

# Atmosfera kao dio detektorskog sustava čerenkovljevih teleskopa

---

**Zečević-Pejić, Julija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:815805>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ODJEL ZA FIZIKU**



**JULIJA ZEČEVIĆ-PEJIĆ**

**ATMOSFERA KAO DIO DETEKTORSKOG SUSTAVA  
ČERENKOVLJEVIH TELESKOPA**

**Završni rad**

**Osijek, 2017.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ODJEL ZA FIZIKU**



**JULIJA ZEČEVIĆ-PEJIĆ**

**ATMOSFERA KAO DIO DETEKTORSKOG SUSTAVA  
ČERENKOVLJEVIH TELESKOPA**

**Završni rad**

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
radi stjecanja zvanja prvostupnice fizike

**Osijek, 2017.**

Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Darija Hrupeca u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

## Sadržaj

Sadržaj.....	IV
UVOD .....	VII
1. ČERENKOVljeVO ZRAČENJE.....	VIII
1.1. Elektromagnetsko zračenje.....	VIII
1.2. Čerenkovljevo zračenje .....	IX
1.3. Čerenkovljevi teleskopi .....	X
2. PLJUSKOVI ČESTICA U ATMOSFERI.....	XI
2.1. Atmosfera .....	XI
2.2. Različita područja u atmosferi .....	XII
2.3. Pljuskovi čestica u atmosferi .....	XIII
3. SOFTVERSKI PAKET MODTRAN .....	XIV
3.1. Mjerenje transparentnosti atmosfere .....	XIV
3.2. Modeli atmosfere.....	XV
3.3. Zadavanje parametara.....	XVII
3.4. Rad u aplikaciji.....	XVIII
4. CTA NORTH.....	XXI
4.1. Atmosferska transparentnost za CTA.....	XXI
5. ZAKLJUČAK .....	XXVI
POPIS LITERATURE .....	XXVII
ŽIVOTOPIS .....	XXIX

# ATMOSFERA KAO DIO DETEKTORSKOG SUSTAVA ČERENKOVLJEVIH TELESKOPA

**JULIJA ZEČEVIĆ-PEJIĆ**

Danas znamo da termički izvori zračenja poput Sunca i običnih zvijezda nisu jedini izvori zračenja u svemiru. Postoje mnogi netermički izvori koji imaju drukčiji spektar i drukčije mehanizme nastanka zračenja. Takvi kozmički izvori emitiraju razne vrste astročestica: elektromagnetsko zračenje svih frekvencija, kozmičko zračenje (jezgre atoma visokih energija), astrofizičke neutrine te gravitacijske valove. Oni su povezani s kompaktnim kozmičkim objektima: neutronske zvijezde i crnim rupama. Atmosfera štiti život na Zemlji od štetnog zračenja na način da zaustavlja astročestice vrlo visokih energija koje dolaze do Zemlje. Najčešće su to protoni i kozmičke gama-zrake, a možemo ih opažati s površine Zemlje preko velikih pljuskova čestica u atmosferi. Čerenkovljev teleskop osnovni je instrument za posredno opažanje visokoenergijskih kozmičkih gama-zraka pomoću Čerenkovljenog zračenja koje u atmosferi stvaraju pljuskovi čestica.

(29 stranica, 9 slika)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** Čerenkovljevi teleskopi / Čerenkovljevo zračenje / visokoenergijske gama-zrake / Zemljina atmosfera

**Mentor:** doc.dr.sc. Dario Hrupec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

# **THE ATMOSPHERE AS A PART OF DETECTING SYSTEM OF CHERENKOV TELESCOPES**

**JULIJA ZEČEVIĆ-PEJIĆ**

Today we know that thermal sources of radiation like our Sun and ordinary stars are not the only sources of radiation in the universe. There are many non-thermal sources that have different spectra and different mechanisms of radiation. Such cosmic sources emit various types of astroparticles: electromagnetic radiation of all frequencies, cosmic radiation (high energy atomic nucleus), astrophysical neutrinos and gravity waves. They are associated with compact cosmic objects: neutron stars and black holes. The atmosphere protects life on Earth from harmful radiation by stopping astroparticles with very high energies coming to Earth. The most common high-energy astroparticles are protons and cosmic gamma-rays, and we can observe them from the ground using large air showers in the atmosphere. Cherenkov Telescope is a basic instrument used for indirect observation of the high-energy gamma-rays. It uses Cherenkov radiation.

(29 pages, 9 figures)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:**Cherenkov radiation / Cherenkov telescopes / Earth's atmosphere /  
high-energy gamma-rays

**Supervisor:** doc.dr.sc. Dario Hrupec

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

## UVOD

"Jedini je smisao vremena u tome da se sve ne dogodi odjedanput", rekao je Albert Einstein kada su ga pitali za njegovu definiciju vremena u prošlom stoljeću. Pa, krenimo redom.

Počeci astronomije sežu u daleku prošlost kad se ona temeljila na opažanju i predviđanju gibanja vidljivih nebeskih tijela, naročito planeta i zvijezda. Astronomijom su se bavili stari Kinezi, Indijci, Babilonci i Egipćani, iz praktičnih potreba kao što su: izrada kalendara, određivanje točnog vremena i položaja. Grci su astronomiju digli na viši stupanj i dali joj veliki doprinos, ali se napredak u Europi zaustavio u srednjem vijeku kad su rad na astronomiji nastavili su Arapi. Razvoj astronomije povezan je nadalje uz Johannesa Keplera i Galilea Galileija koji su utemeljili nebesku mehaniku, na kojoj je onda Isaac Newton zasnovao svoj zakon gravitacije na osnovu čega su francuski matematičari i astronomi naglo razvili nebesku mehaniku. Uporaba dalekozora omogućila je nova saznanja o planetima, otkrivena su i nova, dotad nepoznata nebeska tijela. Oko polovice 19. stoljeća počeo je razvoj spektralne analize i fotometrije. U 21. stoljeću astrofizika je uzela veliki zamah i postigla značajne rezultate a jedan od najsvježijih jest detekcija gravitacijskih valova za koje je, upravo uvrijeme kad ovo pišem, dodijeljena Nobelova nagrada za fiziku.

Danas smo svjedoci razvoja novih astronomija: rendgenske astronomije, gama-astronomije i neutrinske astronomije. Visokoenergijska gama-astronomija danas je najuspješnije područje astročestične fizike. Njezin osnovni instrument je Čerenkovljev teleskop – uređaj za posredno opažanje visokoenergijskih kozmičkih gama-zraka pomoću Čerenkovljevog zračenja koje u atmosferi stvaraju pljuskovi čestica.

U ovom radu napraviti ćemo neke konkretne simulacije softverskim paketom MODTRAN potrebne za projekt CTA (Cherenkov Telescope Array). Za potrebe rada koristili smo besplatnu mrežnu aplikaciju<sup>1</sup> za računanje i crtanje transparentnosti atmosfere uz zadane parametre.

---

<sup>1</sup><http://modtran.spectral.com/>



# 1. ČERENKOVLJEVO ZRAČENJE

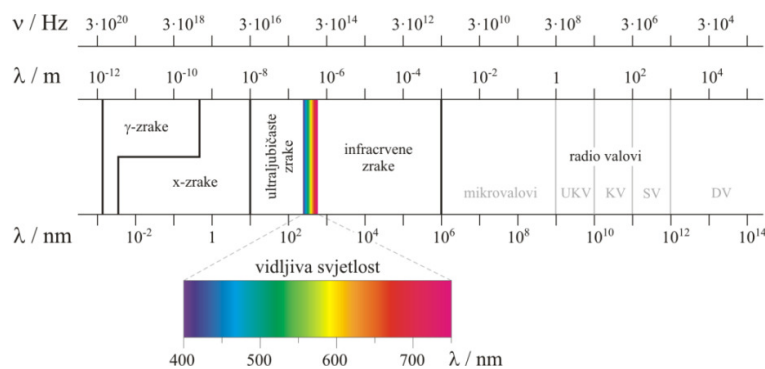
U fizici, zračenje predstavlja emisiju ili transmisiju energije u obliku vala ili čestice kroz prostor ili neku materijalnu sredinu. Zračenje može biti:

- elektromagnetsko zračenje: radiovalovi, mikrovalovi, vidljiva svjetlost, rendgensko, ultraljubičasto i gama
- čestično zračenje: alfa, beta i neutronske
- zvučno zračenje: ultrazvuk, zvuk
- seizmičko
- gravitacijsko

U zavisnosti od energije čestica koje zrače, zračenje može biti ionizirajuće ili neionizirajuće.

## 1.1. Elektromagnetsko zračenje

Informacije o svijetu oko nas prikupljamo pomoću osjetila. Osjetilo vida tu ima najvažniju ulogu. Našim očima primamo najviše informacija iz okoline. Svjetlost nosi velik dio informacija o svojem izvoru. No, naše oči su praktički slijepa za sve dijelove spektra osim onog dijela kojeg nazivamo “vidljivom” svjetlošću. Tijekom 19. stoljeća znanstvenici su otkrili više različitih vrsta svjetlosti: ultraljubičasto i infracrveno zračenje, X-zračenje i gama zračenje, radiovalno i mikrovalno zračenje. Ubrzo je postalo očito da su vidljiva svjetlost i novootkrivene vrste svjetlosti samo različiti oblici jedne te iste pojave: elektromagnetskog zračenja.



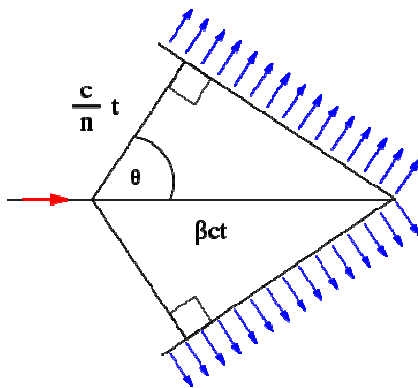
Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja. Različiti se elektromagnetski valovi razlikuju po energijama, odnosno po valnim duljinama. Izvor:

<https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja>.

## 1.2. Čerenkovljevo zračenje

Čerenkovljevo zračenje je emisija elektromagnetskoga zračenja koje nastaje kada brze električki nabijene čestice prolaze kroz optičku sredinu brzinom većom od brzine širenja svjetlosti u istome mediju. Ono ima dobro definiran smjer Čerenkovljevim kutom. Pojavu je 1934. godine opisao Pavel A. Čerenkov, a objasnili su je 1937. godine Ilija M. Frank i Igor J. Tamm. U nuklearnoj fizici se koristi za detekciju brzih električki nabijenih čestica i za mjerenje njihovih brzina. Za ovo otkriće sva trojica dobili su Nobelovu nagradu za fiziku 1958. godine. Čerenkovljeva svjetlost koju stvaraju elektroni i pozitroni u pljuskovima čestica u atmosferi je vidljiva i ultraljubičasta svjetlost posebnih karakteristika.

Bljesak Čerenkovljeve svjetlosti traje vrlo kratko, a sama svjetlost je jako usmjerena, otklonjena je od osi pljuska za najviše jedan stupanj. Zbog tih se svojstava Čerenkovljeva svjetlost može iskoristiti za opažanje kozmičkog zračenja.



Slika 2. Geometrija Čerenkovljevog zračenja. Izvor:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov\\_radiation#/media/File:Cherenkov.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation#/media/File:Cherenkov.svg)

Nabijena relativistička čestica međudjeluje s molekulama u mediju inducirajući lokalnu polarizaciju, a odmah nakon toga i depolarizaciju gdje medij emitira elektromagnetsko zračenje pod kutem  $\theta_c$  u odnosu na putanju čestice. Brzina svjetlosti u mediju indeksa loma  $n$  iznosi  $c' = c/n$ , a Čerenkovljev kut iznosi:

$$\cos\theta_c = \frac{c'}{c} = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n}$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti u vakuumu, a  $v = \beta c$  brzina relativističke čestice. Granična brzina je brzina ispod koje nema emisije Čerenkovljeve svjetlosti. Granična energija koju treba imati nabijena čestica da bi emitirala Čerenkovljevu svjetlost iznosi:

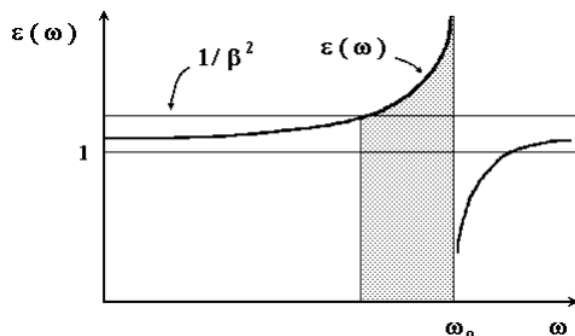
$$E = \gamma mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - 1/n^2}}$$

:

Spektar Čerenkovljevog zračenja je kontinuiran, a ukupni iznos emitirane energije po jedinici puta dana je Frank-Tammovom formulom:

$$\frac{dE}{dl} = \frac{e^2}{c^2} \int \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n \omega^2}\right) \omega d\omega.$$

Iz ove relacije može se uočiti da je najviše emitirane energije za visoke frekvencije, odnosno zračenje se najčešće pojavljuje u vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra. Tipični fotomultiplikatori osjetljivi su u valnom području od 300 nm do 600 nm.



Slika 3. Čerenkovljeva vrpca. Zračenje se samo emitira u osjenčanom području frekvencija gdje je  $\varepsilon(\omega) = \frac{1}{\beta^2}$ . U zraku je to područje vidljive i ultraljubičaste svjetlosti. Na apscisi je frekvencija elektromagnetskog vala  $\omega$ , a na ordinati električna permitivnost medija  $\varepsilon(\omega)$ .

Izvor:<http://fulir.irb.hr/1519/1/319671.diplomathesis.pdf>.

Čerenkovljevo zračenje u atmosferi stvaraju nabijene čestice iz pljuska koji je iniciran upadom kozmičke zrake u atmosferu. U gornjim slojevima atmosfere, gdje je gustoća zraka vrlo mala, Čerenkovljev kut je također malen. S porastom dubine atmosfere raste indeks loma pa se i  $\theta_c$  povećava, do najviše  $1,3^\circ$ . Oblik spektra Čerenkovljevog zračenja u atmosferi određen je velikim dijelom prigušenjem. U ultraljubičastom području spektar naglo pada baš zbog prigušenja. Za pljuske čestice koji ne dopiru do površine Zemlje informacije o upadnoj kozmičkoj zraci dobivamo isključivo detekcijom Čerenkovljevog zračenja.

### 1.3. Čerenkovljevi teleskopi

Čerenkovljevi teleskopi opažaju kozmičke gama-zrake pomoću Čerenkovljeve svjetlosti. Čerenkovljev teleskop sastoji se od segmentiranog zrcala promjera desetak metara i

segmentirane kamere od par stotina foto-senzora. Zrcalo reflektira u kameru teleskopa dio Čerenkovljeve svjetlosti iz pljuska, a brza elektronika kamere zabilježi sliku pljuska.

Atmosferskim Čerenkovljevim teleskopima opažaju se visokoenergijski gama-fotoni koji dolaze iz galaktičkih i izvangalaktičkih izvora. Visokoenergijske čestice visoko u atmosferi međudjeluju s molekulama zraka i stvaraju pljusak sekundarnih čestica koje putuju brzinom većom od brzine svjetlosti u zraku i emitiraju Čerenkovljevo zračenje u obliku niskoenergijskih fotona čije valne duljine odgovaraju vidljivim i ultraljubičastim fotonima. Čerenkovljevo zračenje emitira se pod karakterističnim kutom u odnosu na smjer nabijene čestice a kut se mijenja s gustoćom atmosfere. Zbog malog indeksa loma zraka, karakteristični kut je relativno malen stoga je Čerenkovljeva svjetlost jako usmjerena, a pripadajući svjetlosni bazen na tlu ima promjer oko 250 metara.



Slika 4. Detekcija visokoenergijskih gama-zraka. Izvor: <http://lapp.irb.hr/publications/IvaDiploma.pdf>.

## 2. PLJUSKOVI ČESTICA U ATMOSFERI

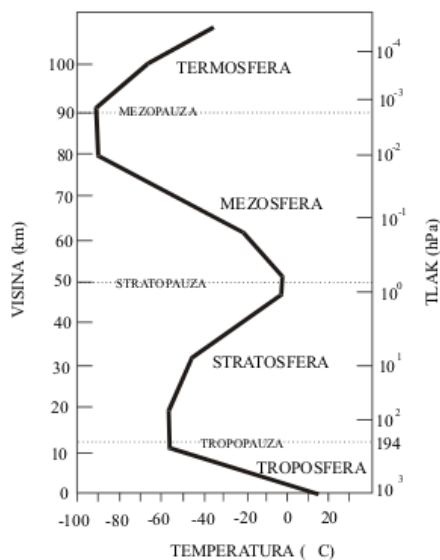
### 2.1. Atmosfera

Atmosfera je sastavni dio detektorskog sustava Čerenkovljevog teleskopa. Ako želimo razumjeti interakciju Zemljine atmosfere i atmosferskog pljuska potrebno je dobro poznavati sastav atmosfere i njezina svojstva. Osnovni sastojci Zemljine atmosfere, zraka, jesu plinovi

dušik, kisik i argon, u tragovima vodena para i ugljikov dioksid te u sasvim malim količinama vodik, helij, ozon, metan, amonijak, ugljikov monoksid, kripton i ksenon. Glavna karakteristika atmosfere je njezina hipotetska vertikalna raspodjela i eksponencijalno smanjivanje gustoće povećanjem udaljenosti od tla. Atmosfera nas štiti od visokoenergetskog zračenja iz svemira.

## 2.2. Različita područja u atmosferi

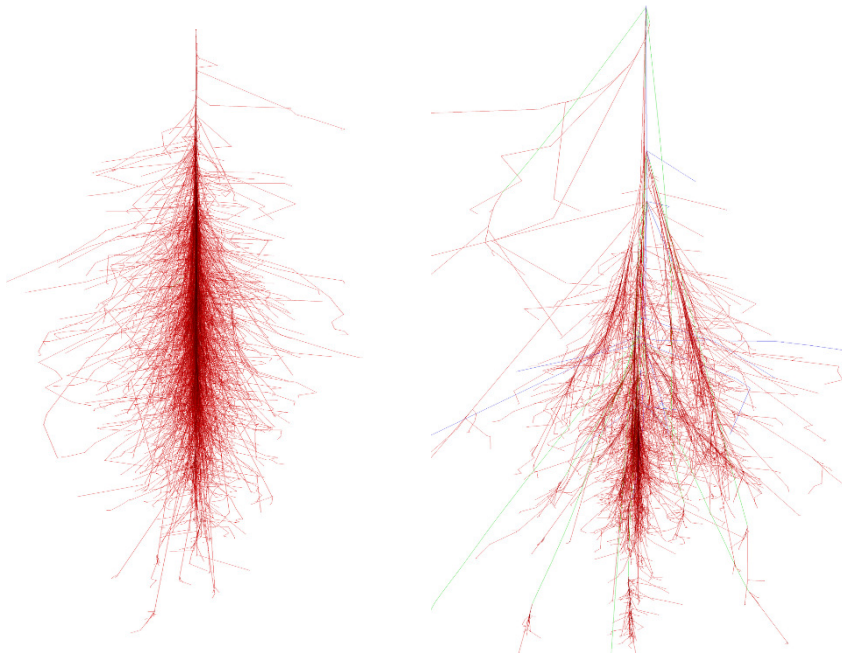
S obzirom na promjenu temperature s visinom atmosfera je podijeljena na više slojeva. Troposfera je najniži sloj gdje temperatura zraka opada u prosjeku  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $1\text{ km}$ . Pojavljuju se oblaci, padaju oborine, pušu vjetrovi i zbivaju se sve promjene koje čine vrijeme. Iznad troposfere je tropopauza,  $1$  do  $2\text{ km}$  deo sloj, gdje se temperatura zraka gotovo ne mijenja. Idući sloj, sve do  $50\text{ km}$ , jest stratosfera, u kojoj temperatura raste te na svojem vrhu doseže vrijednosti kao pri tlu. Atmosferski sloj koji se nalazi između  $50\text{ km}$  i  $80\text{ km}$  naziva se mezosfera. U njemu temperatura zraka opada s visinom da bi na vrhu sloja dosegula vrijednosti od  $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Iznad  $80\text{ km}$  pa sve do  $500\text{ km}$  proteže se termosfera, u kojoj temperatura ponovno raste s visinom. Sloj između  $60\text{ km}$  i  $400\text{ km}$  naziva se ionosfera. Iznad ionosfere proteže se egzosfera; unutar nje na visinama iznad  $500\text{ km}$  započinje magnetosfera, u kojoj struje naelektrizirane čestice zraka pod djelovanjem Zemljina magnetskoga polja, a ionizacija je toliko jaka da čestice čine plazmu.



Slika 5. Slojevitost atmosfere. Promjena tlaka i temperature s promjenom visine. Izvor: [http://jadran.gfz.hr/pojmovnik\\_s.html](http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_s.html).

### 2.3. Pljuskovi čestica u atmosferi

Astročestice vrlo visokih energija koje dolaze do Zemlje redovito bivaju zaustavljene već u gornjim slojevima atmosfere. Tako atmosfera štiti život na Zemlji od pogubnog zračenja. S druge strane, upravo zahvaljujući atmosferi možemo s površine Zemlje opažati visokoenergijske protone i kozmičke gama-zrake preko velikih pljuskova čestica u atmosferi. Visokoenergijski proton ili kozmička gama-zraka sudara se u gornjem sloju atmosfere s atomskom jezgrom dušika ili kisika. Rezultat tog sudara nije samo razbijena atomska jezgra nego i potpuno novi par visokoenergijskih čestica. Stvaranje parova materijalnih čestica iz čiste energije ili tvorba parova uobičajen je događaj u visokoenergijskoj fizici. Dvije nove čestice, zapravo čestica i antičestica, koje nastanu u prvom sudaru kozmičke zrake s atomskom jezgrom imaju više nego dovoljnu energiju da ponove proces tvorbe para. I ta se priča ponavlja puno puta. U vrlo kratkom vremenu nakon prvog sudara nastaje kaskada ili veliki pljusak sekundarnih čestica. Broj novostvorenih sekundarnih čestica, većinom elektrona i pozitrona, ovisi o energiji primarne kozmičke čestice, a može biti od par milijuna do čak stotinu milijardi.



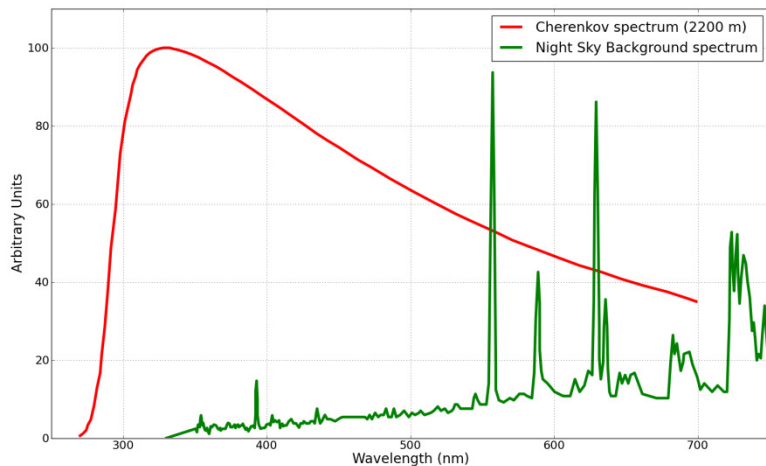
Slika 6. Pljusak sekundarnih nabijenih čestica u atmosferi započet kozmičkom gama-zrakom (lijevo) i kozmičkim protonom (desno). Oba se pljuska protežu dvadesetak kilometara kroz atmosferu, no desni ima širi poprečni razvoj i nepravilniju strukturu. Izvor: <https://www-zeuthen.desy.de/~jknapp/fs/photon-50GeV.xz.png>, [https://www-zeuthen.desy.de/~jknapp/fs/proton\\_11\\_0deg.xz.png](https://www-zeuthen.desy.de/~jknapp/fs/proton_11_0deg.xz.png).

### 3. SOFTVERSKI PAKET MODTRAN

MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) je programski paket dizajniran za modeliranje širenja elektromagnetskog zračenja u atmosferi za spektralno područje od infracrvenog zračenja do ultraljubičastog zračenja. MODTRAN koriste znanstvenici širom svijeta za predviđanje i analizu optičkih mjerenja u atmosferi. MODTRAN je razvijen i nastavlja se održavati kroz dugogodišnju suradnju između Spektralnih znanosti (SSI) i Zrakoplovnog istraživačkog laboratorija (AFRL). Kod je ugrađen u mnoge operativne i istraživačke senzore i sustave za obradu podataka. Fizika zračenja u sklopu MODTRAN-a omogućuje točne i brze metode za modeliranje stratificiranih, vodoravno homogenih atmosfera. MODTRAN rješava transportnu jednadžbu, uključujući molekularnu emisiju i apsorpciju, raspršenje čestica i mnoge druge procese. Osnovna fizika i algoritmi koji se koriste u MODTRAN-u dobro su utvrđeni.

#### 3.1. Mjerenje transparentnosti atmosfere

Mjerenje atmosferske transparentnosti neophodno je za posredno opažanje visokoenergijskih gama-zraka iz galaktičkih i izvangalaktičkih izvora Čerenkovljevim teleskopom. Opaža se Čerenkovljeva svjetlost iz atmosferskog pljuska koji je započeo upadom gama-zrake u atmosferu. Iz slike koja nastane u kameri teleskopa rekonstruira se energija i smjer upadne kozmičke gama-zrake. Atmosfera je najvažniji dio detektorskog sustava. Ona omogućuje posredno opažanje gama-zraka. No, isto tako ona predstavlja i problem za Čerenkovljev teleskop jer Čerenkovljeva svjetlost, prolazeći kroz atmosferu, slabi. Stoga je važno dobro poznavati promjenljivu atmosfersku transparentnost kako bi se dobio što bolji model atmosfere. Mi ćemo određivati transparentnost atmosfere preko online aplikacije koju nudi softverski paket MODTRAN. Sami postavljamo određene parametre na osnovu kojih dobivamo graf koji prikazuje kakva je prozirnost atmosfere uz takve uvjete, u ovisnosti o valnoj duljini. Koristeći MODTRAN-ovu besplatnu mrežnu aplikaciju računat ćemo i crtati transparentnost atmosfere uz zadane parametre. Čerenkovljev spektar se u atmosferi proteže negdje od 290 nm do 700 nm, ali su detektori osjetljivi u području između 300 nm do 600 nm. Izvorni spektar dakle nije ono što će kamera teleskopa vidjeti. Spektar se deformira zbog utjecaja atmosfere. Za različite valne duljine transparentnost atmosfere je različita.



Slika 7. Izvorni Čerenkovljev spekter (crvena krivulja) i spekter pozadinske svjetlosti noćnog neba (zelena krivulja). Kad Čerenkovljeva svjetlost, putujući kroz atmosferu prema tlu ona se atenuira (apsorbira i raspršuje) zbog različitih procesa: apsorpcije na ozonu, apsorpcije na molekulama  $H_2O$  i  $CO_2$ . Izvor: <https://inspirehep.net/record/1246767/plots>.

MODTRAN-ova nam aplikacija nudi izbor od šest različitih modela atmosfere, za koje sami možemo postavljati određene vrijednosti parametara, a program nam onda izradi graf koji prikazuje kako se mijenja transparentnost atmosfere s promjenom valne duljine za odabrani model atmosfere i postavljene parametre

### 3.2. Modeli atmosfere

Atmosfera je vrlo kompleksan sustav i teško ju je u potpunosti opisati. Postoji nekoliko modela atmosfere za nekoliko klimatskih područja:

1. U.S. Standardni model – to je najčešće korišteni model atmosfere. Njime se računaju srednje vrijednosti osnovnih atmosferskih svojstava kao što su tlak, temperatura, gustoća te ostali parametri. U.S. Standardna atmosfera je idealan prikaz prosječnih godišnjih uvjeta koji se pojavljuju u atmosferi od 0 km do 1000 km na zemljopisnoj širini  $45^\circ$  N. Glavni meteorološki elementi, mjereni za razinu mora su temperatura i tlak te temperaturno-visinski profil atmosfere do 1000 km. U modelu su uzete slijedeće vrijednosti kao standardne (za razinu mora):

Temperatura: 288,15 K

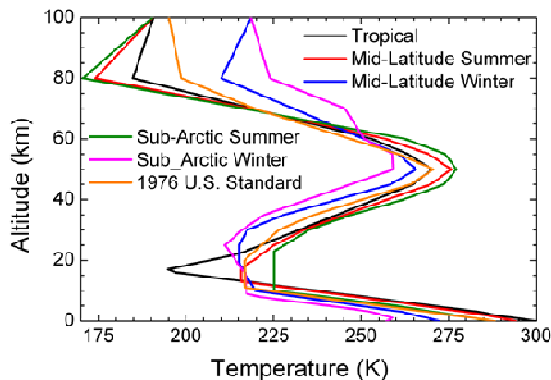
Tlak: 101325 Pa

Gustoća: 1,225 g/L

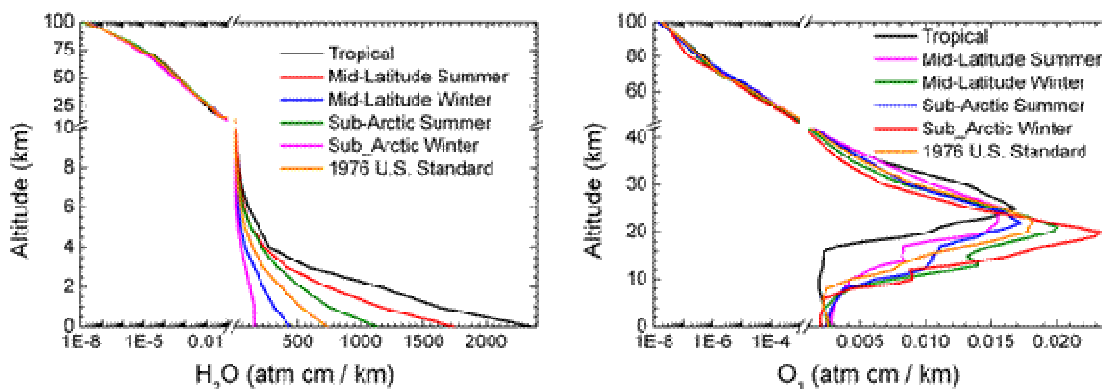


2. Mid-Latitude Summer/Winter Atmosphere Model – modeli zimske i ljetne atmosfere srednje sjeverne zemljopisne širine s visinom do 90 km, daju informacije o atmosferskoj strukturi prema godišnjim dobima. Standardne temperature su:  $T = 294,2 \text{ K}$  za ljetni model i  $T = 272,2 \text{ K}$  za zimski model.
3. Sub-Arctic Summer/Winter Atmosphere Model – modeli zimske i ljetne atmosfere za subarktička područja. Standardne temperature su  $T = 257,2 \text{ K}$  za zimski model i  $T = 287,2 \text{ K}$  za ljetni model.
4. Tropical Atmosphere model - standardni model za područje oko ekvatora sa standardnom temperaturom od  $T = 299,7 \text{ K}$ .

Ovih šest modela atmosfere koje MODTRAN nudi se dakle najznačajnije razlikuju u temperaturama na razini mora te u sadržaju ozona i vodene pare u atmosferi.



Slika 8. Usporedba vertikalnog temperaturnog profila za različite modele atmosfera. Izvor: [http://modtran.spectral.com/static/modtran\\_site/img/fig\\_1\\_Model\\_Atmosphere\\_T\\_nc.png](http://modtran.spectral.com/static/modtran_site/img/fig_1_Model_Atmosphere_T_nc.png).



Slika 9. Usporedba profila za koncentraciju ozona i vodene pare za različite modele. Izvor: [http://modtran.spectral.com/static/modtran\\_site/img/image004.gif](http://modtran.spectral.com/static/modtran_site/img/image004.gif).

### 3.3. Zadavanje parametara

Upoznali smo se ukratko sa modelima atmosfera koje nam MODTRAN nudi u svojoj mrežnoj aplikaciji. Pogledajmo sad koje to parametre koji određuju transparentnost atmosfere možemo zadavati:

1. Aerosol Model - aerosoli su krute ili tekuće čestice raspršene u zraku. Proizvode se prirodnim putem ili iz antropogenih izvora te se emitiraju u atmosferu. Prirodni izvori aerosola su: vulkani, ocean, pustinja i biosfera. Aerosoli se stvaraju i pri izgaranju goriva. Globalna proizvodnja aerosola je oko 10 milijuna tona u danu. Aerosoli se dijele na primarne i sekundarne aerosole. Aerosol Model - nudi izbor 4 modela:

- Rural Model - ovaj se model koristi za područja gdje nema značajnih industrijskih procesa,
- Urban Model – ovaj model dodaje učinke industrijskih procesa,
- Navy Aerosol Model - izrađen po mjeri za morske aerosole i uključuje raspršene veličine aerosola koji se uzimaju u mnogim izvorima. Model ovisi o brzini vjetra koja varira na temelju atmosferskog modela,
- Desert Model - model pustinjskog aerosola koristi tri glavne komponente: ugljikovodici aerosola koristi tri glavne komponente: ugljične čestice, čestice topljive u vodi i pijesak.

2. Water Column – ovim parametrom zadajemo vrijednost apsolutne visinske vodene pare u stupcu atm-cm.

3. Ozone Column – parametar kojim zadajemo gustoću ozona.

4. CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> – vrijednosti koncentracije ugljikovog dioksida, ugljikovog monoksida i metana u ppmv<sup>2</sup>, a koje se smatraju konstantnima kroz atmosferu. Vrijednost za 2013. godinu iznosila je redom oko 400 ppmv, 0,15 ppmv i 1,8 ppmv.

5. Ground Temperature – površinska temperatura zemlje. Navedeno je kolika je standardna temperatura za pojedini model atmosfere.

6. Ground Albedo – reflektivnost površine koja poprima vrijednosti između 0 i 1, što ovisi o materijalu površine.

7. Visibility - varijacija koncentracije aerosola može se mijenjati na temelju površinskog meteorološkog raspona ili vidljivosti. Za mutne uvjete (2 <VIS <10 km) pretpostavlja se

---

<sup>2</sup> "parts per million volume", jedinični volumen nekog plina po milijun jediničnih volumena zraka

da je koeficijent ekstinkcije aerosola konstantan za nadmorske visine do 1 km. Za jasne uvjete ( $23 < \text{VIS} < 50$  km) vertikalna raspodjela aerosola je eksponencijalna.

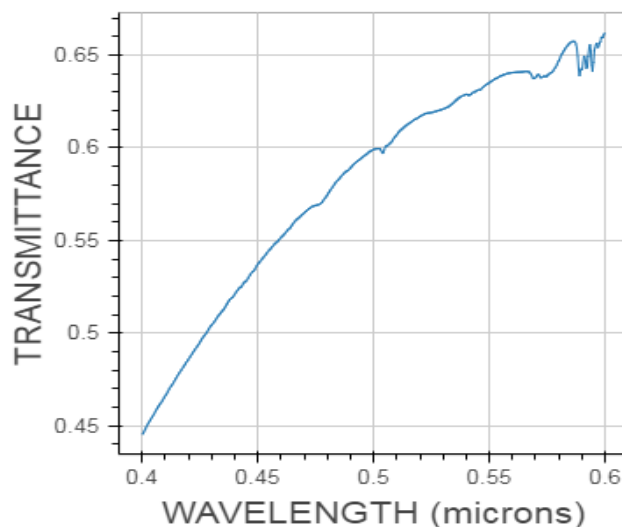
### 3.4. Rad u aplikaciji

Pogledajmo najzad koliko je koji od navedenih modela atmosfere pogodan za promatranje Čerenkovljevog spektra teleskopom. Rekli smo da se Čerenkovljev spektar u atmosferi proteže negdje od 290 nm do 700 nm, ali su detektori osjetljivi u području između 300 nm do 600 nm pa stoga u aplikaciji prvo podesimo to spektralno područje koje promatramo.

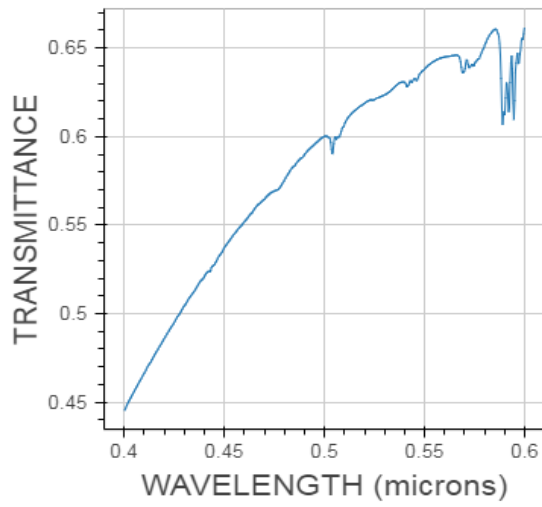


Valna duljina je u aplikaciji izražena u mikrometrima pa jednostavno pretvorimo nanometre u mikrometre i odredimo širinu spektralnog područja. Promatrat ćemo područje od 400 do 600 nm jer aplikacija ne nudi izbor manje valne duljine od 400 nanometara.

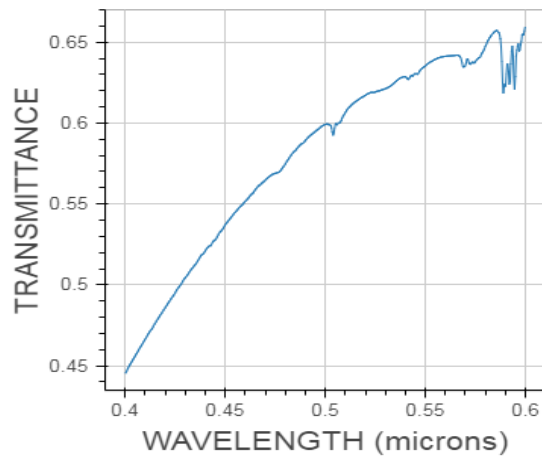
#### 1. U.S. Standard Model 1976.



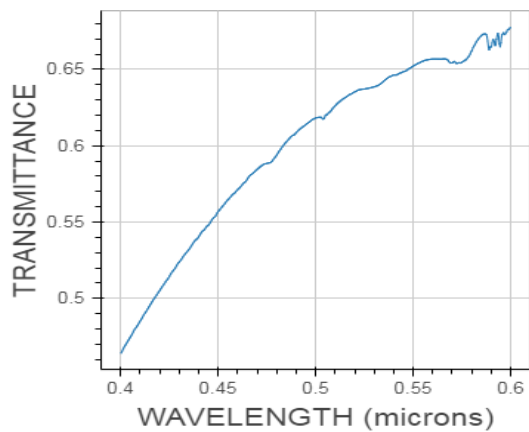
## 2. Tropical Atmosphere Model



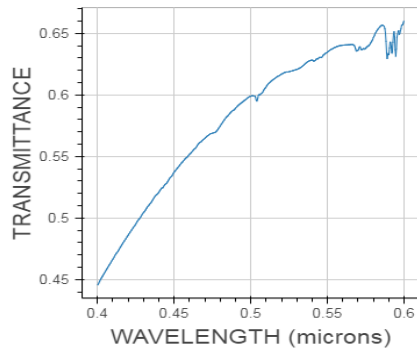
## 3. Mid – Latitude Summer Atmosphere Model



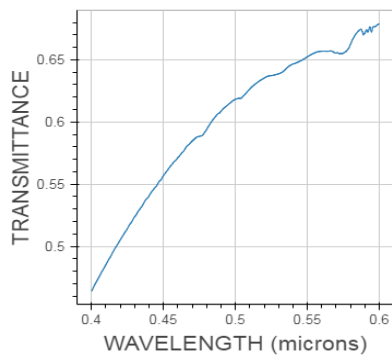
## 4. Mid – Latitude Winter Atmosphere Model



## 5. Sub-Arctic Summer Atmosphere Model



## 6. Sub-Arctic Winter Atmosphere Model



Model	Water Column (atm-cm)	Ozone Column (atm-cm)	Ground Temperature (K)	Aerosol	CO <sub>2</sub> (ppmv)	CO (ppmv)	CH <sub>4</sub> (ppmv)	Visibility (km)	Sensor Altitude (km)	Sensor Zenith (deg)
U.S. Standard	1762.3	0.34356	288.15	Rural	400	0.15	1.8	23.0	50	180
Tropical	5119.4	0.27727	299.7	Rural	400	0.15	1.8	23.0	50	180
Mid- Latitude Winter	1099.7	0.37651	272.2	Rural	400	0.15	1.8	23.0	50	180
Mid- Latitude Summer	3635.9	0.33176	294.2	Rural	400	0.15	1.8	23.0	50	180
Sub-Arctic Winter	517.73	0.3755	257.2	Rural	400	0.15	1.8	23.0	50	180
Sub-Arctic Summer	2589.4	0.34492	287.2	Rural	400	0.15	1.8	23.0	50	180

Tabela prikazuje vrijednosti parametara za dane modele atmosfere.

## 4. CTA NORTH

U sklopu projekta izgradnje niza Čerenkovljevih teleskopa (CTA) 9. listopada 2015. godine je u opservatoriju Roque de los Muchachos na kanarskom otoku La Palmi položen kamen temeljac za prvi od četiri velika Čerenkovljeva teleskopa na sjevernoj hemisferi. Danas dvije godine kasnije, bliži se kraju gradnja tog prvog teleskopa budućeg opservatorija koji će omogućiti nove spoznaje o nekim od najekstremnijih i najsilovitijih događaja u svemiru te opažanje visokoenergijskog zračenja s dosad neviđenom preciznošću. U projektu sudjeluje oko 1500 znanstvenika i inženjera s pet kontinenata i 30 zemalja te više od 170 istraživačkih institucija. Osim sjevernog CTA opservatorija na Kanarskim otocima, gradi se i južni opservatorij u Čileu. Očekuje se da će CTA biti aktivan barem 30 godina kao najmoćniji svjetski opservatorij za mjerenje gama-zračenja iz svemira. Opservatorij CTA dat će nam uvid u najekstremnije objekte u svemiru, koji zrače na visokim energijama: supermasivne crne rupe, kvazare, pulsare, supernove, provale. S obzirom na to da se teleskopi nalaze na vrhu planine, u potpunosti izloženi atmosferi bez zaklona, moraju biti napravljeni vrlo pažljivo zbog vanjskih utjecaja poput promjene temperature, puhanja vjetra, oscilacija i sličnih poremećaja.

### 4.1. Atmosferska transparentnost za CTA

Mjesto gdje će biti opservatorij CTA North je:

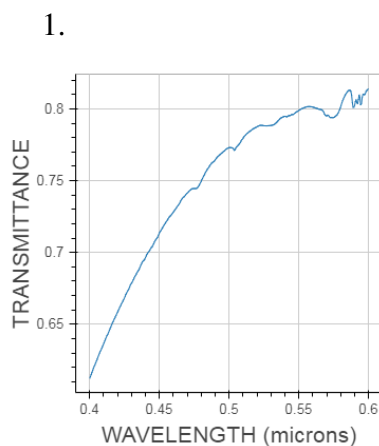
- lokacija: La Palma, Španjolska
- koordinate:  $28^{\circ}45'43''\text{N}$ ,  $17^{\circ}53'24''\text{W}$
- nadmorska visina: 2200 m
- 

Pogledajmo koji atmosferski model, aerosol model, temperatura tla u noći i sastav atmosfere odgovaraju položaju opservatorija, a zatim kakva je tipična transparentnost atmosfere za takve parametre. Na mjestu gdje će biti opservatorij CTA sada se nalazi teleskop MAGIC. Poseban problem za opažanje teleskopom predstavljaju tanki transparentni oblaci par kilometara iznad

teleskopa. Također, svako ljeto, postoji problem sitne pustinjske prašine, zvane kalima, koju vjetar iz Sahare nanosi na Kanarske otoke.

La Palma je mjesto kojim vlada suptropska klima koju karakteriziraju duga, vruća i sušna ljeta te kratke, blage i vlažne zime. To je pogodno mjesto za astronomska istraživanja jer se visoki oblaci nalaze uglavnom iznad visina na kojima nastaje većina Čerenkovljeve svjetlosti, a niski oblaci su ispod mjesta opažanja. Sloj ozona je najvećim dijelom koncentriran između 12 km i 28 km nadmorske visine. U srednjim i gornjim slojevima troposfere zrak je stabilan, dok površinsko zagrijavanje tla destabilizira zrak u nižim slojevima. Na granici tih slojeva događa se temperaturna inverzija. Zrak iznad inverznog je stabilan a zrak ispod je nestabilan, pa opservatorij treba smjestiti iznad inverznog sloja. Inverzni sloj na La Palmi često se nalazi između 600 i 1500 metara nadmorske visine. Dakle, opservatorij je iznad. Prolazak ciklona sa zapada prema istoku preko suprotropa može uzrokovati poremećaj inverznog sloja. Kako je opservatorij iznad tog sloja, atmosferska transparentnost gotovo potpuno ovisi o koncentraciji aerosola u zraku. Temperature na La Palmi su vrlo blage: najniže su oko 290 K, a najviše oko 300 K.

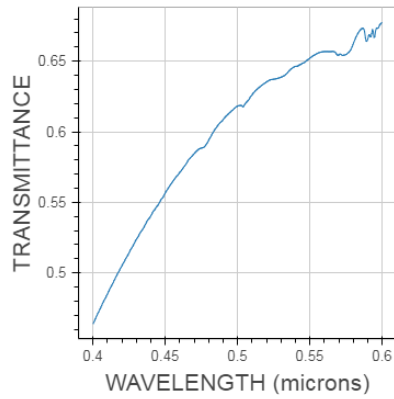
Na osnovu ovih podataka, postavimo parametre i analizirajmo transparentnost atmosfere na tom području.



ATMOSPHERE MODEL	Mid-Latitude Winter
AEROSOL	Desert
VISIBILITY (km)	75,75
OZONE COLUMN (atm-cm)	0,37681
WATER COLUMN (atm-cm)	1059,7
CO <sub>2</sub> (ppmv)	400
CO (ppmv)	0,15
CH <sub>4</sub> (ppmv)	1,8
GROUND TEMPERATURE (K)	290,0
GROUND ALBEDO (0-1)	0
SENSOR ALTITUDE (km)	50
SENSOR ZENITH (deg)	180

Biramo Mid-Latitude model jer je to model za geografsku sjevernu širinu od 23° do 26°. Postavili smo Desert Model za aerosol zbog pustinjske prašine. Za CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> uzete su standardne vrijednosti iz 2013. Oni se smatraju konstantnima. Promatramo zimski model pa smo postavili prosječnu najnižu površinsku temperaturu na La Palmi.

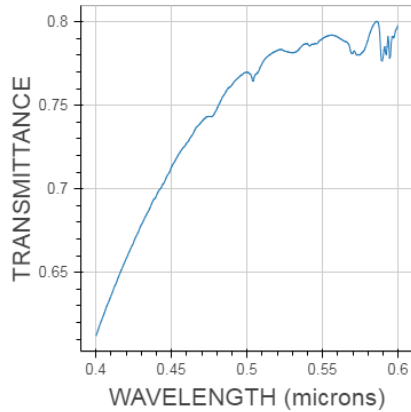
2.



ATMOSPHERE MODEL	Mid-Latitude Winter
AEROSOL	Rural
VISIBILITY (km)	23,0
OZONE COLUMN (atm-cm)	0,37681
WATER COLUMN (atm-cm)	1059,7
CO <sub>2</sub> (ppmv)	400
CO (ppmv)	0,15
CH <sub>4</sub> (ppmv)	1,8
GROUND TEMPERATURE (K)	290,0
GROUND ALBEDO (0-1)	0
SENSOR ALTITUDE (km)	50
SENSOR ZENITH (deg)	180

Ovdje smo uzeli Rural Aerosol Model gdje se vidljivost smanjila na 23,0 km. Budući da je mala promjena vidljivosti u odnosu na prvi slučaj, mala je promjena i u grafu .

3.

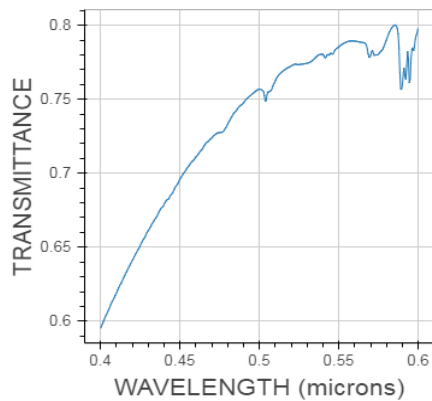


ATMOSPHERE MODEL	Mid-Latitude Winter
AEROSOL	Desert
VISIBILITY (km)	75,75
OZONE COLUMN (atm-cm)	0,50000
WATER COLUMN (atm-cm)	2000,0
CO <sub>2</sub> (ppmv)	1000,0
CO (ppmv)	1,0
CH <sub>4</sub> (ppmv)	2,0
GROUND TEMPERATURE (K)	290,0
GROUND ALBEDO (0-1)	0
SENSOR ALTITUDE (km)	50
SENSOR ZENITH (deg)	180

Sad smo udvostručili vrijednosti CO<sub>2</sub>, CO i CH<sub>4</sub> i vidimo da njihova promjena nema velikog utjecaja na transparentnost atmosfere.



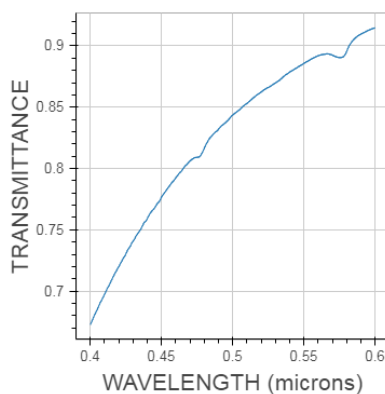
4.



ATMOSPHERE MODEL	Mid-Latitude Summer
AEROSOL	Desert
VISIBILITY (km)	75,75
OZONE COLUMN (atm-cm)	0,33176
WATER COLUMN (atm-cm)	3635,9
CO2 (ppmv)	400
CO (ppmv)	0,15
CH4 (ppmv)	1,8
GROUND TEMPERATURE (K)	300
GROUND ALBEDO (0-1)	0
SENSOR ALTITUDE (km)	50
SENSOR ZENITH (deg)	180

Sada promatramo ljetni model atmosfere pa smo temperaturu postavili na najvišu prosječnu temperaturu na La Palmi.

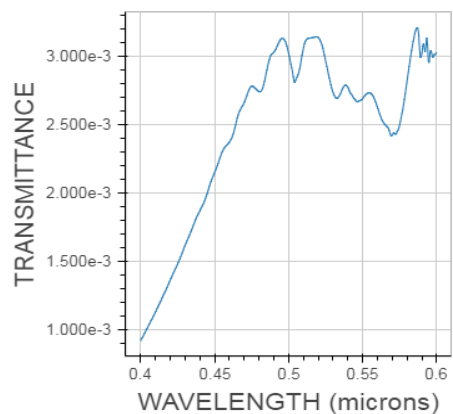
5.



ATMOSPHERE MODEL	Mid-Latitude Summer
AEROSOL	Desert
VISIBILITY (km)	1000
OZONE COLUMN (atm-cm)	0
WATER COLUMN (atm-cm)	0
CO2 (ppmv)	0
CO (ppmv)	0
CH4 (ppmv)	0
GROUND TEMPERATURE (K)	300
GROUND ALBEDO (0-1)	0
SENSOR ALTITUDE (km)	50
SENSOR ZENITH (deg)	180

Promatramo idealni slučaj atmosfere. Nema ozona, vodene pare ni ostalih plinova, a vidljivost je maksimalna. Identičan graf se dobije i kada se promatra zimski model, odnosno kad se temperatura smanji na 290 K uz iste ostale parametre.

6.



ATMOSPHERE MODEL	Mid-Latitude Summer
AEROSOL	Desert
VISIBILITY (km)	1000
OZONE COLUMN (atm-cm)	0
WATER COLUMN (atm-cm)	0
CO <sub>2</sub> (ppmv)	0
CO (ppmv)	0
CH <sub>4</sub> (ppmv)	0
GROUND TEMPERATURE (K)	300
GROUND ALBEDO (0-1)	0
SENSOR ALTITUDE (km)	50
SENSOR ZENITH (deg)	180

Promatramo najnepovoljniji slučaj atmosfere. Udio ozona, vodene pare i ostalih plinova je maksimalan, a vidljivost minimalna. S grafa se vidi drastičan pad transparentnosti atmosfere.

## 5. ZAKLJUČAK

Kozmički fotoni visokih energija donose nam pregršt korisnih informacija o dalekim i neistraženim objektima stoga se gama-astronomijom danas bavi jako puno i ona je najuspješnije područje astročestične fizike. Njezin osnovni instrument je Čerenkovljev teleskop koji atmosferu koristi kao dio detektorskog sustava. Koliko je korisna, toliko stvara i problema jer svjetlost koja nam dolazi iz dalekih objekata prolaskom kroz atmosferu slabi. Danas se jako puno radi na istraživanju svojstava atmosfere i na izrađivanju najpogodnijih modela kako bi promatranja kroz atmosferu bila što učinkovitija. Mjerenje atmosferske transparentnosti nužno je zbog kontrole kvalitete, i eventualnih popravaka podataka dobivenih opažanjem Čerenkovljevih teleskopima. Kako je atmosfera ključni dio detektora, promjene u atmosferskoj transmisiji je potrebno pratiti. Danas se intenzivno radi na simulacijama cijelog detektorskog sustava CTA, od čega su simulacije atmosferske transparentnosti samo jedan dio priče.

## POPIS LITERATURE

- [1] Hrupec, D. Extragalactic sources of rapidly variable high energy gamma radiation, Doctoral Thesis, University of Zagreb, 2008.  
<http://lapp.irb.hr/~dhrupec/documents/doctoralthesis.pdf> (20.7. 2017.)
- [2] Hrupec, D. Doprinos razvoju teleskopa MAGIC za detekciju gama zračenja iz kompaktnih kozmičkih objekata, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 1997.
- [3] Perković, I. Utjecaj promjenljive atmosferske transparentnosti na opažanja Čerenkovljevih teleskopima. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2009.  
<http://lapp.irb.hr/publications/IvaDiploma.pdf>. (8. 8. 2017.)
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation) (8. 8. 2017.)
- [5] <http://www.nemis.hr/index.php/pojmovnik/Pojmovnik-1/%C4%8C/%C4%8Cerenkovljevo-zra%C4%8Denje-28/> (22. 8. 2017.)
- [6] <http://www.astronomija.org.rs/nauka/fizika/10787-brze-od-svetlosti-cerenkovljevo-zracenje> (20. 8. 2017.)
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere> (20. 8. 2017.)
- [8] <http://www.crometeo.hr/atmosfera/> (20. 8. 2017.)
- [9] <https://www.britannica.com/science/Cherenkov-radiation> (21. 8. 2017.)
- [10] <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaean2/> (22. 8. 2017.)
- [11] <https://www.universetoday.com/40276/cherenkov-radiation/> (20. 8. 2017.)
- [12] <http://modtran.spectral.com/> (25. 8. 2017.)
- [13] <https://www.irb.hr/Novosti/Polaganje-kamena-temeljca-za-izgradnju-najveceg-Cerenkovljevog-teleskopa-na-sjevernoj-hemisferi> (24. 8. 2017.)
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=x4Ir6E4IG64> (20. 7. 2017.)
- [15] <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/cherenkov.html> (20. 7. 2017.)
- [16] <https://magic.mpp.mpg.de/> (25. 9. 2017.)
- [17] <http://www.scienceinschool.org/hr/2011/issue20/em> (20. 8. 2017.)
- [18] <https://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/layers.html> (22. 8. 2017.)
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric\\_electromagnetic\\_opacity.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Atmospheric_electromagnetic_opacity.svg) (23. 8. 2017.)
- [20] <http://www.pfri.uniri.hr/~mrak/files/2%20Elektromagnetski%20valovi%202.pdf> (22. 8. 2017.)

[20] <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/particle-physics-basics/cerenkov-radiation/> (24. 8.2017.)

[21]<https://www.irb.hr/content/download/16126/323799/file/PRIOPCENJE-Polaganje-kamena-temeljca-za-prototip-velikoga-Cerenkovljevog-teleskopa.pdf> (28. 9. 2017.)

[22] <http://www.telegram.hr/biznis-tech/astrofizicarka-dijana-dominis-prester-ispricala-nam-je-sve-o-izgradnji-najveceg-gama-teleskopa-na-svijetu/> (28. 9. 2017.)

## **ŽIVOTOPIS**

Julija Zečević - Pejić rođena je 24. 10. 1995. godine u Tuzli, u Bosni i Hercegovini. U Gornjem Zoviku završila je osnovnu školu, a svoje obrazovanje nastavila u općoj gimnaziji u Brčkom. Gimnaziju završava 2014. godine te upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, gdje i danas studira. Govori engleski i njemački jezik. U slobodno vrijeme putuje i bavi se sportom.