

## **Hitrost svetlobe**

*Na predpostavki o v vseh razmerah enaki hitrosti svetlobe temelji pomemben del sodobne fizike. V nadaljevanju so podani pristopi k merjenju hitrosti svetlobe iz gibajočega svetlobnega vira ter rezultati teh meritev.*

Gravitacijski rdeči premik svetlobe, ki se dogodi ob pobegu svetlobe iz okolja z veliko gravitacijo, odpira dilemo o združljivosti gravitacijskega rdečega premika spektralne črte s hipotezo o v vseh razmerah enake hitrosti svetlobe. Ta dilema je podrobneje opisana v predhodnem poglavju.

Odgovor na to vprašanje iščem v obliki materialnih dokazov, predvsem v obliki neposrednih meritev hitrosti svetlobe iz gibajočega vira, takih meritev, ki čim bolj enoumno in neposredno bodisi dokazujejo, bodisi ovržejo v vseh razmerah enako hitrost svetlobe.

Zanima me, na kakšnih osnovah temelji spoznanje o v vseh razmerah enaki hitrosti svetlobe.

### Meritev hitrosti svetlobe iz mirujočega vira

Zgodovino meritev hitrosti svetlobe opisuje Philip Gibbs 1997 v članku '**How is the speed of light measured?**' Povzetek opravljenih meritev prikazuje Tabela 8.1.

| <b>Zgodovina meritev hitrosti svetlobe</b> |                            |                                  |
|--|----------------------------|----------------------------------|
| <b>Leto</b>                                | <b>Avtor</b>               | <b>Metoda</b>                    |
| 1676                                       | <i>Olaus Roemer</i>        | <i>Jupiter's satellites</i>      |
| 1726                                       | <i>James Bradley</i>       | <i>Stellar Aberration</i>        |
| 1849                                       | <i>Armand Fizeau</i>       | <i>Toothed Wheel</i>             |
| 1862                                       | <i>Leon Foucault</i>       | <i>Rotating Mirror</i>           |
| 1879                                       | <i>Albert Michelson</i>    | <i>Rotating Mirror</i>           |
| 1907                                       | <i>Rosa, Dorsay</i>        | <i>Electromagnetic constants</i> |
| 1926                                       | <i>Albert Michelson</i>    | <i>Rotating Mirror</i>           |
| 1947                                       | <i>Essen, Gorden-Smith</i> | <i>Cavity Resonator</i>          |
| 1958                                       | <i>K. D. Froome</i>        | <i>Radio Interferometer</i>      |
| 1973                                       | <i>Evanson et al</i>       | <i>Lasers</i>                    |
| 1983                                       |                            | <i>Adopted Value</i>             |

**Tabela 8.1** Vir<sup>1</sup>

Meritve kažejo, da svetloba v praznem prostoru zapusti vir svetlobe s hitrostjo  $2.99792 \cdot 10^8$  m/s. To hitrost označujemo s konstanto "c" in jo imenujemo svetlobna hitrost.

V tem članku pa vzbujajo pozornost ugotovitve, da so vse navedene meritve opravljene v razmerah, ko sta izvor svetlobe in opazovalec ves čas na enaki medsebojni razdalji, kar pomeni, da mirujeta v odnosu drug na drugega.

---

<sup>1</sup> Philip Gibbs 1997 - **How is the speed of light measured?**  
[http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/measure\\_c.html](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/measure_c.html)

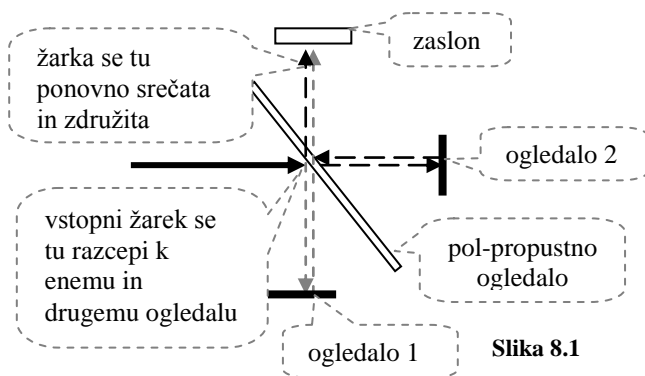
Philip Gibbs ne navaja nobene meritve hitrosti svetlobe, ki bi bila opravljena med izvorom in opazovalcem v razmerah, kjer se izvor in opazovalec gibljeta v odnosu drug na drugega.

Tudi druga strokovna literatura ne ponuja zapisov o meritvah hitrosti svetlobe iz gibajočega vira.

### Michelsonov interferometer

Strokovna literatura omenja meritev, ki sta jo leta 1877 opravila Michelson in Morley<sup>2</sup>. Literatura je enotna v tem, da je Michelson–Morley-jeva meritev ovrgla obstoj etra kot nosilca svetlobe. Literatura pa je deljenega mnenja, ali ta Michelson–Morley-jeva meritev meri tudi hitrost svetlobe iz gibajočega vira. Predvsem sodobni članki v Wikipediji<sup>3</sup> in drugod, rezultatov te meritve ne pojmujejo kot meritve hitrost svetlobe iz gibajočega vira.

Michelsonov interferometer je sistem ogledal, ki na vходу na pol propustnem ogledalu razdeli svetlobni žarek v dva žarka in ju po ločenih poteh vodi do zaslona. Na zaslonu nastane interferenca. Shemo njunega interferometra prikazuje slika 8.1.



<sup>2</sup> Jose A. Fretre: Experiment Of Michelson-Morley And The Original Formula.

<sup>3</sup> Michelson–Morley experiment - **Wikipedia**  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley\\_experiment](http://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment)

Zaradi zagotavljanja koherence morata biti oba žarka podobnih dolžin. Poti žarkov sta:

- Prvi žarek: izvor - pol propustno ogledalo - ogledalo 1 - pol propustno ogledalo - zaslon
- Drugi žarek: izvor - pol propustno ogledalo - ogledalo 2 - pol propustno ogledalo - zaslon

**Eter, kot medija za prenos svetlobnega valovanja, ne obstaja.**

Michelson in Morley sta preverjala, ali je znotraj interferometra hitrost žarka, katerega smer sovpada z domnevnim tokom etra enaka ali drugačna, glede na hitrost žarka, katerega smer je prečna glede na domnevni tok etra. V interferometru namreč eden od žarkov potuje večji del poti v prečni smeri, drug žarek pa glavnino poti v vzdolžni smeri.

Če bi bila hitrost žarka znotraj interferometra v prečni smeri zaradi etra drugačna, kot v vzdolžni smeri, bi v različnih smereh to razliko hitrosti svetlobe avtorja opazila v obliki sprememb interferenčne slike.

S tem, ko interferometer pri svetlobi iz različnih smeri ni zaznal sprememb interference, sta pokazala, da eter v prostoru ne obstaja. Ugotovila sta, da se svetloba v interferometru v vzdolžni in prečni smeri giblje z enako hitrostjo.

**Michelsonov interferometer ni občutljiv na spremembo vpadne hitrosti svetlobe**

V nadaljevanju dopustim hipotetično možnost, da žarek na vhod interferometra prispe hitreje ali počasneje od svetlobne hitrosti, ko na primer interferometer potopim v vodo. V vodi se zaradi medija spremeni vpadna hitrost svetlobe.

Ko ta počasnejši žarek svetlobe vstopi v interferometer, se tudi v tem primeru po eni in drugi poti skozi interferometer v obeh krakih giblje z enako hitrostjo. Ta hitrost je zaradi medija sicer manjša od svetlobne hitrosti, vendar je enaka v obeh krakih.

Med seboj enaki hitrosti enako dolgih žarkov, ki potujejo skozi interferometer po eni in drugi poti, pomeni, da interferometer ne

zazna domnevno manjše ali večje vpadne hitrosti svetlobe. Interferometer torej ni občutljiv na spremembo vpadne hitrosti svetlobe.

### **Hitrost svetlobe iz hitro gibajočih se teles ni izmerjena.**

Njuna meritev je predvsem v starejši literaturi včasih napačno razumljena. Zmotna razlaga bralcu ponuja neutemeljeno sklepanje v smislu, da svetloba prispe na ponor vedno s svetlobno hitrostjo, četudi se vir svetlobe giblje v odnosu na ponor.«, česar pa Michelson in Morley-jeva meritev ne more pokazati.

Napačno razumevanje Michelson in Morley-jeve meritve je celo odvrnilo fizike od prizadevanj, da bi poskušali še na kakšen način objektivno izmeriti vpadno hitrost tiste svetlobe, ki izhaja na primer iz gibajočih se galaksij.

V zadnjih sto letih ni nihče meril hitrosti svetlobe iz gibajočega vira. Hitrost svetlobe iz gibajočega vira še vedno ni izmerjena.

## **Omejitve pri merjenju hitrosti svetlobe**

Pri vodnem valovanju lahko opazujem obliko in hitrost gibanja valovnih front, česar pa na podoben način ne moramo zaznati v primeru svetlobnega valovanja.

Ko s čolnom drsim po vodni gladini proti vodnim valovom, večanje hitrosti čolna povečuje frekvenco, s katero valovi udarjajo v čoln. Valovna dolžina, to je razdalja med dvema valovnima vrhovoma pa se s hitrostjo čolna ne spreminja.

Ločeno opazovanje valovne dolžine in frekvence nam je v primeru opazovanja svetlobe v precejšnji meri prikrito. To pa otežuje meritve hitrosti svetlobe iz gibajočega vira.

### **Prikritost svetlobe**

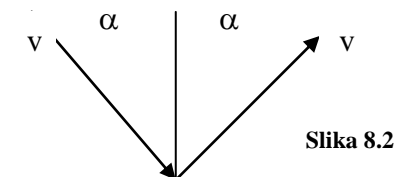
Dokler EM valovanje ne zadane v naše oko ali merilni instrument, ga ne opazimo. EM vala ne morem niti opazovati niti meriti na njegovi poti k cilju.

Kako neopazni so EM valovi oziroma fotoni na poti lahko spoznam, če si zamislim svetlobni žarek, ki potuje mimo očesa. Žarek je energijsko lahko zelo močan, vendar ga tudi s kratke razdalje ne bom opazil, dokler ne zadene v oko.

### **Odboj svetlobe ni odvisen od hitrosti svetlobe**

Svetloba se odbija in lomi. Vprašujem se ali svetloba na odboju in lomu ponuja možnosti za prepoznavanje njenih lastnosti, predvsem hitrosti svetlobe.

Svetloba v primeru oboja svetlobe ne izdaja svoje hitrosti. Ogledalo vsak foton, ki prispe na parabolično ogledalo teleskopa, usmeri v žarišče teleskopa. Slike vseh nebesnih teles na teleskopu so ostre, ne glede na to, iz katere tako ali drugače gibajoče se galaksije prihaja svetloba.



Slika 8.2

Optika teleskopa je lahko enaka za vse hitrosti fotonov le v primeru, če je odboj fotonov simetričen, ne glede na različne hitrost fotonov iz različnih izvorov,

kot to prikazuje slika 8.2.

Simetrični odboj svetlobe pomeni enako vpadno in odbojno hitrost svetlobe. Svetloba se torej odbije vedno z tako hitrostjo, kot je njena vpadna hitrost.

### **Simetrični odboj ne omogoča merjenja hitrosti svetlobe.**

Simetrični odboj svetlobe na zrcalu teleskopa pa ne pomeni, da sta vpadna in odbojna hitrost fotona v vseh okoliščinah enaki svetlobni hitrosti. Katera koli hitrost svetlobe, ki se odbije z enako hitrostjo, kot je vpadna hitrost, ima za posledico simetrični odboj.

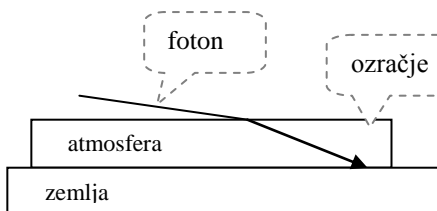
Svetlobna hitrost na vpadu in odboju je sicer pogosta, kljub temu pa le eden od možnih primerov simetričnega odboja svetlobe.

V vseh razmerah opažena simetričnost odboja svetlobe torej ni uporabna za ugotavljanje hitrosti svetlobe, saj prikriva vpadno hitrost svetlobe na ogledalo.

*Posezi po Luni.  
Če je ne dosežeš,  
boš še vedno zrl  
proti zvezdam.*  
**Willis Reed**

### **Žarek se ob prehodu v ozračje zlomi.**

V nadaljevanju opazujem pot svetlobe skozi ozračje iz vesolja na Zemljo, kot prikazuje *Slika 8.3*. Žarek se na prehodu iz vakuuma v zrak lomi. Astronomi ta lom žarka imenujejo refrakcija. Sprašujem se, ali mi refrakcija nudi možnost meritve hitrosti svetlobe.



**Slika 8.3**

Nizko nad obzorjem opazujem medsebojni kot med dvema bližnjima nebesnima telesoma, iz katerih naj bi hipotetično prihajali svetlobi z

različnima hitrostma.

Če bi različne vpadne hitrosti svetlobe iz različnih nebesnih teles pomenile različne lomne kote refrakcije, bi bil medsebojni kot med nebesnima telesoma na obzorju drugačen kot v zenitu.

Svetloba se lomi le na obzorju, v zenitu se ne lomi, ker v zenitu prispe v ozračje pravokotno na atmosfero.

### **Refrakcija ne omogoča merjenja hitrosti svetlobe.**

Opažanja kažejo, da so medsebojni koti med daljnimi galaksijami na obzorju enaki kot v zenitu in niso odvisni od hitrosti izvora svetlobe.

Tako kot v primeru odboja, tudi v primeru loma svetlobe, vedno enaki koti med galaksijami ne dovoljuje sklepanja, da vedno enak

lomni kot žarka (vedno enaka refrakcija), pomeni vedno enako hitrosti svetlobe.

Vedno enak lomni kot refrakcije pove le to, da se hitrost svetlobe na prehodu iz medija v drug medij spremeni za nek faktor, ki je odvisen od snovnih lastnosti medija in valovne dolžine svetlobe.

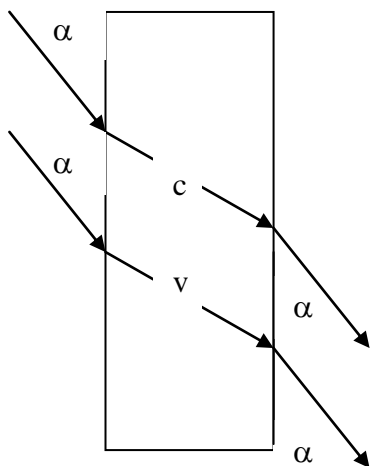
*Paradoksalno je, da pravo varnost najdemo samo v razvoju, preobrazbi in spremembi.*

**Anne Morrow Lindbergh**

Lomni količnik vpadnemu žarku ne določi neke vnaprej določene hitrosti svetlobe. Foton pri vstopu v drug snovni medij spremeni hitrost za določen faktor.

Tudi refrakcija torej ne nudi merljivih lastnosti, iz katerih bi lahko sklepal o hitrosti svetlobe.

#### **Lomni kot je odvisen le od snovnih lastnosti medija.**



**Slika 8.4**

Lom EM vala se po zakonitostih, kot jih opažam pri refrakciji, dogaja tudi na prehodu žarka skozi plan paralelno stekleno ploščo, ali pa pri prehodu skozi lečo.

Leča na primer ne spreminja goriščne razdalje za svetlobo, ki prihaja iz hitro gibajočih se daljnih galaksij.

Lomni kot na leči teleskopa naj pojasnim na lažje razumljivi plan-paralelni plošči, kot ga kaže *Slika 8.4*. Pred vstopom v steklo naj ima svetloba neko hipotetično hitrost. Eden od žarkov naj ima na primer hitrost

'v' drugi pa 'c'. Hitrosti v in c se razlikujeta.

Hitrost svetlobe v steklu je odvisna od lomnega količnika in valovne dolžine, ne pa od vpadne hitrosti svetlobe. Iz opažene refrakcije

lahko sklepamo, da se posledično svetlobi z enako valovno dolžino in različnima vpadnima hitrostma lomita pod enakim kotom.

Ko se žarka na drugi strani stekla vrmeta v prazen prostor, se dogodi obraten simetrični proces, kot pri vstopu v steklo. Žarkoma se povrne njuna vpadna hitrost, s kakršno sta pripotovala do stekla.

Žarka po izstopu iz plan paralelnega stekla nadaljujeta pot z enako hitrostjo in pod enakim kotom, kot sta pripotovala do stekla, kljub med seboj različnima hitrostma.

Simetričnost prehoda svetlobe skozi plan-paralelno ploščo torej tudi ne omogoča merjenja hitrosti svetlobe.

### **Odličnost svetlobnih lastnosti**

Nezaznavnost fotona na poti, simetričnost vpadnega in odbojnega kota pri odboju pri vseh hitrostih svetlobe, ohranjanje smeri fotona ob prehodu skozi plan-paralelno ploščo v primeru kakršne koli hitrosti svetlobe, pomeni odličnost svetlobe kot medija (sredstva) za opazovanje okolice.

Svetloba se v mnogih okoliščinah obnaša neodvisno od lastne hitrosti. Te sposobnosti svetlobi dovoljujejo, da nam zelo kvalitetno in z minimalnimi popačitvami posreduje sliko okolice.

Po drugi strani pa ravno ta odličnost svetlobe pred nas postavljajo poseben izziv za opazovanja nečesa skoraj latentnega, nečesa, kar je na meji zaznavnosti, to je merjenja hitrosti svetlobe.

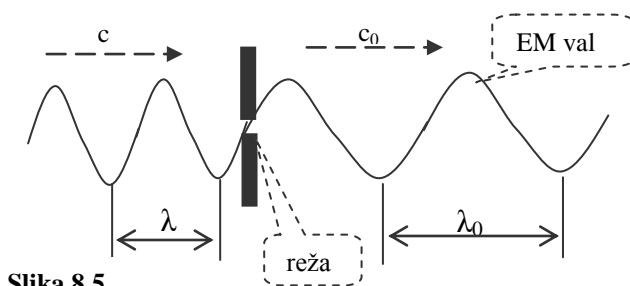
## **Odklonska mrežica**

Lastnosti svetlobe pa niso tako prikrite, da nikakor ne bi omogočale merjenja hitrosti svetlobe. Z opazovanjem loma in odboja svetlobe še nismo pregledali vseh pojavov svetlobe, ki bi lahko izdajali hitrost svetlobe.

### **Reža**

V nadaljevanju si ogledam, kaj se dogaja, ko svetlobo spustim skozi režo.

EM val je prostorsko zaokrožen energijski vozle, kot to prikazuje Slika 6.9 v Poglavlju Foton. To pomeni, da ima EM polje svetlobnega vala določene prostorske razsežnosti. Ravno tako ima luknja reže neko velikost. Izberem torej režo, ki je po velikosti v velikostnem razredu svetlobnega EM vala.



Slika 8.5

Kadar se svetloba lomi na leči ali kadar se odbije od zrcala, kot rečeno optika teleskopov pokaže, da svetloba ohranja frekvenco, valovno dolžino in hitrost svetlobe.

Kadar pa svetlobo spustimo skozi režo primerne velikosti, pa se na prehodu svetlobe skozi režo hitrost svetlobe adaptira iz neke poljubne vstopne hitrosti svetlobe, gledano z reže, na svetlobno hitrost, kot to kaže Slika 8.5.

Ob prehodu svetlobe skozi režo se svetlobi spremeni hitrost in valovna dolžina, frekvenca svetlobe pa se ohranja. Ta trditev je drzna, zato potrebuje nedvoumne materialne dokaze v obliki neposrednih meritev.

### Fizikalna predstava o dogajanju na reži

Svetlobni EM val, kot je to pojasnjeno v poglavju Foton, ima praviloma neko optimalno energijo in obliko, ki jo skuša ohranjati na vsej svoji poti.

Velikosti vala je primerljiva z velikostjo reže, zato val ne more neovirano preiti reže. EM polje svetlobnega vala tako ali drugače zadane ob rob reže. Rob reže s tem popači obliko EM polja.

Ko EM val s popačenim poljem izide iz reže, teži k temu, da čim hitreje uredi svoje EM polje v optimalno obliko, kot jo mu določajo Maxwellovi zakoni.

Način, kako si EM val po prehodu skozi režo ureja obliko EM polja za naše razmišljanje niti ni bistveno. Predvsem nas zanima v kaj se preoblikuje EM polje svetlobnega vala in njegove končne lastnosti po prehodu skozi režo.

### **Preverjanje hipoteze o spremembi hitrosti z meritvijo**

Kadar postavimo drugo ob drugo mnogo rež, dobimo odklonsko mrežico. Odklonska mrežica predstavlja množico vzporednih rež.

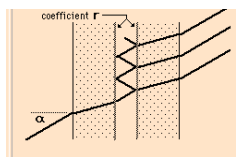
V nadaljevanju z meritvijo skušamo pokazati, da v primeru kadar ima svetloba pred odklonsko mrežico neko poljubno hitrost v odnosu na mrežico, se ji hitrost za mrežico vsakič adaptira v svetlobno hitrost.

To hipotezo z meritvijo lahko preverim tako, da primerjam odklon žarka (spektralne črte) poznane svetlobe iz gibajočega vira, na primer svetlobe iz istega kometa istočasno, enkrat izmerjen z odklonsko mrežico, drugič s Fabry-Perotovim interferometrom (FPI). ref ?

Preden pa preidemo na opis meritve, osvežimo razumevanje kako delujeta navedena instrumenta. Oglejmo si v čem se instrumenta razlikujeta in kakšni so pričakovani rezultati meritev.

### **Fabry-Pérotov interferometer (FPI)<sup>4</sup>**

Fabry-Pérotov interferometer deluje na principu večkratnega odboja svetlobe med dvema polprepustnima ploščama, kot to prikazuje *Slika 8.6*. Na izhodu izide več vzporednih žarkov. Kadar so ti žarki v fazi,



**Slika 8.6**

se interferenčno ojačijo. Interferenca je odvisna od razmika med ploščama in valovne dolžine.

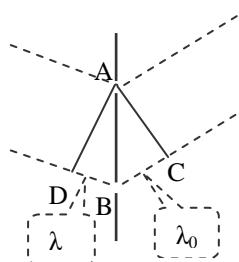
Optika teleskopov namreč kaže, da se hitrost svetlobe v fazi odboja ne spreminja, kot je to podrobneje opisano na sliki 8.2.

<sup>4</sup> **Fabry-Pérot interferometer** <http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Perot>

FPI je torej občutljiv na valovno dolžino svetlobe, ni pa občutljiv na hitrost izmenjave EM valov med ploščama oziroma na frekvenco EM valovanja. Hitrost svetlobe na vhodu v FPI posledično ne vpliva na izmerjen rezultat. Lahko zapišemo, da je izmerjen rezultat s FPI interferometrom funkcija valovne dolžine  $F(\lambda)$

### Spektrometer na osnovi odklonske mrežice

Odklonska mrežica odkloni svetlobo na način, kot to prikazuje Slika 8.7. Linija od A do D prikazuje prihajajočo fronto svetlobnega žarka do mrežice, linija od A do C pa odhajajočo fronto svetlobe od mrežice.



Slika 8.7

Obe fronti morata biti fazno usklajeni za ustvarjanje interferenčne črte. To pa zahteva celo število valovnih dolžin med točkama D in C.

Če se valovna dolžina na mrežici ne spreminja na način, kot to kaže slika 8.5, potem je tudi odklonski kot odklonske mrežice zgolj funkcija valovne dolžine  $F(\lambda)$  in ni odvisen od frekvence svetlobe. Tako pri mrežici, kot pri tudi pri FPI-ju bi bil v

tem primeru odklonski kot odvisen le od valovne dolžine.

V primeru, da se na mrežici valovna dolžina ne spreminja, bosta oba merilnika, tako merilnih z mrežico kot FPI, prikazovala primerljive rezultate.

### Merilna metoda potrditve hipoteze o spremembi hitrosti svetlobe na odklonski mrežici

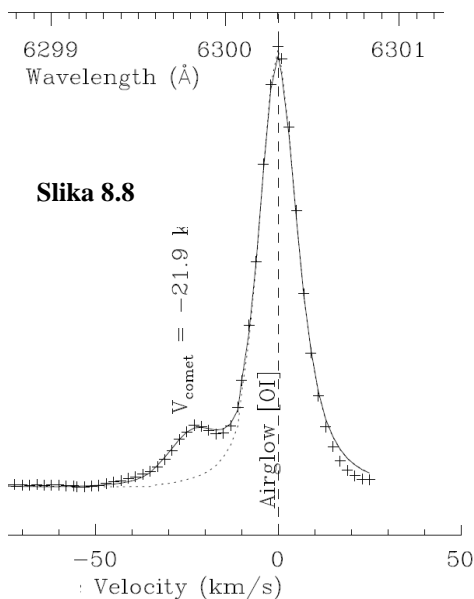
Na sliki 8.7 interferenčne pogoje ustvarja takšna geometrija odklona žarka, kjer razdalja med točkama D in C predstavlja celo število valovnih dolžin svetlobe. Če se valovna dolžina svetlobe kot posledica adaptacije hitrosti svetlobe na svetlobno hitrost spreminja ob prehodu skozi odklonsko mrežico, potem je razdalja celoštevilčnega števila valovnih dolžin med točkama C in D na Sliki 8.7 odvisna od padne hitrosti svetlobe. Odklonski kot na odklonski

mrežici bo v tem primeru tako funkcija valovne dolžine kot frekvence svetlobnega valovanja  $F(f,\lambda)$ .

Poglejmo, katero od navedenih hipotez potrjujejo rezultati že opravljenih in objavljenih meritev.

Imamo torej dva merilnika. Rezultat meritve s FPI interferometrom je funkcija valovne dolžine  $F(\lambda)$ , rezultat meritve na osnovi odklonske mrežice pa funkcija tako valovne dolžine kot frekvence  $F(f,\lambda)$ .

### Meritev spektralne črte s FPI



**Slika 8.8**

Spektralne črte kometa s pomočjo FPI interferometra raziskujejo na University of Wisconsin<sup>5</sup>.

Rezultati njihovih meritev spektralnih črt kometa Hale-Bopp so prikazani na Sliki 8.8.

Merjena je bila spektralna črta valovne dolžine 6300,304 Å glave kometa Hale-Bopp marca 1997.

Vodoravna os nad diagramom, kaže valovno dolžino. Navpična os pa predstavlja izmerjeno svetlost svetlobe pri izbrani valovni dolžini.

<sup>5</sup> Department of astronomy – WHAM (<http://www.wisc.edu>).

Rezultat meritve kaže, da izrazit in svetel del spektra spektralne črte ne spremeni valovne dolžine kot posledica hitrosti kometa.

### **Meritev spektralne črte z mrežico**

Izostanek spremembe valovne dolžine zaradi hitrosti kometa po Dopplerju so avtorji meritve na University of Wisconsin pojasnili tako, da naj bi svetloba iz kometa na poti zadevala v snovne delce, ki svetlobo absorbirajo in jo takoj nato oddajo z drugo valovno dolžino (Rayleigh scattering<sup>6</sup>). To absorbiranje in ponovno emitiranje svetlobe naj bi svetlobi vrnilo spektralno črto svetlobe nazaj na tisto mesto, kot jo seva mirujoč izvor svetlobe.

Če isto spektralno črto iz kometa merimo s pomočjo merilnika na osnovi odklonske mrežice, merilnik pokaže pričakovan zamik spektralne črte brez Rayleighovega raztrosa svetlobe. Merilnik na osnovi mrežice ne zazna nobenega vpliva premikanja spektralne črte nazaj na pozicijo mirujočega vira svetlobe, zaradi absorpcije in emitiranja svetlobe.

Spektrometer na osnovi odklonske mrežice pokaže hitrost kometa v razredu nekaj deset km/s (*Atomic Oxygen in the Comae of Comets*)<sup>7</sup>. Pokaže hitrost, kot jo lahko ocenimo tudi na osnovi opazovanja poti kometa s pomočjo teleskopa.

V komet usmerjen FPI interferometer torej ne pokaže pričakovanega zamika spektralne črte, kot posledica hitrosti kometa (*Large Aperture 6300A Photometry of Comet Hale-Bopp*)<sup>8</sup>. Pričakovan zamik spektralne črte po Dopplerju pa pokaže merilnik na osnovi odklonske mrežice.

### **Pojasnitev rezultatov**

Če sočasno prihaja ista svetloba, enakih lastnosti, do dveh merilnikov, FPI interferometra in merilnika na osnovi odklonske

---

<sup>6</sup> Rayleigh scattering Wikipedia -

[http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh\\_scattering](http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_scattering)

<sup>7</sup> University of Texas, Anita L. Cochran, Atomic Oxygen in the Comae of Comets <http://barolo.as.utexas.edu/anita/oxygen2.pdf>

<sup>8</sup> Large Aperture 6300A Photometry of Comet Hale-Bopp

[http://wisp.physics.wisc.edu/~jpmorgen/hale-bopp/index\\_old.html](http://wisp.physics.wisc.edu/~jpmorgen/hale-bopp/index_old.html) oziroma [http://www.psi.edu/~jpmorgen/pdf/jpmorgen02\\_hale-boppOI\\_poster.pdf](http://www.psi.edu/~jpmorgen/pdf/jpmorgen02_hale-boppOI_poster.pdf)

mrežice in če FPI ne zazna zamika spektralne črte, spektrometer na osnovi odklonske mrežice pa ga zazna, potem je razlika v rezultatih meritve lahko le posledica lastnosti enega in drugega merilnika.

Na Sliki 8.6 je utemeljeno, da je rezultat meritve na osnovi Fabry-Perotove meritve funkcija valovne dolžine. Zamik spektralne črte izmerjen s FPI zato lahko opišemo s funkcijo  $F1(\lambda)$ .

Nezaznavnost zamika spektralne črte, merjeno s FPI, pa kaže na zelo pomembno spoznanje in sicer, da hitrost svetila ne vpliva na valovno dolžino svetlobe na ponoru.

Ker pa spektrometer na osnovi odklonske mrežice zazna zamik spektralne črte po Dopplerjevem zakonu, moramo rezultat meritve pridobljen na osnovi odklonske mrežice pripisati spremembi frekvence svetlobe iz kometa v funkciji  $F2(f, \lambda)$ , to je funkciji, ki določa občutljivost merilnika na osnovi odklonske mrežice.

Odvisnost izmerjenega rezultata meritve z odklonsko mrežico od frekvence EM valovanja pa potrjuje hipotezo, opisano na Sliki 8.5.

Hitrost na reži se spremeni le v primeru, kadar je vstopna hitrost svetlobe na režo različna od svetlobne hitrosti. Rezultati meritev torej dokazujejo, da svetloba na mrežico iz gibajočega vira svetlobe vpada s hitrostjo, različno od svetlobne hitrosti.

Primerjava rezultatov meritev s FPI interferometrom in odklonsko mrežico torej izkazuje dve pomembni dejstvi:

- da svetloba na prehodu skozi odklonsko mrežico spremeni valovno dolžino, kot to kaže Slika 8.5, kadar se mrežica giblje v odnosu na izvor svetlobe,
- da je hitrost svetlobe na ponoru odvisna od hitrost vira svetlobe.

## **Meritev sončevih izbruhov**

V vesolju se pojavlja več gibajočih virov svetlobe, ki so primerni za raziskovanje lastnosti svetlobe iz gibajočega vira. Niso pa vsi gibajoči viri svetlobe primerni za merjenje lastnosti svetlobe. Za meritev hitrosti svetlobe lahko izberemo tiste vire svetlobe v našem sončnem sistemu, ki imajo jasno prepoznavne hitrosti. Za potrebe

meritev lastnosti svetlobe pa se izognemo virom svetlobe, kjer pot in hitrost gibanja ni enoumno prepoznavna po drugi neodvisni metodi, to je objektom kjer obstaja dvom o resnični hitrosti vira svetlobe. Odpovemo se objektom kjer nastopajo turbulence, velike gravitacije in podobni pojavi, ki dodatno na osnovi drugih zakonitosti vplivajo na lastnosti svetlobe, kot je to že omenjeno v poglavju Čas.

Primerna tipa objektov za meritve EM lastnosti svetlobe iz gibajočega vira svetlobe sta torej komet in tudi sončevi izbruhi. Manj primerna je sončeva korona zaradi turbulenc. Niso pa primerni objekti iz daljnega vesolja, kjer ne poznamo niti gravitacije, niti niso izmerjene njihove hitrosti po neodvisni metodi.

### Sončevi izbruhi

Spektrometer na osnovi odklonske mrežice pokaže, da hitrosti sončevih izbruhov dosegajo več sto km/s (*New techniques for the characterization of dynamical phenomena in solar coronal images*)<sup>9</sup>. Podobne hitrosti izbruhov lahko ocenimo na osnovi optičnega opazovanja izbruhov skozi teleskop, prikazanih v istem članku.

Po drugi strani FPI interferometer izbruhov v sončevi koroni ne zazna, kot to opisuje članek *Systematic errors in measuring solar magnetic fields with a FPI spectrometer and MDI*<sup>10</sup>. Članek se v povzetku posveča predvsem možnim razlogom, zakaj FPI ne pokaže pričakovanih rezultatov zamika spektralne črte skladno s hitrostjo opazovanega sončevega izbruha, ter daje smernice in priporočila, kako bi se dalo obiti nepojasnjeno sistemsko napako, ki onemogoča merjenje sončevih izbruhov s pomočjo FPI interferometra.

---

<sup>9</sup> Eva Robbrecht: **New techniques for the characterization of dynamical phenomena in solar coronal images**. Katholische Universiteit Leoven Feb. 2007 <http://wis.kuleuven.be/cpa/phdtheses/eva.pdf>

<sup>10</sup> Astrophysikalisches Institut Potsdam: A. Settele,, T. A. Carroll, I. Nickelt, W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Center for Space Science and Astrophysics, Stanford University A. A. Norton, April 2001 Systematic errors in measuring solar magnetic fields with a FPI spectrometer and MDI  
<http://www.aanda.org/index.php?option=article&access=bibcode&bibcode=2002A%2526A...386.1123SFUL>

### **Raziskave zahteva oprtost in privzemanje izmerjenih rezultatov**

Pri omenjeni meritvi sončevih izbruhov je nedvomno dejstvo, da FPI ne zazna zamika spektralne črte kot posledica hitrosti plazme v sončevem izbruhu.

Če vnaprej ne pričakujemo nekega določenega merilnega rezultata, če nismo miselno obremenjeni s pričakovanim rezultatom meritve, lahko na instrumentu enoumno odberemo rezultat meritve. Izmerjen rezultat kaže, da hitrost izvora svetlobe v primeru sončevih izbruhov ne vpliva na zamik valovne dolžine spektralne črte. Za poznavalce je tak rezultat presenetljiv, vendar ga moramo sprejeti kot nedvomno izmerjeno dejstvo.

Ne odzivanje FPI interferometra na spremembo hitrosti sončevih izbruhov praviloma kažejo tudi druge podobne poznane meritve. V literaturi ni zaslediti meritev, kjer bi na osnovi FPI interferometra izmerili hitrost sončevih izbruhov.

### **Interpretacija rezultatov**

Meritve kometa iz sončevih izbruhov s pomočjo FPI interferometra torej kažejo, da hitrost svetila ne vpliva na valovno dolžino izmerjene svetlobe. Meritve s pomočjo odklonske mrežice pa kažejo, da hitrost svetila vpliva na frekvenco svetlobe po Dopplerjevem zakonu.

Sprememba frekvence ob nespremenjeni valovni dolžini pa skladno z enačbo  $c = f \cdot \lambda$  pomeni, da hitrost svetila vpliva na hitrost svetlobe na ponoru.

Meritvam hitrosti svetlobe na osnovi opazovanja sončevih izbruhov in sončeve korone je namenjeno celotno naslednje poglavje z naslovom Sončeva korona, zato temo tega poglavja nadaljujem z laboratorijskimi meritvami hitrosti svetlobe.

## **Merjenje svetlobe z gibajočim ogledalom**

V nadaljevanju sta opisani dve laboratorijski merilni metodi, ki vsaka zase lahko potrdi ali ovrže hipotezo o vseh razmerah enaki hitrosti svetlobe. Izvaja se jih lahko v kontroliranih razmerah in niso odvisne

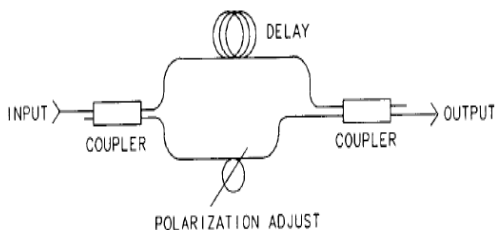
od prihoda kometov ali sončevih izbruhov. Prva od meritev je merjenje valovne dolžine odbite svetlobe od gibajočega ogledala.

Meritev temelji na zelo občutljivem Michelsonovem interferometru.

Kadar se EM valovanje (svetloba) odbije od gibajočega ogledala, se EM valovanju spremeni frekvenca po Dopplerjevem učinku. Z opisano meritvijo pa skušamo ugotoviti, ali se odbitim EM valovom od gibajočega ogledala zaradi hitrosti ogledala poleg frekvence spremeni tudi valovna dolžina, ali pa valovna dolžina ni odvisna hitrosti ogledala.

### **Michelsonov interferometer**

Michelsonov interferometer ja instrument, ki omogoča merjenje sprememb valovne dolžine EM valovanja na osnovi ločevanja enega žarka v dva žarka, ki po ločenih poteh potujeta do skupnega cilja. Pred stotimi leti je bil to instrument na osnovi ogledal, kot je prikazan na Sliki 8.1.



**Figure 1-1. Agilent 11980A Fiber Optic Interferometer, Simplified Schematic**

### **Slika 8.9**

V sodobnem svetu obstajajo industrijsko izdelani interferometri na osnovi Michelsonovega interferometra, ki namesto ogledal, uporabljajo optična vlakna. Enega od takih instrumentov prikazuje *Slika 8.9*.

Instrument na vhodnem sklopniku razcepi vhodni žarek na dva žarka in jih vodi po dveh ločenih poteh do izhodnega sklopnika. Tam se

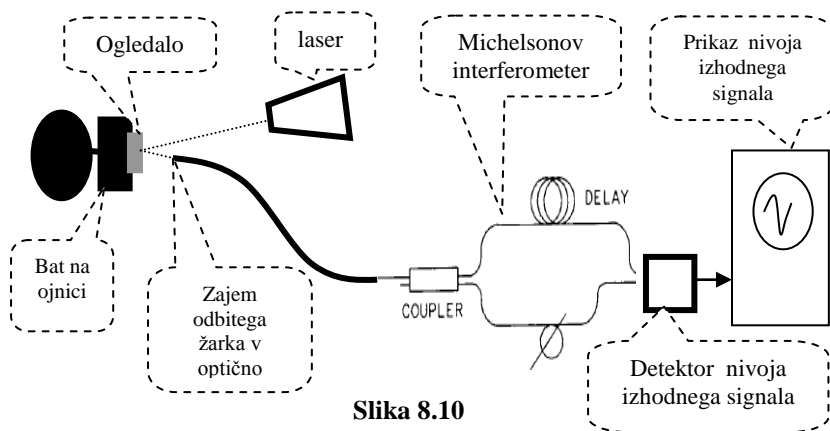
valovanji bodisi ojačita, če se srečata v fazi, oziroma izničita, če se srečata v proti fazi.

Občutljivost instrumenta na valovno dolžino je odvisna od razlik v dolžini optičnih vlaken v eni ali drugi veji. Dolžini vej se lahko razlikujeta tudi do več metrov.

Instrument je občutljiv na spremembe valovne dolžine, ni pa občutljiv na gibanje instrumenta v odnosu na vir EM valovanja. Meri valovno dolžino tudi v primeru gibanja vira svetlobe glede na opazovalca, podobno kot FPI interferometer.

### Shematski prikaz meritve

Laser usmeri žarek na ogledalo, nameščeno na gibajočem bat (kot pri bencinskem motorju). Odbiti žarek prestrežemo v optično vlakno in ga vodimo na občutljiv Michelsonov interferometer. Na izhodu merimo nivo interferenčnega signala.

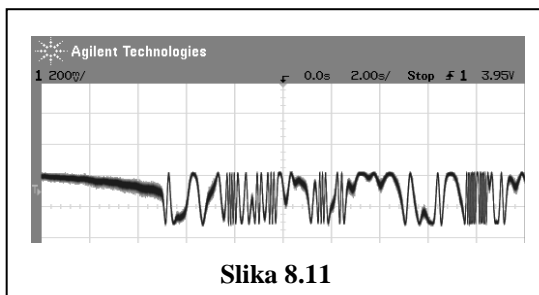


Slika 8.10

Razlika dolžin vej Michelsonovega interferometra je lahko v razredu 10 m. Ob merjenju valovne dolžine svetlobe, ki je v razredu 1  $\mu\text{m}$ , s tem omogoča zaznavanje  $10^{-7}$  relativne spremembe valovne dolžine.

Slika 8.11 ilustrira primer rezultata interferenčnega signala, izmerjenega na FE Univerze v Ljubljani v ta namen.

V opisani meritvi odčitke interferenčnega signala odberemo v trenutku, ko je bat z ogledalom v sredini med skrajnima točkama. V

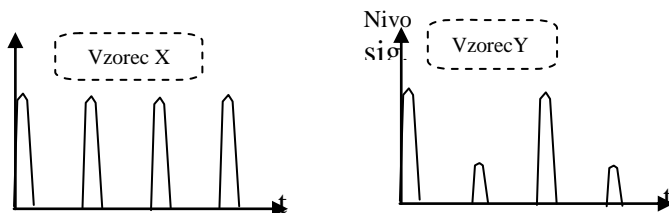


tej poziciji je hitrost ogledala največja. Pri vrtenju bat z ogledalom potuje enkrat v eni smeri drugič v drugi smeri, kar pomeni enkrat hitrost ogledala naprej drugič nazaj.

### Pričakovani rezultati meritve

Pričakovan rezultat meritve bo na zaslonu merilnika opazen kot:

- **Vzorec X** z vedno enakimi nivoji interferenčnega signala ob gibanju bata v eno ali drugo smer. Tak rezultat kaže, da hitrost gibajočega bata ne vpliva na valovno dolžino odbitega EM valovanja.
- **Vzorec Y** z izmeničnim spreminjanjem nivoja signala pove, da smer gibanja ogledala, to je hitrost ogledala vpliva na valovno dolžino odbite svetlobe.



Slika 8.12

Če z vzorcem X dokažemo, da se ob spreminjajoči frekvenci svetlobe zaradi gibanja ogledala, valovna dolžina ne spreminja, to skladno z enačbo  $c=f \cdot \lambda$  nujno pomeni spremembo hitrosti svetlobe v odvisnosti od hitrosti svetila.

Na osnovi:

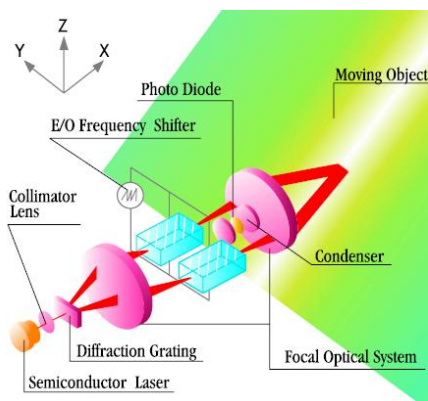
- spreminjanja frekvence svetlobe iz gibajočega vira po Dopplerjevem zakonu,
- na osnovi vedno enake valovne dolžine svetlobe, ne glede na hitrost izvora svetlobe ter
- na osnovi enačbe  $c=f\lambda$

pa lahko zaključimo, da je hitrost svetlobe na ponoru, ki prihaja iz gibajočega vira enaka vektorski vsoti hitrosti svetlobe iz mirujočega vira in hitrosti izvora svetlobe.

## Odboj žarka od gibajočega se traku

Druga meritev hitrosti EM valovanja oziroma svetlobe izvedemo na osnovi interference odbite svetlobe od prečno gibajoče se podlage.

Na gibajočo hrapavo površino usmerim žarek koherentne svetlobe iz mirujočega laserja, tako da žarek pred tem razdelim v dva žarka, ki pod različnima kotoma padata na površino, kot to prikazuje Slika 8.13. Del žarka vpada



**Slika 8.13**

v smeri gibanja podlage, drug del žarka pa v nasprotni smeri gibanja podlage.

Hrapava površina pri odboju naključno usmerja žarka v vse smeri.

Kljub navidezno naključnemu raztrosu svetlobe, odbita svetloba v izbranih primerih ustvarja

interferenco v določeni smeri, kar na primer izkorišča na Sliki 8.13 prikazan Canonov brez kontaktni merilnik hitrosti podlage.

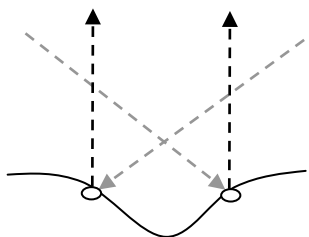
Canon je na tej osnovi izdelal ne kontaktno merjenje hitrosti gibanja traku [http://www.canon.com/optoelectro/5\\_Laser\\_Doppler/5-F.html](http://www.canon.com/optoelectro/5_Laser_Doppler/5-F.html)

Vsaka kotanjica na hrapavi površini gibajoče plošče ima na neki globini oba naklonska kota kotanje natanko pravšnja, da se fazno usklajena koherentna žarka odbijata:

- fazno usklajena
- v isto smer,

kot kaže Slika 8.14.

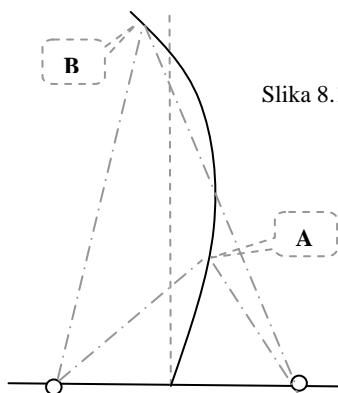
Take razmere se praviloma dogodijo v vsaki kotanjici na gibajoči podlagi. Fazno usklajeni žarki, ki se odbijejo v isto smer lahko ustvarijo interferenco.



Slika 8.14

Smer, kamor se usmerijo žarki, ki imajo pogoje za interferenco, so odvisni le od faz vpadnih žarkov, zato se interferenčni pogoji odboja vseh kotanjic dogodijo v isti smeri. Interferenca iz vseh kotanjic se torej dogaja v tisti smeri, kot jo določata fazi vpadnih žarkov.

#### **Iz oblike interferenčne krivulje določimo hitrosti odbitih žarkov**



Slika 8.15

Interferenca med EM valovi se dogaja na različnih oddaljenostih od odbojne površine, odvisno od tega, kje se poti žarka križata.

Če se EM valovi od podlage odbijejo z enako hitrostjo, ne glede na to, ali so vpadli v smeri gibanja traku ali v nasprotni smeri, bo odboj ustvarjal

interferenco na ravni črti, ki poteka od vpada žarkov v smeri, ki jo določata fazi žarkov.

V primeru, da se žarka od podlage odbijeta z različnima hitrostma, ker en žarek na podlago vpade proti smeri gibanja traku, drug žarek pa v smeri gibanja traku, se bo interferenčna črta skrivila.

Razdalja desnega žarka od odboja do interferenčne črte, na primer točke A na Sliki 8.15, je v bližini odboja lahko krajši od levega žarka do točke A. V nadaljevanju poti se desni žarek zaradi večje hitrosti podaljšuje hitreje kot levi in po določenem delu poti bo desni žarek daljši od levega (točka B). Interferenčna črta ob gibajoči podlagi torej ne poteka naravnost ampak se skrivi, kot kaže Slika 8.15.

Smer interferenčne črte je možno meriti na način, da interferenčni detektor približujemo in oddaljujemo od podlage.

Pričakovan rezultat meritve:

- Ravna interferenčna črta dokazuje, da sta hitrosti odbitih žarkov enaki
- Zakrivljena interferenčna črta dokazuje, da sta hitrosti odbitih žarkov različni.

### **Zaključek**

Meritve hitrosti svetlobe iz gibajočih virov so možne tako na osnovi merjenj svetlobe iz nebesnih teles, kot v laboratorijskih meritvah.

Fizika za svojo verodostojnost potrebuje neposredne meritve hitrosti svetlobe iz gibajočega vira, ki so kot rečeno lahko izvedene na več načinov, še posebno zato, ker so poznane merilne metode in tudi tehnologija, ki omogoča izvedbo teh meritev.

V tem poglavju so opisani osnovni principi metod merjenja hitrosti svetlobe iz gibajočega vira. V naslednjem poglavju pa je opisana metoda merjenja in lastnosti svetlobe, ki prihaja iz sončeve korone.

*Domov:*

<http://www.anti-energija.com>

*Naslednje poglavje*

<http://www.anti-energija.com/Korona.pdf>