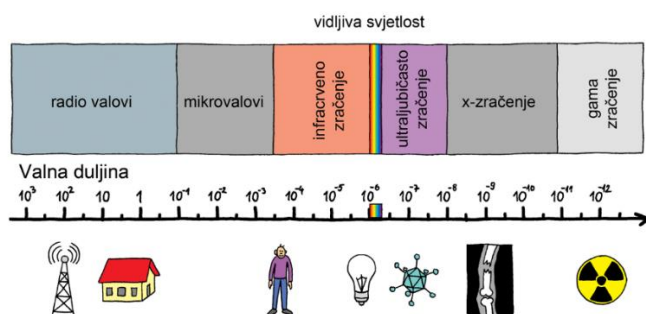
*Klimatologija* se, dakle, bavi dugoročnim statističkim svojstvima atmosfere koja čine klimu.

## 4.1 Zračenje

Prvi klimatski element kojim ćemo se baviti je zračenje. Zračenjem se učenici bave u četvrtom razredu srednje škole kada uče o valno – čestičnoj prirodi svjetlosti i tvari, točnije kada se uči o kvantima elektromagnetskog zračenja. Učenicima je ta tema nerijetko apstraktna, stoga smatram da bi približavanju tema samog elektromagnetskog zračenja, pojma intenziteta zračenja, zatim EM spektra kao i objašnjenje Wienovog i Stefan – Boltzmanovog zakona uvelike pridonijele priče iz geofizike. Možemo, primjerice, s fizikalne strane objasniti zračenje sa Sunca, energiju koju Zemlja prima od Sunca, pričati o prolasku Sunčeve energije kroz atmosferu, albedu, ravnoteži zračenja i efektu staklenika, zagrijavanju podloge i zraka i sl.

Zemlja je konstantno na meti elektromagnetskog zračenja koje dolazi sa Sunca. Sa Sunca Zemlja dobiva energiju, koja se prenosi upravo preko EM – valova. Transverzalni elektromagnetski valovi predstavljaju periodične promjene električnog i magnetskog polja koje titraju u fazi. Budući da za širenje EM – valova nije potrebno sredstvo, zračenje sa Sunca bez problema kroz svemir dolazi do Zemlje, naravno u većim ili manjim količinama ovisno o tome koliko će zračenja atmosfera propustiti.

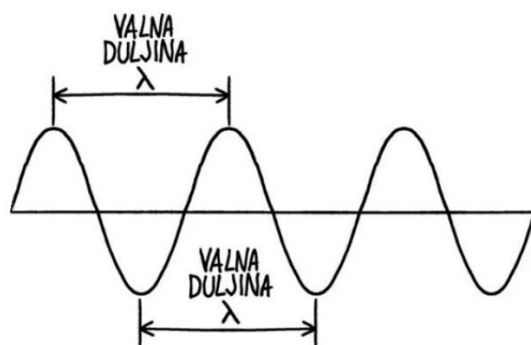
Zapravo, svi objekti koje poznajemo zrače energiju u obliku elektromagnetskog zračenja. Elektromagnetsko zračenje uključuje radio valove, mikrovalove, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, X – zrake i gama – zrake. Svi oni čine elektromagnetski spektar [12].



Slika 4.1 Elektromagnetski spektar ([https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14444\\_Razlaganje\\_svjetlosti\\_na\\_boje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14444_Razlaganje_svjetlosti_na_boje.html))

Zračenje sa Sunca je kratkovalno zračenje i obuhvaća valne duljine od 0.2 do 4 mikrometra. Od toga je otprilike 50% vidljivog zračenja koje zapažamo kao dugine boje. Pomiješane daju bijelu, danju svjetlost. 40% zračenja čine veće valne duljine koje pripadaju infracrvenom dijelu spektra i koje osjećamo kao toplinu. Konačno, 10% zračenja su kraće valne duljine – ultraljubičasto zračenje ili pod češćim nazivom *UV zrake*. Visokoenergetske UV zrake su najopasnije od navedenih zračenja sa Sunca. One mogu uzrokovati sljepoću trajnim oštećenjem mrežnice. Također, pretjeranim izlaganjem Suncu, UV zrake mogu izazvati i rak kože. Uz to, ono ubija i viruse i bakterije, uzrokuje zgrušavanje bjelančevina, stvaranje vitamina D u organizmu kao i pigmentaciju i opekline.

Svako od navedenih vrsta zračenja, tj. valova prikazanih na slici 4.1 opisano je vlastitom valnom duljinom i frekvencijom. Valna duljina  $\lambda$  je udaljenost između dva uzastopna brijega ili dola vala (slika 4.2). Frekvencija  $f$  je broj titraja u određenom vremenu, obično u jednoj sekundi. Frekvencija vala je obrnuto proporcionalna valnoj duljini, što znači da će zračenje kojem pripada najveća frekvencija imati najmanju valnu duljinu i obratno. Termini koje ćemo spominjati bit će kratkovalno i dugovalno zračenje kako bi se istaknula razlika između spektralnog područja u kojemu zrači Sunce ( $\lambda \in 0.2 - 4 \mu\text{m}$ ) i područja u kojemu zrači Zemlja ( $\lambda \in 3 - 80 \mu\text{m}$ ). Iz toga možemo zaključiti da Zemlja zrači mnogo manje energije od Sunca [2].



Slika 4.2 Prikaz vala (prema [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/7180\\_Opis\\_vala.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/7180_Opis_vala.html) [13])

Fizikalni zakoni koji su potrebni za razumijevanje ravnoteže zračenja u sustavu Sunce – Zemlja su *Wienov* i *Stefan – Boltzmannov zakon*. Ti se zakoni uče u četvrtom razredu srednje škole u sklopu kvantne i atomske fizike. Da riječ „kvantna“ ne bude učenicima toliko strana, zakone valja povezati s primjerima iz prirode.

Naime, kada zračenje upada na neko sredstvo, jedan se dio reflektira, dio se apsorbira dok se posljednji dio transmitira. *Idealno crno tijelo* potpuno apsorbira svo upadno zračenje. Naravno, takvo tijelo u prirodi ne možemo pronaći. Njemački fizičar Kirchhoff pronašao je vezu između emisije i apsorpcije različitih tijela; ona kaže da u termodinamičkoj ravnoteži tijela emitiraju onoliko energije koliko i apsorbiraju. Ukupna snaga  $P$  koju zrači neka površina tijela  $A$  u sav prostor obuhvaća sve valne duljine (frekvencije). Dobivena se snaga izražava u *vatima* ( $W$ ). Ako snagu podijelimo s površinom, dobivamo intenzitet zračenja  $I$  koji označava energiju koju zrači jedinica površine u jedinici vremena:

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

Taj intenzitet  $I$  [ $W\ m^{-2}$ ] sumiran je po svim valnim duljinama, tj. frekvencijama [14].

Iako Sunce ni Zemlja nisu idealna crna tijela, na njih se mogu primijeniti Wienov i Stefan – Boltzmannov zakon te donijeti neki korisni zaključci.

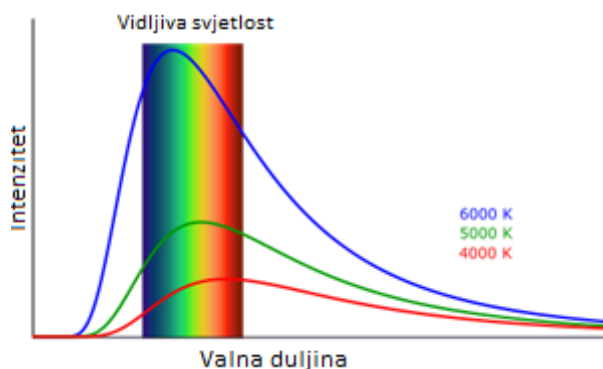
Wienov zakon kaže da je valna duljina na kojoj idealno crno tijelo maksimalno zrači obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi. Odnosno, što je veća temperatura tijela koje zrači, to je manja valna duljina pri maksimalnom intenzitetu zračenja. Prema tome, vruća tijela emitiraju zračenje veoma kratkih valnih duljina, zbog čega kažemo da je zračenje sa Sunca kratkovalno (površinska temperatura Sunca je oko 5800 K), dok hladnija tijela emitiraju zračenje s većim valnim duljinama. Takvo hladnije tijelo je i Zemlja čija je prosječna površinska temperatura 15 °C.

Njemački fizičar Wilhelm Wien teorijskim je putem došao do zakona koji se može zapisati sljedećim izrazom:

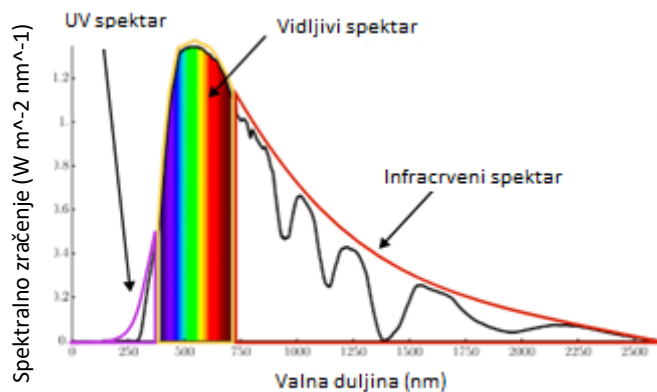
$$\lambda_{\max} = \frac{C}{T}$$

gdje je  $\lambda_{\max}$  valna duljina pri čemu je intenzitet zračenja maksimalan kada određeno tijelo ima temperaturu  $T$ .  $C$  je Wienova konstanta proporcionalnosti i iznosi  $C = 2.897 \cdot 10^{-3}$  m K [14].

Na slici 4.3 [15] imamo prikazan graf čija y – os predstavlja intenzitet zračenja (energija koju zrači jedinica površine u jedinici vremena), dok je na x – osi valna duljina. Takav nam je graf spektralne razdiobe značajan jer opisuje koliko energije u emitiranom toku odgovara određenoj frekvenciji vala, tj. valnoj duljini. Intenzitet, dakle, nije jednoliko raspoređen po svim frekvencijama. To bi zapravo bilo nemoguće zbog toga što bi u tom slučaju energija bila beskonačna jer se frekvencija proteže od 0 do  $+\infty$ , a znamo da je emitirana toplinska energija konačna [16].



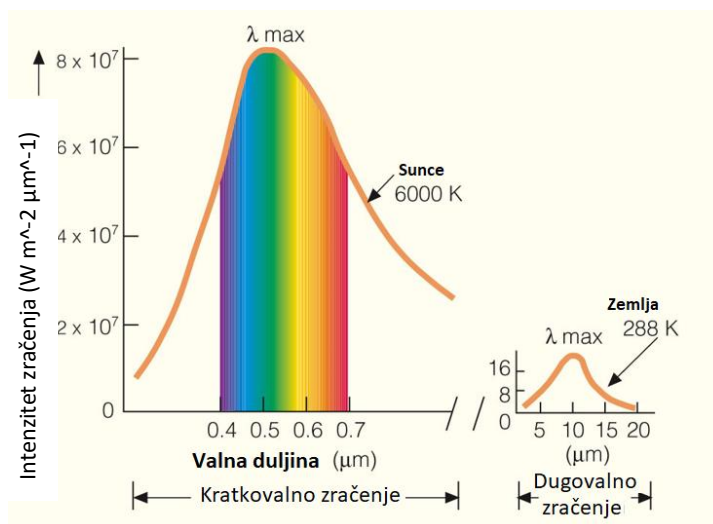
Slika 4.3 Ovisnost intenziteta zračenja crnog tijela o valnoj duljini za različite temperature (prema <https://study.com/learn/lesson/wiens-stefan-boltzmann-law-formulas-overview-uses-functions.html>)



Slika 4.4 Ovisnost spektralnog zračenja Sunca o valnoj duljini (prema <https://brilliant.org/practice/spectral-properties-sunlight/>)

S grafa (sl. 4.4) [17] možemo vidjeti da je maksimalni intenzitet Sunčeva zračenja na oko  $0,5 \mu\text{m}$  u području zelene boje vidljivog spektra.

Slika 4.5 [18] prikazuje spektar Sunčevog i Zemljinog zračenja. Očito je da je intenzitet Zemljinog zračenja puno manji od Sunčevog, što je zapravo i očekivano. Ovakve razlike u intenzitetu zračenja opisuje Stefan – Boltzmannov zakon.



Slika 4.5 Spektar zračenja Sunca i Zemlje (prema <https://atmos.washington.edu/~hakim/101/radiation/>)

Slovenski fizičar Jožef Štefan eksperimentalno je došao do toga da je intenzitet zračenja apsolutno crnog tijela proporcionalan sa četvrtom potencijom apsolutne temperature. Do takvih rezultata je Ludvig Boltzmann došao teorijskim putem zbog čega zakon nosi njihovo ime. Stefan – Boltzmannov zakon dan je sljedećim izrazom:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

$\sigma$  je oznaka za Stefan – Boltzmannovu konstantu i iznosi  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

Valja spomenuti još jedan zakon koji vrijedi za tijela koja zrače, a to je *Planckov zakon*. Do Planckove hipoteze se smatralo da energija s jednog tijela na drugo prelazi kontinuirano. Max Planck je pretpostavio da se crno tijelo sastoji od oscilatora koji diskontinuirano zrače energiju, tj. da oni mogu zračiti samo energiju koja je proporcionalna „paketiću“ odnosno kvantu energije  $hf$ .  $h$  je planckova konstanta i iznosi  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ . Izračenu energiju možemo zapisati izrazom

$$E = n \cdot h \cdot f$$

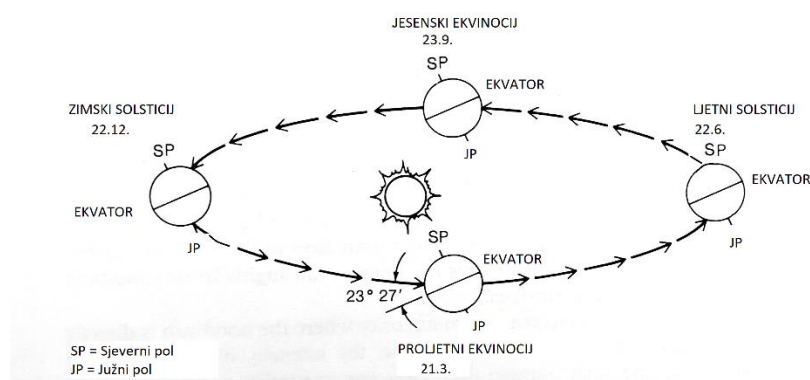
pri čemu je  $n$  prirodan broj.



#### 4.1.1 Sunčevo zračenje

Već smo govorili o vrsti Sunčeva zračenja, što ono može uzrokovati te na kakvim zakonima počiva. Dalje valja reći na koji način to zračenje dolazi do Zemlje i kako se ona zagrijava.

Energija koja dolazi od Sunca nije jednoliko raspoređena tijekom dana kao ni tijekom godine s obzirom na Zemljinu nagnutu os i eliptično gibanje oko Sunca (slika 4.6). Budući da se Zemlja okreće oko vlastite osi, dolazi do izmjene dana i noći. Duljina trajanja dana ovisi i o kruženju Zemlje oko Sunca zbog toga što se ravnina ekliptike (ravnina kojom Zemlja kruži oko Sunca [19]) ne poklapa sa Zemljinom ekvatorijalnom ravninom.

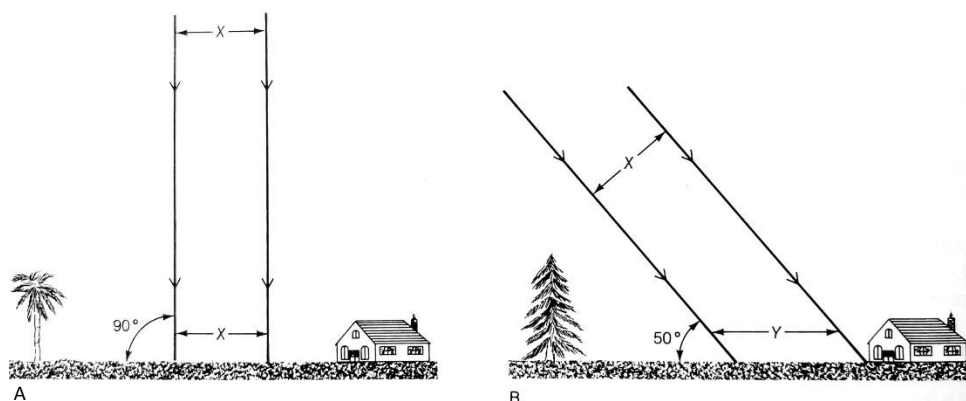


Slika 4.6 Kruženje Zemlje oko Sunca - prikaz nagnutosti Zemljine ekvatorijalne ravnine (Prema Moran & Morgan, 1989)

Zemljina prosječna udaljenost od Sunca je 149.68 milijuna kilometara. Putanja Zemlje je eliptična s jako malim ekscentricitetom ( $\epsilon = 0.017$ ) pa međusobna udaljenost godišnje varira ukupno oko 3.3%. Zemlja je najbliža Suncu početkom siječnja (najčešće oko 3. siječnja) kada je udaljenost približno 147 milijuna kilometara i taj položaj se naziva *perihel* (grč. peri:blizina + helios:Sunce [20]). Najudaljenija je početkom srpnja (najčešće oko 4. srpnja) kada je udaljenost oko 152 milijuna kilometara i taj položaj nazivamo *afel*. Iz toga možemo zaključiti da udaljenost Zemlje od Sunca ne objašnjava godišnja doba jer nam intuicija (krivo) govori da što je udaljenost do Sunca manja, temperature na Zemlji bi trebale biti više. Međutim, godišnja se doba pripisuju tome što je ekvatorijalna ravnina Zemlje nagnuta je u odnosu na ravninu ekliptike za  $23^{\circ}27'$ , to jest os rotacije Zemlje s ravninom ekliptike zatvara kut od  $66.33^{\circ}$ . Zato je sjeverna polutka kada je na njoj ljeto nagnuta prema

Suncu, što je popraćeno višim temperaturama, a zimi od Sunca kada su temperature na sjevernoj polutki znatno niže zbog manje količine energije koja dolazi sa Sunca. Nagnutost ekvatorijalne ravnine također dovodi i do različitog trajanja dana na različitim geografskim širinama [21].

Znamo iz iskustva da intenzitet Sunčeva zračenja ljeti i zimi nije isti. Također, znamo da su dani zimi kraći nego ljeti kao i da je podnevno Sunce intenzivnije nego izlazeće ili zalazeće. Evidentno je, dakle, da visina Sunca na obzoru utječe na intenzitet zračenja. Kad kažemo intenzitet zračenja, mislimo na količinu energije koja prolazi kroz jedinicu površine u jedinici vremena (gustoća toka). Slika ispod prikazuje situaciju kada se Sunce nalazi točno iznad nas (visina Sunca je  $90^\circ$ ) pri čemu su Sunčeve zrake koncentriranije nego u drugom primjeru gdje je Sunce niže na obzoru, tj. visina opada te je Sunčevo zračenje raspršeno po većoj površini na Zemlji i samim time je intenzitet zračenja slabiji [6].



Slika 4.7 Sunčevo zračenje pada na Zemljinu površinu A) okomito B) pod nekim kutom (prema Moran & Morgan, 1989)

Dok visina Sunca ima važnu ulogu u intenzitetu zračenja, duljina dana utječe na ukupnu količinu Sunčeve energije koja će biti primljena. Naravno, područja na Zemlji s više Sunčanih dana primit će više energije [6].

Sve navedene promjene – visina Sunca koja uzrokuje promjenu upadnog kuta zračenja na Zemlju, duljina dana, udaljenost Zemlje od Sunca su pravilne i samim time se Sunčevo zračenje u bilo koje doba i na bilo kojem mjestu na gornjoj granici atmosfere može izračunati. Standardna mjera je *sunčana* ili *solarna konstanta*. Solarna konstanta je količina energije koja na vrhu atmosfere u jedinici vremena padne na jediničnu površinu okomitu na

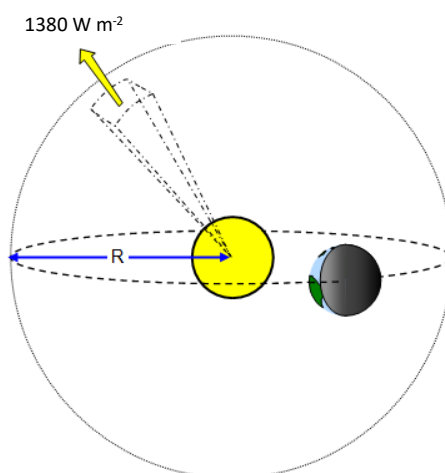
ulazno zračenje, pri srednjoj udaljenosti Sunce – Zemlja (slika 4.8) [2]. Numerička vrijednost solarne konstante mjerena je u više navrata sa sve većom točnosti kroz dvadeseto stoljeće, no samo ona mjerenja koja su napravljena s umjetnim satelitima su bila potpuno lišena interakcije s atmosferom. Trenutna vrijednost solarne konstante je  $S = 1.38 \text{ kW m}^{-2}$  s greškom od oko 1% [7].

Količina Sunčeve energije koja pada na gornju granicu atmosfere varira tijekom godine. Maksimum energije dolazi na površinu kada je Zemlja najbliža Suncu (perihel) a minimum kad je najudaljenija od Sunca (afel). U perihelu je Zemlja za 3.3% bliža Suncu nego u afelu. Intenzitet zračenja pada kao inverzni kvadrat udaljenosti koju prijeđe tako da planet u perihelu prima 6.7% više zračenja.

Gustoća snage (snaga izračena u svim smjerovima sa svakog kvadratnog metra fotosfere, tj. vidljive površine Sunca)  $E_s$  na površini Sunca određena je Stefan – Boltzmannovim zakonom zračenja i iznosi oko  $64 \text{ MW m}^{-2}$ . Kada to ekstraterestričko zračenje (Sunčevo zračenje koje pada na gornju granicu Zemljine atmosfere [22]) prođe kroz prazan prostor, gustoća izračene energije  $I_R$  se smanjuje s kvadratom udaljenosti od Sunca, tj. od izvora zračenja.  $E_s$  komponenta se ne mijenja. To nam predstavlja sljedeći izraz:

$$I_R = \frac{R_S^2}{R^2} E_S$$

gdje je  $E_s$  već navedena gustoća snage na površini Sunca,  $R_S$  polumjer Sunca ( $6.96 \cdot 10^8 \text{ m}$ ) i  $R$  udaljenost mjesta na kojem računamo gustoću zračenja od Sunca [21].



Slika 4.8 Intenzitet Sunčeva zračenja na udaljenosti Sunce – Zemlja  
([https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Astrophysics/text/Solar\\_energy/index.html](https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Astrophysics/text/Solar_energy/index.html))

Budući da Zemlja kruži oko Sunca s udaljenošću od otprilike 216 solarnih radijusa  $R_S$ , možemo zaključiti da je solarna iradijacija  $I_R$  na Zemlji tek  $(1/216)^2$  fotosferske emisije  $E_S$ , odnosno to nam daje već navedenu vrijednost od  $1.38 \text{ kW m}^{-2}$  [23]. Godišnji prosjek Sunčeve iradijacije je solarna konstanta  $S$  [7].

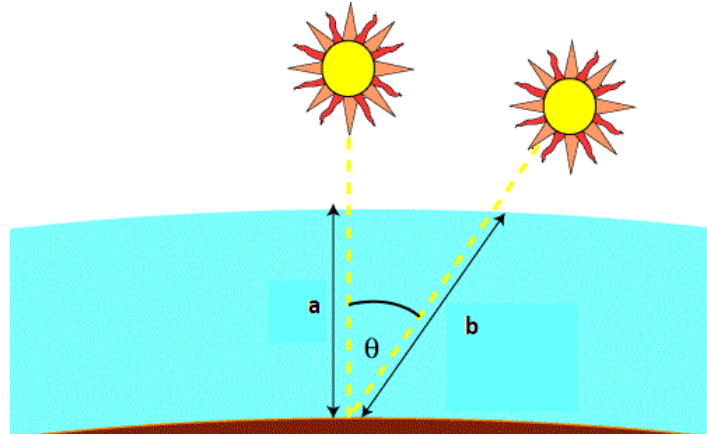
#### 4.1.2 Sunčevo zračenje i atmosfera

Dok se Sunčevo zračenje na gornjem dijelu atmosfere može točno izračunati, zračenje unutar atmosfere ili na samom tlu treba mjeriti. Zračenje kroz atmosferu slabi, a smjer mu više nije kakav je bio prije ulaska. Razlog tome su različiti sastojci u atmosferi s kojima zračenje interagira (aerosoli i plinovi koji čine atmosferu) kao i razni materijali koji prekrivaju površinu Zemlje. Oni mijenjaju zračenje apsorpcijom, raspršivanjem i odbijanjem [2]. Zračenje koje nije reflektirano ili raspršeno natrag u svemir, dopijeva na Zemljinu površinu gdje dolazi do daljnjih interakcija.

Apsorpcija ili upijanje Sunčevog zračenja događa se u visokim dijelovima atmosfere. U tim se dijelovima energijom najviših frekvencija, odnosno najmanjih valnih duljina ioniziraju atomi i molekule zraka. Za najveći dio apsorpcije u atmosferi zaslužni su kisik, ozon, vodena para i razni aerosoli. Primjerice, zagrijavanje gornjeg dijela stratosfere događa se zbog toga što kisik i ozon apsorbiraju ultraljubičasto zračenje. Oblaci su odlični refraktori ali veoma loši apsorberi Sunčeva zračenja. Oni obično apsorbiraju manje od 10% zračenja koje padne na vrh oblaka. Iznimka su izuzetno debeli oblaci poput kumulonimbusa koji mogu apsorbirati nešto više.

U poglavlju 4.1.1 spomenuli smo da visina Sunca na nebu utječe na intenzitet zračenja zbog drugačije raspodjele zračenja na jediničnu površinu. Atmosfera pak stvara dodatan efekt – kada se visina Sunca na obzoru smanjuje, put Sunčevih zraka kroz atmosferu se produljuje. Time zračenje sve više interagira s različitim česticama u atmosferi (atomi i molekule zraka, aerosoli i sl.) i samim time slabi dok apsorpcija biva sve veća [6]. Odnosno, apsorpcija je time veća što je masa zraka kroz koju prolazi veća. Možemo definirati *optičku masu zraka*  $m$  [24] koja je omjer stvarne duljine Sunčeva zračenja koje putuje kroz atmosferu i najkraćega mogućeg puta (slika 4.9). Optička masa zraka je funkcija upadnog kuta Sunčevih zraka i zapravo je najbitniji faktor koji određuje snagu upadnog zračenja. U

trenutku kada se Sunce nalazi iznad mjesta koje promatramo, tada je optička masa zraka najmanja [21].



Slika 4.9 Optička masa zraka (prema <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>)

$$m = \frac{b}{a} = \frac{1}{\cos \theta}$$

Pri čemu je:

$m$  koeficijent optičke mase zraka,

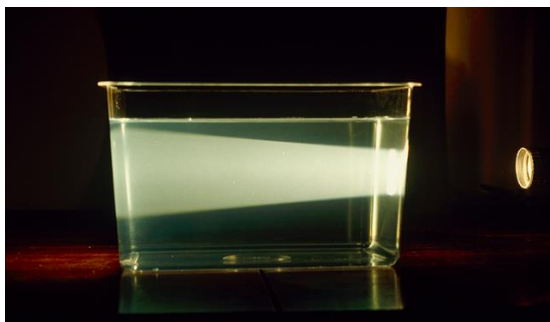
$a$  [m] visina atmosfere,

$b$  [m] put koji Sunčevo zračenje prijeđe kroz atmosferu,

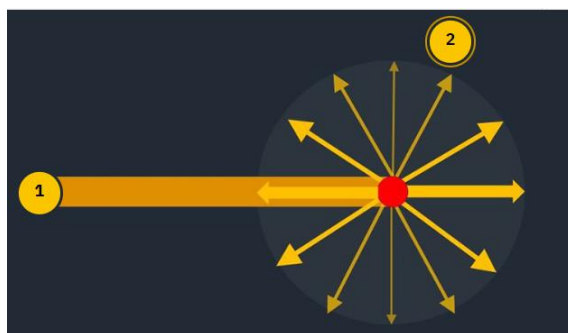
$\theta$  [°] zenitni kut Sunca

Raspršenje (difuzija) Sunčeva zračenja događa se na molekulama plinova u atmosferi i česticama koje lebde u zraku. Molekule i čestice energiju zračenja koja dolazi u jednom smjeru raspršuju dalje u svim smjerovima. To je razlog zašto svjetlost ne dobivamo sa Sunca iz samo jednog, već iz svih smjerova.

U četvrtom razredu srednje škole, kada se uči o svjetlosti kao EM valu, u nastavnoj jedinici *Raspršenje svjetlosti*, možemo napraviti demonstracijski pokus tako da u posudu s vodom dodamo mlijeko u prahu [25]. Tekućinu potom osvijetlimo i uočimo kako se svjetlost raspršila. Naime, svjetlost koja je prolazila kroz otopinu nailazila je na čestice otopljene tvari te se na njima odbijala u svim smjerovima (slika 4.10). Slika 4.11 prikazuje raspršenje svjetlosti na čestici. Upadni snop svjetlosti (označen brojem 1 na slici) nailazi na čestice otopljene tvari pri čemu se odbija u svim smjerovima (strelice označene brojem 2).



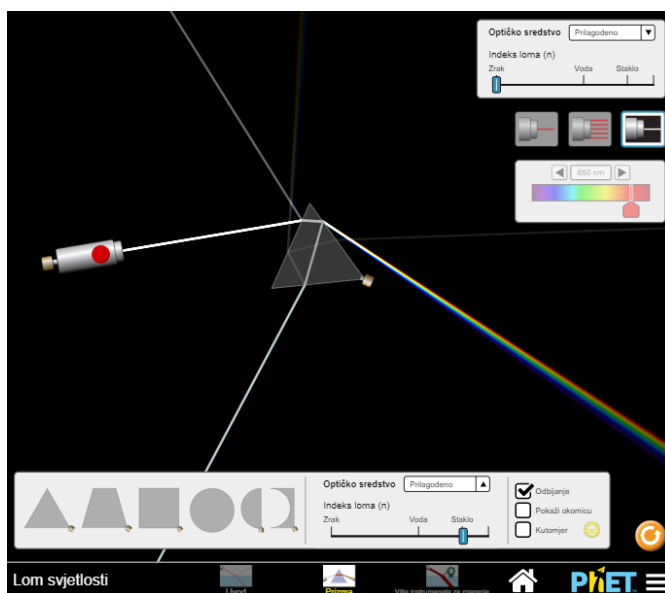
Slika 4.10 Raspršenje svjetlosti u vodi s dodatkom mlijeka u prahu (<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/rasprsenje-svjetlosti.html>)



Slika 4.11 Raspršenje svjetlosti na čestici (<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/rasprsenje-svjetlosti.html>)

Pokus o raspršenju zračenja u Zemljinoj atmosferi može poslužiti kao uvod za posebnu temu u razredu koja je učenike uvijek intrigirala, a to je pitanje zašto je nebo plavo?

Kao nastavak, možemo demonstrirati i eksperiment na prizmi (ukoliko imamo potrebnu opremu u učionici; a ako ne, možemo koristiti simulaciju za lom svjetlosti (slika 4.12) [26]) tako da učenici, uz prethodne pretpostavke, sami dođu do zaključka na pitanje od čega se sastoji bijela, vidljiva svjetlost. Također, time bi mogli vidjeti da se ne raspršuju sve valne duljine jednako.



Slika 4.12 Odbijanje bijele svjetlosti na staklenoj prizmi i razlaganje na boje (snimka zaslona aplikacije PhET)

Bijela se svjetlost, dakle, sastoji od cijelog spektra boja od crvene pa sve do ljubičaste. Pokusom možemo utvrditi da se ljubičasta koja ima najveću frekvenciju svjetlosti najviše otklanja, dok se crvena s najnižom frekvencijom otklanja od prizme najmanje. No, refrakcija je jedan način na koji se bijela svjetlost može razdijeliti na boje. Drugi je način već navedeno raspršenje. Raspršenje se događa kada sitne čestice u atmosferi interagiraju s valovima svjetlosti. Ukoliko je radijus čestica mnogo manji od valne duljine zračenja koje se raspršuje, tada količina raspršenja ovisi o valnoj duljini. To se događa u prirodi kada je vidljiva svjetlost raspršena na molekulama plina koje čine atmosferu. Lord Rayleigh je 1881. godine eksperimentom došao do toga da je raspršenje svjetlosti obrnuto proporcionalno četvrtoj potenciji valne duljine. Po njemu se takvo raspršenje elektromagnetskog zračenja naziva *Rayleighovo raspršenje*. Koliko će učinak raspršenja biti vidljiv ovisi o intenzitetu raspršene svjetlosti. Zakonitost glasi:

$$I = \frac{k}{\lambda^4}$$

pri čemu je

$I$  intenzitet raspršene svjetlosti,

$k$  faktor proporcionalnosti,

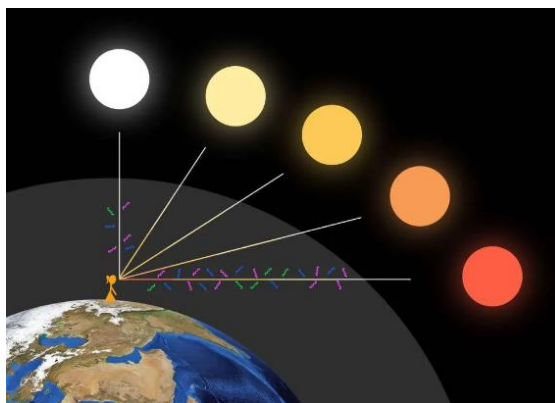
$\lambda$  valna duljina svjetlosti. [25]

Iz ove relacije možemo zaključiti da se ljubičasta svjetlost, koja ima najkraću valnu duljinu u vidljivom dijelu svjetla raspršuje više nego crvena koja ima najdulju. UV zračenje se, dakako, najviše raspršuje. Dalje se možemo pitati kako to da onda nebo ne vidimo kao ljubičasto nego plavo? Razlog tome je što je ljudsko oko više osjetljivo na plavu boju pri čemu nam se nebo čini više plavo nego što zaista jest. Za raspršenje plave boje na dnevnom nebu zaslužne su molekule kisika i dušika.

Danima kada je vrijeme oblačno, u atmosferi se nalazi veća količina aerosola, kristalića i kapljica koje su veće nego molekule plinova i stoga se na njima zračenje svih valnih duljina raspršuje podjednako, tako da raspršenu svjetlost vidimo kao bijelu ili bijelo – sivu. Isto tako, budući da su oblaci puni kapljica vode, svjetlost svih frekvencija se raspršuje pa ih vidimo kao bijele. Oblaci koji nose više vode su tamniji jer ona apsorbira velik dio svjetlosti zbog čega intenzitet raspršene svjetlosti opada [25].

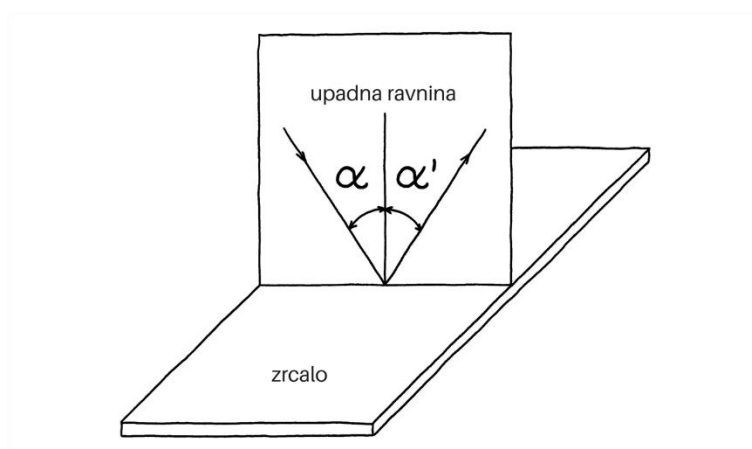
Sada možemo razumjeti zašto je zalazak Sunca crvenkaste boje. Kada je Sunce jako nisko na nebu, Sunčeve zrake moraju prijeći puno veći put kroz atmosferu nego danju. Ljubičasta i plava svjetlost se na putu skoro u potpunosti rasprše, dok do našeg oka uspiju doprijeti samo boje većih valnih duljina (crvena, narančasta, žuta) jer se one vrlo malo raspršuju na molekulama plinova. Što je Sunce na nebu niže, to ga vidimo crvenijim jer crvena boja u najvećoj mjeri može proći kroz atmosferu bez raspršenja (slika 4.13). Također, pri izlasku i zalasku Sunce možemo slobodno vidjeti golim okom upravo zbog toga što je intenzitet zračenja puno slabiji nego preko dana [27]. Naravno, promatramo li Zemlju iz svemira, ona će i dalje će biti plava.





Slika 4.13 Prikaz duljine Sunčevih zraka kroz atmosferu pri različitim visinama na nebu (<https://www.astroucionica.hr/koje-je-boje-sunce/>) Napomena: veličine zraka nisu u stvarnom omjeru.

Refleksija, odnosno odbijanje Sunčeva zračenja događa se na granici dvaju različitih sredstava. *Zakon refleksije* u fizici kaže da je upadni kut svjetlosnih zraka jednak kutu pri kojem su zrake reflektirane [28]. Refleksija svjetlosti na zrcalu prikazana je na slici 4.14.



Slika 4.14 Refleksija svjetlosti na zrcalu ([https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14440\\_Odbijanje\\_svjetlosti\\_-\\_ravno\\_zrcalo.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14440_Odbijanje_svjetlosti_-_ravno_zrcalo.html))

Sunčevo zračenje kada dolazi na Zemlju nailazi na plinove i čestice u atmosferi, oblake, vodene površine i tlo od kojih se dijelom i reflektira. Koliki će se dio tog zračenja odbiti natrag ovisi o svojstvima određene podloge. Koliko će zračenja biti odbijeno, govori nam albedo.

$$albedo = \frac{\text{odbijeno zračenje}}{\text{dolazno zračenje}}$$

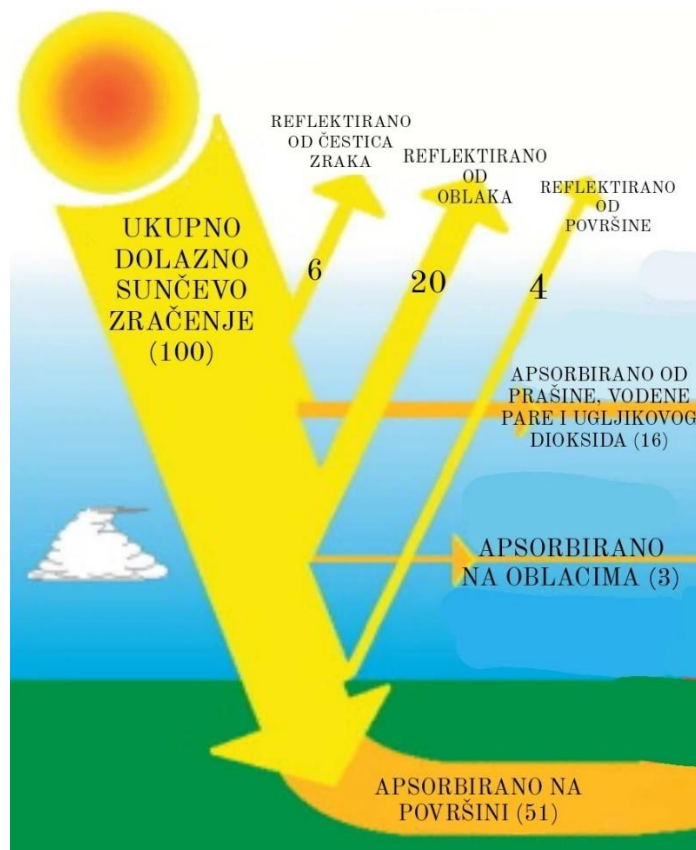
Albedo se iskazuje dijelovima jedinice ili u postotcima. Površine koje imaju velik albedo, najčešće su svjetlije boje, a tamnije površine malo odbijaju, odnosno mnogo upijaju, zbog čega imaju manji albedo. To je razlog zašto je ljeti bolje nositi svjetliju odjeću. Najviše se zračenja odbija o vrhove oblaka. Koliko će se odbiti ovisi o njihovoj debljini, tako da oblaci debljine od oko 50 metara odbijaju nekih 40%, dok oni debljine od oko 5 kilometara odbijaju čak do 80% zračenja. Također, jako visok albedo ima i svježi snijeg (tablica 2) [6].

Površina	Albedo (%)
Svježi snijeg	75 - 95
Oblaci (debeli)	60 - 90
Oblaci (tanki)	30 - 50
Led	30 - 40
Pijesak	15 - 45
Trava	10 - 30
Oranice	5 - 20
Voda	10 (srednje)
Šuma	3 - 10
<b>Zemlja &amp; Atmos.</b>	<b>30</b>

Tablica 2 Podaci o albedu na Zemlji (prema: Nastavni materijali za kolegij Fizika zemlje i atmosfere, PMF Zagreb [29])

Mjerenja koja su se obavljala korištenjem satelita pokazala su da je 30% kratkovalnog zračenja koja dolazi sa Sunca reflektirano natrag u svemir sa strane sustava Zemlja – atmosfera. Oko 6% zračenja koje uđe u atmosferu reflektirano je natrag od čestica zraka, 20% natrag reflektiraju oblaci dok Zemlja reflektira 4%. Tih 30% čini takozvani *planetarni albedo*.

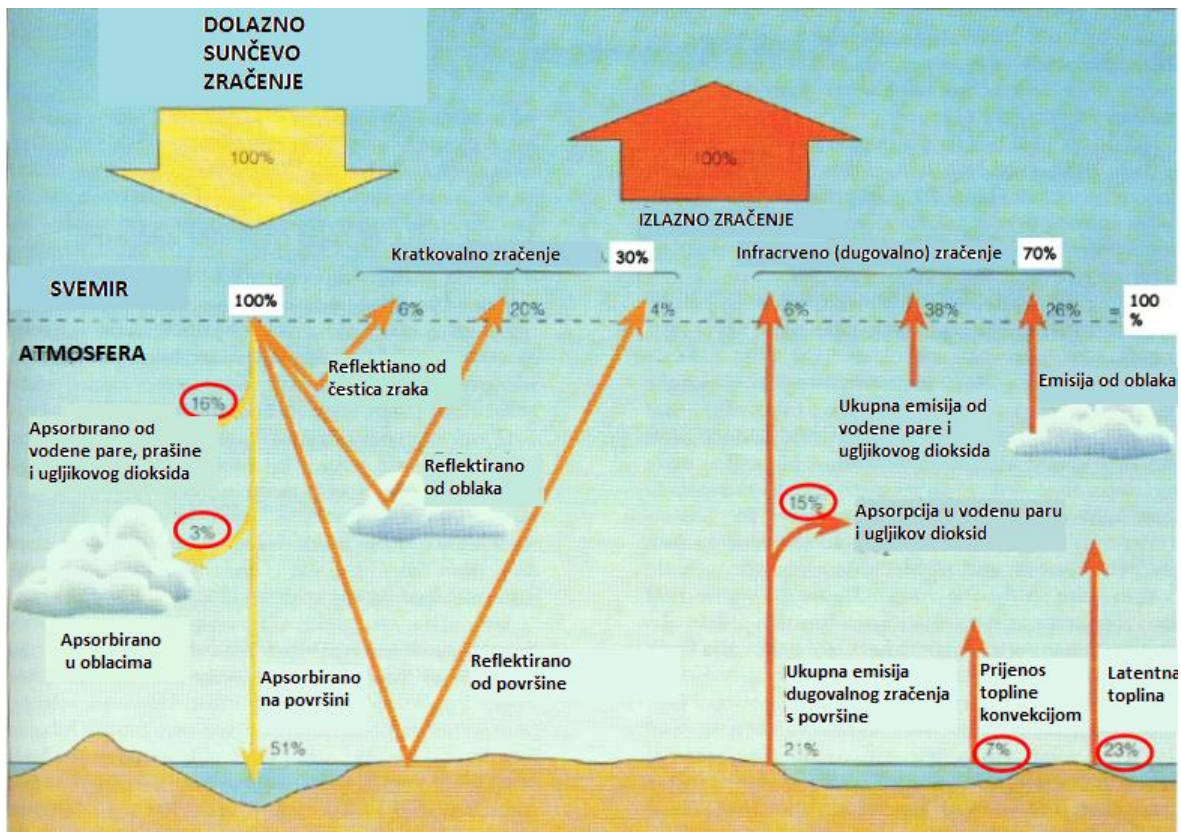
Od ostatka zračenja koje nije reflektirano natrag, 16% apsorbiraju vodena para i ugljikov dioksid dok oblaci apsorbiraju nekih 3%. Preostali dio zračenja (51%) apsorbiraju vode na Zemlji i tlo. Shematski prikaz nalazi se na slici 4.15.



Slika 4.15 Odbijanje i apsorpcija Sunčevog zračenja na Zemlji (prema <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/radiation-balance>)

Budući da su atmosfera i Zemljina površina na mnogo nižoj temperaturi od Sunca, zrače i mnogo manje energije – energije u području infracrvenog spektra iznad  $4 \mu\text{m}$  (dugovalno zračenje). Zemljina je površina glavni primatelj zračenja sa Sunca te konstantno zrači prema atmosferi koja dio vrati natrag u svemir. To nam govori da je Zemlja glavni faktor zagrijavanja atmosfere što se očituje u vertikalnom temperaturnom profilu troposfere. Zrak je najtopliji pri površini Zemlje i hladi se s porastom visine, tj. udaljavanjem od izvora topline.

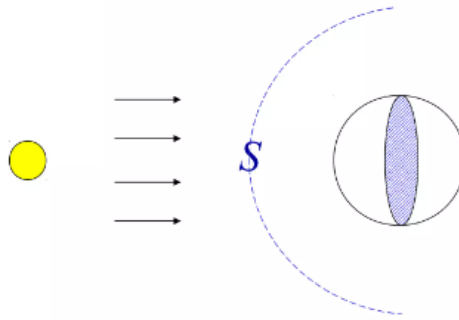
Za razliku od Sunčevog kratkovalnog zračenja, atmosfera upija mnogo više Zemljinog dugovalnog zračenja (ukupno 45%, od čega najveći dio – 15% apsorbiraju voda i ugljikov dioksid, 7% odlazi na konvekciju i 23% na trošenje latentne topline isparavanjem). Ostalih 6% Zemljinog dugovalnog zračenja ode natrag u svemir. Slika 4.16 prikazuje ravnotežu zračenja. Iz nje nam je lako zaključiti da se atmosfera više zagrijava odozdo (apsorbiranih 45 jedinica) nego odozgo (apsorbiranih 19 jedinica).



Slika 4.16 Ravnoteža zračenja (prema nastavnim materijalima kolegija Fizika zemlje i atmosfere, PMF Zagreb)

Atmosfera jedan dio dugovalnog zračenja zrači natrag prema Zemlji, odnosno dio topline se zadržava u sustavu Zemlja – atmosfera pa donji dio atmosfere i zbog toga ima veću temperaturu nego gornji, što omogućava ovakav život na Zemlji. To svojstvo troposfere pri kojemu propušta velik dio kratkovalnog i zadržava dio dugovalnog zračenja zovemo *efektom staklenika*. Da efekt staklenika ne postoji, danas bi temperatura na Zemlji bila za tridesetak stupnjeva niža [2].

U četvrtom razredu srednje škole, kada se uči o zračenju crnog tijela, u sklopu nastavne cjeline *Valno – čestična priroda svjetlost i tvari*, s učenicima u razredu možemo napraviti interaktivan izvod s određenim pojednostavljenjima tako da u koracima dođemo do temperature na Zemlji kada ne bi imala atmosferu. Za početak, odredili bismo koliko Sunčeva zračenja prosječno padne na Zemlju po jedinici površine.



Slika 4.17 Energija koju Zemlja prima od Sunca (prema nastavnim materijalima iz kolegija Fizika zemlje i atmosfere, PMF Zagreb)

Ukupnu Zemljinu površinu približno možemo računati kao površinu sfere:  $P_Z = 4R_Z^2\pi$ ;

Površina Zemlje koja biva osunčana u danom trenutku jest površina kruga:  $P_K = R_Z^2\pi$

pri čemu je  $R_Z$  radijus Zemlje.

Protok energije od Sunca je konstantan i njegova vrijednost je solarna konstanta,  $S=1380\text{Wm}^{-2}$  (slika 4.17).

Po jedinici površine prosječno Zemlje padne  $\frac{S \cdot R_Z^2\pi}{4R_Z^2\pi} = \frac{S}{4}$

Energija u sustavu atmosfera – Zemlja je u stalnoj ravnoteži s dolaznim Sunčevim zračenjem.

Zemlja reflektira  $\frac{S}{4} \cdot \alpha$  gdje je  $\alpha = 0.3$  planetarni albedo.

Prema tome, ono što bi apsorbirala računali bismo kao  $\frac{S}{4} \cdot (1 - \alpha)$ .

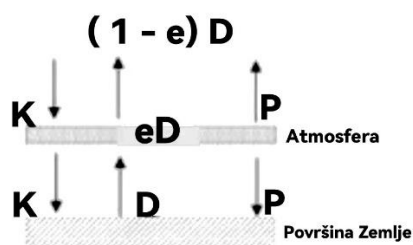
Zemlja zagrijana do temperature  $T$  emitira prema Stefan – Boltzmannovom zakonu zračenja  $E = \sigma \cdot T^4$ .

Ravnoteža kaže da je *apsorbirano* = *emitirano*, odnosno  $S/4 \cdot (1 - \alpha) = \sigma \cdot T^4$

Iz toga dobivamo da bi temperatura na Zemlji bez atmosfere bila  $T \approx - 18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Međutim, znamo da je prosječna temperatura na Zemlji ipak nešto veća. Atmosfera se ponaša kao polupropusni sloj, sastavljen od idealnih plinova i vodene pare, između zračenja koje dolazi sa Sunca i onog koje emitira Zemljina površina.

Zračenje koje dolazi sa Sunca je uglavnom kratkovalno, za koje je atmosfera gotovo u potpunosti propusna. Kratkovalno zračenje koje dolazi do Zemljine površine Zemlja djelomično reflektira, a djelomično upija. Kada Zemlja upije kratkovalno zračenje, povećava se unutarnja energija i temperatura Zemlje. Odnosno, Zemlja se zagrije, a zračenje koje emitira, zbog temperature na koju se zagrije (značajno manja od temperature Sunca) odgovara dugovalnom infracrvenom dijelu spektra. Atmosfera, točnije, staklenički plinovi u atmosferi, uglavnom ne propuštaju valne duljine iz tog dijela spektra, već upijaju dugovalno zračenje. Jednako zračenje koje su apsorbirali moraju i emitirati, a emitiraju ga u svim smjerovima. Posljedica toga je da dio zračenja odlazi u svemir, a dio se vraća na Zemlju. Opisani proces zove se efekt staklenika te zahvaljujući njemu temperatura na Zemlji iznosi oko 15 °C. Efekt staklenika pojednostavljeno je prikazan na slici 4.18.  $K$  označava kratkovalno zračenje,  $D$  dugovalno,  $P$  zračenje koje emitira atmosfera,  $eD$  dio dugovalnog zračenja kojeg atmosfera apsorbira sa Zemlje, a  $(1-e)D$  dio dugovalnog zračenja kojeg atmosfera propusti.



Slika 4.18 Shematski prikaz zračenja u sustavu Zemlja – atmosfera [29]

Na shemi sa slike 4.18  $e$  predstavlja *emisivnost*. *Emisivnost* je veličina koja govori koliko dobro neko tijelo emitira zračenje. Drugim riječima, to bi bio omjer energije zračenja koju emitira realno tijelo (sivo tijelo) i energije zračenja koju bi emitiralo crno tijelo na istoj temperaturi. Jednadžbe sustava prikazanog na slici 4.18 izgledaju ovako:

$$K = (1 - e)D + P \text{ na vrhu atmosfere.}$$

$$\text{Atmosfera upije } eD \text{ i ukupno zrači } 2P - \text{jedan prema gore i jedan prema dolje: } eD = 2P.$$



Na Zemlji je  $D = K + P$ .

Eliminiranjem zračenja atmosfere  $P$  dobijemo:

$$K = \left(1 - \frac{e}{2}\right)D$$

S obzirom da je Zemljino dugovalno zračenje  $D = \sigma T^4$ , a dolazno kratkovalno  $K = (1 - \alpha)\frac{S}{4}$ , dobivamo sljedeći izraz za površinsku temperaturu Zemlje:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha)S}{2(2 - e)\sigma}}$$

Za početak pojednostavimo model staklenika i uzmimo da je emisivnost atmosfere jednaka 1.

Uz albedo  $\alpha = 0.3$ , površinska temperatura Zemlje iznosila bi 303.8 K ili 30.7 °C.

Vidimo da je dobivena prosječna temperatura površine Zemlje mnogo veća nego što je u stvarnosti. To znači da je faktor emisivnosti atmosfere manji od 1. Da bismo odredili faktor emisivnosti atmosfere, krenut ćemo od činjenice da je opažena temperatura u prizemnom sloju atmosfere oko 15 °C tj. oko 288 K. Koristeći gornji izraz, možemo izračunati efektivnu emisivnost atmosfere kao:

$$e = 2 - \frac{(1 - \alpha)S}{2\sigma T^4} = 0.76$$

#### 4.1.3 Prijenos topline na Zemlji

Količina Sunčevog zračenja na Zemlji nije svugdje jednako rasprostranjena. Prema tome i temperature na Zemlji variraju. Promjenu temperature po jedinici udaljenosti u fizici nazivamo *temperaturni gradijent*. Horizontalni temperaturni gradijent očituje se u promjeni temperature od vrućeg ekvatora prema hladnim polovima. Vertikalni temperaturni gradijent zapažamo kao sniženje temperature od Zemljine površine do jako hladne tropopauze. Zakon termodinamike nalaže da toplina uvijek prelazi s tijela više temperature na tijelo niže temperature, pa tako zbog temperaturnih gradijenata u sustavu Zemlja – atmosfera imamo tri načina prijenosa topline: kondukcija (vođenje), konvekcija (strujanje)\* i radijacija (zračenje) [6].

Zemljino tlo grije se i hladi kondukcijom, odnosno vođenjem topline. Do kondukcije dolazi kada su tijela u direktnom fizičkom kontaktu. Tada se kinetička energija prenosi s jedne molekule na drugu međusobnim sudarima. Kondukcija je svojstvena tvarima koje se nalaze u čvrstom agregatnom stanju jer su tekućine i plinovi loši vodiči topline. Tako kod suhog tla koje u sebi ima dosta zraka, vođenje topline će biti slabije nego kod zbijenog tla koji među česticama nema zraka ili kojemu je međuprostor ispunjen vodom. Ako promatramo svježi snijeg, on ima izrazito nisku vodljivost upravo iz razloga što među pahuljama ima jako puno zraka. Deblji sloj snijega može usporiti ili spriječiti smrzavanje tla ispod njega unatoč tome što temperatura zraka pada ispod nule. Svježi snijeg ima i vrlo visok albedo zbog čega se njegova površina danju slabo zagrijava, pa tako tlo koje se nalazi ispod sloja snijega ostaje toplo [2]. Tablica 3 prikazuje koeficijente toplinske vodljivosti kod pojedinih sredstava.

---

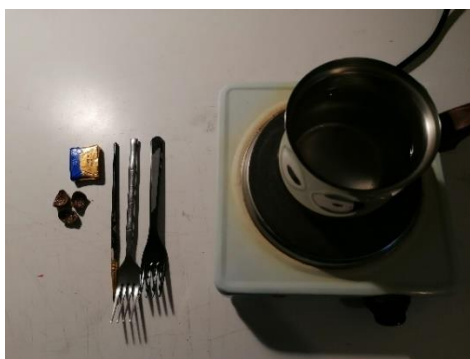
\* Napomena: u nastavi fizike i u meteorologiji pojam *konvekcija* ima različito značenje. U nastavi se kao sinonim navodi *strujanje* [40] i označava prijenos topline u fluidima (tekućinama i plinovima) zbog promjene njihove gustoće zagrijavanjem. Kao primjeri se najčešće navode zagrijavanje vode na plameniku i sustav centralnog grijanja u kućanstvima. U meteorologiji je pak za konvekciju sinonim *miješanje* (npr. zagrijavanje vode na plameniku ili u fizici atmosfere grijanje i hlađenje zraka iznad tla). Isto tako, kada se u meteorologiji koristi pojam *strujanje*, misli se na *advekciju* koja opisuje horizontalni prijenos topline kroz atmosferu (prijenos zračnih masa s jednog mjesta na drugo – vjetrovi) [6]. U ovom radu koristit ćemo se školskom terminologijom.



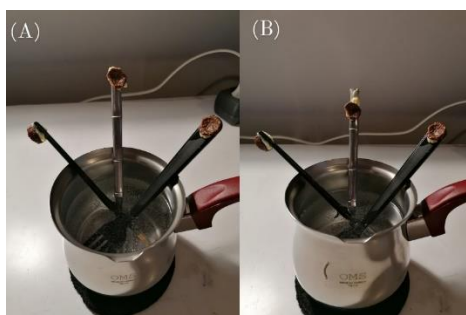
Sredstvo	Koeficijent vodljivosti ( $\text{J cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
zrak	0,000 25
voda (0 °C)	0,005 9
led (-10 °C)	0,023 0
rahli snijeg	0,000 75
vrlo zbijen snijeg	0,022 6
suho tlo	0,001 67 do 0,003 35
vlažno tlo	0,012 6 do 0,033 5
granit	0,027 2
željezo	0,67

Tablica 3 Koeficijenti toplinske vodljivosti (Penzar i sur., 1996)

U sedmom razredu osnovne škole, u sklopu nastavne cjeline o unutarnjoj energiji i prijelazu topline, možemo napraviti učenički pokus kojim bismo ispitali vođenje topline kod različitih materijala. Kao pribor bi nam poslužilo nekoliko štapića jednakih dimenzija koji su napravljeni od različitih materijala (npr. bakar, aluminij i plastika) prikazanih na slici 4.19. Na vrhove svakog od štapića margarinom ili maslacem zalijepimo tjesteninu ili bilo kakve manje predmete i stavimo ih u istu praznu čašu. U čašu potom ulijemo vruću vodu (slika 4.20). Zatim promatramo što se događa s tjesteninom i tražimo od učenika da objasne svoja opažanja. (Ukoliko nemamo takve štapiće, možemo koristiti metalnu, plastičnu i drvenu žlicu)



Slika 4.19 Pribor: izvor topline, posuda s vodom, maslac, žitarice, metalna i plastična žlica, drveni kist

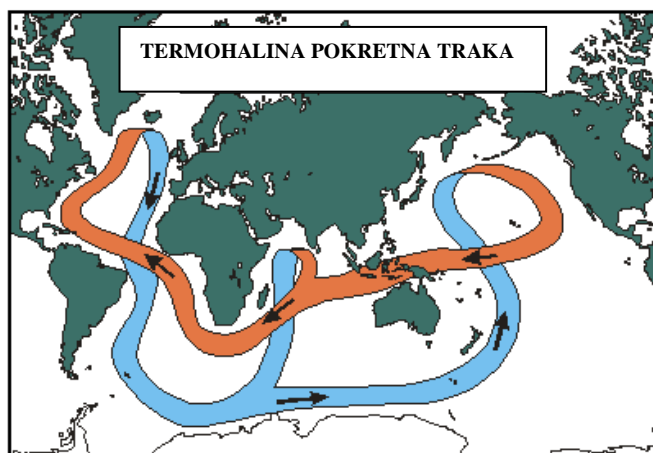


Slika 4.20 (A) Početni trenutak kad smo tek žitarice „zalijepili“ maslacem i stavili u vrelu vodu. (B) Žitarica na metalnom štapiću se nakon određenog vremena počela spuštati.

Žitarica na metalnom štapiću, tj. žlici se najbrže spustila. Točnije spustila se jedina. Iz toga možemo zaključiti da od navedenih materijala ima najveći koeficijent toplinske vodljivosti, tj. da je dobar vodič topline dok su plastika i drvo dobri izolatori. (*Ideja preuzeta s kolegija Praktikum iz eksperimentalne nastave fizike, PMF Zagreb*)

Kada pričamo o zagrijavanju i hlađenju voda na Zemlji, primarno o moru, važno je za reći da ono ima velik toplinski kapacitet, da je djelomično prozirno i da se giba. Velik toplinski kapacitet znači da se sporije grije i sporije hladi u odnosu na tlo. Zbog te spore promjene temperature, more često nazivamo i rezervoarom topline. Također je i bolji vodič topline nego tlo te djelomično upija elektromagnetsko zračenje. To se može zaključiti i iz činjenice da pod morem možemo na nekim mjestima vidjeti i do 20 metara dubine. Najvažniji način prijenosa topline kod vode jest *konvekcija* ili strujanje. Do konvekcije dolazi kada molekule mijenjaju svoj položaj uslijed toplinske neravnoteže [14]. Strujanje nastupa kada se gušća tekućina nalazi iznad rjeđe pa zbog djelovanja sile teže pada i miješa s rjeđom. Također, konvekcija može biti posljedica valova ili horizontalnih struja.

Najbolji primjer konvekcije su oceanske struje. Prirodni fenomen najpoznatiji pod nazivom *ocean conveyor belt* ili pod hrvatskom inačicom *termohalina pokretna traka*, tj. *termohalina cirkulacija* opisuje morska strujanja četiri oceana (slika 4.21). Takvi procesi obuhvaćaju dva efekta – prvi, koji se krije iza riječi *termo-* koja označava temperaturu, govori o tome da porastom temperature, moru gustoća opada. *-halina* predstavlja salinitet. Kada salinitet mora raste, tada raste i njegova gustoća.



Slika 4.21 Termohalina pokretna traka (prema [http://skola.gfz.hr/d5\\_3.htm](http://skola.gfz.hr/d5_3.htm) [30])

Morska voda najtoplija je u području ekvatora, odnosno na niskim geografskim širinama gdje je zračenje sa Sunca naj snažnije. Zbog tog zagrijavanja more na površini postaje slanije zbog isparavanja velike količine tekućine, pri čemu sol ostaje u moru. Tako je more na površini, na području ekvatora, toplije i slanije, dok je u dubini hladnije i manje slano. Dio tople vode biva nošen vjetrovima prema polovima (primjerice topla Gofska struja koja ima smjer od Meksičkog zaljeva prema sjeveru Europe) gdje je hladni zrak hladi. Na tim većim geografskim širinama voda postaje gušća kako postaje hladnija i samim time tone u dublje slojeve. Tome također pridonosi i stvaranje ledenjaka u hladnim krajevima. Naime, čista se voda kristalizira i nastaje led, dok sol ostaje u moru zbog čega voda postaje slanija i gušća. Sa Sjevera Europe preko Atlantika putuje hladna i slana duboka voda. Dolazi do Antarktike odakle je Antarktička cirkumpolarna struja nosi sve do toplijih oceana, Indijskog i Tihog. Tu se, na niskim geografskim širinama, hladna voda počinje grijati i uzdizati gdje se ponovo spaja s toplom vodenom masom [7].

Termohalina cirkulacija je iznimno važna za život morskih organizama. Kada se hladna voda iz dubina uzdiže na površinu, ona nosi hranjive tvari mikroorganizmima koji žive na manjim dubinama i samim time se stvara hranidbeni lanac u moru. Ovaj je proces bitan je i u samoj regulaciji klime jer se toplina prenosi s toplijih dijelova Zemlje ka hladnima.

Konvekciju i termohalinu cirkulaciju učenicima bismo najbolje mogli približiti preko pokusa. To bismo prezentirali, kako je već navedeno, u sedmom razredu pod nastavnom jedinicom *Prijelaz topline*. Učenike možemo podijeliti u nekoliko grupa gdje će sami izvoditi pokus i donositi zaključke. Budući da se u školi uči samo ovisnost gustoće i temperature, prvi i treći dio pokusa koji se odnose na slanost mogao bi poslužiti kao dodatan sadržaj za učenike koji žele naučiti više. U razredu bi, dakle, izvodili drugi dio dok bi ostatak bio dobar sadržaj za dodatnu nastavu. Eksperiment bi se sastojao od tri dijela. Prvim se ispituje gustoća vode u odnosu na slanost, drugim gustoća u odnosu na temperaturu dok bi treći dio pokusa to dvoje povezao i prikazao kako zapravo funkcionira termohalina cirkulacija.

*Konvekcija – prvi dio pokusa: ispitivanje gustoće vode ovisno o salinitetu*

Opis pokusa: prozirnu plastičnu posudu napunimo vodom iz slavine. Unutra stavimo dvije zatvorene manje boce s vodom. U jednoj se nalazi prirodna voda u koju smo dodali malo crvene prehrambene boje. U drugoj se nalazi slana voda u koju smo dodali malo plave

prehrambene boje (slika 4.22). Učenici iznose svoje pretpostavke pred razredom. Te dvije boce otvorimo (slika 4.23) pri čemu učenici bilježe svoja zapažanja.



*Slika 4.22 Pribor: posuda s vodom, prehrambene boje, žlica, sol, staklene bočice s vodom*



*Slika 4.23 Slana voda obojana u plavo ide na dno, dok obična voda ostaje na istoj visini ili ide na vrh*

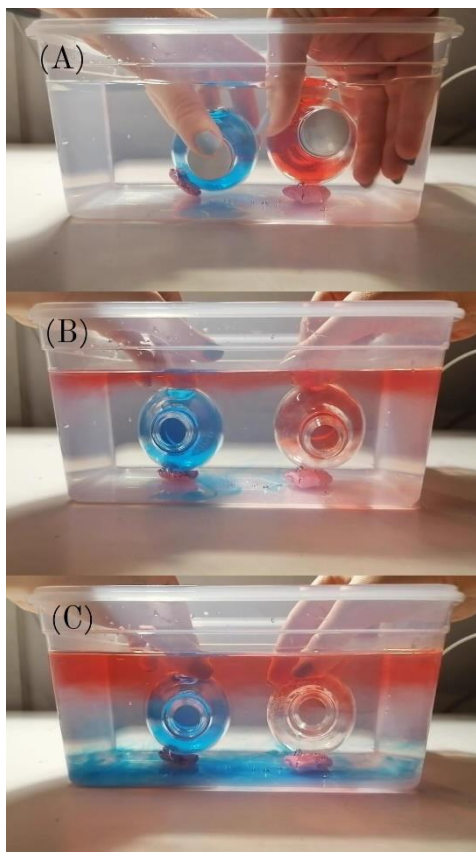
Možemo doći do zaključka da je slana voda gušća.

*Konvekcija – drugi dio pokusa: ispitivanje gustoće vode ovisno o temperaturi*

Opis pokusa: Veliku plastičnu posudu napunimo vodom iz slavine. U dvije staklene bočice pripremimo vruću i hladnu vodu (najbolje da hladna neko vrijeme bude u hladnjaku, a vruću nastavnik zagrije u kuhu ili nad plamenikom). Vruću vodu obojimo crvenom prehrambenom bojom a hladnu plavom. Učenici iznose pretpostavke o tome što će se dogoditi kada otvorimo čepove bočica koje držimo pod vodom. Izvodimo pokus te učenici

bilježe zapažanja. Plavo obojena voda tone odmah na dno posude, dok se crvena diže prema površini. Također, crvena se brže širi zbog toga što je toplija pa se njene čestice gibaju brže zbog veće kinetičke energije. Cijeli proces prikazan je na slici 4.24.

Ovim pokusom pokazujemo da je topla voda ima manju gustoću od hladne.



Slika 4.24 (A) Stavljamo začepljene bočice s hladnom i toplom vodom u posudu s vodom (B) Otvorili smo čepove bočica (C) Topla voda se uzdiže, dok se hladna spušta

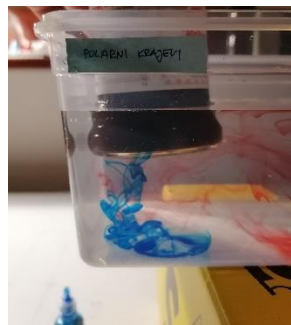
### *Konvekcija – treći dio pokusa: termohalina cirkulacija*

Opis pokusa: u veliku plastičnu posudu ulijemo slanu vodu koja će predstavljati oceane (u učionici bi bilo sigurnije koristiti staklenu posudu otpornu na više temperature). Posuda s vodom mora biti malo odignuta kako bi ispod nje mogao stati izvor topline, u našem slučaju mali prijenosni električni štednjak. U lijevom gornjem kutu nalijepimo papirić gdje piše *polarni krajevi*, a u gornjem desnom *ekvator*. U desnu stranu posude kapnemo nekoliko kapi crvene prehrambene boje. Izvor topline ispod posude predstavlja zagrijavanje sa Sunca. Možemo primijetiti kako se crvena boja počinje uzdizati (slika 4.25). Dakle, topla je voda rjeđa i ide na površinu. Nakon toga u gornji lijevi kut stavimo nešto jako hladno (najbolje bi

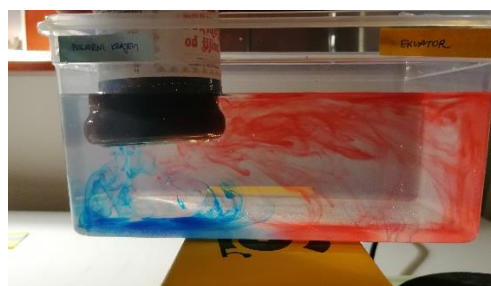
bilo veliku kocku leda) što nam predstavlja hladne polarne krajeve. Mi smo koristili teglu iz hladnjaka. Nakon toga, pokraj leda kapnemo nekoliko kapi plave prehrambene boje. Plava boja jako naglo i duboko pada na dno akvarija (slika 4.26) te ide prema desnom kraju, prema „ekvatoru“ (slika 4.27). Na ekvatoru se ta plava boja uzdiže jer se grije i postaje rjeđa (slika 4.28).



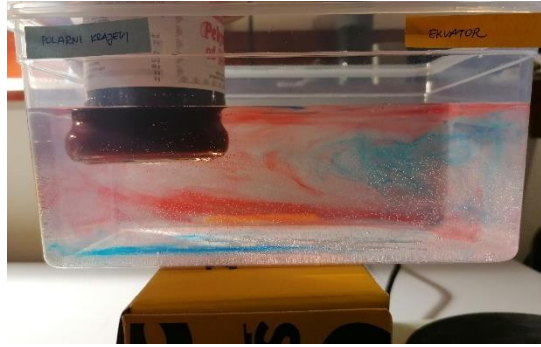
*Slika 4.25 Voda se u donjem desnom dijelu posude zagrijava od prijenosnog štednjaka što vidimo po uzdizanju crvene boje koju smo kapnuli*



*Slika 4.26 Voda se u gornjem lijevom kutu posude hladi od hladne tegle što vidimo po naglom padanju plave boje koju smo kapnuli*



*Slika 4.27 Hladna voda ide prema „ekvatoru“ a topla prema „polovima“*



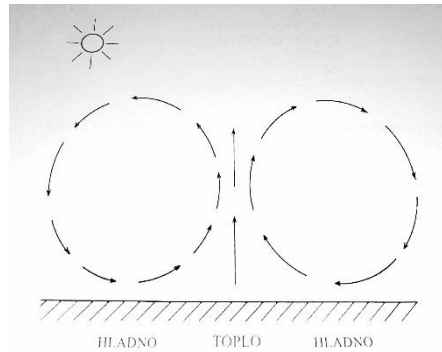
Slika 4.28 Prijašnja topla voda (obojena u crveno) se na „polovima“ hladi i spušta, dok se prijašnja topla voda (obojena plavo) na „ekvatoru“ uzdiže

Budući da smo u prva dva dijela pokusa donijeli zaključke o ovisnosti gustoće i saliniteta, odnosno temperature, treći dio je služio da učenici uz te zaključke vide kako zaista funkcionira termohalina cirkulacija u prirodi.

Još nam preostaje objasniti na koji se način grije i hladi zrak iznad tla. Već smo naveli da se gornji dio atmosfere zagrijava upijanjem Sunčevog kratkovalnog zračenja, a da se donji dio atmosfere grije dugovalnim Zemljinim zračenjem. U nastavku ćemo vidjeti da zagrijavanju donjeg dijela atmosfere doprinose još neki parametri. Najniži sloj zraka, onaj prizemni koji ima debljinu od nekoliko centimetara, razmjenjuje toplinu s tlom iako je loš vodič topline. Kada Sunčevo zračenje zagrije podlogu, zagrije se i prizemni sloj zraka. Kako mu se temperatura povećava, samim time se i širi te postaje rjeđi pri čemu se počne uzdizati. Atmosfera pri standardnim uvjetima ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $101325\text{ Pa}$ ) ima vertikalni gradijent temperature od  $\partial T/\partial z = -6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  na svakih kilometar visine. Za lakše predočavanje, kada visina naraste za sto metara, temperatura se smanji za  $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$  [31].

Na mjesto ugrijanog zraka s tla dolazi hladniji zrak iz viših slojeva. On se pri tlu također grije i uzdiže te dolazi do vertikalnog miješanja zraka, to jest do *toplinske konvekcije* (slika 4.29).





*Slika 4.29 Toplinska konvekcija zraka (Penzar i sur., 1996)*

Promjer vrtloga može biti od par centimetara do nekoliko stotina metara, što ovisi o atmosferskoj stabilnosti. Vjetar miješa zrak s tla sa zrakom koji dolazi sa visine, iz troposfere. Ako vjetra nema ili ako je slab, tada danju (najizraženije je ljeti) uz površinu nastaje sloj toploga zraka, a noću hladnoga.

U višim slojevima atmosfere toplina se najviše dobiva Sunčevim zračenjem (stratosfera), dok se troposfera grije dugovalnim Zemljinim zračenjem, ali i prijenosom od podloge i oslobođenom latentnom toplinom. Naime, iznad velikih vodenih površina, vlažnog tla i sl. vodena para odlazi u troposferu. Kako voda isparava, zraku se oduzima određena količina topline. Vodena para dolazi u više slojeve i pri tom vraća u tekuće ili čvrsto stanje (kapljice i kristalići leda) pri čemu se latentna toplina oslobađa i grije okolni zrak.

U sedmom razredu osnovne škole, također u okviru jedinice o prijelazu topline možemo napraviti dva jednostavna pokusa kojima bismo pokazali da je topliji zrak lakši od hladnog.

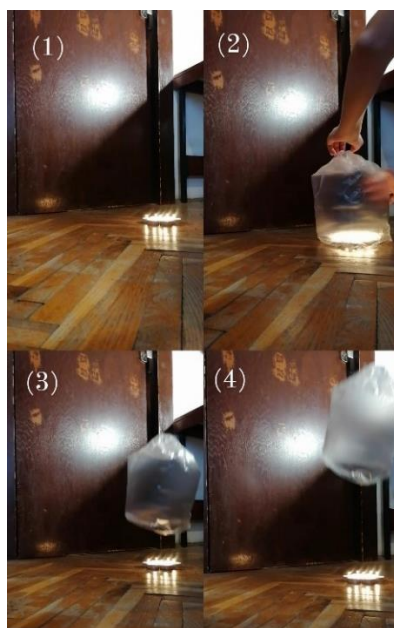
- (1) Za pokus su nam potrebni: vreća za smeće (tanka), nekoliko svjećica i upaljač (slika 4.30).

Opis pokusa: nekoliko svjećica stavimo jednu do druge na pod te ih upalimo. Iznad upaljenih svijeća držimo vreću naopačke dok se zrak unutra ne zagrije. Nakon nekog vremena vreću pustimo pri čemu ona odleti u vis (slika 4.31). Ovaj pokus zapravo opisuje princip rada balona za letenje.





Slika 4.30 Pribor



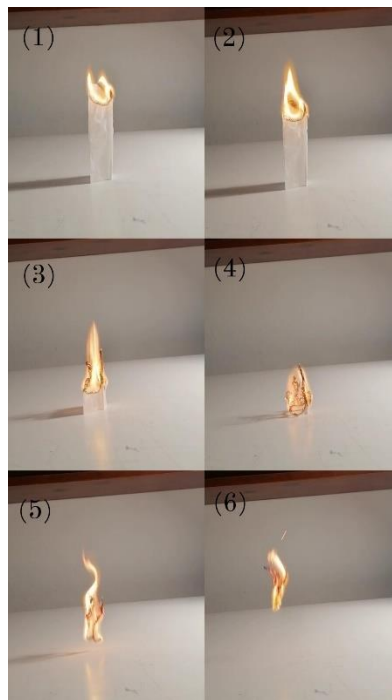
Slika 4.31 (1) Zapalimo svjećice koje se nalaze na podu (2) Stavljamo vrećicu od smeća iznad svjećica, s otvorom prema dolje (3) Zrak u vrećici se dovoljno zagrijao da se počne uzdizati (4) Vrećica je „poletjela“

(2) Za drugi pokus je potrebna vrećica čaja i upaljač (slika 4.32).

Opis pokusa: odrežemo vrh vrećice čaja čime uklonimo spajalicu i konac i potom je ispraznimo. Vrećicu zatim otklopimo i prstima proširimo središnji dio kako bismo dobili šuplji cilindar. Vrećicu postavimo uspravno, s otvorom prema gore i zapalimo njen vrh. Zrak unutar vrećice čaja se zagrijava te podiže dio vrećice koji nije izgorio uvis (slika 4.33). Ono što je česta greška pri izvođenju ovog pokusa jest da se vrećica izreže npr. na pola visine pri čemu se zrak unutar vrećice ne uspije dovoljno ugrijati zbog čega ona ne poleti.



Slika 4.32 Pribor



Slika 4.33 Koraci (1) - (6) prikazuju postupno gorenje vrećice čaja te naposljetku njeno uzdizanje

## 4.2 Voda u atmosferi

Meteorološki elementi kojima ćemo se dalje baviti u izravnoj su vezi s vodom u prirodi. To su tlak, vlaga, oblaci i oborine. Proces koji objedinjuje sve navedene elemente je *hidrološki ciklus*, odnosno kruženje vode na Zemlji i on omogućuje održavanje života. Voda u prirodi neprestano cirkulira između kopna, oceana i atmosfere pri čemu mijenja svoj oblik i nikada ne nestaje [32]. U atmosferi, voda se pojavljuje u sva tri agregatna stanja: kao vodena para, kao sitni kristalici leda te vodene kapljice. Na Zemlji, najveći rezervoar vode

jesu oceani koji čine 97.2% ukupne vode na planetu. Od ostatka vode najviše se nalazi u obliku leda na Antarktici i Grenlandu [6].

Rezervoar	Postotak ukupne vode na Zemlji [%]
Oceani	97.2
Ledenjaci	2.15
Podzemne vode	0.62
Jezera (slatkovodna)	0.009
Unutrašnja mora i slana jezera	0.008
Voda u tlu	0.005
Atmosfera	0.001
Rijeke i potoci	0.0001

*Tablica 4 Postotci ukupne vode na Zemlji u različitim rezervoarima (Moran & Morgan, 1989)*

Iz tablice 4 možemo vidjeti da atmosfera sadrži tek 0.001% ukupne vode na Zemlji i upravo je taj dio u konstantnom kretanju. Ono što se ukratko događa pri hidrološkom ciklusu jest da voda sa Zemlje ulazi u atmosferu isparavanjem (prelazak tekućeg stanja u plinovito) i sublimacijom (prelazak čvrstog stanja u plinovito) u obliku vodene pare. U atmosferi dolazi do kondenzacije (prelazak iz plinovitog stanja u tekuće) pri čemu nastaju oblaci. Iz njih nastaju oborine u obliku kiše i snijega koji rijekama otječu u oceane te se cijeli proces ponovno pokreće.

#### *4.2.1 Vlaga zraka*

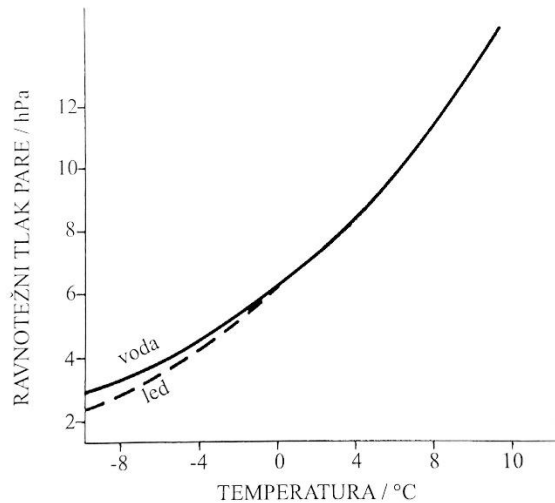
*Evaporacija* ili isparavanje se zbiva pri svim temperaturama i nije važno hoće li voda biti u tekućem ili čvrstom agregatnom stanju. Ono što je različito jest koliko će proces biti izražen. Naime, sve molekule vode se gibaju kaotično. Ukoliko neka molekula zbog viška svoje kinetičke energije nadvlada kohezivne sile, tada ona mijenja svoje agregatno stanje. To se zbiva na graničnim plohama između vode u tekućem stanju i zraka. Porastom temperature raste i kinetička energija, zbog čega sve veći broj molekula „bježi“ iz vode,

odnosno isparavanje biva sve jače [11]. Molekule vode se dakle uzdižu u obliku vodene pare dok se druge molekule vraćaju iz zraka u tekućinu. Prvi je proces već navedena evaporacija, a drugi kondenzacija. Pri isparavanju dolazi do hlađenja iz razloga što brže molekule „bježe“, dok sporije ostaju tako da srednja temperatura vode pada. Isparavanjem se troši unutarnja energija na svladavanje kohezijskih sila kao i na rad jer se molekule sada šire na veći obujam. Dio energije se nadoknadi uzimanjem energije iz okolnog prostora zbog čega mu se temperatura smanji. Jačina isparavanja osim o temperaturi još ovisi i o vjetru (tada je isparavanje jače) i o vlažnosti zraka (isparavanje je jače kada je zrak suh).

*Latentna toplina isparavanja* ili toplina potrebna za isparavanje govori koliko topline je potrebno dovesti jedinici mase određene tvari kako bi promijenila agregatno stanje. Latentna toplina isparavanja vode iznosi oko  $L = 2.5 \text{ MJ kg}^{-1}$  [7]. Ta bi toplina bila dovoljna da se jedan kilogram vode zagrije za čak  $595 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $Q = m c \Delta t$ , pri čemu je  $c_{\text{vode}} = 4200 \text{ JK}^{-1}$ ), što znači da je za promjenu agregatnog stanja vode iz tekućeg u plinovito potrebno dovesti skoro šest puta više topline u odnosu na zagrijavanje vode od  $0^\circ\text{C}$  do  $100^\circ\text{C}$ .

Pri kondenzaciji se okolni zrak zagrijava jer sporije molekule pri sudaranju formiraju kapljice dok brže molekule ostaju.

Kada je broj molekula koje ispare i broj molekula koje se vrate u početnu sredinu jednak, tada dolazi do zasićenja i postiže se ravnotežno stanje. *Ravnotežni tlak*, odnosno *tlak zasićene vodene pare* ( $e_s$ ) je tlak što ga u ravnotežnom stanju, tj. pri zasićenju vrše molekule vodene pare [29]. Za svaku temperaturu i tlak zraka ima maksimalna količina vodene pare koju zrak može primiti. Ravnotežni tlak najviše ovisi o temperaturi, i ovisnost je eksponencijalna (slika 4.34).



Slika 4.34 Graf ovisnosti ravnotežnog tlaka pare o temperaturi zraka (Penzar i sur., 1996)

Što je veća temperatura zraka, to je veća kinetička energija pojedinačnih molekula te ih više napušta vodu u obliku vodene pare [6]. Dakle, koncentracija vodene pare biva veća zbog čega raste i tlak zasićene vodene pare. Laički rečeno, porastom temperature zrak može primiti vodene pare. Taj tlak ovisi i o vrsti podloge nad kojom se vodena para nalazi. Na prethodnom grafu možemo vidjeti da kada je temperatura u minusu da je ravnotežni tlak vodene pare nad vodom veći nego nad ledom. Do zasićenja prije dolazi kada je tlak niži tako da se zbiva da iznad leda zrak bude zasićen, ali ne i nad jako hladnom vodom [11].

Sada možemo definirati i vlagu zraka. Vлага zraka govori o tome koliko je vodene pare sadržano u stalnom sastavu zraka pri čemu zrak shvaćamo kao smjesu suhog zraka i vodene pare [11]. *Daltonov zakon* kaže da je ukupni tlak zraka jednak zbroju parcijalnog tlaka suhog zraka i tlaka vodene pare ( $e$ ) [6].

$$p = p_s + e$$

*Tlak vodene pare* veći je što je veća vлага u zraku. Rijetko doseže vrijednost veću od 40 mb (milibara\*). Vodene pare ima najviše u najnižem kilometru troposfere gdje čini maksimalno 4%. Prema tome, maksimalni tlak vodene pare može biti 4% od standardnog atmosferskog tlaka pri morskoj razini (1 bar, tj. 101 325 Pa), odnosno 40 mb [6].

---

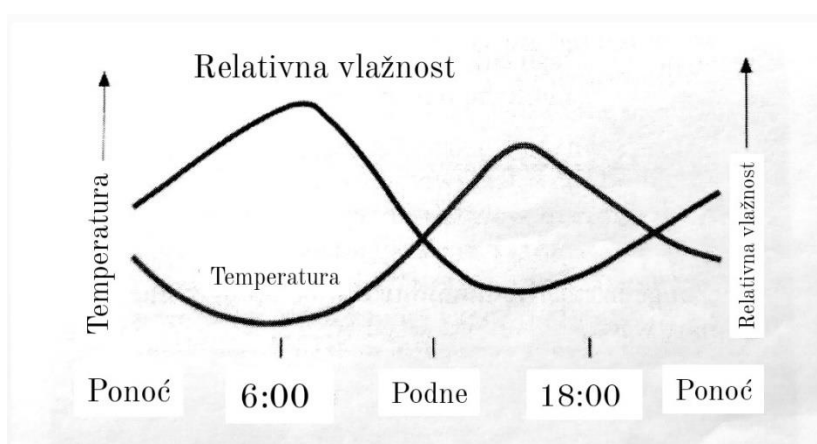
\* 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa

Navest ćemo neke mjere vlage u zraku [29]:

- Tlak vodene pare [ $e$ ] = hPa
- Tlak zasićene vodene pare [ $e_s$ ] = hPa
- Apsolutna vlažnost  $a = \frac{\text{masa vodene pare}}{\text{volumen vlažnog zraka}}$ ; [ $a$ ] = g m<sup>-3</sup>
- Specifična vlažnost  $q = \frac{\text{masa vodene pare}}{\text{masa vlažnog zraka}}$ \*; [ $q$ ] = g kg<sup>-1</sup>
- Relativna vlažnost  $u = \frac{\text{tlak vodene pare}}{\text{tlak zasićene vodene pare}} \cdot 100\%$ ; [ $u$ ] = %  
pri čemu  $u$  ovisi o temperaturi, tj.  $u = u(T)$
- Rosište  $\tau$  je temperatura pri kojoj je stvarni tlak  $e$  jednak ravnotežnom  $e_s$ ; [ $\tau$ ] = °C

Od navedenih mjera vlage u zraku, uz tlak vodene pare, relativna vlažnost se najviše koristi zbog toga što iskazuje koliko je zapravo pare u zraku u odnosu na najveću moguću količinu pri jednakoj temperaturi. U trenutku zasićenja, relativna vlažnost je 100% [2].

Na sljedećoj slici prikazan je dnevni hod relativne vlažnosti i temperature kada nema vjetra. Također, pretpostavljamo da je  $q = \text{konst.}$



Slika 4.35 Dnevni hod relativne vlažnosti i temperature zraka (prema nastavnim materijalima iz kolegija Fizika zemlje i atmosfere, PMF Zagreb)

\* masa vlažnog zraka je zbroj mase vodene pare i mase suhog zraka

Primjećujemo da je relativna vlažnost u obrnutoj proporcionalnosti s temperaturom. To možemo zaključiti i preko relacija:  $u \sim \frac{1}{e_s}, e_s \sim T \Rightarrow u \sim \frac{1}{T}$ . Na grafu (slika 4.35) vidimo da kada Sunce izlazi, temperatura zraka raste negdje do popodnevnih sati.

#### 4.2.2 Oblaci i magla

Oblaci u atmosferi predstavljaju nakupine sitnih kapljica vode i ledenih kristalića. U samom oblaku se također znaju nalaziti i mnogo veće kapi vode i komadi leda te čestice nastale onečišćenjem [11]. Da bi u atmosferi nastali oblaci, potrebno je nekoliko uvjeta: u zraku mora biti dovoljna količina vodene pare, dovoljno kondenzacijskih jezgara (aerosoli) te je potrebno ohlađivanje zraka ispod temperature rosišta. Dovoljna količina vodene pare zapravo je ona količina pri kojoj zrak postaje zasićen. Kondenzacijske jezgre su higroskopne čestice koje već pri relativnoj vlažnosti od oko 70% postaju vlažne. Ukoliko se relativna vlažnost poveća, postaju mokre i prelaze u sitne kapljice. Kondenzacija se može odviti i ispod 0 °C tako da u zraku ima i prehladnih kapljica. Također se vodena para može taložiti u kristaliće leda procesima depozicije gdje para izravno prelazi u kruto stanje [33].

Oblaci mogu biti različitih oblika i veličina (slika 4.36), od onih jedva vidljivih do teških, sivih koji zbog svog sastava i debljine gube prozirnost i često prekrivaju čitavo nebo. Ako se zrak s vrlo sitnim vodenim kapljicama nalazi uz tlo i smanjuje vidljivost na do 1 kilometar, nazivamo ga *maglom*. Ukoliko je horizontalna vidljivost od 1 km do 10 km onda to nazivamo *sumaglicom*.

Osim toga što oblake možemo razlikovati po sastavu (vodeni, ledeni i mješoviti), razlikujemo još dvije klasifikacije oblaka – morfološku koja opisuje oblake prema obliku i visini te genetsku prema načinu nastajanja. Klasifikacija oblaka danas je takva da oblake dijeli na 10 osnovnih oblika, to jest rodova. Prema visini se dijele na visoke (iznad 5 km) koji se sastoje uglavnom od leda, srednje visoke (2 – 5 km) koji se sastoje od kapljica i od kristala budući da je njihova temperatura između 0 °C i -25 °C te na niske oblake (do 2 km) koji se sastoje samo od kapljica. Te visinske granice ustvari i nisu strogo određene. U zasebnoj skupini nalaze se oblaci jakog vertikalnog razvoja koji se protežu duž više slojeva. Prema obliku razlikujemo slojevite (*stratus*) i grudaste (*cumulus*) oblake. Oblake koji nose oborine nazivamo *nimbusima*.

Skupini visokih oblaka ubrajaju se cirrusi, cirrocumulusi i cirrostratusi. Oblaci srednjeg sloja su altocumulusi i altostratusi dok su niski oblaci stratusi, stratocumulusi i nimbostratusi. Oblaci vertikalnog razvoja su cumulusi i cumulonimbusi.

- *Cirrusi* su vlaknasti oblaci u obliku bijelih vlakana i uskih pruga. To su najbjelji oblaci koji kada Sunce izlazi ili zalazi poprimaju narančasto – crvene boje.
- *Cirrocumulusi* su vlaknasti i grudasti oblaci u obliku „malih ovčica“.
- *Cirrostratusi* su vlaknasti i slojeviti oblaci koji potpuno ili djelomično prekrivaju nebo. Često znaju biti gotovo prozirni pa ih je teško uočiti na nebu.
- *Altocumulusi* su srednje visoki slojeviti grudasti oblaci. Najčešće se na nebu javljaju rano ujutro ili kasno popodne.
- *Altostratusi* se pojavljuju kao jednoličan sivi ili bijeli sloj koji u potpunosti ili djelomično prekriva nebo. Često su toliko debeli da se Sunce kroz njih skoro i ne vidi, a vidi se tek kao kroz mutno staklo.
- *Nimbostratusi* su tamni jednolični kišni oblaci koji daju dugotrajnu umjerenu kišu.
- *Stratusi* su niski slojeviti oblaci uniformne sive boje koji potpuno ili djelomično zasjenjuju Sunce.
- *Stratocumulusi* su grudasti i slojeviti oblaci. Od altocumulusa ih razlikujemo po veličini pojedinih oblaka – kod stratocumulusa su pojedinačne grudice veće. Uglavnom su neprozirni.
- *Cumulusi* su grudasti oblaci bijele ili sive boje kod kojih lako raspoznamo rubove koji se vertikalno razvijaju. U uvjetima stabilne atmosfere znače lijepo vrijeme no vrlo rijetko mogu dati i kratkotrajnu oborinu.
- *Cumulonimbusi* su teški, gusti oblaci koji se protežu sve do visine tropopauze. To su olujni, grmljavinski oblaci koji daju kišu, sugradicu ili tuču. Kad je zima, iz njih često padaju velike pahulje snijega [33].

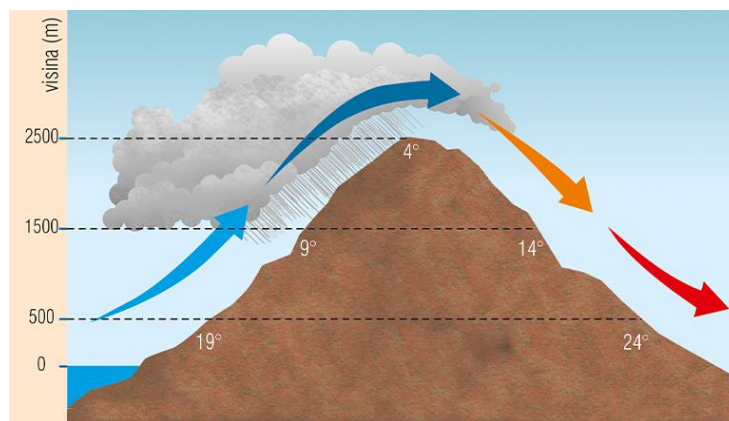




Slika 4.36 Podjela oblaka po visini (Grbec i Matić, 2015)

Objasniti ćemo oblake prema njihovom nastanku. Uvjet da bi oblaci nastali je ohlađivanje zraka ispod temperature rosišta. Jedan od načina na koji se zrak može ohladiti je njegovo uzdizanje. Kada zrak koji sadrži vodenu paru ide uvis, dolazi u područje nižeg tlaka zraka, širi se i pri tom hladi. Tako hladan zrak postaje zasićen pri manjoj količini vodene pare (da bi došlo do zasićenja toplog zraka, potrebno je više vodene pare). Kada se temperatura vlažnog zraka počne hladiti i ispod temperature rosišta, dolazi do kondenzacije i sublimacije u kapljice vode i kristaliće leda i tada njihovu nakupinu vidimo kao oblak [33].

Orografski oblaci (slika 4.37) nastaju kada određena masa zraka prelazi planinu. U privjetrini se zrak uzdiže i dolazi do adijabatskog (bez izmjene topline) hlađenja. Sa zavjetrinske strane oblaci izgledaju kao kapa na vrhu planine. Kada relativna vlažnost zraka dođe do 100%, nastaju oblaci i oborine koje padaju s privjetrinske strane. S druge strane planine, zrak se spušta te se adijabatski grije jer dolazi u područje višeg tlaka zraka i komprimira se. Zrak se također suši, odnosno relativna vlažnost se smanjuje pri čemu oblaci isparavaju [6]. „Kapa“ nad planinom, npr. Velebitom predznak je bure, hladnog i suhog vjetra (slika 4.38).

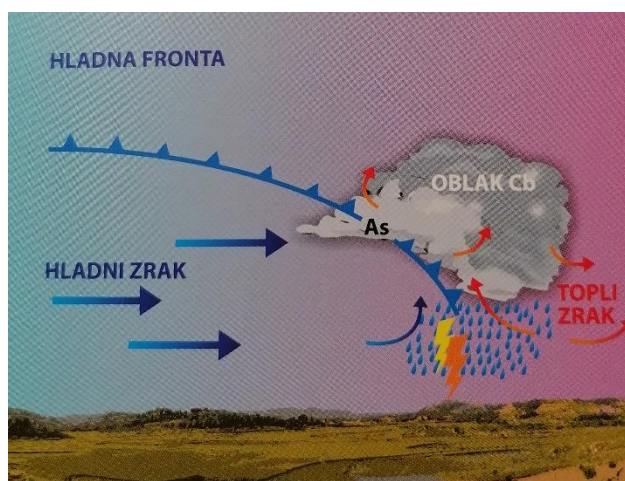


Slika 4.37 Orografsko uzdizanje (<https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/af0509d5-844b-4eea-bf1f-aede697f1e0a/geografska-raspodjela-klimatskih-elemenata.html>) [34])



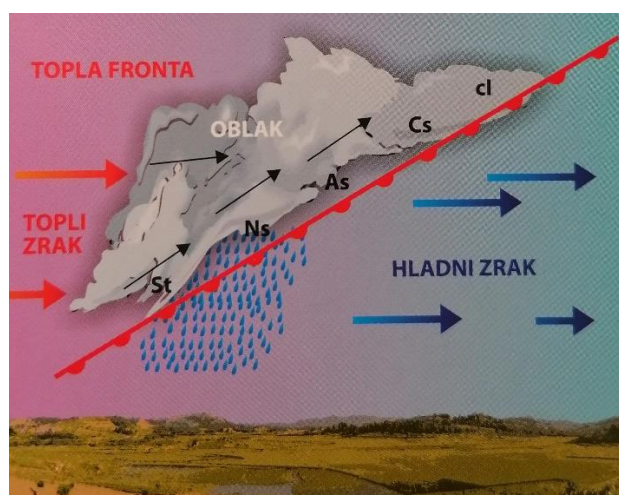
Slika 4.38 „Kapa“ nad Velebitom (<https://zadarski.slobodnadalmacija.hr/zadar/fotoreport/velebitska-kapa-ili-kako-je-bura-polegla-oblake-na-nasu-najduzu-planinu-1184991>) [35])

Frontalni oblaci nastaju na granici dviju zračnih masa. Topao i vlažan zrak je manje gustoće od hladnog zraka pa se tako topli zrak diže nad hladnim uz frontalnu plohu (mjesto susreta različitih zračnih masa). Možemo razlikovati dvije različite frontalne plohe – hladnu i toplu. *Hladna fronta* (slika 4.39) granica je između hladnog zraka koji dolazi i toplog zraka koji se nalazi nad njim. Taj se hladni zrak podvlači pod topli poput klina te ga brzo podiže. Tada nastaju grudasti oblaci kumulusi, stratokumulusi i kumulonimbusi. Kumulonimbusi nose kišu, snijeg ili tuču. Dolaskom hladne fronte raste tlak zraka te jača vjetar i naoblaka.



Slika 4.39 Hladna fronta (Grbec i Matić, 2015)

*Topla fronta* (slika 4.40) je granica između toplog zraka koji dolazi i hladnog zraka kojeg topli potiskuje. Frontalna ploha blago je nagnuta prema površini Zemlje. Dolazi do sporog uzdizanja toplog zraka i on kao da klizi uvis uz frontalnu plohu. Tada nastaju slojeviti oblaci nimbostratusi, altostratusi i cirrostratusi te cirusi. Dolaskom tople fronte pada tlak zraka dok temperatura i vlaga rastu.



Slika 4.40 Topla fronta (Grbec i Matić, 2015)

*Radijacijski oblaci* nastaju ohlađivanjem prizemnog sloja zraka zbog emisije dugovalnog zračenja. Tada uz tlo nastaje magla (slika 4.41), tj. oblak uz tlo. U slučaju kada topli zrak nad površinom miruje, odnosno kad nema vjetera, dolazi do hlađenja kopna i

prizemnog sloja zraka. Tada se stvaraju jutarnje magle. Tijekom dana se magla može uzdignuti 50 do 100 metara i prijeći u niski oblak stratus. Radijacijske oblake najčešće nalazimo u uvalama i kotlinama jer tamo najčešće nema vjetra [33]. Također, do hlađenja zraka može doći i kada postoji polagano strujanje toplog zraka preko hladne podloge, npr. nad snijegom. Maglu koja nastaje na taj način zovemo *advekcijskom*.



Slika 4.41 Magla nad Mostarom (<https://hms.ba/gusta-magla-pokrila-mostar/mostar-magla1/> [36])

Posljednja vrsta oblaka koje ćemo opisivati su *oblaci termičke konvekcije*. Da bismo razumjeli nastanak ovih oblaka moramo ući malo dublje u fiziku, točnije u termodinamiku i adijabatske procese koje ona objašnjava.

Za početak valja navesti neke od pojmova kojima se opisuju pojave i procesi u termodinamici. Ono što termodinamika opisuje su *termodinamički sustavi*. Takvi sustavi predstavljaju određenu količinu materije koja zauzima određeni volumen. Najčešći primjer termodinamičkog sustava, a ujedno i najjednostavniji koji se spominje u nastavi je plin zatvoren u posudi s pomičnim klipom (slika 4.42) [37]. Osnovni termodinamički sustav atmosfere je *čest* – jedinični volumen ili jedinična masa zraka određenih svojstava. Stanje određenog termodinamičkog sustava opisuju varijable stanja: tlak  $p$  [Pa], temperatura  $T$  [K] i volumen  $V$  [m<sup>3</sup>]. Ukoliko su te varijable jednake za svaki dio sustava i ako se vremenom ne mijenjaju, tada kažemo da se sustav nalazi u stanju termodinamičke ravnoteže. Svaki termodinamički sustav posjeduje unutarnju energiju  $U$  koja dolazi od gibanja čestica plina i potencijalne energije njihovog međudjelovanja. Unutarnja energija je proporcionalna s temperaturom sustava.



Prvi zakon termodinamike zapravo je zakon očuvanja energije gdje do promjene unutarnje energije sustava dolazi radi izmjene topline ( $Q$ ) ili(i) vršenja rada ( $W$ ) [14]. Matematički ga formuliramo na sljedeći način:

$$\Delta U_{plina} = Q + W_{okoline na plin}$$

$$\Delta U_{plina} = Q - W_{plina na okolinu}$$

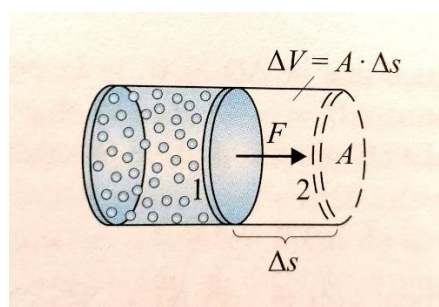
Vidimo da je  $W_{okoline na plin} = -W_{plina na okolinu}$ . U nastavku ćemo se koristiti prvom relacijom gdje okolina vrši rad nad plinom.

$Q$  i  $W_{o-p}$  su pozitivni kad povećavaju energiju promatranog sustava (plina).  $Q_{dovedena} > 0$ ,  $Q_{odvedena} < 0$ ,  $W_{o-p} > 0$  kod kompresije plina dok je  $W_{o-p} < 0$  kod ekspanzije plina. [38]

U termodinamici razlikujemo nekoliko procesa. U *izobarnom* procesu tlak je konstantan i varijable stanja se mijenja na račun dovođenja ili odvođenja topline i vršenja rada. Pri *izohornom* procesu volumen je stalan iz čega proizlazi da je rad jednak nuli jer je  $W = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s = p \cdot \Delta V$ , a  $\Delta V = V_{konačni} - V_{početni} = 0$

$F$  je sila izražena u njutnima [N],  $\Delta s$  [m] put na kojem sila djeluje,  $p$  tlak [Pa],  $A$  [m<sup>2</sup>] površina na koju sila djeluje i  $\Delta V$  [m<sup>3</sup>] promjena volumena unutar cilindra. Tlak matematički opisujemo kao

$$p = \frac{F}{A}$$



Slika 4.42 Ekspanzija plina u cilindru (Brković, Pećina, 2013)

Izotermni proces je proces pri kojem je temperatura stalna. Budući da unutarnja energija ovisi samo o temperaturi, njena će promjena biti jednaka nuli i tada je  $Q = -W_{o-p}$ .

Proces koji je nama najvažniji za objašnjavanje nastanka oblaka termičke konvekcije je adijabatski proces. Pri takvom procesu ne dolazi do izmjene topline i kažemo da je sustav od okoline termički izoliran. Tada je  $Q = 0$ . Iz prvog zakona termodinamike slijedi da je  $\Delta U = W_{o-p}$ . Rad se obavlja na račun promjene unutarnje energije sustava.

Za početak ćemo prvi zakon termodinamike zapisati u najčešćem, diferencijalnom obliku:

$$dq = C_V dT + p d\alpha^* \quad (1)$$

gdje je  $C_V$  konstanta – specifični toplinski kapacitet plina pri konstantnom volumenu.  $C_V$  za suhi zrak iznosi  $717 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , što znači da jednom kilogramu zraka u troposferi treba dovesti  $717 \text{ J}$  energije da bi mu se temperatura povisila za  $1 \text{ K}$ .

Volumen koji označavamo sa  $\alpha$  možemo zamijeniti recipročnom gustoćom zraka ( $\alpha = \frac{1}{\rho}$  za jediničnu masu zraka). Također, koristeći jednadžbu stanja  $p = \rho RT$  smatrajući zrak idealnim plinom možemo doći do meteorološke forme jednadžbe (1):

$$dq = C_p dT - \alpha dp$$

Specifični toplinski kapacitet suhog zraka  $C_p$  veći je od  $C_V$  za  $R$ , odnosno za specifičnu plinsku konstantu koja je za svaki plin različita. Specifična plinska konstanta izravno je povezana s općom pliskom konstantom  $R^*$ .

Naime, opća plinska jednadžba u izvornom obliku glasi

$$pV = nR^*T \quad (2)$$

pri čemu je  $p$  [Pa] tlak plina,  $V$  [ $\text{m}^3$ ] volumen,  $n$  [mol] broj molova plina u danom volumenu,  $R^*$  opća plinska konstanta ( $R^* = 8.314 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) i  $T$  [K] temperatura. Jedan mol bilo koje tvari sadrži  $6.02214 \cdot 10^{23}$  molekula.

Ako je masa idealnog plina  $m$  [kg] i  $M$  molarna masa plina [kg/mol], broj molova  $n$  je po definiciji  $m/M$ . Koristeći jednadžbu (2), dobivamo meteorološki oblik jednadžbe stanja plina:

---

\* Za toplinu i volumen uvest ćemo nove varijable koje ćemo koristiti u nastavku, a koje su definirane kao specifične vrijednosti, tj. po jedinici mase: za toplinu  $q = Q / m$ , a umjesto  $V$  uvodimo  $\alpha = 1/\rho$

$$p = \frac{mR^*T}{MV} = \frac{m}{V} \frac{R^*}{M} T = \rho R T \text{ ili } p \propto RT.$$

$\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ] je gustoća plina ( $\rho = m/V$ ), a  $R$  [ $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] već navedena specifična plinska konstanta ( $R = R^*/M$ ).

Rekli smo da je  $C_p = C_v + R$ . Iščitamo li tablične vrijednosti navedenih konstanti za suhi zrak ( $C_p = 1004 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $C_v = 717 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $R = 287 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) primjećujemo da je  $C_p$  zaista mnogo veći od  $C_v$ . Za istu količinu topline  $dq$ , porast temperature pri konstantnom volumenu ( $dq = C_v dT + p d\alpha$ ;  $d\alpha = 0$ ) bit će veći od porasta temperature pri konstantnom tlaku ( $dq = C_p dT - \frac{dp}{\rho}$ ;  $dp = 0$ ) – pri stalnom volumenu sva dovedena toplina zapravo grije zrak, dok se pri konstantnom tlaku jedan dio dovedene topline troši i na ekspanziju zraka u odnosu na okolinu [7].

Kod adijabatskog procesa se temperatura plina mijenja bez dovođenja ili odvođenja topline, odnosno  $dq = 0$ . Tada vrijedi da je  $0 = C_v dT + p d\alpha$ , što daje  $C_v dT = -p d\alpha$  ili  $0 = C_p dT - \frac{dp}{\rho}$  iz čega slijedi da je  $C_p dT = \frac{dp}{\rho}$ , odnosno  $C_p dT = \alpha dp$ .

Možemo zaključiti da kada čest zraka prolazi kroz adijabatski proces, povećanjem volumena joj se temperatura smanjuje. To se događa kada se zrak u atmosferi uzdiže. S druge strane, temperatura česti raste kada joj se volumen smanjuje, do čega dolazi kada se zrak spušta. S gledišta tlaka, kompresija ( $dp > 0$ ) povezana je sa zagrijavanjem ( $dT > 0$ ), dok je ekspanzija ( $dp < 0$ ) povezana s hlađenjem ( $dT < 0$ ).

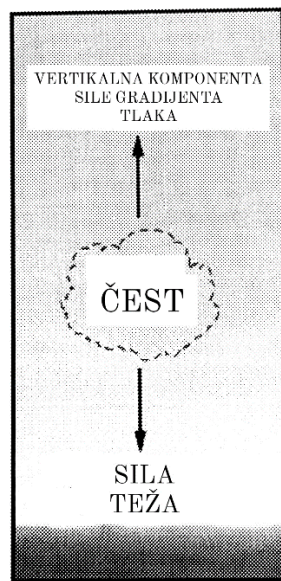
Poissonova jednadžba povezuje konačno i početno stanje kod adijabatskog procesa:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{R/C_p}$$

Nakon objašnjenja adijabatskih procesa, sada možemo opisati kako nastaju oblaci termičke konvekcije. Zbog zagrijavanja prizemnog sloja zraka dolazi do njegovog širenja, smanjenja gustoće i posljedično, uzdizanja iznad hladnog sloja zraka (konvekcija). Tada se taj zrak u visini nalazi u području niskog tlaka gdje se širi i hladi. U trenutku kada temperatura tog zraka bude jednaka temperaturi okoline, smiruje se. U isto vrijeme hladni zrak koji je prije bio iznad, počinje se spuštati na mjesto gdje je prije bio topli. Sada taj zrak dolazi u područje višeg tlaka, stlačuje se i zagrijava. Pri ovim procesima nema izmjene topline s okolinom jer je uzdizanje brz proces u odnosu na zračenje, zbog čega se tijekom

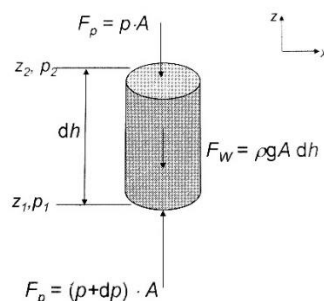
adijabatskog procesa  $dQ$  od zračenja može zanemariti. Ovakve procese dizanja, tj. spuštanja zraka zovemo adijabatsko dizanje odnosno spuštanje [11].

U slučajevima kada vertikalno strujanje zraka ne prelazi velike brzine, odnosno ubrzanja, kažemo da vrijedi kvazistatički uvjet – tada se tlak zraka u česti odmah izjednačava s tlakom u atmosferi. Dodatno, u većini su atmosferskih procesa vertikalne akceleracije zanemarive i tada se može primijeniti hidrostatička aproksimacija prema kojoj je sila teža gotovo u potpunosti uravnotežena vertikalnom komponentom sile gradijenta tlaka (slika 4.43) [29].



Slika 4.43 Čest u hidrostatičkoj ravnoteži (prema nastavnim materijalima iz kolegija Fizika zemlje i atmosfere, PMF Zagreb)

Na slici ispod prikazane su sile na čest zraka.



Slika 4.44 Sile na čest zraka (Nastavni materijali iz kolegija Fizika zemlje i atmosfere, PMF Zagreb)



$$F \downarrow = F \uparrow$$

$$pA + \rho g A dh = (p + dp)A$$

$$dp = \rho g dh$$

$$dp = -\rho g dz$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

Izraz  $C_p dT = \alpha dp$  možemo diferencirati po visini i primijeniti hidrostatičku jednadžbu (3):

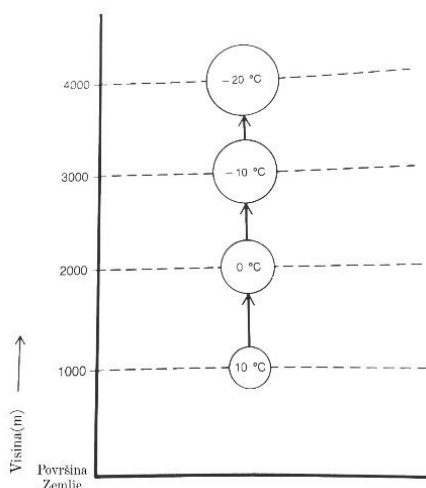
$$C_p dT = \alpha dp \mid \frac{d}{dz}$$

$$C_p \frac{dT}{dz} = \alpha \frac{dp}{dz} = \alpha \frac{\partial p'}{\partial z} = -\alpha \rho g$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C_p} = -\delta = -0.00976 \text{ K/m} \approx -1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$$

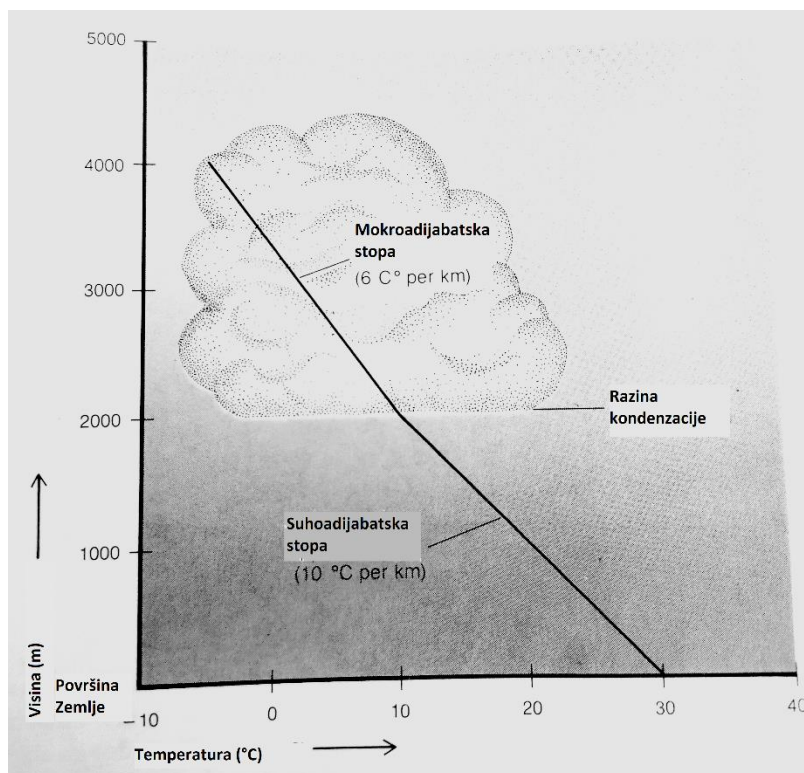
Koristili smo da je  $p = p'$ , tj. da je  $dp = \partial p'$  gdje su sa ' označene veličine u slobodnoj atmosferi. U zadnjem koraku smo koristili da je  $\alpha = \frac{1}{\rho}$ .  $\delta$  stoji za suhoadijabatski temperaturni gradijent gdje se pretpostavlja da u zraku nema kondenzacije, tj. oslobađanja latentne topline.

Kod takvih vertikalnih gibanja se temperatura zraka smanji ili poveća za 1 °C svakih 100 m uzdizanja ili spuštanja (ili 10 °C svakih 1000 m). U slučaju kada se suha čest uzdiže pa spušta do neke početne visine pri čemu joj se temperatura smanjuje pa povisi na početnu (slika 4.45), tada se ona giba po liniji koju nazivamo *suha adijabata* [11].



Slika 4.45 Nezasićena čest zraka se uzdiže, širi i hladi po suhoadijabatskoj stopi (Moran & Morgan, 1989)

Kada se čest zraka ohladi do te točke da relativna vlažnost dosegne 100% i dođe do procesa kondenzacije, odnosno nastanka oblaka (visina pri kojoj dolazi do kondenzacije naziva se kondenzacijska visina), uzdižući zrak se više ne hladi po suhoadijabatskoj stopi. Daljnjim uzdizanjem zasićenog zraka oslobađa se latentna toplina koja djelomično usporava adijabatsko hlađenje zbog čega se uzdižući zasićeni zrak ne hladi tako naglo kao suhi. Pri ukapljivanju dijela vodene pare, točnije na svaki kilogram ukapljene vodene pare se oslobodi 2260 kJ latentne topline isparavanja. Latentnom toplinom se zagrijava okolni zrak zbog čega se on širi i uzdiže. Ova niža stopa hlađenja zove se *mokroadijabatska stopa*, a krivulja koja prikazuje promjenu temperature zasićenog zraka je *mokra ili zasićena adijabata*. U trenutku kada zbog podizanja i kondenzacije nestane vodene pare u zraku, zrak se hladi i uzdiže suhoadijabatski. Mokroadijabatski temperaturni gradijent  $\delta^*$  varira od oko  $\frac{dT}{dz} = -3 \text{ }^\circ\text{C}/1000 \text{ m}$  za jako vlažan zrak do čak  $\frac{dT}{dz} = -9 \text{ }^\circ\text{C}/1000 \text{ m}$ . Za razliku od  $\delta$ ,  $\delta^*$  ovisi o temperaturi i o tlaku te je, kao što se može primijetiti, manji od  $\delta$ . Kako raste visina, tako se mokra adijabata sve više približava suhoj i kažemo da je to *mokroadijabatski proces* [11]. Dizanje zraka po suhoj i mokroj adijabati prikazano je na slici 4.46.



Slika 4.46 Dizanje zraka po suhoj i mokroj adijabati (Moran & Morgan, 1989)

Navedeni su procesi potrebni za shvaćanje nastanka oblaka kumulonimbusa i grmljavinske oluje koja iz njega proizlazi.

Prva faza nastanka već je prethodno opisana – ukratko, dolazi do formiranja nakupina grudastih bijelih oblaka zbog kondenzacije vodene pare kada se oslobađa latentna toplina te se oblak još više grije i vertikalno uzdiže. Oblak se prestaje razvijati u trenutku kada se više ne obogaćuje toplim i vlažnim zrakom koji dolazi s manjih visina [33].

U drugoj fazi razvoja u sredini oblaka dolazi do jakog uzlaznog strujanja. Takve uzlazne struje dolaze do visine od oko 11 km. Na visini pri kojoj je brzina uzlaznih struja najveća, mijenja se njihov smjer te postaju silazne. Uzlazne i silazne struje često postoje i skupa. Naime, zrak se prilikom uzdizanja hladi i kondenzira te nastaju oborine. Težina vodenih kapljica i kristala postaje toliko velika da padaju brže nego što se uzlazne struje dižu. Oborine prolaskom kroz oblak za sobom povlače i susjedni zrak pa nastaju navedene silazne struje. U isto vrijeme, nezasićeni zrak pri rubovima oblaka uvlači se u unutrašnjost oblaka. Uvučeni se zrak miješa sa zasićenim te uzrokuje da neki kristalići i kapljice ispare. Posljedično hlađenje nadalje slabi uzgon i jača strujanje prema dolje. Strujanje prema dolje skupa s oborinama izlazi iz baze oblaka i širi se duž tla kao hladan i vjetrovit zrak, poput

male hladne fronte u obliku luka. U ovoj fazi oblak dobiva oblik nakovnja – na visini tropopauze jako horizontalno gibanje raspršuje kristale leda. Ravni vrh oblaka ukazuje na stabilan zrak u tropopauzi. Temperature unutar gornjeg dijela oblaka su toliko male pa se taj dio sastoji samo od kristalića leda što mu daje vlaknasti izgled. Tijekom ove faze događaju se najveći pljuskovi i munje. Također često dolazi do pojave tuče, jakih naleta vjetra, ponekad čak i tornada. Pri završetku druge faze, kumulonimbus je u potpunosti razvijen. Baza mu je na visinama od 600 m do 1500 m a vrh do 12 km. U tropskim predjelima mogu doseći visinu i do 20 km. U horizontalnoj ravnini može biti rasprostranjen na više od 10 km [6,2].

U završnoj fazi topao i vlažan zrak s manjih visina više ne obogaćuje oblak te prevladavaju silazne struje koje zauzimaju sve veći prostor unutar oblaka. Čestice oblaka isparavaju te nevjeme staje kao i životni ciklus kumulonimbusa. U visinama se oblak sve više razvlači dok se na mjestu silaznih struja raspada. Obično olujna ćelija „živi“ 30 minuta do sat vremena, ali ponekad munje, grmljavina i pljuskovi traju i više zbog toga što se oluje često sastoje od grupa ćelija koje nisu u jednakim fazama [33].

## 5 Zaključak

Fizika atmosfere povezana je s mnoštvom pojava i aktivnosti u ljudskoj svakodnevici te objašnjava vrijeme i klimu o kojima čovjek ovisi. O vremenu ovise poljoprivrednici, vrijeme utječe na sigurnost prometa, meteorološki su podaci važni za građevinare i arhitekte, o njima ovisi i izgradnja i upotreba vodoprivrednih objekata, vjetroelektrana i sl. Također, koliko god pojave iz atmosfere utječu na život ljudi, tako i čovjek utječe na atmosferu. Ljudsko ponašanje u odnosu na atmosferu se najviše očituje u onečišćenju zraka i samim time pogoršavanjem kvalitete života na Zemlji.

Na početku rada opisana je sama atmosfera, njen sastav i podjela. Drugi dio govori o elementima vremena i klime uz fizikalna objašnjenja koja su shvatljiva za učenike srednjih škola. Prikazano je par jednostavnih izvoda vezanih za zračenje u sustavu Sunce – Zemlja, jednadžbu stanja plina i temperaturni gradijent. U dijelu gdje se opisuje lom svjetlosti prikazana je i simulacija koja se može koristiti u školi pri objašnjavanju loma bijele svjetlosti na prizmi. U poglavlju koje tumači prijenos topline na Zemlji detaljno su opisana četiri pokusa koja se mogu izvesti u školi, čime bi se učenike dodatno zainteresiralo za gradivo.

Smatram da je fizika atmosfere važno područje u fizici koje učenike može uvelike potaknuti i na kritičko razmišljanje i promišljanje o važnim aktualnim temama. Uz sve ono što djeca vide i osjete oko sebe (Sunce, oblaci, magla, padaline, vlaga, vjetar i sl.), fizika atmosfere objašnjava i današnju problematiku oko klimatskih promjena kao važnu znanstvenu i društvenu temu. Zbog toga sam imala potrebu napisati ovaj rad kao motivaciju da se kod djece što ranije probudi znatiželja i svijest o navedenim temama. Mnoge nastavne cjeline iz fizike, poput zračenja crnog tijela, optike, stanja idealnog plina, termodinamike i sl. imaju usku povezanost s fizikom atmosfere. Nažalost, veliki dio onoga što objašnjava geofizika nalazi se samo u nastavnom planu i programu geografije, zbog čega učenici nemaju dublji uvid u određene pojave, odnosno nemaju percepciju o tome da se uopće radi o fizici. Ovim radom sam pokušala prikazati da se određene nastavne cjeline, od kojih učenici često zaziru, mogu povezati s geofizikom i time učiniti zanimljivijima, kao i ukazati na to da bi se mnoge teme iz meteorologije i klimatologije mogle integrirati u kurikulum nastave fizike.

## Literatura

- [1] Klarić, I., Jurdana, S., Klarić, I. Hipokratova talasoterapija od Antike do modernog talasoterapijskog centra u Crikvenici. // *Acta medico – historica Adriatica*. Vol 5, 01 (2007), str. 125 – 132.
- [2] Penzar, B. i sur. *Meteorologija za korisnike*. Zagreb : Školska knjiga, 1996.
- [3] Bajić, A.; *Meteorologija u provedbi programa korištenja energije vjetra*. // *Gospodarstvo i okoliš*, 14 (2006), 81, str. 404 – 410.
- [4] Čuvalo, I. *Onečišćenje zraka i okoliša*. Specijalistički diplomski stručni. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2021.
- [5] Ivušić, S. Nobelova nagrada za fiziku 2021: Hoćemo li ikad spoznati koliko je fizike u samo jednoj kapljici kiše. Ponašanje neuređenih sustava. // *ideje.hr* / 2021.
- [6] Moran, M.J., Morgan, D.M. *Meteorology: The Atmosphere and the Science of Weather*. 2nd ed. New York : Macmillan Publishing Company, 1989.
- [7] McIlveen, R. *Fundamentals of Weather and Climate*. 2nd ed. New York : Oxford University Press, 2010.
- [8] Mlazna struja, (2021), *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=41357> , 12.11.2022.
- [9] Atmosfera, *Crometeo – motrenje i prognoziranje vremena*, <https://www.crometeo.hr/atmosfera/> ,13.11.2022.
- [10] Meteorologija, (2021), *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=40414> ,15.11.2022.
- [11] Gelo, B. *Opća i prometna meteorologija I*. Zagreb : Školska knjiga, 1994.
- [12] Razlaganje svjetlosti na boje, (2018), *Edutorij*, [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14444\\_Razlaganje\\_svjetlosti\\_na\\_boje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14444_Razlaganje_svjetlosti_na_boje.html), 19.11.2022.
- [13] Opis vala, (2018), *Edutorij*, [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/7180\\_Opis\\_vala.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/7180_Opis_vala.html) , 20.11.2022.
- [14] Brković, N., Pećina, P. *Fizika u 24 lekcije*. 3. izdanje. Zagreb: Biblioteka Repetitio, 2013.

- [15] Wien's law & Stefan – Boltzmann's law (29.9.2021.), <https://study.com/learn/lesson/wiens-stefan-boltzmann-law-formulas-overview-uses-functions.html> ,23.11.2022.
- [16] Nastavni materijali za kolegij Fizika 2 – FKIT Zagreb (Dananić, V.), (2012), <https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/F2-13-predavanje-beamer.pdf> ,20.11.2022.
- [17] Spectral properties of Sunlight, <https://brilliant.org/practice/spectral-properties-sunlight/> ,20.11.2022.
- [18] Radiation spectrum for the Sun and Earth, <https://atmos.washington.edu/~hakim/101/radiation> ,20.11.2022.
- [19] Ekliptika, (2021) *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17320>, 23.11.2022.
- [20] Perihel, (2021), *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=47605>, 9.1.2023.
- [21] Matić, Z. Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske : Priručnik za energetske korištenje Sunčevog zračenja, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007.
- [22] Ekstraterestričko zračenje, *Hrvatski jezični portal*, [https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search\\_by\\_id&id=f15iXRF1](https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=f15iXRF1) ,9.1.2023.
- [23] Solar energy, (2020), *Schoolphysics*, [https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Astrophysics/text/Solar\\_energy/index.html](https://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Astrophysics/text/Solar_energy/index.html) ,10.1.2023.
- [24] Air mass, *PVEducation*, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass> ,10.1.2023.
- [25] Raspršenje svjetlosti, (2021), *Edutorij*, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/rasprsenje-svjetlosti.html>,10.1.2023.
- [26] Lom svjetlosti, (2002), *PhET simulacija* [https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_hr.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_hr.html), 13.1.2023.
- [27] Koje je boje Sunce?, (5.2.2022.), *Astroučionica*, <https://www.astroucionica.hr/koje-je-boje-sunce/> ,14.1.2023.

- [28] Odbijanje svjetlosti – ravno zrcalo, (2018), *Edutorij* [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14440\\_Odbijanje\\_svjetlosti\\_-\\_ravno\\_zrcalo.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14440_Odbijanje_svjetlosti_-_ravno_zrcalo.html), 14.1.2023.
- [29] Pasarić, M. Nastavni materijali za kolegij Fizika zemlje i atmosfere. Akademska godina 2019./2020.
- [30] Struje u oceanima, Mala internet škola oceanografije, [http://skola.gfz.hr/d5\\_3.html](http://skola.gfz.hr/d5_3.html), 17.1.2023.
- [31] CROMETEO UČIONICA: Termika – prirodni lift (VIDEO), (16.8.2013), *Crometeo – motrenje i prognoziranje vremena*, <https://www.crometeo.hr/crometeo-ucionica-termika-prirodni-lift-video/>, 17.1.2023.
- [32] Gereš, D.: Kruženje vode u Zemljinom sustavu // Građevinar. Vol 56, 06 (2004), str. 355 – 365.
- [33] Grbec, B., Matić, F. Oblaci. Split : Institut za oceanografiju i ribarstvo, 2015.
- [34] Geografska raspodjela klimatskih elemenata, (2021), *Edutorij*, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/af0509d5-844b-4eea-bf1f-aede697f1e0a/geografska-raspodjela-klimatskih-elemenata.html>, 20.1.2023.
- [35] Velebitska kapa ili kako je bura "polegla" oblake na našu najdužu planinu, (17.4.2022.), *Zadarski.hr* <https://zadarski.slobodnadalmacija.hr/zadar/fotoreport/velebitska-kapa-ili-kako-je-bura-polegla-oblake-na-nasu-najduzu-planinu-1184991>, 20.1.2023.
- [36] Mostar magla 1, *Hrvatski medijski servis*, <https://hms.ba/gusta-magla-pokrila-mostar/mostar-magla1/>, 21.1.2023.
- [37] Prvi zakon termodinamike, (2018), *Edutorij*, [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/999\\_Prvi\\_zakon\\_termodinamike.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/999_Prvi_zakon_termodinamike.html), 22.1.2023.
- [38] Planinić, M. Nastavni materijali za kolegij Metodika nastave fizike 2. Akademska godina 2021./2022.
- [39] Radiation balance (2012), *ScienceDirect* <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/radiation-balance>, 2.4.2023.
- [40] Beštak Kadić, Z., Brković, N., Pećina, P. Fizika 7 – Udžbenik iz fizike za sedmi razred osnovne škole. 2. izdanje. Zagreb: Alfa, 2020.