

# Dvojna priroda svjetlosti

---

Zubović, Janja

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:160:720594>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-21**

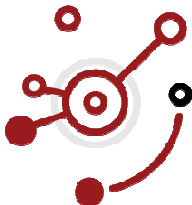


Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU ODJEL  
ZA FIZIKU



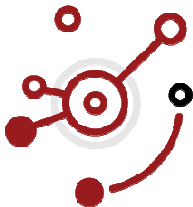
JANJA ZUBOVIĆ

# **DVOJNA PRIRODA SVJETLOSTI**

Završni rad

Osijek, 2016.

SVEUČILIŠTE J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU ODJEL  
ZA FIZIKU



JANJA ZUBOVIĆ

## **DVOJNA PRIRODA SVJETLOSTI**

**Završni rad**

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J.J.Strossmayera u  
Osijeku radi stjecanja zvanja prvostupnice fizike

Osijek, 2016.

Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Branka Vukovića u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

# DVOJNA PRIRODA SVJETLOSTI

**Janja Zubović**

Jedna od najranijih pojava iz fizike koju je čovjek počeo proučavati, svakako je svjetlost. Prema nekim istraživanjima, prva lampa napravljena je prije 70 000 godina (u posudu sa otvorom stavljao se materijal koji je mogao gorjeti i tako stvarati svjetlo). Teško je zamisliti da pojavu s kojom se čovjek susreo čim je došao na svijet, nije mogao u potpunosti objasniti do 1905. godine. Od 17. do 20. stoljeća svjetlost je znanstveno proučavana jer neka pitanja vezana uz nju nikako se nisu mogla objasniti. Preko 350 godina znanstvenici su pokušavali odgonetnuti kakva je to čudna priroda svjetlosti zbog koje se ona ponaša na sasvim različite načine u različitim situacijama - nekada kao val, a nekada kao čestica. Danas priznajemo teoriju po kojoj svjetlost ima dvojnju narav – valnu (undularnu) i čestičnu (korpuskularnu) i ovisno o tome koje pojave proučavamo, nekada se očituje jedna, a nekada druga priroda.

(21 stranica, 13 slika)

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

**Ključne riječi:** svjetlost / dualna priroda / valna teorija / čestična teorija / pokus s dvije pukotine / fotoelektrični efekt

**Mentor:**

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

# DUAL NATURE OF LIGHT

**Janja Zubović**

The phenomena of light is one of the phenomena that mankind started to study most early. According to some researches, first lamp was made 70 000 years ago (it was made of some materials that could burn and on that way, made light). It is hard to imagine that mankind could not explain light until the year 1905. From 17th century until the 20th century light was scientific studied because some question related with light could not be explained. For over 350 years scientists have been trying to figure out about strange nature of light that makes it to behave sometimes as wave and sometimes as particle. Today is confirmed The dual theory of light – wave and corpuscular theory and depending on which phenomena we study, light can manifest as a wave or as a particle.

(21 pages, 13 figures)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** light / dual nature / wave theory / corpuscular theory / double slit experiment / photoelectric effect

**Supervisor:** Branko Vuković, Ph.D., Associate Professor

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

## Sadržaj :

UVOD .....	1
1. O SVJETLOSTI .....	2
1.1. Što je svjetlost? .....	2
2. RAZVOJ IDEJE O PRIRODI SVJETLOSTI .....	4
3. VALNA PRIRODA SVJETLOSTI .....	5
3.1. Interferencija – Youngov pokus .....	6
3.2. Ogib / difrakcija .....	9
3.3. Polarizacija .....	11
4. ČESTIČNA PRIRODA SVJETLOSTI .....	12
4.1. Fotoelektrični efekt .....	13
4.2. Comptonovo raspršenje .....	14
5. IZRADA ANIMACIJA .....	16
6. ZAKLJUČAK .....	19
POPIS LITERATURE .....	20
ŽIVOTOPIS .....	21

---

„Što je neki pojam općenitiji, to on češće ulazi u naše mišljenje, a što je posredniji njegov odnos prema osjetilnom iskustvu, to nam je teže razumjeti njegovo značenje.

To je osobito slučaj s prirodnoznanstvenim pojmovima na koje smo se navikli upotrebljavajući ih od djetinjstva. Uzmimo pojmove koji su u vezi s riječima GDJE, KADA, ZAŠTO, POSTOJANJE, pa se prisjetimo koliko im silan opseg filozofije bijaše posvećen. Mi u našim umovanjima nismo ništa bolji od ribe koja pokušava dokučiti sastav vode.“

---

Albert Einstein, članak *Prostor-vrijeme*

*Encyclopedia Britannica*, 13.izdanje

[1]



## UVOD

„U fizici više ne postoji ništa novo što bi se moglo otkriti, već ostaju samo sve preciznija i preciznija mjerenja.“ izjava je W.Thomsona iz 1900. godine pred skupom na Britanskom udruženju za napredak znanosti. Međutim, pokazalo se da je Thomsonovom izjavom zapravo tek najavio početak eksponencijalnog razvoja kako znanosti tako i tehnologije u 20. stoljeću. Već sam početak tog stoljeća donio je povijesne prevrate u razvoju znanosti. Tijekom tog stoljeća objašnjeni su mnogi problemi iz područja fizike koje dotadašnje znanje nije moglo objasniti.

Na prijelazu iz 19. u 20. stoljeće postojalo je nekoliko „kritičnih“ eksperimenata koje nije bilo moguće objasniti primjenom klasične fizike. To su npr. bili problem zračenja crnog tijela, fotoelektrični efekt, spektralne linije. Stoga, početkom 20. stoljeća razvija se sasvim novi način promatranja svijeta, potpuno nova grana fizike koja uvodi načela i principe koji su u suprotnosti sa klasičnom fizikom - kvantna mehanika.

U ovom radu objasniti ćemo kako je kvantnomehanički pristup omogućio objašnjenje dvojnosti prirode svjetlosti. Valna teorija, eksperimentalno potvrđena 1801. godine, nije mogla objasniti problem fotoelektričnog učinka s kojim se 1887. godine susreo Heinrich Hertz[6]. U čudesnoj<sup>1</sup> 1905. godini mladi Albert Einstein pomoću smione pretpostavke objasnio je tu pojavu - pri fotoelektričnom učinku elektromagnetno zračenje ne ponaša se kao val, nego kao roj sitnih zrnaca koja imaju energiju. Ta zrnca energije su kasnije nazvani fotoni. Objašnjenjem fotoelektričnog efekta u potpunosti je riješen problem dvojne prirode svjetlosti [1], [2].

---

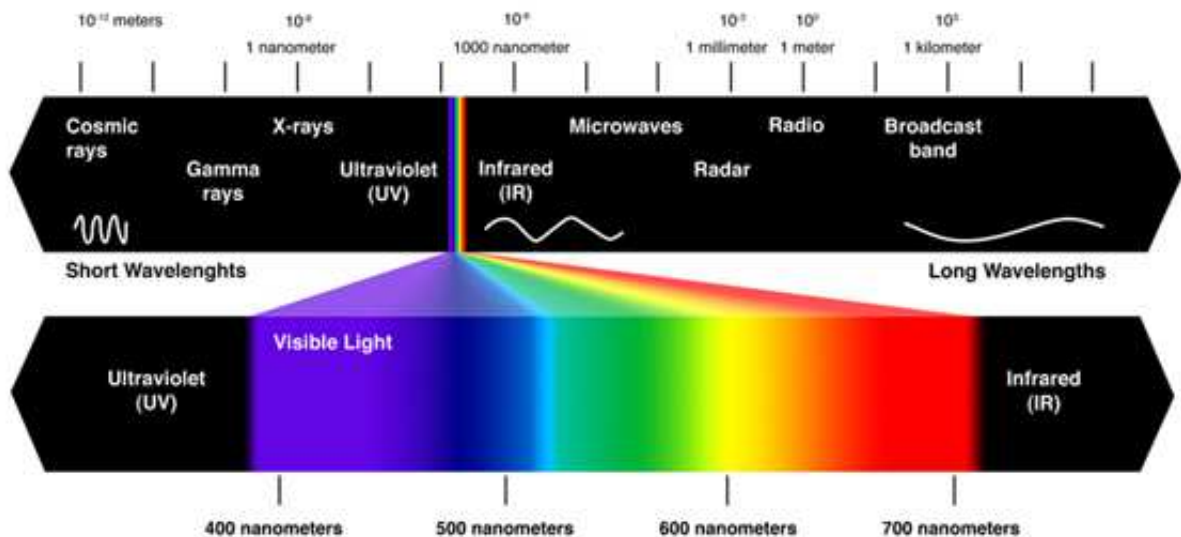
<sup>1</sup>1905. godine A. Einstein svoja četiri velika otkrića objavljuje u časopisu *Annalen der Physik*. Ta otkrića su: fotoelektrični efekt, Brownovo gibanje, specijalna teorija relativnosti i ekvivalentnost mase i energije. Uobičajeno je da se danas ti znanstveni radovi nazivaju radovi *Annus Mirabilis*, prevedeno sa latinskog „čudesna godina“. Za otkriće fotoelektričnog efekta A. Einstein dobio je Nobelovu nagradu.

# 1. O SVJETLOSTI

Da bismo mogli vidjeti Sunce, zvijezdu Sjevernjaču ili plamen svijeće, dio svjetlosti iz tog izvora mora pasti na mrežnicu našeg oka. Oko je organ vida koji neposredno prima svjetlosne utiske i šalje ih u mozak. Ali, kako vidimo nešto? Ukratko, svjetlost koja padne na naše oko, prolazi rožnicom, lomi se na očnoj leći te na mrežnici stvara sliku. Struktura mrežnice omogućuje detekciju zračenja, odnosno svjetlosnih podražaja te nastajanje živčanih impulsa, koji dovode informaciju o podražaju u mozak. Mrežnica dakle predstavlja zastor na kojem optički sustav stvara sliku vanjskog predmeta.

## 1.1. Što je svjetlost?

Svjetlošću nazivamo elektromagnetsko zračenje koje se sastoji od vidljivog dijela spektra valova s rasponom valnih duljina od 380 do 780nm, koje ljudsko oko razlikuje kao boje - od ljubičaste, s najmanjom valnom duljinom, do crvene, s najvećom valnom duljinom, što je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja. [3]

Tijela koja emitiraju svjetlost nazivaju se izvorima svjetlosti. Svjetlost se giba najvećom mogućom brzinom,  $c = 300\,000\text{ km/h}$ . Svjetlost koja dolazi iz umjetnih izvora (npr. žarulja) ima ista svojstva kao svjetlost koja dolazi iz prirodnih izvora.

Dio fizike koji proučava svojstva i širenje svjetlosti te međudjelovanje svjetlosti i tvari zove se optika. U širem smislu, optika se bavi i infracrvenim, ultraljubičastim, a djelomično i rendgenskim zračenjem. Klasična se optika dijeli na geometrijsku i valnu optiku, dok su novije grane nelinearna, neslikovna i kvantna optika.

Geometrijska optika zanemaruje valni karakter svjetlosti, odnosno u potpunosti zanemaruje karakter svjetlosti. Ona opisuje svjetlost kao snop zraka koje se šire pravocrtno. Postoje četiri zakona geometrijske optike:

1. Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti. Svjetlost se u homogenom izotropnom sredstvu širi pravocrtno.

2. Zakon nezavisnosti snopova svjetlosti. Snop svjetlosti je skup svjetlosnih zraka. Dva snopa svjetlosti se u prostoru šire potpuno nezavisno, bez međudjelovanja.

3. Zakon refleksije svjetlosti. Kad svjetlost dolazi do granice dvaju prozirnih sredstava, onda djelomično reflektira, a djelomično ulazi u drugo sredstvo. Kad se svjetlost reflektira na granici dvaju sredstava, upadna zraka, reflektirana zraka i okomica na granicu drugog sredstva leže u istoj ravnini, a upadni kut jednak je kutu refleksije.

4. Zakon loma svjetlosti. Kada svjetlost prelazi iz jednog sredstva u drugo, dolazi do loma svjetlosti jer je brzina svjetlosti različita u tim sredstvima [7], [5].

Fizikalna optika se pak zasniva na valnoj teoriji, ali joj pripisuje i čestična svojstva.

## 2.RAZVOJ IDEJE O PRIRODI SVJETLOSTI

Optika se proučavala još u starom vijeku. Drevni su Babilonci poznavali pravocrtno širenje svjetlosti. O njoj je pisao Euklid u svojim djelima *Optikai Katoptrika*. U djelu *Katoptrika* on iznosi zakon odbijanja i loma svjetlosti tvrdnjom da su kut odbijanja i upadni kut jednaki. Aristotel je tvrdio da je brzina svjetlosti beskonačna, jer nije zabilježen nijedan „dolazak“ ili „odlazak“ zrake svjetlosti. U 2. stoljeću Ptolomej u svom djelu *Optika* piše o odnosu svjetlosti i oka, o odbijanju svjetlosti, ravnim i sfernim zrcalima te o lomu svjetlosti.

Nastavljači antičkih istraživanja iz područja optike bili su arapski učenjaci. Oni su sami izrađivali leće, a znali su kako zakrivljena leća lomi svjetlost. Proučavali su boje, Sunce, Mjesec. U 10. stoljeću načinjena je prva *camera obscura*<sup>2</sup>. Nadalje, područje optike bilo je relativno zapostavljeno tijekom renesanse. Novi procvat razvoja fizike započinju talijanski učenjaci tek tijekom 16. stoljeća koji izrađuju instrumente za sve preciznija mjerenja i izračune donose mnoge važne zaključke, kako iz optike, tako i iz fizike općenito.

Prva znanstvena razmatranja o prirodi svjetlosti započinju u 17. stoljeću. Od tada pa do sredine 20. stoljeća u stalnom su nadmetanju znanstvenici zagovornici valne i čestične teorije. Do 20. stoljeća, kada se počinje razvijati kvantna mehanika, dvojna priroda svjetlosti nije bila u potpunosti objašnjena. Tu dvojnost u ponašanju svjetlosti nije lako razumjeti. Ona je u suprotnosti s našim svakodnevnim iskustvom. Naše predodžbe temelje se na promatranju razmjerno velikih, tzv. makroskopskih tijela, koja opažaju naša osjetila. Ako primjerice promatramo loptu koju bacimo u zrak, vidimo čisto čestično gibanje, dok su valovi na vodi primjer valnoga gibanja. Ne poznajemo makroskopske predmete kojima pridodajemo i jedna i druga svojstva. Dakle, u svagdanjem iskustvu, nema ničega sličnog ponašanju elektromagnetskog zračenja, koje su u nekim okolnostima ponaša kao val, a u nekima kao roj čestica. Zbog toga, o svjetlosti ne treba razmišljati kao o valovima ili česticama, nego kao o složenoj pojavi koju je zbog ograničenosti naših osjetila i predodžaba teško predočiti [1], [4].

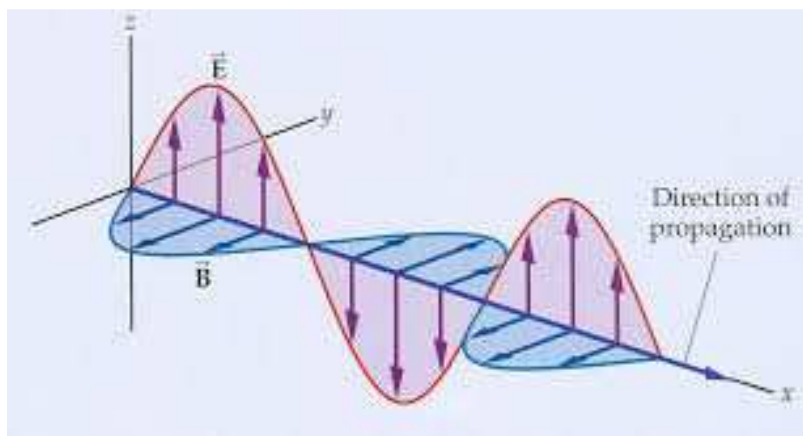
---

<sup>2</sup>*Camera obscura* (lat. tamna soba) je preteča svih vrsta fotoaparata. U osnovi je to kutija u koju kroz mali otvor ulazi svjetlost. Fotoaparati i kamere rade na tom načelu. Riječ *kamera* dolazi od izraza *camera obscura*.

### 3. VALNA PRIRODA SVJETLOSTI

U geometrijskoj smo optici svjetlost tretirali samo kao snop zraka koji se može lomiti, reflektirati, stvarati sliku. Sada napuštamo tu praktičnu aproksimaciju i počinjemo svjetlosti pridodavati neka nova svojstva. Prvo, svjetlost ćemo promatrati kao val.

1865. godine škotski fizičar James Clerk Maxwell iznio je teoriju o elektromagnetskim valovima. Kako se svako tijelo sastoji od atoma, jezgre atoma nose električne naboje pa tako pri titranju atoma dolazi zapravo do titranja električnih naboja. U točkama prostora oko električnog naboja uvijek postoji električno polje, a ako se električni naboj giba, onda postoji još i magnetsko polje. U svojim jednadžbama elektromagnetske valove Maxwell je objasnio jednadžbama za električna i magnetska polja. Prema tome EM valovi nastaju zato što promjenljivo električno polje stvara magnetsko i obrnuto. Na taj način, naizmjeničnim titranjem električnih i magnetskih polja, valovi se gibaju prostorom. Svjetlost nije ništa drugo nego jedan takav val. Na sljedećoj slici prikazana je svjetlost kao transverzalni EM val.[5]



Slika 2. prikazuje Maxwellovu predodžbu o EM valovima. [8]

$\vec{E}$  – električno polje

$\vec{B}$  – magnetsko polje

Magnetsko i električno polje su međusobno okomiti i okomiti su na smjer širenja vala što znači da su EM valovi transverzalni.

Elektromagnetski valovi imaju četiri važna svojstva:

- 1.) EM valovi se za razliku od ostalih valova mogu širiti vakuumom.
- 2.) Titrajuća električna i magnetska polja u linearno polariziranom<sup>3</sup> valu su u fazi.
- 3.) Smjerovi električnog i magnetskog polja u EM valu su međusobno okomiti i oba su okomita na smjer širenja vala, što znači da su EM valovi transverzalni.
- 4.) Brzina EM valova ovisi samo o električnim i magnetskim svojstvima medija kojima se šire.

Također, Maxwell je izmjerio brzinu svjetlosti<sup>4</sup> tvrdeći da svi ostali dijelovi EM spektra gibaju tom brzinom. [4] [5]

### 3.1. Interferencija – Youngov pokus

1801. godine Thomas Young (1773.-1829.) izveo je povijesni pokus kojim je pokazao da je svjetlost val. Taj pokus se danas većinom koristi kao demonstracija interferencije kod svjetlosti. Jednostavno rečeno, interferencija je pojava pojačavanja ili djelomičnog ili potpunog poništavanja koherentnih valova koji se u istom trenutku nađu u istom mjestu.



Slika 3. Na slici je prikazana interferencija valova na plaži u Tel Avivu, Izrael. Valovi prolaze kroz „pukotine“ u obalnom zidu i stvaraju nove valove koji oblikuju obalu. [9]

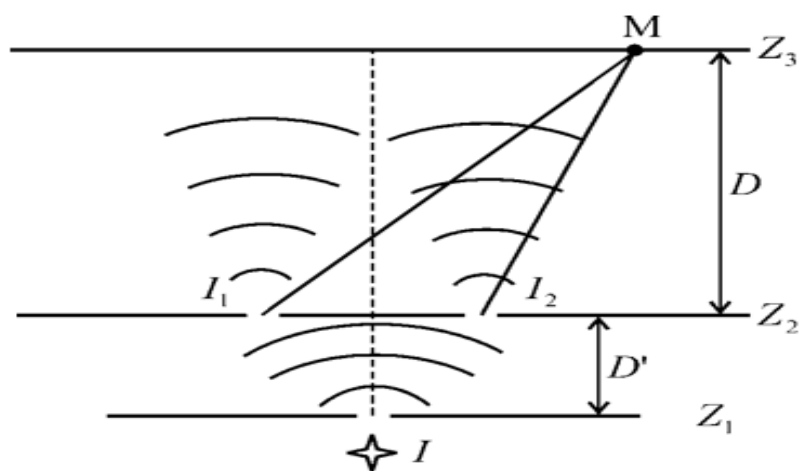
---

<sup>3</sup>Linearno polarizirani val – pogledati dio 3. 3. Polarizacija valova.

<sup>4</sup>Brzina svjetlosti,  $c = 300\,000\text{ km/h}$ .

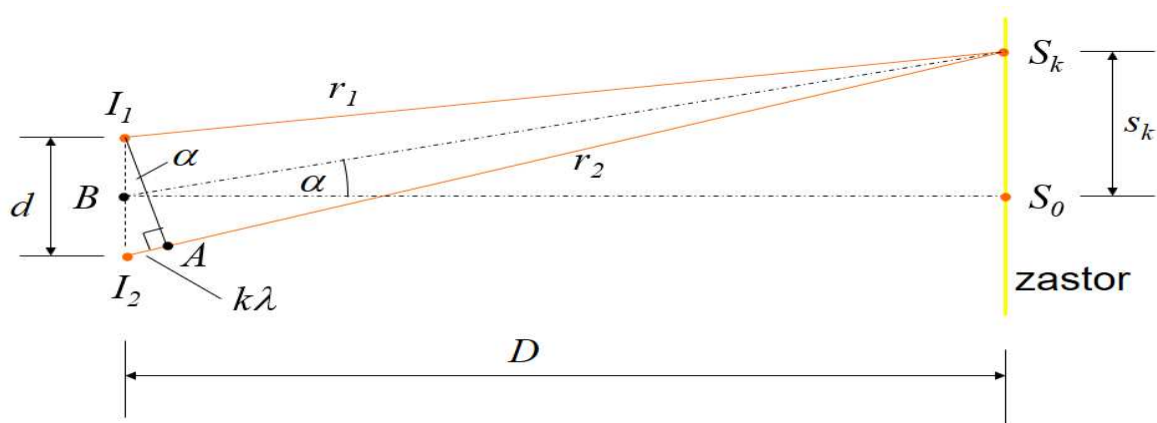
Da bismo sa svjetlošću ostvarili interferenciju kao kod valova na vodi, svjetlosni valovi moraju biti koherentni. To znači da moraju imati jednaku frekvenciju i jednaku razliku u fazi. Ako je to zadovoljeno na zastoru se vidi rezultat interferencije valova svjetlosti - svijetle i tamne pruge. Svijetle pruge su mjesta konstruktivne interferencije, a tamne pruge mjesta destruktivne interferencije.

No, kako dobiti koherentne svjetlosne izvore, odnosno koherentne valove? Obično se od jednog izvora nastoji dobiti dva. Young je monokromatsku svjetlost iz jedne pukotine usmjerio prema dvjema pukotinama i tako dobio dva realna izvora koherentne svjetlosti koji imaju stalnu "razliku u hodu".



Slika 4. prikazuje shematski prikaz Youngovog pokusa. [10]

Kada je Young svjetlost pustio kroz dvije pukotine, na zastoru je vidio interferencijski uzorak. Time je eksperimentalno potvrdio da se svjetlost ponaša kao val – valovi iz jednog izvora „zbrajali“ su se ili „oduzimali“ sa valovima iz drugog izvora. Da je svjetlost roj čestica, na zastoru bismo vidjeli dvije linije u ravnini sa pukotinama kroz koje bi čestice mogle proći.



Slika 5. prikazuje geometriju Youngovog pokusa. [10]

$I_1, I_2$  – izvori (eng. sources)

$d$  – udaljenost između pukotina

$D$  – udaljenost do zastora

$s_k$  – udaljenost inferentne pruge od osi simetrije na kojoj leži točka  $S_0$

$r_1, r_2$  – hod zrake svjetlosti od izvora do zastora

$\delta = k \cdot \lambda$  – geometrijska razlika hoda,  $\delta = r_2 - r_1$ .

Da bi došlo do konstruktivne interferencije, odnosno svijetlih pruga na zastoru, mora vrijediti:

$\delta = k \cdot \lambda$ , tada za valove koji su interferirali kažemo da su u fazi,

$k$  je redni broj pruge,  $k = 0, 1, 2 \dots$

Da bi pak došlo do destruktivne interferencije, odnosno tamnih pruga na zastoru, mora vrijediti:

$\delta = (2k + 1) \cdot (\lambda / 2)$  i tada kažemo da su valovi u protufazi.

U točki  $S_0$  uvijek imamo svijetlu prugu, zatim sa svake strane tamnu prugu, opet svijetlu itd. Pruge interferencije u Youngovom pokusu su ekvidistantne tj. jednako razmaknute. Razmak između dviju susjednih svijetlih ili tamnih pruga računa se prema formuli:

$$\Delta s = \frac{D \cdot \lambda}{d}.$$



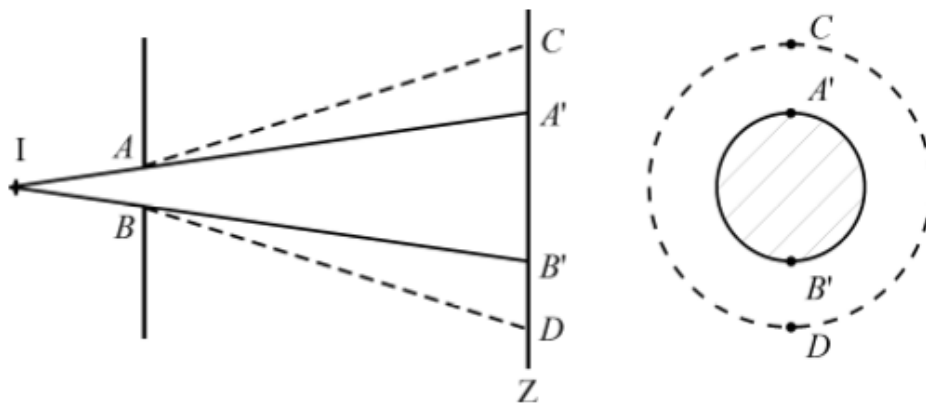
Youngov pokus s dvije pukotine je prikazan u Animaciji 1. Da bi došlo do ovih pojava, razmak između pukotina mora biti jako malen. Tipični je eksperimentalni razmak između pukotina 0.1mm [10], [11].

Animacija 1. Interferencija svjetlosti nalazi se na sljedećem linku:

[https://www.youtube.com/watch?v=kX8B\\_h\\_8wWk](https://www.youtube.com/watch?v=kX8B_h_8wWk). [19]

### 3.2. Ogib / difrakcija

Svjetlost puštamo iz točkastog izvora (I) do kružnog otvora, pukotine AB. Svjetlost bi trebala nakon prolaza kroz kružni otvor (dijafragmu) osvijetliti na zastoru krug promjera A'B'. Međutim, osvijetljene su na zastoru i točke (CD) koje su izvan kruga A'B', premda manjim intenzitetom svjetlosti. (Prikazno na Slici 6.)

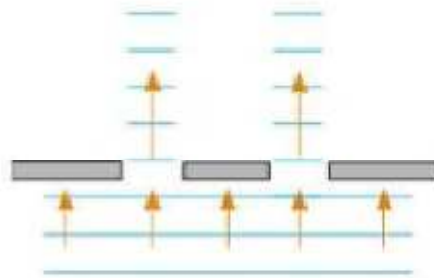


Slika 6. prikazuje pojavu ogiba ili difrakcije svjetlosti. [10]

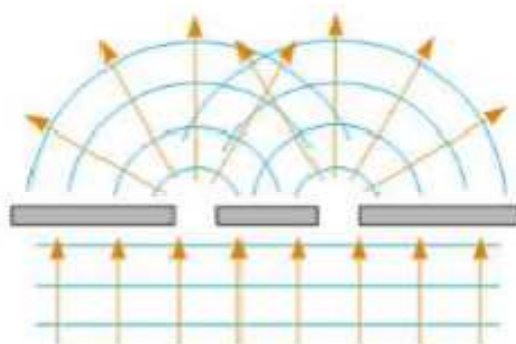
Kod vrlo uskih pukotina svjetlost se širi gotovo u svim pravcima, tj. po cijelom zastoru.

Vidimo da više ne možemo govoriti o pravocrtnom širenju svjetlosti, jer se svjetlost na rubu pukotine ogiba. Ta se pojava naziva difrakcija ili samo ogib.

Metode razmatranja ogiba zasnivaju se na Huygensovom principu prema kojem je svaka točka valne plohe izvor sekundarnih elementarnih valova što se šire u svim pravcima. Mogli bismo reći da kod difrakcije dolazi do interferencije valova koji dolaze iz istog izvora. Dakle, valovi dolaze iz jednog izvora, nailaze na pukotinu, ogibaju se o nju i nakon prolaska kroz pukotinu interferiraju međusobno.



Slika 7. Huygensov princip (1). Kada bi se svjetlost širila pravocrtno, kao roj čestica, ne bi došlo do interferencije. Poznato nam je da to nije slučaj. [10]



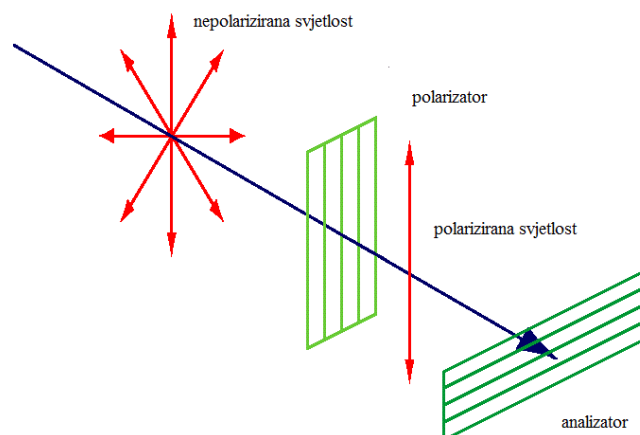
Slika 8. Huygensov princip (2) budući da se svjetlost širi poput vala, prema Huygensovom načelu, svaka je pukotina izvor novog vala i dolazi do interferencije. [10]

### 3.3. Polarizacija

Dosada smo već spomenuli da je svjetlost transverzalni val. Isto tako, znamo da postoje i longitudinalni valovi, valovi kod kojih je za razliku od transverzalnih valova, smjer titranja vala paralelan sa smjerom širenja vala. Svojstvo elektromagnetskih valova povezano sa smjerom titranja polja zove se polarizacija. Pri širenju svjetlosti najveći dio međudjelovanja sa sredstvom otpada na električnu komponentu polja, polarizacija, odnosno smjer titranja valova, određena je smjerom titranja električnog polja. Linearna polarizacija ili potpuna polarizacija je polarizacija pri kojoj vektor električnog polja stalno titra u istoj ravnini. Prirodna svjetlost je nepolarizirana.

Postoje materijali sa svojstvima djelomičnog prigušenja titranja prirodne svjetlosti i propuštanja svjetlosti koja titra u samo jednoj ravnini, polarizirane svjetlosti. Na Slici 9 prikazan je jedan takav materijal.

Ako se dva polarizatora postave tako da su im smjerovi propuštanja svjetlosti međusobno okomiti, tada nakon drugog polarizatora svjetlost ne može proći. Tada je uobičajeno taj drugi polarizator zvati analizator [11].



Slika 9. prikazuje kako od nepolarizirane svjetlosti nastaje polarizirana. [12]

## 4. ČESTIČNA PRIRODA SVJETLOSTI

Tijekom 19. i 20. stoljeća valna i čestična teorija bila su u stalnom nadmetanju. Zagovornik čestične teorije bio je jedan od najvećih znanstvenika svih vremena, Isaac Newton (1642.-1727.). Iako je bilo zagovornik čestične teorije, on ipak nije zanemarivao ni valnu prirodu svjetlosti. Newton je smatrao da je svjetlost roj čestica koje se u vakuumu gibaju brzinom 300 000km/s, a gibajući se u eteru<sup>5</sup> stvaraju valove.

Budući da je u to vrijeme Newton bio vrlo ugledan i cijenjen znanstvenik, njegovo mišljenje bilo je široko prihvaćeno među ostalim znanstvenicima pa je čestična priroda svjetlosti tada prihvaćena. Youngovim pokusom, kojim je potvrđena valna priroda, čestična teorija pada nakratko u zaborav.

Na ideji o čestičnoj prirodi svjetlosti nastavlja raditi mladi Albert Einstein. 1905. godine on je objasnio problem fotoelektričnog učinka, za što je 1921. godine dobio Nobelovu nagradu. Pojavu fotoelektričnog efekta, Einstein je objasnio na vrlo jednostavan način, pretpostavivši da se svjetlost u tom slučaju može ponašati jedino kao roj čestica, nikako kao val. Sljedeći dokaz čestične prirode svjetlosti je Comptonovo raspršenje [1], [2], [13].



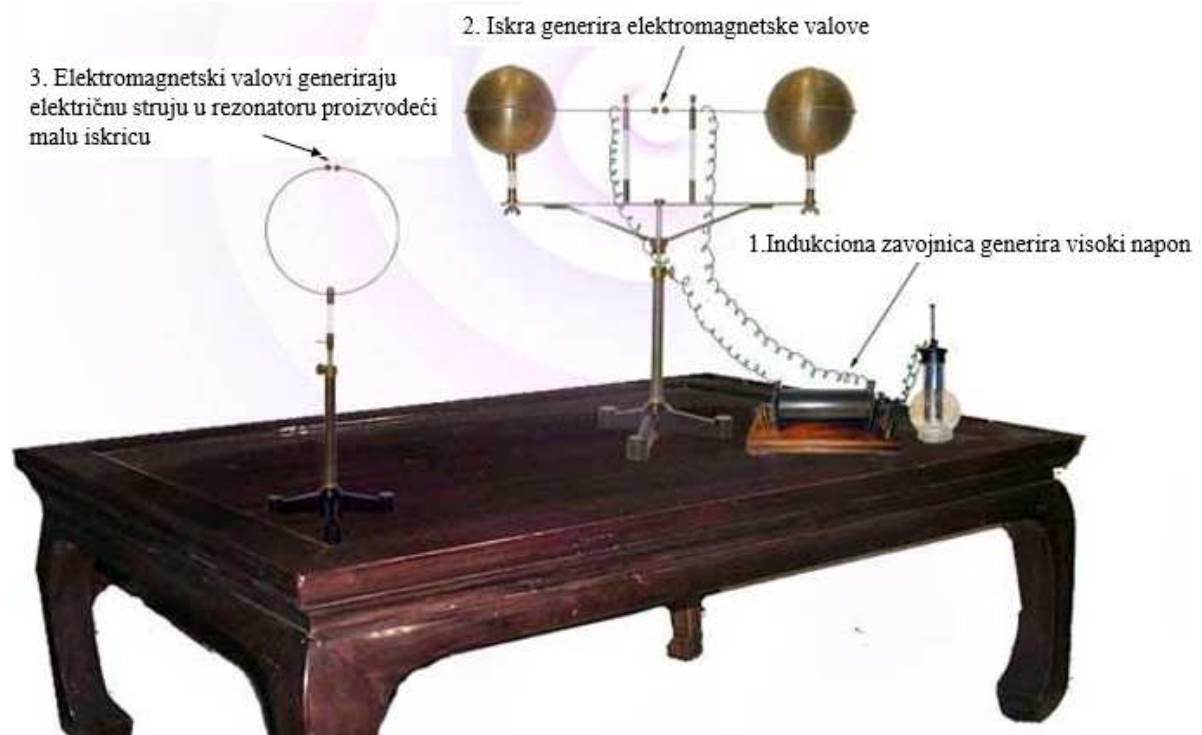
Slika 10. prikazuje A. Einsteina otprilike u vrijeme kada je radio na problemu fotoelektričnog učinka (oko 1904. godine). [13]

---

<sup>5</sup>Eter je tada bila pretpostavljena tvar koja ispunjava cijeli prostor, pa tako i vakuum i time je objašnjeno zašto se EM valovi šire prostorom. Pretpostavka o eteru napuštena je potkraj 19. stoljeća.

## 4.1. Fotoelektrični efekt

Pojavu fotoelektričnog efekta otkrio je sasvim slučajno 1887. godine H. Hertz prilikom rada s generatorom s iskrištem. Aparatura korištena u tom pokusu prikazana je na slici 10. Uređaj osvjetljen ultraljubičastim svjetlom pokazivao je promjenu napona, pri kojemu se pojavljuju iskre između njegovih elektroda. Između dviju metalnih kuglica je visok električni napon. Kad napon dođe do visine iznad kritičnog napona, koji je različit za razne plinove, dolazi do proboja zračnog sloja pa u zraku dolazi do električnog proboja. Hertz nije znao objasniti zašto dolazi do tog proboja naboja [13], [14].



Slika 10. prikazuje aparaturu kojom je Hertz 1887. otkrio fotoelektrični efekt [14].

Kako bi riješio problem zračenja crnog tijela, također jedan od problema kojega klasična fizika nije mogla riješiti, M. Planck je napravio potez bez presedana (i *ad hoc*) pretpostavio da je energija valova vezana za frekvenciju, a ne njegovu amplitudu kao u

klasičnoj teoriji. On je kazao da se svjetlost emitira u paketima energije koje Gilbert Lewis, u 1926., naziva foton. Samom Plancku nikad se nije svidjela cijela ideja.

Koristeći se Planckovom idejom o kvantu energije, tada dvadesetšestogodišnji Albert Einstein objašnjava što se događa kod pojave fotoelektričnog efekta.

Prema klasičnoj valnoj teoriji energija koju bi EM val predao elektronu u metalu morala bi ovisiti o intenzitetu svjetlosti. Eksperiment je pokazao da energija ovisi o frekvenciji, a o intenzitetu svjetlosti ovisi samo broj fotoelektrona koji su napustili metal. Također, prema valnoj teoriji fotoelektrični efekt bi se morao dogoditi za bilo koju frekvenciju ako je intenzitet elektromagnetskog vala dovoljno velik. Ako je v frekvencija svjetlosti, onda svjetlost prenosi energiju u kvantima.

Kvant energije svjetlosti (ili energija kvanta svjetlosti)  $E_\gamma$  dan je Planckovom relacijom:  $E_\gamma = h \cdot \nu$ .

Elektron u metalu apsorbira taj kvant energije i ako je on dovoljno velik, dio se potroši na izlazni rad  $W_i$ , a dio preda elektronu kao kinetička energija  $E_k$ .

Oslobađanje elektrona iz metala, tj. izlazni rad  $W_i$  je savladavanje potencijalne energije kojom je elektron vezan u metalu.

$E_\gamma = h \cdot \nu = W_i + E_k$  - Einsteinova jednažba fotoelektričnog efekta [14].

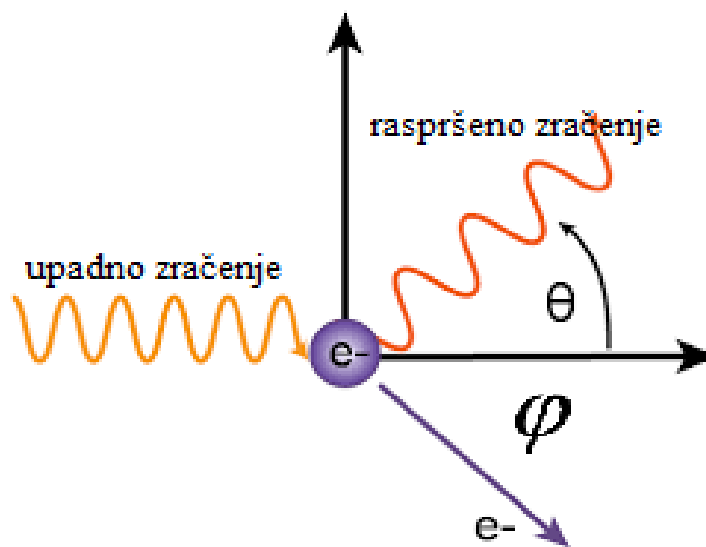
Animacija 2 – Fotoelektrični efekt nalazi se na sljedećem linku :

<https://www.youtube.com/watch?v=sLqp3L5ISX8> [20]

## 4.2. Comptonovo raspršenje

Energija i količina gibanja, svojstva koja karakteriziraju čestice, najjasnije se ogledaju u Comptonovu raspršenju, odnosno Comptonovom učinku. 1922. godine američki fizičar Arthur Compton puštao je rendgensko zračenje na listiće načinjene od lakih elemenata,

primjerice grafit ili parafin. Kada je došlo do listića, zračenje se raspršivalo i iza listića širilo u različitim smjerovima u odnosu na upadni smjer. Compton je uočio da izlazno zračenje ima veću valnu duljinu od upadnog zračenja i da je valna duljina to veća što je veći kut raspršenja,  $\vartheta$ . Kod izlaznog zračenja koje se širi u smjeru upadnog nije uočena promjena valne duljine. Osim toga, opaženo je da iz listića izlijeću elektroni i da je njihova energija ovisna o kutu što ga smjer brzine elektrona zatvara sa smjerom upadnog zračenja,  $\varphi$ .



Slika 11. prikazuje Comptonovo raspršenje. [16]

Opisani učinak zove se Comptonov učinak, a objasnili su ga istodobno Compton i nizozemski fizičar Debye. Oni su prepostavili da se rendgensko zračenje sastoji od fotona i da pri međudjelovanju fotona i elektrona vrijedi zakon očuvanja količine gibanja i zakon očuvanja energije, kao što to vrijedi kod sudara dviju kuglica u klasičnoj mehanici.

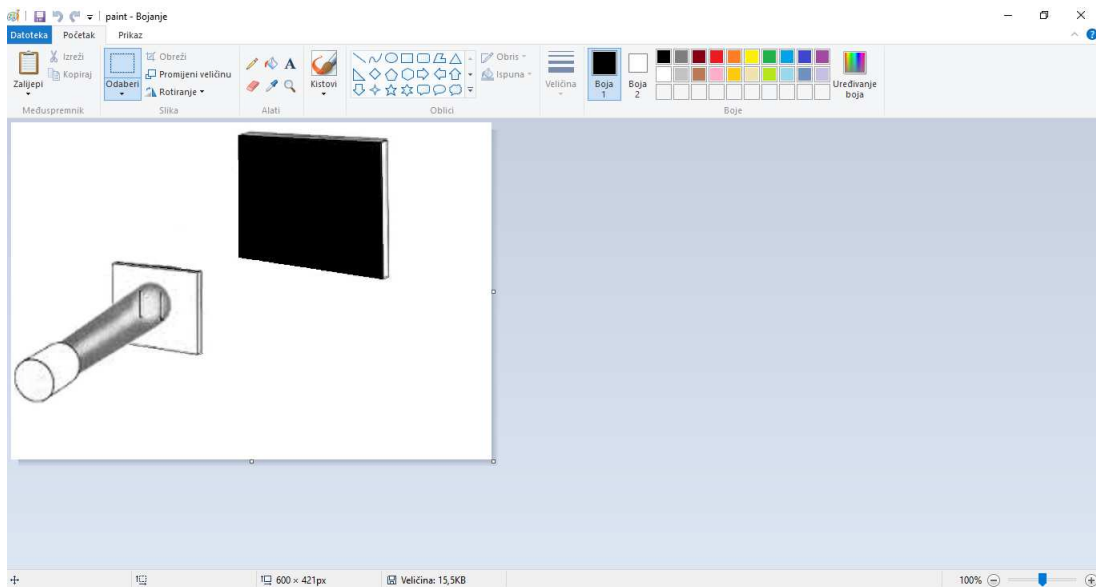
Koristeći ta dva zakona može se doći do formule za računanje tzv. Comptonove valne duljine.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m \cdot c} (1 - \cos\vartheta)$$

$\Delta \lambda = \lambda_0 (1 - \cos\vartheta)$ , gdje je  $\lambda_0$  Comptonova valna duljina. [13], [15], [17]

## 5. IZRADA ANIMACIJA

Za izradu animacija Pokusa s dvije pukotine i Fotoelektričnog efekta pokušala sam se koristiti jednostavnim programima koji svaki student može naučiti koristiti. Jedan od programa koji sam koristila je MS Paint. Svakako jedan od najjednostavnijih programa, program kojega prvog naučimo koristiti kada se kao djeca susretnemo sa računalom, pokazao se vrlo korisnim u mom radu. Pomoću njega izrađivala sam slike koje sam u drugom programu animirala. Na Slici 11 prikazan je jedan od koraka izrade slika u programu.



Slika 11. Izrada Animacije 1 u programu MS Paintu.

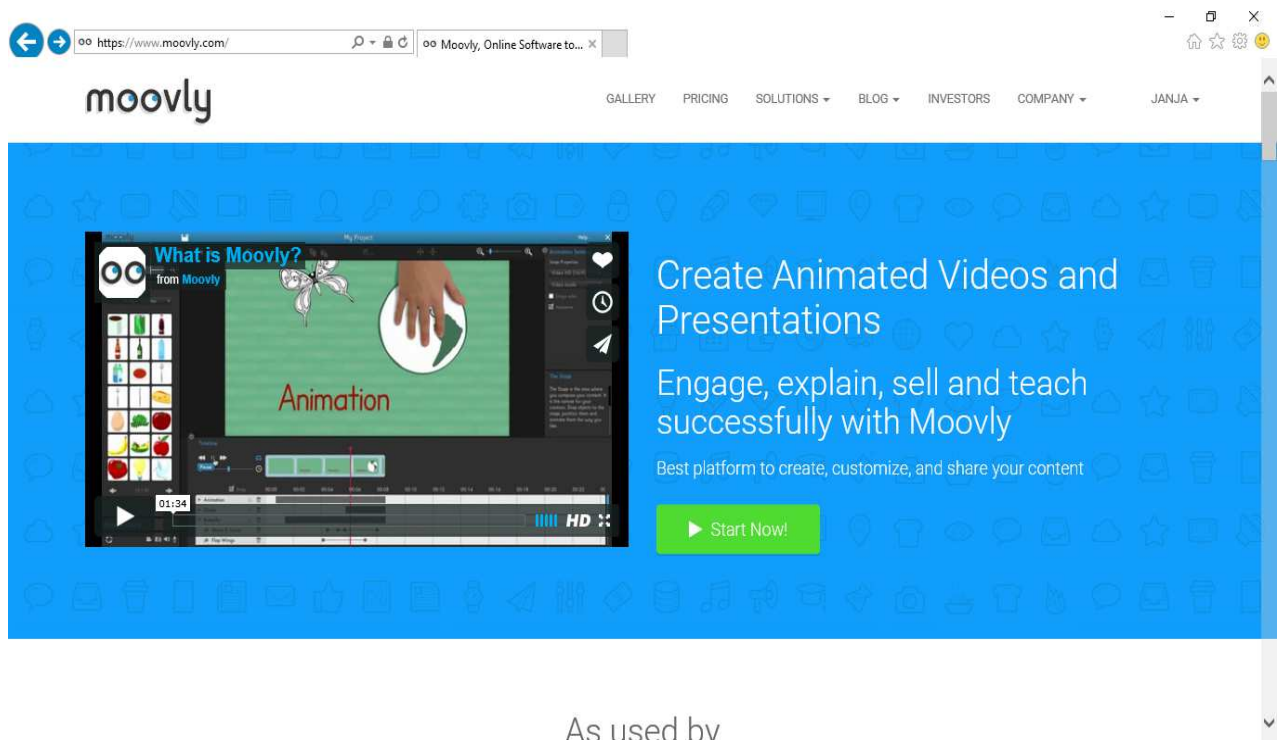
Nakon što sam izradila slike, samu animaciju sam radila u programu Moovly. Moovly je isto tako poprilično jednostavan program koji se koristi za izradu animiranih sadržaja za različite tematike. Moovly je besplatan alat, a za njegovo korištenje potrebno se registrirati. Nakon registracije otvara se osobna korisnička stranica od koje se kreće u daljnji rad alatom. Na Slici 12 je prikazan izgled sučelja programa Moovly nakon registracije, a na Slici 13 radna površina programa, korak u izradi Animacije 2.

Neke od značajki ovog alata su :



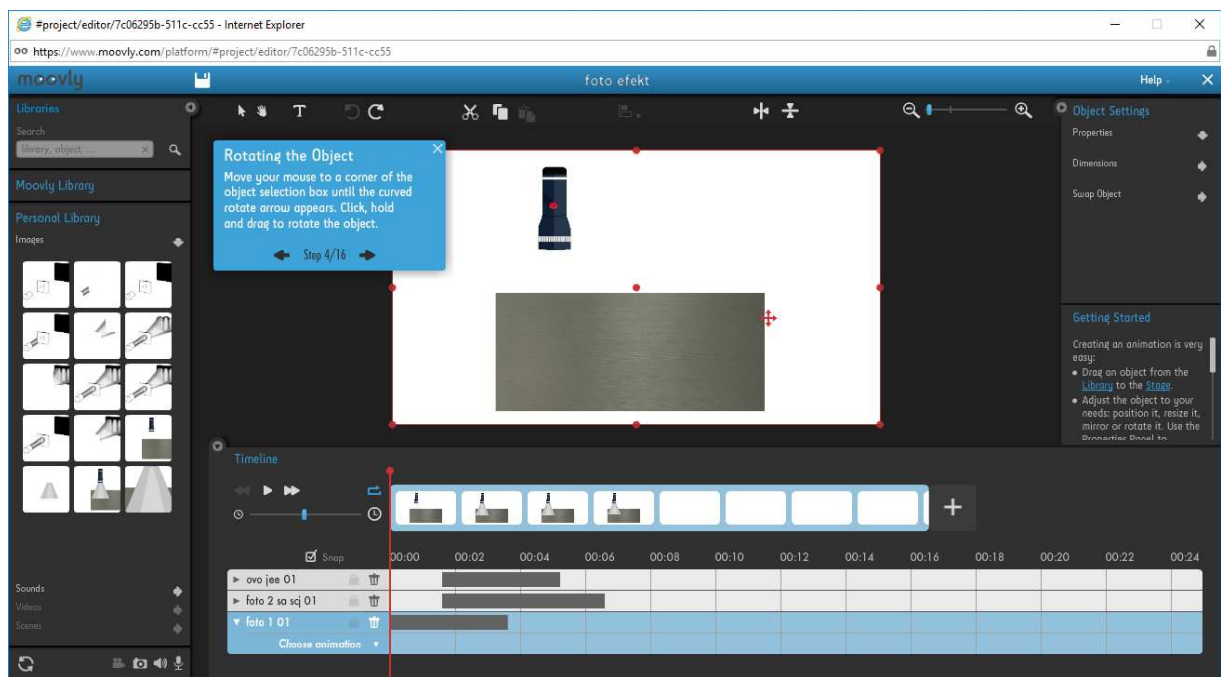
- drugačiji pristup izradi animiranog video sadržaja
- širok spektar mogućnosti primjene (od običnog video materijala do prezentacija, reklama ili e-poruka)
- mogućnost dijeljenja uradaka na YouTube i Facebook servisima ili integriranja u web stranice
- pohrana video uratka na računalo za offline korištenje
- dostupnost dodatnog materijala putem Moovly trgovine
- korištenje predložaka koji su unaprijed prilagođeni određenim tematikama
- jednostavan i lak uvod u korištenje alata
- dobra korisnička podrška
- potiče kreativnost mjesečnim natjecanjima za najbolji uradak
- osobna radna površina za lakši rad
- osobna biblioteka radova za pregled sadržaja koji je kupljen u trgovini ili koji korisnik sam postavi.

Nakon izrade vlastitog *Moov*-a, moguće ga je pohraniti na računalo, objaviti u *Moovly galeriju* ili objaviti na *YouTube*. [18]



As used by

Slika 12. prikazuje sučelje programa Moovly [18]



Slika 13. prikazuje jedan od koraka izrade Animacije 2 u programu Moovly.

## 6. ZAKLJUČAK

Kao što je rečeno u citatu na početku ovoga rada „Što je neki pojam općenitiji, to on češće ulazi u naše mišljenje, a što je posredniji njegov odnos prema osjetilnom iskustvu, to nam je teže razumjeti njegovo značenje“. Ovu rečenicu svakako bismo mogli primijeniti na svjetlost. Dok čitamo ove rečenice, a ne bismo ih nikako mogli čitati da ne postoji svjetlost, ne razmišljamo o tome kakve je ona prirode, odnosno vidimo li čestice ili valove. U našem svagdanjem iskustvu ne susrećemo se s pojavama koje jednom mogu biti čestice a jednom valovi. Lopta je lopta - čestica; nikako nije slična valu na vodi. Dakle, makroskopski predmeti koje uočavamo ili su čestice ili su valovi. Mi ne poznajemo ponašanje slično ponašanju EM valova, odnosno svjetlosti koja se u jednim okolnostima ponaša kao val a u drugim pak kao roj čestica. Stoga svjetlost ne možemo promatrati niti kao val niti kao roj čestica, nego kao složenu pojavu koja se može ponašati dvojako. Takvo ponašanje nazivamo kvantnim ponašanjem za koje se kaže da nema povezanosti sa zdravim razumom. Stoga nije ni čudo da si dvojnost u prirodi svjetlosti ne možemo zorno predočiti, barem ako se držimo zdravog razuma.

## POPIS LITERATURE

- [1] <http://ahyco.uniri.hr/povijestfizike/>(16.8.2016.)
- [2] Vladimir Paar, Fizika 4, udžbenik za 4.razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2009.
- [3] [energoinspekt.hr](http://energoinspekt.hr)(15.8.2016.)
- [4] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Camera\\_obscura](https://hr.wikipedia.org/wiki/Camera_obscura)(15.8.2016.)
- [5] [http://kolegij.fizika.unios.hr/of2/files/2015/02/12-Maxwellove\\_jednadzbe.pdf](http://kolegij.fizika.unios.hr/of2/files/2015/02/12-Maxwellove_jednadzbe.pdf)(16.8.2016.)
- [6] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetsko\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetsko_zra%C4%8Denje)(16.8.2016.)
- [8] [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/ELEKTROMAGNETSKI\\_VALOVI.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ELEKTROMAGNETSKI_VALOVI.pdf)(16.8.2016.)
- [7] [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/GEOMETRIJSKA\\_OPTIKA1.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/GEOMETRIJSKA_OPTIKA1.pdf)  
(16.8.2016.)
- [9] <http://www4.uwsp.edu/physastr/kmenning/Phys385/Lect16.html>(16.8.2016.)
- [10] [http://kolegij.fizika.unios.hr/of3/files/2011/12/04-Fizikalna\\_optika-1.pdf](http://kolegij.fizika.unios.hr/of3/files/2011/12/04-Fizikalna_optika-1.pdf)(16.8.2016.)
- [11] <https://element.hr/artikli/file/2283>(16.8.2016.)
- [12] [van.physics.illinois.edu](http://van.physics.illinois.edu)(16.8.2016.)
- [13] Jakov Labor, Fizika 4, Udžbenik za 4.razred gimnazije, Alfa, 2007.
- [14] [http://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/F10%20Dualna%20priroda%20svjetlosti%20i%20fotoefekt.pdf](http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/F10%20Dualna%20priroda%20svjetlosti%20i%20fotoefekt.pdf)(16.8.2016.)
- [15] <http://phy.grf.unizg.hr/media/Comptonov%20efekt%20predavanje.pdf>(16.8.2016.)
- [16] [www.sciencecalculators.org](http://www.sciencecalculators.org)(16.8.2016.)
- [17] <http://physics.mef.hr/Predavanja/IVG/html/spektro%20pred/img16.html>(16.8.2016.)
- [18] <https://www.moovly.com/>(16.8.2016.)
- [19] [https://www.youtube.com/watch?v=kX8B\\_h\\_8wWk](https://www.youtube.com/watch?v=kX8B_h_8wWk)
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=sLqp3L5lSX8>

## ŽIVOTOPIS

Janja Zubović rođena je 5.12.1994. godine u Slavonskom Brodu, a živi u Kruševici, malom mjestu 50 km udaljenom od Slavanskog Broda. U Kruševici je završila Osnovnu školu Josip Kozarac. Nakon završetka osnovne škole upisuje u Slavonskom Brodu Gimnaziju Matija Mesić, jezično odjeljenje, sa željom nastavka obrazovanja u području stranih jezika. No, ipak tijekom školovanja, zanimanje za strane jezike nadjačalo je zanimanje za prirodne znanosti, odnosno fiziku i stoga po završetku srednje škole, 2013. godine upisuje studij fizike na osječkom Odjelu za fiziku, gdje studira i danas. Govori engleski, njemački i španjolski jezik, a u slobodno vrijeme čita i bavi se fotografijom.