

Dr Milivoje J. Rakić

Praktična astrofizika
— skripta —

BEOGRAD, 1988

Autor
Dr Milivoje J. Rakić

Recenzenti
Dr Mirjana Karabin — redovni profesor
Dr Aleksandar Kubičela — viši naučni savetnik
Dr Boško Ćirilov — redovni profesor

Izdavač
Matematički fakultet
Beograd

Tiraž 300 primeraka

Štampa "STUDIO PLUS", Beograd
Typeset in $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, S. Bajčetić

Sadržaj

1	Uvod	5
1.1	Informacije	6
1.2	Elektromagnetni talasi	6
1.3	Uticaj Zemljine atmosfere	7
1.4	Kosmičko zračenje	8
1.5	Meteoritski materijal	8
2	Osnovni astrofizički instrumenti	9
2.1	Optički instrumenti	9
2.1.1	Refraktori	9
2.1.2	Uvećanje	10
2.1.3	Teleskop reflektor	12
2.1.4	Tipovi reflektora	15
2.1.4.1	Njutnov	15
2.1.4.2	Kasegrenov	15
2.1.4.3	Kude-ov	16
2.1.4.4	Šmitov	16
2.1.4.5	Katadioptrik sistem	18
2.1.5	Montaža teleskopa (ekvatorijalna)	19
2.1.6	Postojeći (značajniji) teleskopi	20
2.1.7	Važniji parametri kod teleskopa	21
2.1.7.1	Prečnik objektiva.	21
2.1.7.2	Moć razdvajanja.	21
2.1.7.3	Žižna daljina.	23
2.1.7.4	Vidno polje teleskopa.	23
2.1.7.5	Svetlosna jačina teleskopa.	23
2.1.8	Neki nedostaci kod sočiva	24
2.1.8.1	Aberacije sočiva.	24

2.1.8.2	Sferna aberacija.	25
2.1.8.3	Hromatska aberacija.	26
2.1.8.4	Koma.	28
2.1.8.5	Astigmatizam.	29
2.1.8.6	Distorzija	29
2.1.8.7	Končanica	30
2.1.9	Problem apsorpcije	31
2.1.10	Atmosferske smetnje	32
2.2	Radio teleskopi	33
2.2.1	Priroda radio talasa	33
2.2.2	Antene i radio teleskopi	34
2.2.3	Radio šum. Odnos signal-šum	35
2.2.4	Ograničenje osetljivosti radio teleskopa	35
2.2.5	Unutrašnji šumovi. Osetljivost radio teleskopa	37
2.2.6	Faktor šuma radio teleskopa	38
2.2.7	Registrowanje toplotnih radio izvora	39
2.2.8	Temperatura antene i osetljivost radio teleskopa	41
2.2.9	Interferometri	42
2.2.10	Veliki nepokretni radio teleskopi	45
2.2.11	Osnovni prijemni sistemi — prijemnici u radio- opsegu	46
2.2.11.1	Praktično izvodjenje prijemnika.	47
2.2.11.2	Superheterodinski prijemnik.	47
2.2.11.3	Prijemnik sa direktnim pojačanjem.	48
2.2.11.4	Modulisani prijemnici.	48
2.2.11.5	Sistem prijemnika "Dike".	49
2.2.11.6	Prijemnik sa modulisanim pojačanjem.	50
2.2.11.7	Prijemnik na principu dodavanja šumova.	50
2.2.11.8	Servo kontrolisani prijemnici.	51
2.2.12	Prijemnici za specijalne svrhe	51
2.2.12.1	Prijemnici spektralnih linija.	52
2.2.12.2	Višekanalni spektrometri.	52
2.2.12.3	Jednokanalni podešavajući spektrometri.	53
2.2.12.4	Autokorelacioni spektrometri.	53
2.2.12.5	Polarizacioni prijemnici.	54
2.2.13	Opšti uslovi pri radu prijemnika	54

2.2.14	Važni momenti u konstruisanju radiometarskih sistema	55
3	O zvezdanim spektrima (opšti pojmovi)	56
3.1	Spektar Sunca i drugih zvezda	57
3.2	Interpretacija intezivnosti različitih linija u zvez- danom spektru	58
3.2.1	Spektri ostalih gasova	59
3.2.2	Popunjenost različitih nivoa. Bolcmanova for- mula	60
3.2.3	Uzroci pomeranja, širenja, udvajanja spektralnih linija (praktična razmatranja)	60
3.2.3.1	Doplerov efekat.	60
3.2.3.2	Zemanov efekat.	61
3.2.3.3	Komptonov efekat.	61
3.2.3.4	Ajnštajnov efekat.	62
3.2.3.5	Štarkov efekat - obični i medjuatomske.	62
4	Instrumenti u spektroskopiji	63
4.1	Spektrometar	63
4.2	Spektroskop	63
4.3	Spektrograf	64
4.4	Spektrofotometar	64
4.5	Osnovni elementi optičkog spektrometra	64
4.6	Spektrografi u astronomiji	65
4.6.1	Spektrograf sa prizmom.	65
4.6.2	Spektrograf sa rešetkom	66
4.7	Zvezdani spektrograf	68
4.8	Spektrografi bez proreza	68
4.9	Spektrofotometri kao registratori	69
4.10	Raspodela spektralnih oblasti	71
4.11	Spektrograf u praktičnom izvodjenju sa osnovnim karakteristikama	72
5	Prijemnici za razne spektralne oblasti	74
5.1	Čovečije oko	74
5.1.1	Redukovano oko	75
5.1.2	Spektralna osetljivost oka	75
5.1.3	Granica osetljivosti oka	76

2.1.8.2	Sferna aberacija.	25
2.1.8.3	Hromatska aberacija.	26
2.1.8.4	Koma.	28
2.1.8.5	Astigmatizam.	29
2.1.8.6	Distorzija	29
2.1.8.7	Končanica	30
2.1.9	Problem apsorpcije	31
2.1.10	Atmosferske smetnje	32
2.2	Radio teleskopi	33
2.2.1	Priroda radio talasa	33
2.2.2	Antene i radio teleskopi	34
2.2.3	Radio šum. Odnos signal-šum	35
2.2.4	Ograničenje osetljivosti radio teleskopa	35
2.2.5	Unutrašnji šumovi. Osetljivost radio teleskopa	37
2.2.6	Faktor šuma radio teleskopa	38
2.2.7	Registrowanje toplotnih radio izvora	39
2.2.8	Temperatura antene i osetljivost radio teleskopa	41
2.2.9	Interferometri	42
2.2.10	Veliki nepokretni radio teleskopi	45
2.2.11	Osnovni prijemni sistemi — prijemnici u radio- opsegu	46
2.2.11.1	Praktično izvodjenje prijemnika.	47
2.2.11.2	Superheterodinski prijemnik.	47
2.2.11.3	Prijemnik sa direktnim pojačanjem.	48
2.2.11.4	Modulisani prijemnici.	48
2.2.11.5	Sistem prijemnika "Dike".	49
2.2.11.6	Prijemnik sa modulisanim pojačanjem.	50
2.2.11.7	Prijemnik na principu dodavanja šumova.	50
2.2.11.8	Servo kontrolisani prijemnici.	51
2.2.12	Prijemnici za specijalne svrhe	51
2.2.12.1	Prijemnici spektralnih linija.	52
2.2.12.2	Višekanalni spektrometri.	52
2.2.12.3	Jednokanalni podešavajući spektrometri.	53
2.2.12.4	Autokorelacioni spektrometri.	53
2.2.12.5	Polarizacioni prijemnici.	54
2.2.13	Opšti uslovi pri radu prijemnika	54

2.2.14	Važni momenti u konstruisanju radiometarskih sistema	55
3	O zvezdanim spektrima (opšti pojmovi)	56
3.1	Spektar Sunca i drugih zvezda	57
3.2	Interpretacija intezivnosti različitih linija u zvez- danom spektru	58
3.2.1	Spektri ostalih gasova	59
3.2.2	Popunjenost različitih nivoa. Bolcmanova for- mula	60
3.2.3	Uzroci pomeranja, širenja, udvajanja spektralnih linija (praktična razmatranja)	60
3.2.3.1	Doplerov efekat.	60
3.2.3.2	Zemanov efekat.	61
3.2.3.3	Komptonov efekat.	61
3.2.3.4	Ajnštajnov efekat.	62
3.2.3.5	Štarkov efekat - obični i medjuatomski.	62
4	Instrumenti u spektroskopiji	63
4.1	Spektrometar	63
4.2	Spektroskop	63
4.3	Spektrograf	64
4.4	Spektrofotometar	64
4.5	Osnovni elementi optičkog spektrometra	64
4.6	Spektrografi u astronomiji	65
4.6.1	Spektrograf sa prizmom.	65
4.6.2	Spektrograf sa rešetkom	66
4.7	Zvezdani spektrograf	68
4.8	Spektrografi bez proreza	68
4.9	Spektrofotometri kao registratori	69
4.10	Raspodela spektralnih oblasti	71
4.11	Spektrograf u praktičnom izvodjenju sa osnovnim karakteristikama	72
5	Prijemnici za razne spektralne oblasti	74
5.1	Čovečije oko	74
5.1.1	Redukovano oko	75
5.1.2	Spektralna osetljivost oka	75
5.1.3	Granica osetljivosti oka	76

5.1.4 Kontrastna osetljivost oka	76
5.2 Upotreba fotografije u astronomiji	77
5.2.1 Fotografska emulzija kao prijemnik zračenja	78
5.2.2 Granice osetljivosti fotografske emulzije	78
5.2.3 Gustina fotografskog lika	79
5.2.4 Spektralna osetljivost fotografskih emulzija	79
5.3 Bolometri-toplotni senzori zračenja	81
5.4 Fotoćelije, fotomultiplikator, jonizacione komore	84
5.5 Scintilacioni brojač	85
5.6 Registratori	86
6 Primena računara	88
6.1 Način povezivanja računara sa procesom	88
Dodatak	
Medjunarodni sistem jedinica (jedinice SI)	93

1 Uvod

Praktična astrofizika je astronomska disciplina u kojoj se upoznaju (opisuju) instrumenti i metode merenja u cilju izučavanja fizičkih osobina i procesa na kosmičkim objektima. Skoro sve oblasti današnje fizike, a naročito one koje su najviše vezane za laboratorijska istraživanja, prisutna su u velikom broju i u astrofizici. Na neki način astrofizika je proširenje zemaljske fizike na fiziku kosmičkih objekata.

Zadatak sa kojim se astrofizika neprijatno suočila je rešavanje problema o stanju materije koje je bilo nepoznato na Zemlji. Drugim rečima, na ispitivane astrofizičke objekte nije moguće uticati u cilju ispitivanja. Međutim, zahvaljujući velikom napretku raznih tehnoloških oblasti sada je omogućeno ispitivanje osobina materije u uslovima koji su doskora bili obuhvaćeni samo astrofizičkim ispitivanjima.

Karakteristike osnovnih instrumenata, optičkih teleskopa, radio teleskopa kao i nekih pratećih instrumenata, npr. spektrografa, preinačavane su u njihovim principima mnogo puta tokom poslednjih stotina godina. Njihove karakteristike se stalno poboljšavaju, ali jednim vrlo usporenim korakom. Sa druge strane, takozvani merni lanac je kao posrednik napravio značajno kvalitativno poboljšanje naročito u osetljivosti pri registraciji kod izlaza uobičajenih instrumenata tako da se ova osetljivost približava teorijskoj granici. Završni deo mernog lanca, registrator, naročito je prerađivan da bi se omogućile što preciznije i obilnije informacije koje stižu u teleskop.

Izlaganje materijala je proisteklo iz izvesnog iskustva tokom održanih predavanja, kojom prilikom se pokušalo da izlaganje sledi jedan logičan put. Na kraju je dat dodatak o medjunarodnom sistemu jedinica, onih koje se najčešće upotrebljavaju u astrofizičkim merenjima.

1.1 Informacije

Astronom prima na Zemlji vrlo malo energije iz kosmosa, no i pored toga, preciznim analizama dobijenih informacija može da sazna hemijski sastav zvezda i galaksija, njihove fizičke uslove, temperaturu, stepen jonizacije, magnetno polje itd. Informacije koje se za sada mogu primiti su u obliku: elektromagnetnih talasa, kosmičkog zračenja i meteoritskih materijala.

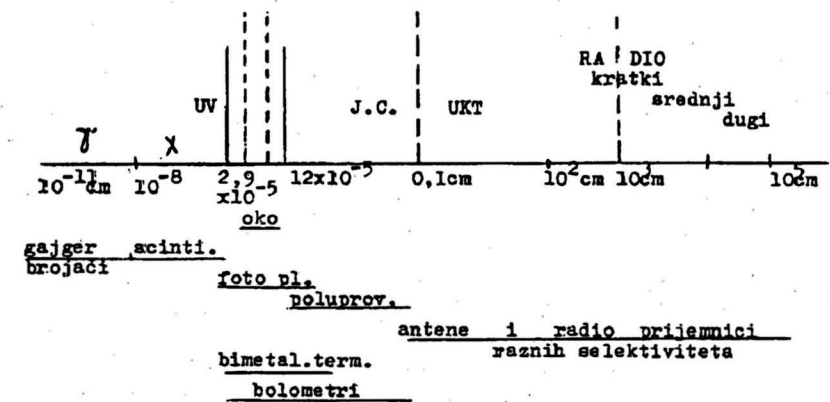
1.2 Elektromagnetni talasi

Ne postoji kvalitativna razlika između vidljivih i radio talasa pošto su oba elektromagnetne prirode t.j. pripadaju elektromagnetnom spektru. Saglasno talasnoj teoriji e.m. talasi se sastoje od transverzalnih elektromagnetnih vibracija koje se prostiru u vakuumu brzinom $3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$. Vibracije karakterišu tri veličine: talasna dužina λ , učestanost ili frekvencija ν , i brzina svetlosti c . Veza između gornje tri veličine je data poznatom relacijom,

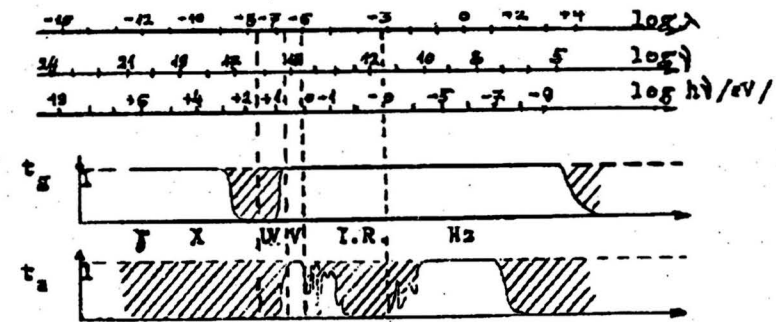
$$\lambda \cdot \nu = c \quad (1.1)$$

Ako bi rasprostrli sva elektromagnetna zračenja prema talasnim dužinama dobili bi kontinualnu promenu od vrlo kratkih do vrlo dugih talasnih dužina. Na slici 1 je dat spektralni opseg elektromagnetnih zračenja. Na slici 2 je data nomenklatura e.m. talasa gde se mogu videti energije u elektron voltima kao i monohromatski faktori transmisije (prostiranja) galaksije i zemaljske atmosfere, t_g i t_a .

Na slici 2 se vidi da je γ zračenje relativno apsorbovano od zemaljske atmosfere, ali već oko 30 km visine mogu da se mere zračenja od 500keV, što odgovara talasnoj dužini $\lambda = 2,410^{-12} \text{ cm}$. Optički prozor "V" se prostire od $\lambda = 0,3\mu$ do 3μ , to jest od ultra ljubičastih (UV) do infracrvenih (IR). U ovom delu apsorpciju vrši vodena para i njene kapljice. "Radio prozor" počinje negde oko $\lambda = 4\text{mm}$ do $\lambda = 60\text{m}$ približno. Dalje jonosferska apsorpcija i refleksija slobodnih elektrona ekranizuje kompletno elektromagnetni spektar na nivou površine Zemlje.



Slika 1:



Slika 2:

1.3 Uticaj Zemljine atmosfere

Uglavnom se može zaključiti da postoje dva "prozora", jedan u vidnom području, između ultraljubičastog (UV) i infracrvenog (IR). Drugi prozor je u radio domenu od 4mm do 60m. Infracrveni se mogu primiti iznad 10000m. U unutrašnjosti ovih prozora atmosfera vrši znatne promene na primljene informacije (selektivna apsorpcija, turbulencija itd.). Takođe, sekundarno kosmičko zračenje koje dopire do površine Zemlje je nuklearna interakcija primarnih zračenja sa atomima atmosfere.

1.4 Kosmičko zračenje

Korpuskularna priroda ovog jonizacionog zračenja je otkrivena negde 30-tih godina ovog veka. Kosmički zraci su sastavljeni od 90% protona, 9% čestica i 1% težih jezgara: elektrona, pozitrona, neutrina itd. Energetski spektar se proteže od 10^6 do 10^{20} eV sa srednjom energijom od 10^9 eV. Srednje kosmičko zračenje u hiljadu metara kubnih je ono koje daje kosmičko zračenje gustine energije reda elektron volta po cm^3 .

1.5 Meteoritski materijal

Ovaj materijal može da bude iz našeg Sunčevog sistema, takodje može prispeti u Zemljinu atmosferu i iz prostora van Sunčevog sistema. Ocenjeno je da je ukupan broj meteora koji u toku 24^{h} udje u Zemljinu atmosferu, a može se videti kao svetao trag, oko 200 miliona. Njihova zajednička težina je oko 10 tona, ali ako se uzme u obzir da je broj materijala koji dospe u atmosferu, a nije vidljiv, približno deset puta veći, tada je količina materijala reda 10^8 gr.

Najbolje vreme za posmatranje meteora je između ponoći i radjanja Sunca i tada posmatrač mora posmatrati u pravcu kretanja Zemlje i videće ih sa brzinom kretanja manjom od kretanja Zemlje tj 30km/sec .

Da bi video meteore od zalaska Sunca do ponoći postmatrač mora tragati za njima kada se kreću direktno nasuprot Zemlji, brzinom većom od Zemljine. Meteor postaju vidljivi na daljini od odprilike 96km iznad površine Zemlje. Iz jačine svetlosti koju emituje trag meteora može da se odredi iznos količine kinetičke energije. Iz ovoga i poznavanja brzine može da se odredi masa, i ovo nam je pokazalo da je masa kod većine samo nekoliko miligrama.

Iz spektralne analize meteorskog traga, kao i iz hemijske analize meteorita nadjeno je da su sastavljeni od gvoždja, nikla, kalcijuma i silicijuma.

2 Osnovni astrofizički instrumenti

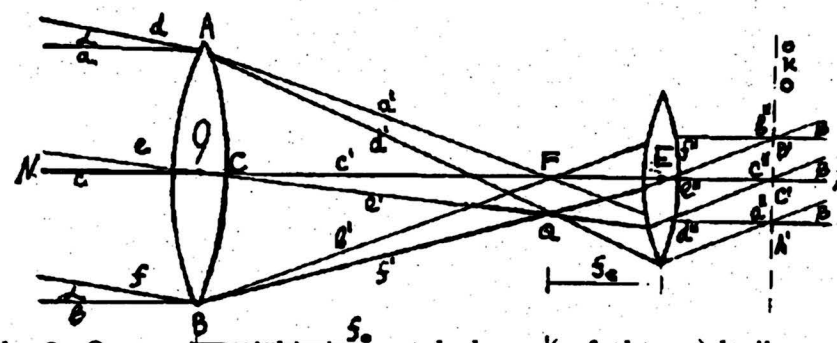
2.1 Optički instrumenti

Cilj astronomskih optičkih instrumenata je da sakupe što veću količinu svetlosnih informacija.

Istorijski posmatrano, klasifikacija astronomskih optičkih instrumenata se može izvršiti na instrumente zasnovane na prelamanju (refrakciji) svetlosti koji se nazivaju **refraktorima** (durbini) i instrumente koji rade na principu odbijanja (refleksiji) svetlosti i nazivaju se **reflektori** (teleskopi). Danas se uglavnom u astronomskoj literaturi odomaćio termin **teleskopi** za oba.

2.1.1 Refraktori

U principu teleskopi — refraktori — se sastoje od dva sočiva koaksijalno postavljenih u cilindričnoj cevi koja je iznutra crno obojena. Ulazno sočivo je velike žižne daljine i naziva se **objektiv**, izlazno sočivo je male žižne daljine i naziva se **okular**. U praktičnom izvodjenju je to sistem sočiva. Na slici 3 se vidi osnovni sistem.



Slika 3: Osnovni optički sistem teleskopa (refraktora) koji se sastoji od objektiv "O" i okulara "E". Tačka F je zajednička žiža oba sočiva

Kod ovog sistema okular E i objektiv O su razdvojeni rastojanjem koje je jednako zbiru žižnih rastojanja f_0 od objektiv i f_e žižne daljine okulara. Ako dva zraka dolaze sa nekog

vrlo udaljenog objekta (zvezde), neka su to zranci a i b i neka su paralelni optičkoj osi c , oni dolaze na objektiv u tačke A i B , i seći će se u tački F , a i svi ostali paralelni zranci koji prodju kroz objektiv presecaće se u tački F — nazvanoj žiži. Pošto je tačka F u isto vreme i žiža okulara proizilazi da će zranci a' i b' posle prolaska kroz okular biti paralelni sa optičkom osom c . Ako se "oko" posmatrača nalazi na optičkoj osi tako da sakuplja zrake, tada će sočivo oka na retini formirati lik predmeta.

Razmotrićemo slučaj kada dolazeći zranci nisu paralelni sa optičkom osom c , već dolaze pod izvesnim uglom sa nekog vrlo udaljenog objekta. Neka su ti zranci d , e i f ; oni se pri prolasku kroz objektiv O seku u tački Q koja je u žižnoj ravni objektiva, koja je normalna na optičku osu i koja takodje sadrži i tačku F . Q je lik objekta koji je na ugaonom rastojanju α od optičke ose. Razmotrimo sada zrake d' , e' i f' , vidimo da je centralni zrak e' posle prolaska kroz okular E savijen postajući zrak e'' , tako da seče optičku osu u tački C' . Ova tačka je lik centra objektiva formiranog okularom E i na ovom mestu mora oko biti postavljeno. Isto razmatranje važi za zrake d' , i f' t.j. za tačke B' i A' . Potrebno je zapaziti da je upadni ugao α manji od izlaznog ugla β .

2.1.2 Uvećanje

Uvećanje se posmatra kao ugaono i definiše se obrascima poznatim iz geometrijske optike:

$$G = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_0 + f_e}{f_e} = \frac{f_0}{f_e} \quad (2.1)$$

Uvećanje se određuje i kao odnos prečnika ulaznog i izlaznog snopa

$$\frac{D}{d} \quad (2.2)$$

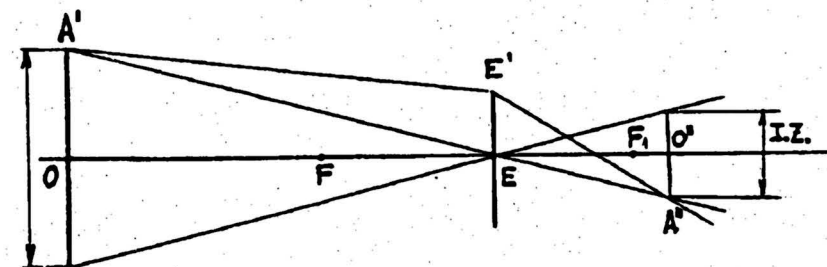
gde je d prečnik izlaznog snopa ($\overline{A'B'}$), a D je prečnik objektiva.

Izjednačavanjem obrasca 2.1 i 2.2 dobija se da je $d = D \frac{f_e}{f_0}$; poslednji izraz nam omogućava da se žižna daljina okulara može

odrediti merenjem izlaznog snopa za poznati objektiv i u slučaju ako je okular složen sistem sočiva, što je u praksi i uobičajeno.

α i β su upadni i izlazni uglovi svetlosnog zraka i mogu se smatrati malim uglovima. U praksi se odnos 2.1 naziva "moć uvećanja" ili samo "uvećanje". Pošto su objekt i lik u obrnutom smeru u odnosu na optičku osu NN to je lik FQ okrenut, međutim obrnuti lik nema posledice.

Ivice objektiva ograničavaju ulazni snop svetlosnih talasa. U teleskopu ulazna i izlazna zenica (apertura)¹ su oformljene ograničenim prečnikom objektiva i likom objektiva iza okulara. Veličina i položaj izlazne zenice prikazane su na slici 4, gde je O — objektiv, E — okular, i O'' — lik objektiva formiran okularom, t.j. izlazna zenica. Ako je objektiv uniformno osvetljen, centralni zrak $A'E A''$ i prelomljeni zrak $A'E' A''$, svojim presekom određuju izlaznu zenicu ($2\overline{A''O''}$).



Slika 4: Ulazna zenica (UZ) i izlazna zenica (IZ)

Fokusiranjem teleskopa na beskonačnost prema objektu na nebu, izlazna zenica može biti locirana pomeranjem jednog ekrana napred i nazad iza okulara dok se ne nadje najoštriji lik. Ovo daje položaj i prečnik izlazne zenice (I.Z.) a odatle i uvećanje može biti

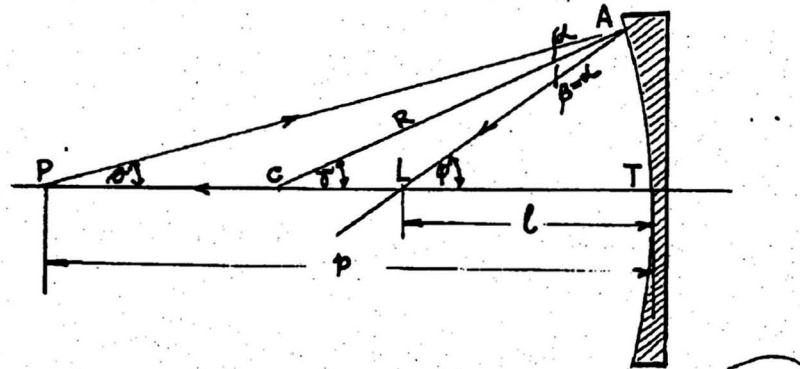
¹Apertura (svetlosna jačina objektiva) — je sposobnost optičkog sistema da propusti veću ili manju količinu svetlosti.

izračunato:

$$G = \frac{U.Z.}{I.Z.} = \frac{D}{d} \quad (2.3)$$

2.1.3 Teleskop reflektor

Sastoji se od objektiva koji je u principu predstavljen izdubljenim (konkavnim) ogledalom i okulara (lupe) klacičnog tipa. U početku su objektivi bili sferna ogledala, a danas su parabolična.



Slika 5: Veza između položaja i veličine predmeta i likova

Kod izvođenja aproksimativne jednačine za ogledalo uzećemo da je otvor ogledala mali tako da je moguće tolerisati izvesne aproksimacije. Na slici 5 označili smo $PT = p$, $LT = l$, pošto je duž CA simetrala ugla PAL može se napisati relacija

$$\frac{R-l}{p-R} = \frac{AL}{AP}$$

približno se može uzeti da je $AL = LT = l$ i da je $AP = PT = p$, pa je

$$\frac{R-l}{p-R} = \frac{l}{p}$$

odavde se dobija aproksimativna jednačina za ogledalo:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{2}{R} \quad (2.4)$$

Posmatrajući uglove očigledan je sledeći odnos

$$\gamma = \theta + \alpha = \theta + \phi - \gamma$$

ili

$$\theta + \phi = 2\gamma, \quad \text{a kako je } \theta \approx \frac{AT}{p}, \quad \phi \approx \frac{AT}{l} \text{ i } \gamma = \frac{AT}{R}$$

odmah se dobiva odnos 2.4.

Jednačina 2.4 pokazuje simetričnost u odnosu na p i l t.j. lik i predmet mogu izmeniti mesta i uloge. Slika 5 je ista, s razlikom što zracima treba izmeniti orijentaciju, dati im suprotan smer naznačenom. Ista jednačina pokazuje, takodje, da ako se predmet nalazi u centru krivine izdubljenog ogledala ($p = R$), onda je lik u istoj tački ($l = R$). Naime, u tom slučaju, upadni zrak ima pravac normale, pa isti pravac sa suprotnim smerom ima i odbijeni zrak. Dalje se vidi da se udaljavanjem predmeta dobiva približavanje lika temenu. Najveće udaljenje je za $p \rightarrow \infty$. U tom slučaju je $l = \frac{R}{2}$. Izraz $p \rightarrow \infty$ znači da svetlosni zraci nailaze paralelno na ogledalo. Za sve paralelne zrake, uz usvojenu aproksimaciju, odbijeni zraci prolaze kroz jednu tačku $l = \frac{R}{2}$. Ta tačka se naziva žiža ogledala. Rastojanje između žiže i temenom ogledala naziva se žižna daljina i obeležava se sa f . Žižna daljina ogledala jednaka je polovini poluprečnika krivine.

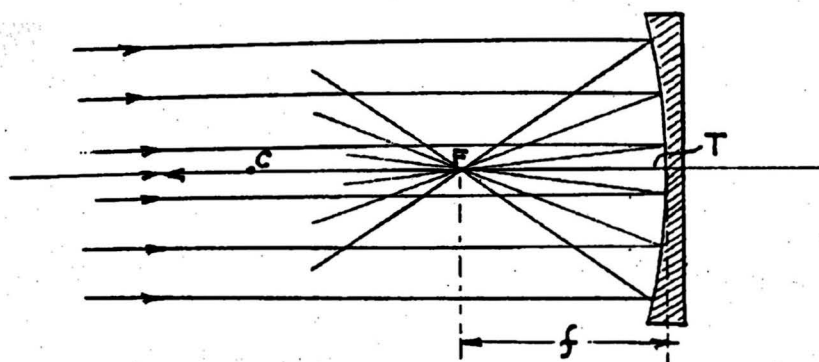
Paralelni zraci i odgovarajući odbijeni zraci sa žižom F i centrom krivine C izdubljenog ogledala prikazani su na slici 6. za

$$p \rightarrow \infty, \quad l = \frac{R}{2} = FT = LT = F.$$

Prema tome jednačina za izdubljeno ogledalo je

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f} \quad \text{ili samo} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (2.5)$$

Kao i kod refraktora, u žiži F , slici 6 formira se lik nebeskog tela. Ovaj lik posmatra se okularom kao lupom.



Slika 6:

Ahromatizam ovog objektiva je potpun, a količnik otvora može biti manji od $1/5$ ili $1/6$ što utiče na smanjenje težine i glomaznosti instrumenta.

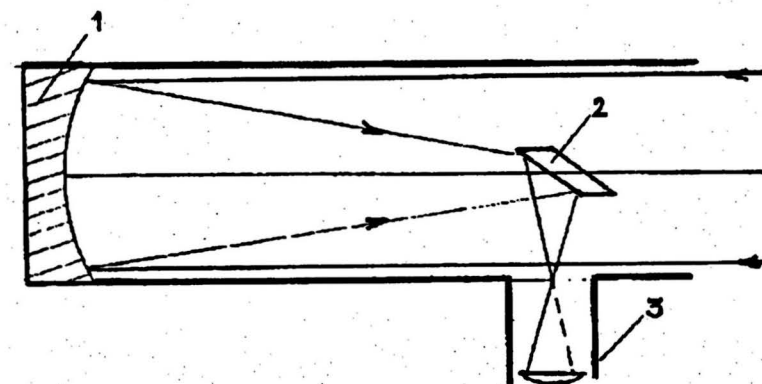
Kod ovih teleskopa veliku ulogu imaju spoljni uzroci – temperaturne promene – koji utiču na kvalitet slike, tako da se teorijska moć razdvajanja ne može ostvariti, a što naročito dolazi do izražaja kod vrlo velikih refleksionih instrumenata.

Refleksioni teleskopi se uglavnom koriste za fotografisanje a ne za vizuelna posmatranja. Da bi se smanjili spoljni uticaji, naročito kod velikih instrumenata, pridodaju se razni specijalni uređaji još kod same montaže da bi se izvršila bolja raspodela i uravnoteženje staklene mase koja nekad ide i do više tona.

Nekada su reflektori teleskopa radjeni od specijalne bronzne, današnja tehnologija upotrebljava izvanredno glačano staklo ili zerodur (sital), prekrivene tankim slojem aluminijuma (naparavanjem u vakuumu). Reflektori napareni srebrom su vrlo kratkotrajni tj. posle nekoliko meseci postupak srebrenja se mora ponoviti a takodje nedostatak je to što je moć refleksije u opsegu ultra ljubičastih zraka vrlo slaba.

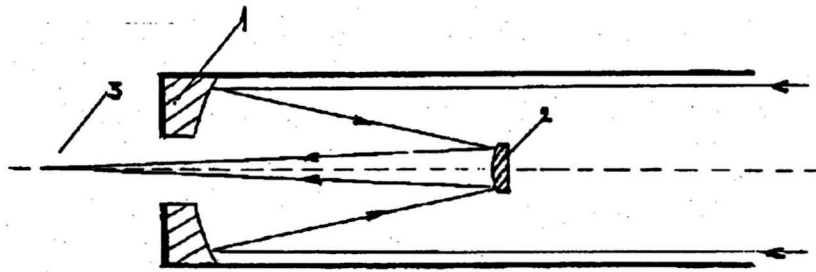
2.1.4 Tipovi reflektora

2.1.4.1 Njutnov tip izvodjenja teleskopa je najstariji. Sastoji se od glavnog paraboličnog ogledala i jednog malog ravnog ogledala postavljenog naspram glavnog ogledala. Slika se dobija refleksijom od ravnog ogledala u okular koji je bočno postavljen, slika 7. Ovaj tip teleskopa je danas najčešće upotrebljavan od strane amatera zato što je dosta jednostavan za izvodjenje i uglavnom je manjih dimenzija. Dosta nezgodan problem predstavlja pristup oka, jer je okular bočno postavljen. Jasno vidno polje je nekoliko ugaonih minuta.



Slika 7: Njutnov tip reflektora: 1 – glavno ogledalo, 2 – malo ogledalo, 3 – okular

2.1.4.2 Kasegrenov tip teleskopa ima, takodje, glavno ogledalo parabolično, koje je u centru probušeno. Drugo malo ogledalo je ispupčeno hiperbolično, koje reflektuje svetlost sa glavnog ogledala ka okularu koji se nalazi u osi koja prolazi kroz centar paraboličnog ogledala, slika 8. Ovde je vidno polje takodje nekoliko minuta. Kasegrenovo izvodjenje zbog vrlo velike žižne daljine se naročito koristi kada je potrebno meriti mala linearna pomeranja. Zbog pogodnosti montaže spektrografa na osi instrumenta isti se vrlo često upotrebljavaja za precizna spektrografska merenja.



Slika 8: Kasegrenov tip reflektora: 1 – glavno ogledalo, 2 – malo hiperbolično ogledalo, 3 – okular

Prednost Kasegrenove montaže je da se zenica može postaviti na niži kraj teleskopa tako da je posmatranje veoma olakšano. Ovaj tip teleskopa veoma se mnogo nalazi u eksploataciji u profesionalnoj astronomiji.

Malo ispupčeno hiperbolično ogledalo (2) također povećava žižnu daljinu celog sistema u odnosu na žižnu daljinu malog konkavnog ogledala (1).

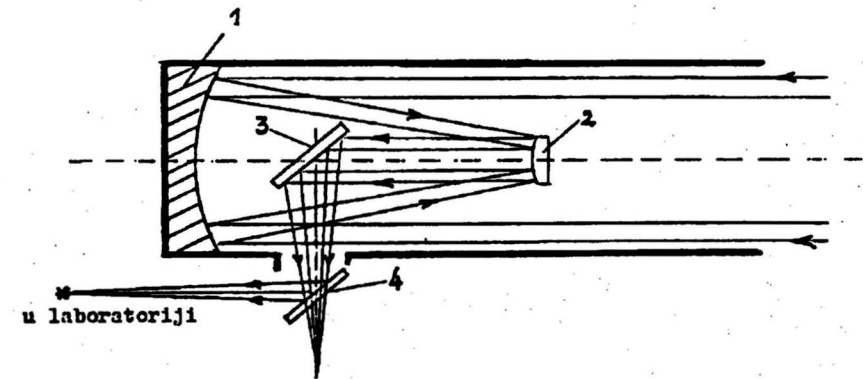
Zbog aksijalne simetrije ovaj teleskop je pogodan za merenje polarizacije zračenja nebeskih tela.

2.1.4.3 Kude-ov tip teleskopa ima iste elemente kao i Kasegrenov teleskop sa dodatkom jednog ravnog ogledala smeštenog u preseku glavne optičke ose i deklinacijske ose. Pomoću još jednog ravnog ogledala može se adaptirati montaža tako da se žiža lika dovede u laboratoriju van kupole, slika 9.

Ova montaža omogućava korišćenje ostalih pomoćnih instrumenata većih težina tako da dozvoljava izvestan komfor pri posmatranju.

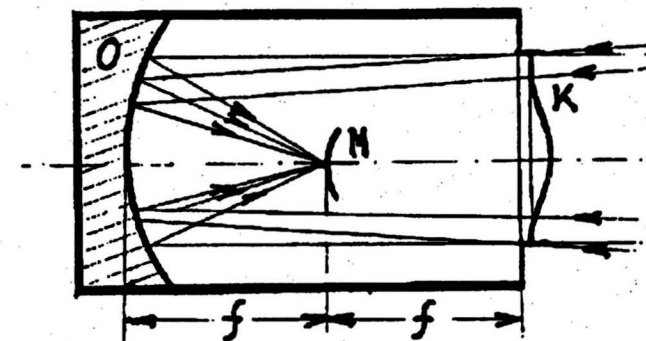
Njutnovu, Kasegrenovu i Kudeovo izvodjenje montaže je takvo da se može izvršiti na istom teleskopu.

2.1.4.4 Šmitov teleskop je konstruisan tridesetih godina i sastoji se od sfernog ogledala O i dijafragme K stavljene u centar



Slika 9: Kudeov tip reflektora: 1 – glavno ogledalo, malo hiperbolično ogledalo, 3 – ravno ogledalo, 4 – ravno ogledalo

krivine ogledala, slika 10.



Slika 10: Šmitov tip reflektora

Ovakva konstrukcija omogućava fotografisanje širokog polja čak i sa velikim ogledalom, i do 20° , dok ranije pomenuti teleskopi sa parabolničnim ogledalima daju vrlo sužena vidna polja - oko desetak minuta. Ova činjenica omogućava Šmitovom teleskopu da je najpogodniji za metodično istraživanje vasiona, posebno za posmatranje vrlo dalekih maglina i brzo promenljivih zvezda.

Prolaskom kroz dijafragmu svaki svetlosni snop iseca na sfernom ogledalu elementarna ogledala istog prečnika kao što je njegov. Elementarna ogledala reprodukuju sliku svake zvezde u

vidnom polju koje su rasporedjene po sfernom elementu M sa poluprečnikom krivine upola manjim od poluprečnika krivine velikog ogledala. Kompenzacija sferne aberacije se vrši stavljanjem u ravan dijafragme jedne staklene pločice čija debljina prvo postepeno opada a zatim raste od centra ka ivicama. Profil pločice je izračunat tako da promena optičkog puta kroz staklo otklanja sfernu aberaciju. Hromatska aberacija postoji ali je zbog tanke dijafragme mala.

Teorijsko vidno polje izraženo u radjanima dato je relacijom

$$\frac{D - d}{R} \quad (2.6)$$

gde je

D – prečnik velikog ogledala

R – radius krivine velikog ogledala

d – prečnik dijafragme

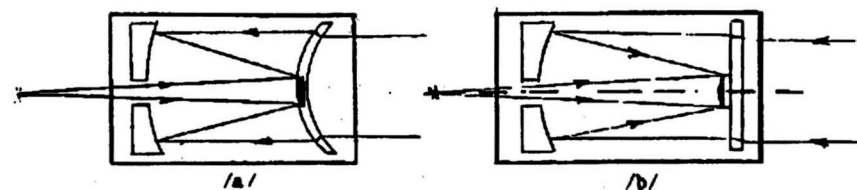
2.1.4.5 Katadioptrik sistem je veliko poboljšanje u odnosu na klasičan tip Kasegrena i njegove razne kombinacije kao "Riče-Kretien Kasegren". Sistem je kombinacija ogledala i sočiva u zatvorenoj cevi sa vrlo velikom žižnom daljinom. Postoje dva osnovna tipa ovog sistema: Maksutov-Kasegrenov i Šmit-Kasegrenov tip. Sočiva su postavljena ispred ogledala i vrše korekciju grešaka ogledala.

Tip Maksutova koristi debelo ispupčeno - udubljena sočiva za korekciju a tip Šmit tanja asferična, slika 11.

Kod Šmitovog katadioptričnog tipa hromatska aberacija i koma bitno ne postoje ali su upadljive kod Maksutova. Iz dosadašnjeg izlaganja se može videti da je vidno polje kod refraktora veće nego kod reflektora.

Što se tiče stabilnosti slike refraktori su znatno bolji, zbog zatvorene i pocrnjene cevi tako da se parazitske refleksije svode na minimum.

Temperaturske promene mnogo više utiču na ogledala što menja žižnu daljinu i zato se te kompenzacije vrše upotrebom savremenih materijala (zerodur, sital itd.) umesto stakla, čime je



Slika 11: (a) Maksutov-Kasegren, (b) Šmit-Kasegrenov tip katadioptrik sistema refraktora

skoro potpuno otklonjen uticaj temperature na oblik reflektujuće površine.

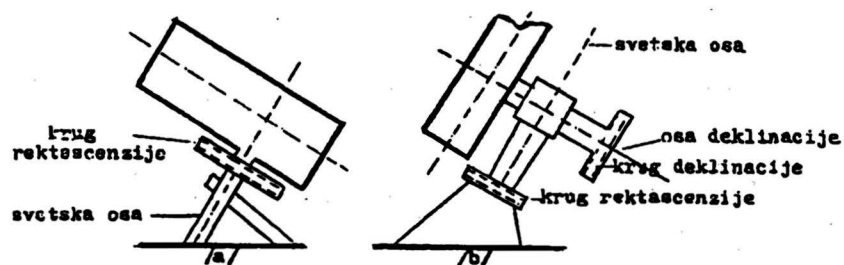
Ove promene se kod sočiva ne ispoljavaju toliko jer se jedna krivina R povećava sa smanjenjem druge R' , te žižna daljina $\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}$, ostaje približno konstantna.

2.1.5 Montaža teleskopa (ekvatorijalna)

Teleskopi montirani ekvatorijalno mogu se pokretati oko stalne (fiksirane) ose koja je paralelna Zemljinoj osi (svetska osa) i oko druge ose koja je upravna na prethodnu (deklinacijska osa). Postoje više načina ekvatorijalne montaže "viljuškasta montaža", slika 12, "engleska montaža", "nemačka montaža".

Okretanjem oko prve ose teleskopom se prati posmatrana zvezda tokom njenog prividnog dnevnog kretanja. Rotacijom oko druge ose teleskop se dovodi u položaj koji odgovara deklinaciji zvezde koja se prati. Obeleženi krugovi, upravno na obe ose, omogućavaju postavljanje teleskopa prema željenoj deklinaciji i rektascenziji. Na boljim teleskopima postoje dodatni uređaji koji omogućavaju da se vrši digitalno navodjenje sa većom preciznošću.

Automatsko praćenje slike zvezde tokom prividnog dnevnog kretanja je omogućeno vrlo preciznim satnim mehanizmom. Tada slika zvezde izgleda kao fiksirana u vidnom polju što omogućava



Slika 12: (a) viljuškasta montaža, (b) nemačka montaža

da se: produži ekspozicija (bez mesečine) na više noći i do nekoliko desetina časova zatim, mogu se obaviti diferencijalna merenja koordinata u odnosu na susedne zvezde. Sa takvih snimaka se merenja mogu obaviti vrlo precizno korišćenjem mikroskopskog komparatora a ujedno snimak predstavlja i trajan dokument izvršenih merenja.

2.1.6 Postojeći (značajniji) teleskopi

Najveći optički teleskop nalazi se u SSSR-u na Kavkazu. Njegovo je parabolično ogledalo šest metara u prečniku. Montaža mu je azimutalna.

U Kaliforniji na Maunt Palomaru je 1950 instaliran teleskop "HALE" sa prečnikom ogledala 5,08 metara. Ogledalo je teško dvadeset tona. Količnik otvora je 1,33 tako da je moć razdvajanja približno jednaka teorijskoj.

Na Maunt Palomaru se takodje nalazi Šmitov reflektor od 1,25 metara u prečniku koji je omogućio prvi skup fotografija dela nebeske sfere vidljivog sa tog mesta.

Najveći Šmitov teleskop se nalazi u Tautenburgu sa prečnikom 1,34 metara i otvorom $F/2,5$ a može da funkcioniše i kao Šmit-Kasegren.

U Francuskoj na opservatoriji Ot-Provans se nalazi Njuton-

Kasegren-Kude teleskop od 1,93 metara. Južna Evropska Opservatorija (L'ESO) raspolaže teleskopom Riče-Kretien od 3,60 metara.

Francusko-kanadsko-havajski teleskop Riče-Kretien od 3,6 metara je postavljen na Mauna Kea na Havajima na 4200 metara visine.

2.1.7 Važniji parametri kod teleskopa

2.1.7.1 Prečnik objektiva. Potrebno je da prečnik objektiva D bude što veći da bi primio što veću količinu svetlosti i da bi difrakcioni lik bio što manji. Pri posmatranju zvezda sa velikim uvećanjem slika ne izgleda kao tačka, već kao vrlo mali svetli krug (lažni disk) koji je u centru sjajniji nego na ivici a okružen je prstenovima čiji sjaj opada sa udaljenošću od centra. Ovi prstenovi se nazivaju difrakcioni prstenovi. Ugaona veličina prstenova je obrnuto proporcionalna prečniku objektiva, na primer za objektiv prečnika 10cm, difrakcioni ili lažni disk ima ugaoni poluprečnik $1''$,4. Ovaj fenomen ograničava moć razdvajanja teleskopa tj. posmatranje sitnih detalja, a to je u stvari granica razdvajanja datog teleskopa.

Mali prečnici objektiva sa velikim uvećanjem favorizuju pojavu difrakcionih prstenova. Ova pojava je posledica talasne prirode svetlosti – takodje se javlja u akustici i radiotehnici – a nastaje usled toga što se svetlost kroz male otvore ne prostire pravolinijski, već se savija (difrakcija svetlosti). Zbog ove pojave mora se bitno razlikovati moć razdvajanja teleskopa od njegovog uvećanja.

2.1.7.2 Moć razdvajanja. Ovaj pojam se izvodi iz teorije difrakcije i pokazuje da je poluprečnik centralne difrakcione mrlje ρ dat prostom formulom:

$$\rho = \frac{1,22 \lambda}{D} \quad (2.7)$$

gde je

λ – talasna dužina posmatrane svetlosti

D – prečnik objektiva

Ako posmatramo dva svetlosna izvora koji daju dve difrakcione mrlje i ako se izvori približavaju, nastupa trenutak kada se dve mrlje poklapaju i tada ih je nemoguće razdvojiti, tj. reći da li se posmatraju dva izvora ili samo jedan.

Smatra se da su dve difrakcione mrlje odvojene sve dok njihova daljina ne bude jednaka poluprečniku centralne mrlje. Na osnovu ovoga se izvodi sledeći primer:

primer: ako je $\lambda = 0,55\mu\text{m}$ što odgovara talasnoj dužini na kojoj je oko maksimalno osetljivo, tada je

$$\rho = \frac{1,22 \times 0,55}{D} \text{ radiana} \quad (2.8)$$

$$\rho = \frac{1,22 \times 0,55 \times 206265 \times 10^{-4}}{D[\text{cm}]} = \frac{13",4}{D[\text{cm}]}$$

Znači povećavanjem prečnika objektiva poboljšava se i moć razdvajanja. Medjutim, nije moguće preterano povećavati prečnik objektiva jer bi tehnološki bilo skoro nemoguće proizvesti velike mase savršeno homogenog stakla sa svim karakteristikama optičkog stakla.

Moć razdvajanja oka, čija je srednja vrednost $60''$ pri dovoljnoj količini svetlosti (za slabe izvore svetlosti ide i do $120''$), određuje uvećanje koje zbog toga ima granicu.

Ova granična vrednost zvana korisno uvećanje G_u je:

$$G_u = \frac{60''}{13",4} = 5 \times D [\text{cm}] \quad (2.9)$$

Uvećanje G je praktično jednako odnosu prečnika objektiva i prečnika izlazne zenice tj. slike objektiva koju daje okular, formula 2.2. Samo veliko uvećanje dozvoljava posmatranje lažnog diska difrakcione slike, tj. dostizanja moći razdvajanja objektiva. Ta velika uvećanja izražavaju se približno dvostrukom vrednošću prečnika objektiva izraženog u milimetrima. Kod objektiva od 20cm korisno uvećanje za prosto vizuelno posmatranje iznosi 400 tako da se vidi lažni disk i dostiže se takozvana granica razdvajanja.

2.1.7.3 Žižna daljina. Da bi se ostvarilo zadovoljavajuće uvećanje mora se uzeti sočivo velike žižne daljine. Medjutim, za fotografisanje nebeskih objekata velikog prividnog prečnika i vrlo slabog sjaja planete, (udaljene magline) radije se koriste instrumenti sa velikim prečnikom objektiva i malom žižnom daljinom, da bi se dobilo dovoljno ocrnjenje za relativno kratko vreme.

2.1.7.4 Vidno polje teleskopa. Ugao pod kojim se iz centra objektiva vidi okularni prsten je vidno polje teleskopa. Znači, približno je proporcionalno recipročnoj vrednosti uvećanja. Zbog toga se javlja potreba da se pored teleskopa sa velikim uvećanjem koristi i "tražilac" sa malim uvećanjem, a velikim vidnim poljem.

U praksi uvećanju od 70 odgovara polje otprilike $0^\circ 30'$, tj. približno jednako prividnom prečniku Meseca ili Sunca.

U boljim teleskopima vidi se samo mali deo ovih nebeskih tela. Ako okular ima veliko uvećanje, on ne dozvoljava da se sagleda celo polje vidljivo u žižnoj ravni, tada se, pri nekim astrometrijskim merenjima, mora omogućiti pomeranje okulara u ravni upravnoj na osu durbina.

U instrumentima namenjenim istovremenom fotografisanju spektra velikog broja zvezda ispred fotografskog objektiva koristi se prizma velikih dimenzija. Tako se postižu vidna polja od 5° ili čak 10° sa prečnicima od 40cm i količnikom otvora reda $1/5$.

2.1.7.5 Svetlosna jačina teleskopa. Svetlosna jačina je ustvari koncentracija energije na jedinicu površine žižne ravni, za neki objektiv proporcionalna je otvoru objektiva a obrnuto proporcionalna njegovoj žižnoj daljini. Svetlosna jačina, ili kako se još naziva, relativni otvor instrumenta, izražava se u vidu količnika D/f , gde je D otvor objektiva, a f njegova žižna daljina. Znači svetlosna jačina objektiva je utoliko veća ukoliko je gornji količnik veći i obrnuto.

Za tačkaste izvore, na primer zvezde, takodje važi gornje razmatranje jer je veličina difrakcionog lika zvezde (lažni disk) obrnuto proporcionalna svetlosnoj jačini D/f upotrebljenog instrumenta. Što je ovaj količnik veći to će difracioni lik biti manji,

tj. pri istom otvoru objektiva biće veća koncentracija energije po jedinici površine, a kod takozvanih tačkastih izvora ukoliko mu je žižna daljina manja.

2.1.8 Neki nedostaci kod sočiva

Da bi se lakše shvatili neki nedostaci kod sočiva potrebno je reći nekoliko reči šta bi to treba da bude "idealni optički sistem". Videli smo kako difrakcija svetlosti utiče na oblik lika, tako što se tačkasti izvor svetlosti pojavljuje u žiži optičkog sistema kao kružić određenog prečnika. Ovaj prečnik se (skoro) može svesti na određene dimenzije pravilnim izborom geometrijskih parametara D/f .

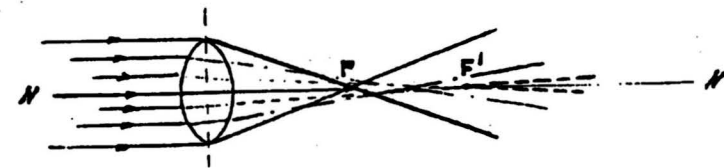
Idealan optički sistem, bez aberacije i zanemarivanja difrakcije, treba jednoznačno da preslikava posmatrani predmet tj. da jednoj tački lika korespondira odgovarajuća tačka predmeta. Ovaj uslov se naziva uslov hemocentričnog snopa i uslov stigmatičnosti. Idealan optički sistem se praktično ne može realizovati jer ravan-ski talas koji dolazi na objektiv transformiše se u sferni talas pa se pojavljuje da lik tačkastog izvora nije tačka i kaže se da objektiv ima optičke aberacije.

Kriterijum koga je dao Rejli utvrđuje da li je neki optički sistem zadovoljavajućih karakteristika ili nije. Na osnovu tog kriterijum, ravan-ski talas posle prolaza kroz optički sistem ne sme da odstupa od sfere više od četvrtine talasne dužine svetlosti. Znači da odstupanje aktivne površine od sfernog oblika treba da je manje od $\lambda/4$ za svaku površinu pojedinačno, kao sistem koji se sastoji od samo jednog sočiva, $\lambda/8$ za površinu ogledala koje samo čini optički sistem, itd. za ostale razne kombinacije.

2.1.8.1 Aberacije sočiva. Nedostatke ili aberacije imaju i vrlo tanka sočiva. Ispoljavaju se na razne načine u zavisnosti od zahtevanog kvaliteta. Aberacije se klasifikuju na više načina: uzdužne i poprečne tj. da li se pojavljuju duž optičke ose ili normalno na nju, zatim se dele na fizičke i geometrijske. Hromatska aberacija pripada fizičkim, dok u geometrijske aberacije

ulaze takozvana osna (sferna) i van-osna. U ovu poslednju se ubrajaju koma, astigmatizam i distorzija. Za sfernu i hromatsku aberaciju se kaže da su to aberacije paraksijalnih zraka, a ostale aberacije nastaju usled kosih zraka.

2.1.8.2 Sferna aberacija. Nedostatke ili aberacije imaju i vrlo tanka sočiva. Ispoljavaju se na razne načine u zavisnosti od zahtevanog kvaliteta. Kod astronomskog durbina je cilj dobiti što oštiji lik tačkastog predmeta. U tom slučaju treba optički sistem korigovati na sfernu aberaciju, koja se izražava u pojavi da zraci prelomljeni na rubovima sočiva seku optičku osu u tačkama bližim sočivu nego što je seku zraci bliži centru (slika 13).



Slika 13:

Ova aberacija je srazmerna trećem stepenu relativnog otvora D/f . Radijus kruga rasejanja kod sočiva sa sfernim površinama je određen sa $C = \frac{206265}{32}(D/f)^3$, gde je C konstanta koja npr. za plan-konveksno sočivo iznosi 1,1. Ovu aberaciju nije moguće otkloniti samo jednim sočivom, jer ona zavisi od indeksa prelamanja stakla, poluprečnika krivine i njegove orijentacije prema upadnoj svetlosti. Aberacija je minimalna za predmete u beskonačnosti u slučaju kada je poluprečnik ulazne površine šest puta manji od izlazne površine. U praksi se sferna aberacija može otkloniti plankonveksnim sočivom ili kombinovanjem bikonveksnog sočiva od krona sa konveks-konkavnim sočivom od flinta (slika 14).

Kod ogledala sferna aberacija se odstranjuje prelaskom na paraboličnu površinu. Reli-jev kriterijum za sferno ogledalo daje odnos D/f i žižnu daljinu f za date prečnike D , za koje je u dovoljnoj meri odstranjena sferna aberacija, npr. za $D[\text{cm}]$, f/D je veće ili jednako 5,6, a žižna daljina f je veća ili jednaka 28, itd. Praktično prihvatljiva vrednost ove aberacije postoji jedino ako je mali količnik između prečnika objektiva i njegove žižne daljine f , koji u praksi (količnik otvora) mora biti reda 1/15 tj. 1/20 da bi se dobili zadovoljavajući rezultati.

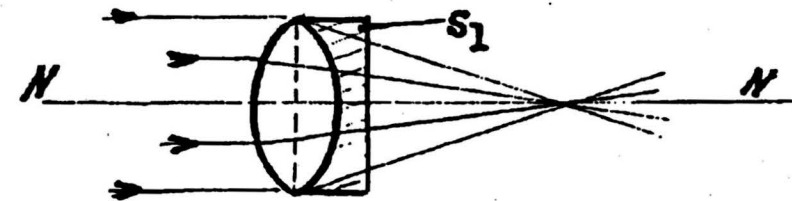
Zbog problema sferne aberacije zahtev za malim količnikom otvora doveo bi za vrlo velike objektivne do ogromnih dimenzija celog teleskopa tako da bi konstrukcije bile nepraktične ili pak nemoguće, jer bi takodje cevi teleskopa bile vrlo dugačke.

U Jerkskoj opservatoriji, u Viljems Bejz u američkoj državi Viskonsin nalazi se refraktor sa najvećim objektivom proizvedenim do danas, prečnika $D = 102\text{cm}$, a žižne daljine $f = 19,30\text{cm}$.

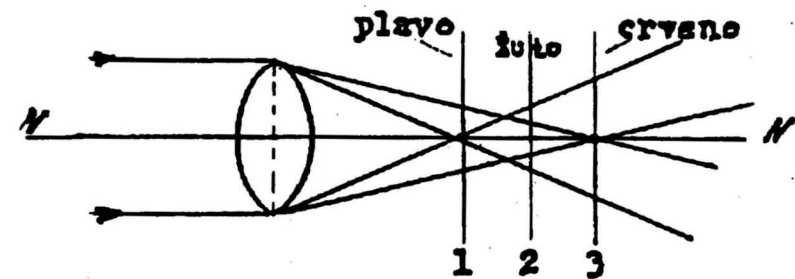
2.1.8.3 Hromatska aberacija. Ova aberacija je fizička greška sočiva i ona je jedna od najneprijatnijih. Pošto se sočivo može tretirati i kao niz prizmi postavljenih jedna iznad druge, to je i uzrok pojave ove aberacije kod sočiva. Jasno je zašto ovu aberaciju nemaju ogledala.

Ako posmatramo konvergentno sočivo koje u svojoj žiži daje lik veoma udaljenog izvora bele svetlosti, tada ono više skrece plave zrake nego crvene, delujući ustvari kao niz prizama malih uglova, slika 15.

Ako stavimo zaklon u položaj 1 dobijamo plavu kružnu pegu oivičenu crvenim oreolom, u položaju 2 pega žute ili zelene boje ima minimalan prečnik, ali je još obojena na rubovima gde slaganje ljubičastog i crvenog daje purpurno i blede ružičasto. U položaju 3 se vidi crvena kružna pega oivičena plavim i ljubičastim oreolom. Rastojanje između žiža 1 i 3 je relativno znatno i zavisi od prirode stakla, kreće se između 1/60 do 1/30 žižne daljine. Indeks prelamanja stakla zavisi od talasne dužine svetlosti i smanjuje se s porastom talasne dužine, zato se žiža sočiva za plavu



Slika 14: Otklanjanje sferne aberacije kombinacijom sa plankonveksnim sočivom S_1



Slika 15: Vidi se najveće skretanje plavih zrakova (tačka 1) i manje skretanje crvenih (tačka 3)

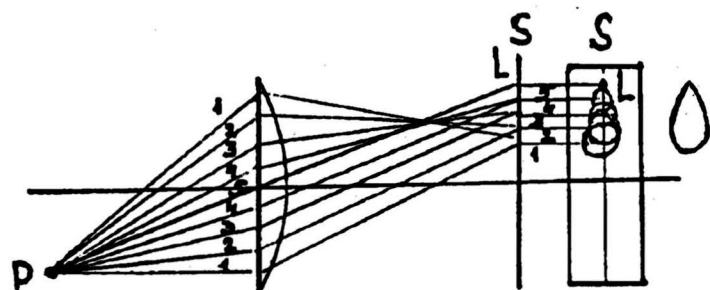
svetlost nalazi bliže sočivu nego za crvenu svetlost.

Ovaj nedostatak se otklanja upotrebom objektiva sastavljenog od dva stakla tzv. ahromatičnih, sabirnog, načinjenog od lakog stakla male disperzije (kronskog) i rasipnog sočiva od teškog stakla veće disperzije (flintskog). Hromatske aberacije su tada suprotnog smera i tako se kompenzuju. Proračuni su vrlo složeni da bi se ostvarila takva konstrukcija u kojoj variraju četiri prečnika krivina i indeksi prelamanja sočiva.

Tačnu kompenzaciju je moguće izvesti samo za dve određene talasne dužine.

Pošto se talasne dužine najpovoljnije za vizuelno posmatranje znatno razlikuju od onih za fotografisanje, neki instrumenti (astrografi) imaju sistem od više različitih cevi sa sočivima različitih karakteristika za ove dve vrste posmatranja. Najčešće se uzimaju $\lambda = 486,1\text{nm}$ i $\lambda = 656,3\text{nm}$ za vizuelno posmatranje, a $\lambda = 404,2\text{nm}$ i $\lambda = 486,1\text{nm}$ za fotografska posmatranja sa običnim pločama.

2.1.8.4 Koma. Ako predmeti leže dalje od ose sočiva onda zraci sa njih padaju koso na sočivo. Tada zraci padaju pod većim uglovima i ne mogu se smatrati paraksijalnim, tako da dva divergentna zraka padaju na sočivo pod različitim uglovima. Udaljavanjem tačke od ose ista se projektuje u "kometu" - komu, kojoj je glava okrenuta osi i omedjana pravima pod uglom od 60° . Na slici 16 je prikazan divergentni snop zraka, koji polazi od svetlog tačkastog predmeta P izvan optičke ose sočiva. Posle prelamanja kroz sočivo, centralni zrak C pravi tačkasti lik L na zaklonu S a koma je prikazana na bočnoj projekciji.



Slika 16:

Poznavajući prečnik objektivu D , konstantu V^2 za dati objektiv kao i ugaono rastojanje lika od optičke ose može se napisati

² V — Zajdelov koeficijent, on je funkcija od poluprečnika sočiva (R) i debljine sočiva. Određuje se merenjem

izraz za dužinu kome $l = VD^2\theta/2$, a za širinu $s = 3VD^2\theta/4$.

Deformacije koje unosi koma je količnik njene dužine i radijusa difrakcionog kruga:

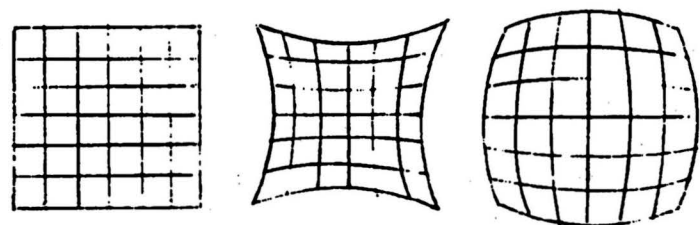
$$k = \frac{3VD^2\theta/4}{1,22 \cdot \lambda \cdot f/D} = \frac{VD^3\theta}{1,62 \cdot \lambda \cdot f} \quad (2.10)$$

Ako je $k = 1$ oko ne uočava ovu deformaciju. Ova deformacija je veoma izražena kod paraboličnog ogledala. Za komu je karakteristično da se može odstraniti kod jednog jedinog sočiva i to čak i tankog sočiva, ali samo za određeni položaj predmeta i lika. Koma se odstranjuje i pomoću dijafragme pogodne veličine stavljene na specijalno mesto na osi sočiva. U optičkoj tehnici postoji specijalni naziv za tačke koje nemaju ni sfernu aberaciju ni komu, to su tzv. aplanatičke tačke. Sočivo sa svojstvima bez sferne aberacije i bez kome naziva se aplanatično sočivo.

2.1.8.5 Astigmatizam. Astigmatizam nastupa pri velikom uglu upadnog zraka i ogleda se u tome da se snop meridijanskih zrakova (u ravni optičke ose i upadnog ugla) koncentriše u obliku izduženog lika u ravni normalnoj na meridijansku ravan, a snop sagitalnih (normalnih na meridijansku ravan) zrakova koncentriše na nekoj većoj daljini u obliku izduženog lika, koji leži u meridijanskoj ravni.

Između ova dva lika nalazi se približno kružni lik tzv. krug najmanjeg rastojanja. Geometrijsko mesto ovih kružnih likova je približno sferna površina i njeno odstupanje od njene tangentne ravni u optičkoj osi naziva se krivina polja vida.

2.1.8.6 Distorzija se sastoji u tome da se linearno uvećanje u ravni lika menja u zavisnosti od ugla upadnog zraka. Time se narušava sličnost između predmeta i njegovog lika. Distorzija je negativna kada se sa porastom ugla uvećanje smanjuje, a pozitivna kada ono raste. Pri negativnoj distorziji pravougaona kvadratna mreža postavljena normalno na optičku osu preslikava se u obliku "buretaste" figure, a pri pozitivnoj distorziji njen lik je "jastučaste" forme slika 17.



Slika 17: Buretaste i jastučaste forme kod distorzije

Distorzija se otklanja podesnim izborom dva sočiva i stavljanjem jednog zaklona između njih, koji propušta centralni snop svetlosti. Distorzija nema velikog značaja kod ogromne većine optičkih sistema izuzev tamo gde se vodi računa o dimenzijama i tačnim merenjima (Astrometrija, geodezija).

2.1.8.7 Končanica je smeštena u žižnu ravan objektiva i ima dvostruku ulogu kod vizuelnih uglovnih merenja. Prvo, doterivanje okulara na končanicu, ovaj rezultat zavisi od posmatračevog vida. Kratkovidni posmatrač mora približiti okular. Drugo, pomeranje celog sistema (okular-končanica) radi dovodjenja ovog u žižnu ravan objektiva. U slučaju nesavršenog obavljanja ove dve operacije pojavljuje se efekat paralakse između slike i končanice. U ovom slučaju nijedno precizno merenje nije moguće izvršiti.

Prisustvo končanice omogućuje materijalizovanje optičke ose durbina. Optička osa durbina je prava koja spaja centar objektiva sa žižom i tu treba da se ukrste vlakna končanice. Končanica najčešće sadrži horizontalno (ili longitudinalno) vlakno i transversalno vlakno koja su oba fiksirana.

Kod tzv. mikrometara postoji jedno ili više transversalnih vlakana koja su pokretna u ravni beskrajno bliskoj onoj koju određuju nepomična vlakna, a njihova pomeranja mere se odgo-

varajućim mikrometarskim uređajima.

Deo sa končanicom je obično pokretan a njegova orijentacija očitava se na pozicionom krugu smeštenom na spoljaštosti durbina. Obično je horizontalni položaj longitudinalnih vlakana ili položaj paralelan nebeskom ekvatoru nula pozicionog kruga. U mnogim durbinama je ravan končanice fiksirana prema objektivu i odgovara fokusiranju durbina na beskonačnost. Ako se merenja vrše noću vlakno ili polje vida je osvetljeno i ako ono nije dovoljno oko gubi oštrinu vida, a ako je suviše jako ne mogu se posmatrati slabe zvezde.

2.1.9 Problem apsorpcije

Optičke talasne dužine koje se koriste u astronomiji nalaze se u vrlo uskom domenu približno od 300 nm do 1000 nm.

Staklo je prozračno samo za zračenja između 360 nm i 3000 nm.

Sloj ozona u visokim delovima atmosfere zaustavlja sva zračenja talasnih dužina manjih od 2900 nm.

Objektivi od kvarcnog stakla se mogu koristiti već od 290 nm, ali je njihova proizvodnja vrlo teška. Kvarcno staklo je samo transparentno za zračenja od 150 nm do 4200 nm, tzv. rock-salt za svetlost između 170 i 18000 nm, i kalcit za opseg od 200 do 3100 nm.

Prema tome stakleni refrakcioni instrumenti za daleki infracrveni deo spektra u Sunčanoj svetlosti do 5300 nm postaju neupotrebljivi.

Između 100 nm i 300 nm osnovni prijemnici nisu više osetljivi, kako oko, tako i fotografska ploča. Pored pomenute ukupne apsorpcije stakla neophodno je uzeti u obzir i takozvanu diferencijalnu apsorpciju koja nije neznatna ako deo svetlosti prolazi kroz deblje staklo, a deo svetlosti kroz tanje. To je još jedan razlog za ograničavanje prečnika objektiva.

2.1.10 Atmosferske smetnje

Pri posmatranju nebeskih objekata momentalno stanje atmosfere igra neobično važnu ulogu, zato je izbor mesta jedan od suštinskih problema za dobra osmatranja. Znači prirodna sredina-Zemljina atmosfera izaziva velike smetnje kod posmatranja i snimanja nebeskih objekata. Smetnje koje stvara atmosfera različitog su porekla i potiču kako od njenog sastava tako i od njenih kinematičkih osobina. Sem kiseonika i azota, atmosfera sadrži velike količine vodene pare i prašine, zatim mnoštvo drugih gasova i aerosola u manjim količinama. Gustina ρ atmosfere je relativno mala, međutim zbog svoje debljine ponašaće se kao mutno staklo stavljeno ispred teleskopa, koje kviri sliku. Ako postoji znatno kretanje u atmosferskom delu posmatranja ono vrši modificiranje difrakcionih prstenova. U zavisnosti od toga da li se slika "talasa" ili "ključa" ove difrakcione modifikacije su više ili manje bitne. U tom slučaju je nekorisno povećanje uvećanja da bi se video lažni disk.

U isto vreme na kapljicama vode, česticama prašine, čadji i leda svetlost se rasejava tako, da se umesto tačkastog lika dobija difuzan lik, na primer zvezde. Znači potrebno je opservatoriju postaviti na što veću nadmorsku visinu, da bi vazdušni sloj bio što manji i po mogućstvu što dalje od naseljenih mesta.

Atmosferski sloj vrši delimično apsorbovanje svetlosti pri prolasku što se odražava u smanjenju osvetljenosti nebeskih objekata. Merenjima je pokazano da skoro sva apsorpcija potiče od vodene pare, vodonika i ozona, a da apsorpcija od kiseonika i azota skoro i ne postoji u vidljivom delu spektra. Slabljenje i rasejanje prouzrokovano apsorpcijom atmosfere može se uzeti u obzir uvođenjem "koeficijenta prozračnosti" atmosfere, koji ima vrednost između 0 i 1. Utvrđeno je empirijskim putem da za oko, vrednost ovog koeficijenta je $\tau_a = 0.835$. Vrednost za talasne dužine od $\lambda = 360\text{nm}$ do 700nm iznosi 0.510 do 0.911. Pošto svi slojevi atmosfere nisu iste gustine i temperature, slabljenje svetlosti pri prolazu kroz atmosferu zavisi od zenitske daljine na kojoj se objekt vidi iznad horizonta.

2.2 Radio teleskopi

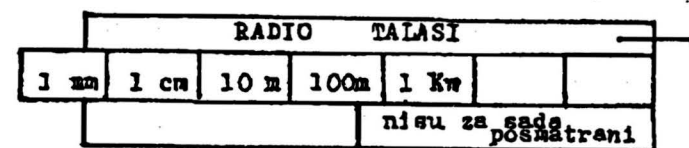
Radio teleskopi su uređaji koji skupljaju zračenja mnogo većih talasnih dužina od onih koje pripadaju optičkom domenu. Ove vrste zračenja pripadaju raznim oblastima vasiona kao: galaktičkim maglinama, nekim zvezdama, Suncu, velikim planetama itd. Godine 1932 inženjer Janski je proučavajući atmosferske smetnje u radio prenosu otkrio periodično vraćanje vrlo slabog ali jasnog signala koji se ponavljao sa određenom periodom iz pravca koji je približno odgovarao sazveždju Strelac u pravcu jezgra naše Galaksije.

Za vreme drugog svetskog rata 1942 godine engleski vojnici na radarskim postrojenjima su ustanovili postojanje jasnog signala iz pravca Sunca. Te godine se Sunce nalazilo u periodu velike aktivnosti.

Od 1932 godine datira rođenje radio astronomije.

2.2.1 Priroda radio talasa

Radio talasi su mnogu većih talasnih dužina i kreću se od centimetarskih do kilometarskih, slika 18.



Slika 18:

Može se reći da je radio šum mešavina svih učestanosti, to jest, talasnih dužina iz radio spektra i da odgovara beloj svetlosti u vidljivom spektru. Da bi se skupilo što više radio talasa upotrebljavaju se radio teleskopi koji odgovaraju optičkim teleskopima kao i dodatni uređaji koji razdvajaju radio učestanosti na one koje se po potrebi dalje obradjuju.

Radio talas određene učestanosti koji stigne u radio teleskop se sastoji od električne komponente, inteziteta $E = E_0 \cos 2\pi ft$, i magnetne komponente inteziteta $H = H_0 \cos 2\pi ft$. Ovde su E_0 i H_0 amplitude, a t je vreme mereno od nekog određenog trenutka. Znači, radio talas se sastoji od električnog i magnetnog polja koja osciliraju f puta u sekundi, pri čemu je magnetno polje upravno na električno polje.

Energija koja se sakuplja u sekundi za određenu učestanost je data izrazom,

$$\frac{c}{8\pi} (E_0^2 + H_0^2)$$

Za elektro magnetni talas koji dolazi sa velike udaljenosti se može pokazati da je $E = H$ i tada je fluks energije dat izrazom,

$$E = \frac{c}{4} E_0^2 \quad (2.11)$$

2.2.2 Antene i radio teleskopi

Ovaj sistem se sastoji od same antene tj. prijemnog elementa koji je skoro redovno polutaladni dipol. To je provodnik dužine polovine talasne dužine zračenja koje se prima. Provodnik je razdvojen na sredini, polovine su spojene prijemnikom specijalnom transmisionom linijom. Primljeno elektromagnetno polje deluje na dipol na kome se javljaju stacionarni talasi i u slučaju rezonance intenzitet je maksimalan. U slučaju ako odnos talasne dužine zračenja i dužine dipola nisu isti finije usaglašavanje vrši se u specijalnom prijemniku.

Drugi deo sistema je konkavna paraboloidna površina od metalne rešetke ili punih metalnih limova. Paraboloidna površina koncentriše primljene talase u svoju žižu, gde se nalazi polutaladni

dipol koji je povezan sa prijemnikom. Da bi se otklonili nedostaci kao, male primljene energije signala i slaba moć razdvajanja, radio teleskopi, to jest, paraboloidi se grade vrlo veliki.

2.2.3 Radio šum. Odnos signal-šum

Problem prijema se komplikuje zbog prisutnosti tako zvanih šumova, koji su trostruke prirode.

- Spoljašnje smetnje od električnih motora, raznih vrsta električnih varničenja, munja, zemaljskih radio signala itd.
- Unutrašnje smetnje u samom prijemniku, a iste zavise uglavnom od temperature ulaznog stepena prijemnika.
- Šumovi od tzv. pozadinskog toplotnog zračenja prouzrokovano toplim vazduhom, površinom zemlje, antene, prenosnih linija i svega onog što može da se izrača u antenu.

Da bi radio teleskop bio koristan on mora da razdvoji korisne informacije koje donosi signal šumova svih vrsta. Može se zaključiti da dobar rad teleskopa zavisi od veličine odnosa signal-šum Z . Veća vrednost veličine Z pokazuje da je radio teleskop efikasniji i da se veća količina informacija može dobiti iz signala.

Ako je korisna snaga dobijena iz antene S , a snaga šumova S_n , tada je odnos signal-šum dat kao $Z = S/S_n$ a pošto ne postoji način da se kontroliše S važno je tada za upotrebljeni teleskop smanjiti što je više moguće nivo šumova S_n . Iz ovog sledi da nivo šumova ograničava osetljivost radi teleskopa.

Kod modernih uređaja korekcionom tehnikom je moguće pod izvesnim uslovima detektovati signale čiji inteziteti su samo mali delovi primljenih šumova.

2.2.4 Ograničenje osetljivosti radio teleskopa

Informacije koje mogu biti izdvojene iz radio signala zavise od karakteristike radio teleskopa u odnosu na signal i one moraju biti podjednako analizirane kako u odnosu na unutrašnje šumove

prijemnika tako i signala, ako želimo da odredimo osetljivost radio teleskopa.

Predpostavimo da uređaj za registrovanje priključen radio teleskopu može da detektuje n jasno izdvojenih strujnih impulsa u prijemniku u vremenu τ i neka je R srednja vrednost ovog očitavanja na registratoru, tada je

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (2.12)$$

gde je R_i očitavanje i -tog strujnog impulsa u registratoru.

Neka je ΔR koren srednje kvadratne devijacije (odstupanja) nekog posebnog očitavanja od srednjeg očitavanja R . Tada se može pokazati da je ΔR proporcionalno R/\sqrt{n} , to jest,

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\alpha}{\sqrt{n}}$$

gde je α broj, saglasno statističkoj teoriji približno ravan 1, a određen je konstrukcijom. Pošto je n broj impulsa koji se dogodi u vremenskom intervalu posmatranja τ , tada postoji relacija $n = \tau \cdot \Delta\nu$, gde je $\Delta\nu$ širina frekventnog opsega šumova, primljena radio teleskopom.

Širina $\Delta\nu$ za datu učestanost ν_0 može biti definisana kao razlika između dve učestanosti sa jedne ili druge strane od ν_0 pri kojoj je izlazna polovina ulaznog signala pri ν_0 . Tada iz prethodne jednačine imamo,

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\alpha}{\sqrt{\tau \cdot \Delta\nu}} \quad (2.13)$$

ovo je osnovna relacija u radio astronomiji koja postavlja praktičnu granicu osetljivosti radio teleskopa.

Ova formula je izvedena za fluktuacije u rekorderu koje su nastale od smetnji iz prijemnika, i ako se primeni na prijemnik koji ne stvara šumove, a ako pak mereni radio signal ima slučajan (random) karakter i sastoji se od niza kratkih impulsa razdvojenih dugačkim vremenskim intervalom, tada ova formula definiše neizvesnost u određivanju srednje vrednosti signala.

Pošto je poželjno da odnos $\Delta R/R$ bude što je moguće manji da bi se izbegle preterane fluktuacije rekordera, mora se povećati

$\Delta\nu$ ili τ ili oboje. U slučaju kod optičkih uređaja gde se radi u talasnom intervalu od 10^{-1} nm, može se pokazati da je širina frekventnog opsega $\Delta\nu$ optičkog signala 10^{11} Hz. Ovo se lako može postići ako se talasni interval $\Delta\lambda$ pomnoži sa c/λ^2 gde je c brzina svetlosti. Sa $\Delta\nu$ tako velikim kao što je ovo, $\Delta R/R$ je vrlo malo, reda veličine 10^{-5} i ako je τ samo 0.1 sec. U slučaju radio teleskopa je situacija sasvim drugačija zbog intervala učestanosti $\Delta\nu$ koji prolazi kroz prijemnik i reda je 10^6 do 10^7 Hz. Ako je sada vremenski interval $\tau = 100$ sekundi vidimo upotrebljavajući jednačinu 2.13 da je $\Delta R/R$ reda 10^{-4} .

Vidi se kako obrazac 2.13 određuje najmanji signal koji može biti detektovan za dati radio teleskop. Postupak je da se antena okrene prema delu neba gde nema zračenja posmatranog objekta. Tada se snima samo šum prijemnika, i fluktuacije su date sa $\alpha \cdot R/\sqrt{\tau \cdot \Delta\nu}$.

Ako se zatim radio teleskop okrene ka posmatranom objektu i primaju se signali čiji je intenzitet jednak ili veći od fluktuacija, tada je jasno da će ovaj signal biti detektovan ako je njegovo trajanje dovoljno dugo. Ako je trajanje signala $N\tau$, fluktuacija smetnje je tada $\alpha R/\sqrt{N\tau \cdot \Delta\nu}$ i ovo može biti mnogo manje od inteziteta slučajnog signala ako je N dovoljno veliko.

2.2.5 Unutrašnji šumovi. Osetljivost radio teleskopa

Unutrašnji šumovi dolaze iz dva izvora:

- temperature same antene i
- usled kretanja elektrona u raznim otporima u prijemniku prouzrokovanog varijacijama temperature.

Neka je P_0 snaga smetnji koja je generisana u samoj anteni, kada signali dolaze u nju. Saglasno teoriji ova snaga u funkciji temperature antene T je data sa

$$P_0 = kT \cdot \Delta\nu \quad (2.14)$$

gde je k Bolcmanova konstanta a $\Delta\nu$ je opseg učestanosti koji prolazi kroz prijemnik. Treba uočiti da su važni samo oni šumovi

koji leže u opsegu učestanosti na koje je prijemnik podešen. Neka je sada P_i snaga generisana isključivo u samom prijemniku bez antene. Ukupne smetnje koje dolaze u prijemnik su $P_i + P_0$. Medjutim, smetnje koje registrator primi su veće zbog pojačanja koje se dešava u prijemniku. Ako je faktor pojačanja g tada rekorder prima snagu koja je data sa $g(P_i + P_0)$ u kome se ne nalazi spoljni signal. Očitavanje ili skretanje R rekordera, bez slučajnog signala je tada proporcionalno gornjoj količini.

S druge strane, snaga dolazećih signala u antenu je P , tada skretanje S rekordera raste i proporcionalno je gP . Sada se može napisati

$$\frac{S}{R} = \frac{gP}{g(P_i + P_0)} = \frac{P}{(P_i + P_0)} \quad (2.15)$$

Pošto S mora biti veće ili jednako R za koristan signal da bi se mogao lako detektovati bez dugog vremenskog intervala ili specijalne tehnike, mora da se ostvari nejednakost

$$\frac{RP}{(P_0 + P_i)} \geq R$$

Iz jednačine 2.13 je $\Delta R = \alpha R / \sqrt{\tau \cdot \Delta \nu}$ odakle je

$$\frac{P}{(P_0 + P_i)} \geq \frac{\alpha}{\sqrt{\tau \cdot \Delta \nu}} \quad \text{ili} \quad P \geq \frac{\alpha(P_0 + P_i)}{\sqrt{\tau \cdot \Delta \nu}} \quad (2.16)$$

Ovo nam daje minimum snage u korisnom signalu širine $\Delta \nu$ koji lako može biti detektovan radio teleskopom koji je podešen na ovaj koristan signal.

2.2.6 Faktor šuma radio teleskopa

Zgodno je uprostiti izraz 2.16 uvodjenjem veličine N koja se naziva faktor šuma radio teleskopa. Definisani je kao odnos signal-šum na ulazu prijemnika podeljen odnosom signal-šum na izlazu prijemnika. Na ulazu prijemnika je samo šum antene P_0 , i koristan signal P , a na izlazu prijemnika šum $g(P_0 + P_i)$ tada je

$$N = \frac{P/P_0}{P/(P_0 + P_i)} = \frac{P_0 + P_i}{P_0} = \left(1 + \frac{P_i}{P_0}\right) \quad (2.17)$$

Ako se ovo reši po P_i dobijamo $P_i = (N-1)P_0 = (N-1)kT \cdot \Delta \nu$ gde je uvedena temperatura T antene iz jednačine 2.14.

Iz gornje jednačine $P_0 + P_i = NP_0 = NkT \cdot \Delta \nu$, dobijamo substitucijom

$$P \geq \alpha \frac{Nkt \cdot \Delta \nu}{\sqrt{\tau \cdot \Delta \nu}}$$

Ako stavimo da je $P = P_\nu \cdot \Delta \nu$, gde je P_ν snaga po učestanosti širine opsega a pri učestanosti ν , dobija se

$$P_\nu \geq \alpha \frac{NkT}{\sqrt{\tau \cdot \Delta \nu}} \quad (2.18)$$

Vidi se da faktor šuma određuje koliko slab signal može biti detektovan. Desna strana jednačine predstavlja najslabiji signal koji se može detektovati.

2.2.7 Registrovanje toplotnih radio izvora

Pogodno je u radio astronomiji sjaj izvora izraziti ekvivalentnom temperaturom, koja igra istu ulogu kao efektivna temperatura u ponašanju zvezda. Mada je efektivna temperatura u optičkoj astronomiji uvedena razmatrajući zračenje crnog tela, to je koristan parametar za opisivanje zvezde bez obzira što zvezda ne zrači sasvim kao crno telo. Ustvari, efektivna temperatura je prosto jedan numerički način predstavljanja totalne energije, sabrane u opsegu svih učestanosti izračenih sa zvezde.

Na isti način može se uvesti temperatura T_r u radio talasnom području, da bi se opisao radio-sjaj izvora. Pri tome se mora biti vrlo pažljiv da bi se razdvojilo radio zračenje emitovano toplotnim mehanizmom od emisije netoptnog izvora.

Ako je prmljena energija emitovana kao rezultat toplotnih kretanja atoma i molekula u izvoru, čija je temperatura T , izvor se ponaša kao crno telo, a temperatura te radio energije je izmerena temperatura izvora. Tada se može primeniti zakon zračenja crnog tela za radio energiju da bi se dobila temperatura izvora. Takodje se može odrediti vrsta efektivne temperature te radio energije da bi se definisao intezitet.

Za toplotna zračenja, izmerena temperatura je mera zagrejanosti materije radio izvora, dok kod netermalnog izvora to nije slučaj. Sad ćemo videti kako može biti određena temperatura izvora primljena antenom. Neka izvor emituje u opsegu radio spektra po zakonu Planka za crno telo. Pošto su talasne dužine u radio spektru relativno velike, Plankova formula za intenzitet

$$I_{\lambda T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1}$$

se u radio frekventnom opsegu može uprostiti na oblik

$$I_{\lambda} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2.19)$$

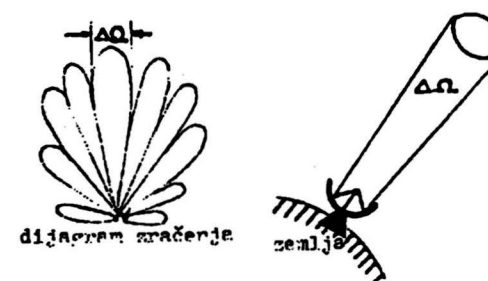
gde se sada T posmatra kao temperatura sjaja izvora.

Sada se može dobiti temperatura radio izvora od radio talasa koji dolaze na antenu radio teleskopa. Neka je posmatrana antena centar sfere i neka unutrašnja površina sfere predstavlja crno telo temperature T koja zrači radio talase ka anteni u saglasnosti sa zakonom zračenja crnog tela, tada će i temperatura antene takodje biti T . Ovo je zbog termodinamičkog zakona da antena i unutrašnja površina sfere moraju biti u ravnoteži. Sada se može naći temperatura površine sfere računajući da apsorbovana snaga od strane antene u frekventnom opsegu je $\Delta\nu$ je $P = kT_{\alpha}\Delta\nu$. Temperatura T_{α} se može okarakterisati kao antenska temperatura.

Medjutim, ovo nije idealno stanje, to jest antenska temperatura T_{α} nije jednaka intenzitetu temperature izvora kako je gore definisano. Da bi se ostvarila ova zavisnost potrebno je zapaziti da dolazeći talasi nisu bezuslovno istog intenziteta tako da intenzitet temperature T_{α} , zavisi od pravca iz koga se izvor vidi. Drugim rečima, intenzitet I_{ν} je zavisian od pravca izvora i geometrije antene.

Ako uzmemo mali prostorni ugao $\Delta\Omega$ posmatran od antene prema izvoru, slika 19, i ako uvedemo A kao efektivnu površinu naše antene, za uzeti prostorni ugao, tada je apsorbovana snaga od strane antene za dati pravac

$$P = \frac{1}{2} A I_{\nu} \Delta\Omega \Delta\nu \quad (2.20)$$



Slika 19: dijagram zračenja

faktor $\frac{1}{2}$ pokazuje da je samo polovina radio energije apsorbovana to jest samo paralelan vektor električnog polja je kompletno apsorbovan dok normalna komponenta nije. Ovo se naziva polarizacioni efekat i kombinacijom jednačine $P = kT_{\alpha} \cdot \Delta\nu$ i jednačine 2.20 dobija se da je antenska temperatura

$$T_{\alpha} = \frac{A I_{\nu} \Delta\Omega}{2k} \quad (2.21)$$

Ako u ovu jednačinu unesemo smenu I_{ν} iz jednačine 2.19 u kojoj se nalazi temperatura izvora dobija se

$$T_{\alpha} = \frac{A \cdot \Delta\Omega \cdot T}{\lambda^2} \quad (2.22)$$

Ovo povezuje temperaturu antena sa temperaturom sjaja izvora pod uslovom da je prostorni ugao $\Delta\Omega$ vrlo mali.

2.2.8 Temperatura antene i osetljivost radio teleskopa

Kao što je izrazom 2.18 data osetljivost radio teleskopa gde se uzima minimalna snaga koja može biti detektovana, analogno možemo govoriti o temperaturnoj osetljivosti radio teleskopa razmatrajući koje su najmanje temperaturne promene koje mogu biti detektovane od strane prijemnika. Uzimajući u

obzir jednačinu $P_\nu = kT_a\Delta\nu$ dobija se da je najmanja promena temperature koja može da se detektuje

$$\Delta T_a \geq \alpha \frac{NT}{\sqrt{\tau\Delta\nu}} \quad (2.23)$$

gde je T na desnoj strani jednačine stvarna temperatura antene i obično je oko $300^\circ K$ a α je reda 1. Pošto je faktor šuma N reda od 3 do 10 za dobar radio teleskop, najmanja promena koja se može detektovati je reda od $0.06^\circ K$ za radio signale čiji je frekventni opseg jednak 10^6 Hz i za vremensku konstantu τ od 100 sec.

Kao primer za primenu gornjeg obrasca uzećemo istorijski slučaj kada je Reber koji je bio pionir na ovom polju, upotrebio antenu-paraboloid (75 m) u prečniku i detektovao radio učestanost oko 160 MHz, to jest $\lambda = 1.80$ metara. Najveći intenzitet koji je on ostvario bio je $1.510^{-17} \text{ ergs/cm}^2$ u sekundi u pravcu galaktičkog centra. Iz Riley-Djinsove formule 2.19 može se videti da ovo odgovara temperaturi od odprilike $1200^\circ K$.

Minimum intenziteta koji je Reber mogao da detektuje bio je približno 21 put manji od ovog, tako da je temperaturna osetljivost ΔT_a njegove antene bila oko $60^\circ K$.

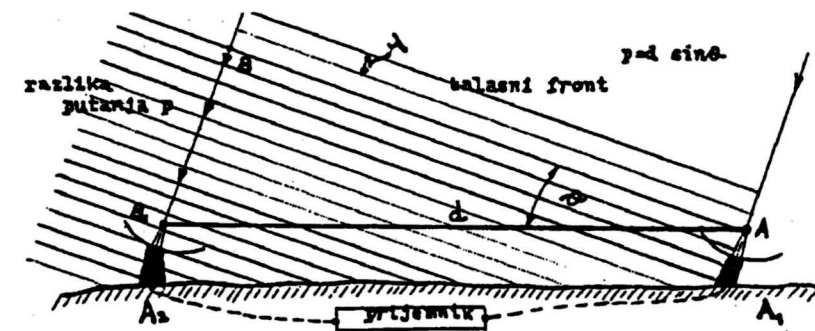
2.2.9 Interferometri

U dosadašnjim razmatranjima o radio teleskopima govorilo se samo o jednom paraboloidnom reflektoru. Medjutim, veća količina informacija se može dobiti sa radio izvora upotrebom sistema sa više antena. Potrebno je antene u tom sistemu tako rasporediti da se efekat interferencije može ostvariti. Takodje se moć razdvajanja poboljšava povezivanjem dva radio teleskopa koji moraju biti postavljeni na velikoj daljini jedan od drugog. Njihovo postavljanje je skoro uvek u pravcu istok-zapad, pri tome treba znati da je posmatranje dinamičko a ne statičko. Antene treba da su pokretne u smeru sever-jug jer se radio izvori kreću od istoka prema zapadu, ovako se mogu pratiti ma koji izvori pri prolasku kroz meridijan.

Primljena energija zavisi od zbira površina, dvaju teleskopa.

Povećavanjem broja teleskopa povećava se površina, a time i primljena energija.

Na slici 20 je dato na koji način se ostvaruje interferencija izmedju različitih delova talasnog fronta istog radio talasa. Dve antene primaju radio signal iz željenog pravca, pri tome su obe antene spojene kablovima do centralnog prijemnika, tako, da kad signali dpospeju u prijemnik oni su fazno pomereni. Ova razlika u fazi zavisi od rastojanja izmedju dva prijemna dipola, d , i ugla θ izmedju talasnog fronta upadnih radio talasa i horizontalne linije koja spaja dva centra dipola.



Slika 20:

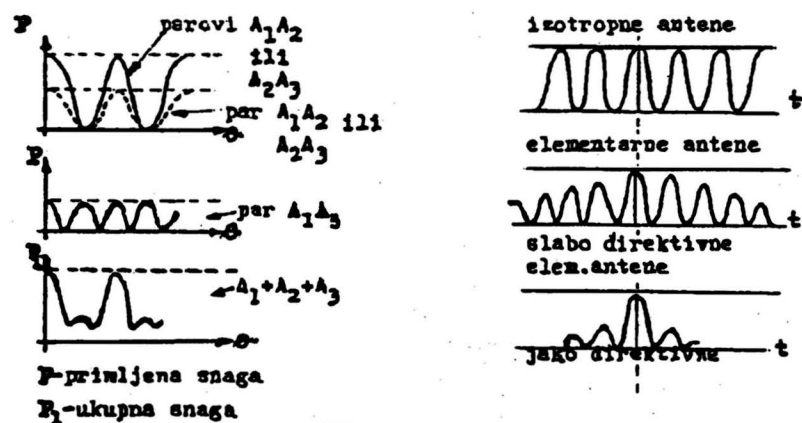
Da bi se dobila fazna razlika izmedju delova A i B_1 na mestima gde talasni front ulazi u antenu A_1 i A_2 , moramo izračunati razliku putanja izmedju B i B_1 . Sa slike se vidi da je $\overline{BB_1} = d \sin \theta$. Ako je λ dužina talasa, tada je broj talasnih dužina sadržan u razlici putanje upravo $d \sin \theta / \lambda$. Prema definiciji je tada fazna razlika 2π puta ova veličina, to jest, $2\pi \sin \theta / \lambda$.

Razmotrimo sada efekat interferencije koji se javlja iz ovako spregnutih antena. Ako je razlika faza izmedju B i B_1 upravo jedna polovina talasne dužine ili neki neparan multipl talasne dužine, tada dva talasa poništavaju jedan drugog. S druge strane, ako je putanja cela talasna dužina ili multipl celih talasnih dužina, tada se dva talasa pojačavaju i postižu maksimum. Tako, ako se izvor radio talasa kreće preko neba i dolazeći radio talasi padaju

na dve antene pod uglom, tada se pravilno smenjuju promene minimuma i maksimuma. Može se naći pravo kretanje izvora ako su antene tako postavljene da srednja tačka između njih leži na nebeskom meridijanu. Časovni ugao i deklinacija su tada dati u trenutku kada centralni signal postigne maksimum.

Ako dva izdvojena signala šalju radio talase, i svaki od njih ima svoju sopstvenu interferentnu putanju, na prijemniku će se pojaviti zajednički signal koji će biti prilično komplikovan. Analizom ovog signala može se naći ugao između ova dva izvora radio signala.

Da uzmemo još i primer sa tri antene u nizu, A_1 , A_2 i A_3 , i neka su izotropne, sa slike 21 se može videti da, svaki od parova A_1A_2 ili A_2A_3 daje sinusoidu (crtkasta linija), dva para zajedno daju sinusoidu (puna linija) iste periode i dvostruke amplitude.



Slika 21:

Par koji sačinjavaju dve krajnje antene A_1 i A_3 daju sinusoidu iste amplitude kao i bilo koji od parova A_1A_2 ili A_2A_3 , međutim perioda je dva puta manja. Rezultanta sva četiri beleženja daje jasno diferencirani signal, koji bi bio još više izražen ako bi antene bile jako direktivne, a ne izotropne, što je slučaj kod paraboloida, jer je velika osa usmerena ka izvoru.

U praktičnom izvodjenju različiti teleskopi ili grupa teleskopa moraju biti povezani sa prijemnikom apsolutno identičnim vodovima. Ako, se u, jednu od nekih linija stavi kabl dužine $\lambda/2$,

tada se dijagram interferencionih linija pomera za polovinu linije, u tom slučaju maksimumi zamenjuju nule i obrnuto. Ako se transformacija pravilno ponavlja f -puta u sekundi tada će se ceo dijagram pomeriti u prostoru i konačno daje signal učestanosti f , koja se može učiniti vrlo različitom od parazitnih šumova koji se žele eliminisati.

2.2.10 Veliki nepokretni radio teleskopi

U Nansiju u Francuskoj je 1965 godine podignut nepokretni veliki radio teleskop sa namenom da se posmatraju linije od 21 cm to jest, da bi se odredjivao položaj vodoničnih maglina u našoj Galaksiji a istovremeno i pokušaj otkrivanja ovakvih maglina u ostalim galaksijama koje su udaljene i više miliona svetlosnih godina.

Pomenuti radio teleskop se sastoji od jednog nepokretnog elementa, u stvari, sfernog ogledala okrenutog severu. Radius krivine je 580 metara, širina je 300 metara a visina 35 metara. Na rastojanju od 460 metara ispred ovog ogledala nalazi se ravno ogledalo napravljeno od mreže dužine 10×20 metara, visine 40 metara. Deset panoa od po 20 metara se mogu kretati oko horizontalne ose. Ovakvom pokretljivošću se postiže da se talasi iz prostora mogu uputiti na sferno ogledalo. Slika se stvara u žižnoj ravni na 290 metara od sfernog ogledala.

Vidno polje je 15° u horizontalnom smeru a sferna aberacija je prilično velika. Zbog ovakvog vidnog polja može se posmatrati isti izvor tokom jednog časa, a praćenje se ostvaruje kretanjem antene u žižnoj ravni po jednoj zakrivljenoj pruzi dužine 60 metara. Pomeranje je sinhronizovano sa pomeranjem slike izvora u polju. Problem difrakcione mrlje koja je u ovom slučaju veličine 4 metara je rešen stavljanjem jednog dodatnog ogledala u antenu, istih dimenzija, koje koncentriše zračenje u neku vrstu levka tačno na dipol antene.

U opservatoriji Aresibo u Portoriku u blizini ekvatora konstruisan je takodje veliki nepokretni radio teleskop, prečnika 300 metara. Polje instrumenta je 20° , a ostvareno je pomeranjem

antene i žižne ravni ogledala. Isti je namenjen za posmatranje planeta i nebeskih tela malih deklinacija.

2.2.11 Osnovni prijemni sistemi — prijemnici u radio-opsegu

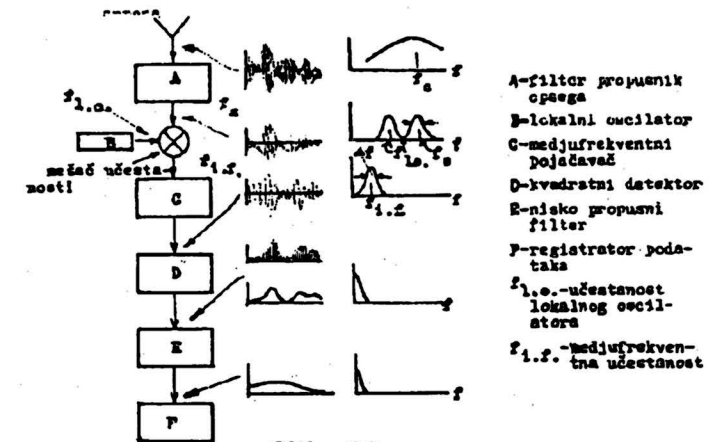
Zbog veoma velike važnosti prijemnika u sklopu sistema radio teleskopa potrebno je posvetiti izvestan prostor toj problematici a naročito obzirom na današnje stanje te tehnologije i mogućnosti koje ona pruža.

Unutar prijemnika signal prolazi kroz razne brojne procese kao, filtriranje, pojačanje, promenu učestanosti (mešanje učestanosti ili heterodin princip), detekcija i integracija. Komponente ili elementi koji izvršavaju ove operacije u opštem slučaju nisu idealni. Unose šumove, nemaju linearne karakteristike ili pokazuju nestabilnost. Jedan od bitnih problema je pojačanje izuzetno slabih signala, a da se pri tome ne pojačaju šumovi. Da bi se mogla praviti uporedjenja raznih vrsta prijemnika i njihovih važnijih karakteristika potrebno je definisati šta je to "idealni prijemnik". Pod tim nazivom se najčešće opisuje sistem i njegove funkcije matematičkim terminima. Tada je moguće uporediti praktične sisteme sa ovim idealnim i odrediti relativne vrednosti različitih tipova.

Idealan sistem treba da ima sledeće karakteristike: filtere sa pravougaonim propusnim opsezima, beskonačno pojačanje i stabilnost propusnog opsega, perfektnu detekciju i vernu integraciju i izlaz. Slika 22 pokazuje prijemnik superheterodinog tipa kao blok šemu sa signalima za svaki stepen prijemnika.

U ovom sistemu širina frekventnog opsega Δf je deo korisnog signala f_s . Ovaj signal se zatim meša sa izlazom lokalnog oscilatora $f_{l.o.}$. Posle ovoga, učestanost se pretvara u tako zvanu medju-učestanost $f_{i.f.}$ i reda je veličine 10 ili 30 MHz.

Medjufrekventni signal koji poseduje istu informaciju spektra i intenzitet kao originalni opseg radio-učestanosti se pojačava. Kod većine prijemnika glavni deo pojačanja se odvija kod medjufrekventne učestanosti. Posle toga signal prolazi kroz stepen



Slika 22:

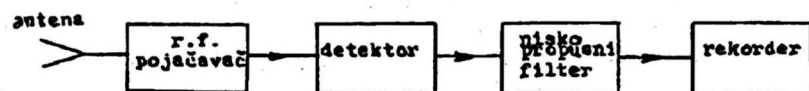
detektora koji kao izlaz daje anvelopu medjufrekventnog talasnog oblika. Izlaz iz detektora je proporcionalan kvadratu amplitude dovedenog napona to jest, izlaz iz detektora je proporcionalan snazi na ulazu prijemnika. Najzad, izlaz detektora prolazi kroz nisko propusni filter da bi se otklonila komponenta visokih učestanosti. Ovaj izlazni signal zatim odlazi na recorder podataka.

2.2.11.1 Praktično izvodjenje prijemnika. U prijemnim sistemima pojavljuju se izrazi "okrenut prema prednjem kraju" (*front end*) ili "okrenut prema zadnjem kraju" (*back end*). Uglavnom, (*front end*) su uređaji koji su montirani u kutiji prijemnika kod same žiže teleskopske strukture. Ovde su obično smeštene komponente ulaznog kola radio učestanosti i predpojačavači sa filterima, mešač učestanosti, medjufrekventni pojačivač, stepen za napajanje i kontrolni uređaji. (*Back end*) su grupe uređaja koji se nalaze u prostoru udaljenom od žiže teleskopa, na primer, u temelju teleskopa i to su uglavnom, detektor, sinhroni demodulator, integrator i recorder podataka. Treba napomenuti da oba izraza nisu oštro definisana, na primer lokalni oscilator može da se nalazi ma u kom delu.

2.2.11.2 Superheterodinski prijemnik. Ovaj princip je dat na prethodnoj slici. Ulazni signal - sa ili bez pojačanja ra-

dio učestanosti, rf , - je pomešan sa signalom iz lokalnog oscilatora. Rezultujući medjufrekventni $i.f.$ signal se dalje pojačava zatim se vrši detekcija, da bi posle pogodne integracije bio odveden na displej ili rekorder. Propusni opseg prijmnika je u glavnom određen propusnim opsegom medjufrekventnog stepena ili filterom propusnika opsega, koji je ili pre ili posle medjufrekventnog pojačavača. Superheteroidni prijmnici mogu biti sa jednim ili dva bočna opsega. Uglavnom se upotrebljavaju sa jednim bočnim opsegom, jer daje veće mogućnosti u izboru medjufrekventnih učestanosti, omogućava upotrebu sistema za merenje spektralnih linija, i omogućava najjednostavniji postupak kalibracije.

2.2.11.3 Prijemnik sa direktnim pojačanjem. Ovaj tip prijmnika nalazi se često u upotrebi. Njegov princip dat je blok šemom na slici 23.



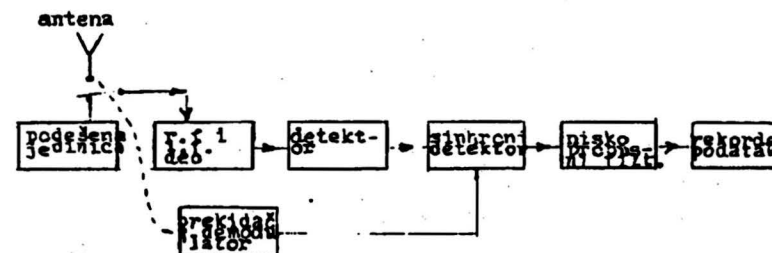
Slika 23:

U ovom sistemu je radi signal pojačan direktno do nivoa kada može biti detektovan. Ovakav prijemnik obično ima širok propusni opseg da bi postigao željenu osetljivost, a upotrebljava se u opsegu gigaherca. Upotrebljeni su pojačavači sa tako zvanim tunel diodama. Posle detekcije signal se filtrira i vodi na rekorder.

2.2.11.4 Modulisani prijmnici. Najčešće upotrebljeni prijmnici u radio astronomiji su oni kod kojih je stabilizacija

pojačanja izvršena tehnikom modulacije. Ovi prijmnici se zasnivaju na činjenici da intenzitet pojačanih fluktuacija se brzo smanjuje sa učestanošću približno do nule iznad učestanosti od 1 KHz. Ako pojačanje može da se prati kao neki odnos dela pri najvišim učestanostima kod nestabilnosti pojačanja, tada korekcije većeg dela nestabilnosti pojačanja mogu automatski da se kontrolišu.

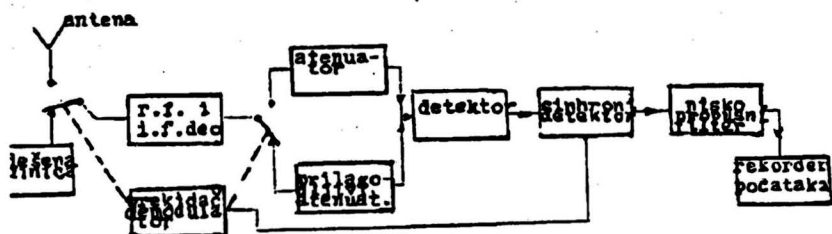
2.2.11.5 Sistem prijmnika "Dike". Ova tehnika prijmnika se vrlo mnogo upotrebljava, slika 24.



Slika 24:

Ulaz prijmnika se prekida mnogo puta u sekundi izmedju signala koji se meri i nekog konstantnog referentnog izvora. Posle postupka konverzije, pojačanja i detekcije, modulisani signal prolazi kroz sinhroni detektor koji daje izlazni napon proporcionalan razlici u snazi (ili temperaturi) izmedju referentnog i ulaznog signala. Ako je ova razlika mala, na primer, nekoliko procenata od temperature sistema, efekat promene pojačanja na izlazu će biti odgovarajuće smanjen. Potrebno je reći, da ako se ulaz prekida po zakonu četvrtaste funkcije da je tada korekcija najbolja. Takodje se pokazalo da i demodulacija mora biti kvadratna i da propusni opseg izmedju detektora i sinhronog demodulatora mora biti dovoljno širok da omogući prolaz najviših harmonika prekidačke učestanosti koja sadrži informaciju modulisanog signala.

2.2.11.6 Prijemnik sa modulisanim pojačanjem. Kod "Dike" sistema nepromenljivost u pojačanju zavisi od toga kako je sistem balansirani to jest, da li je temperatura signala i referentnog izvora približno ista. Ovo je u praksi često vrlo teško ostvariti, naročito pri učestanostima iznad 1GHz gde antenska temperatura može biti 20 K, a referentna temperatura 80 K. U takvoj situaciji može biti upotrebljen prijemnik sa modulisanim pojačanjem, slika 25.

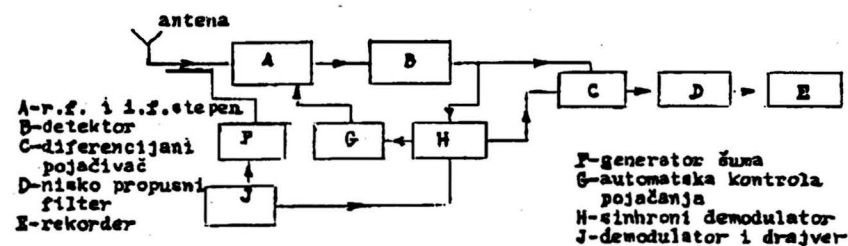


Slika 25:

U ovom sistemu jedan prilagodljiv pasivni atenuator (oslabljivač) se prekida u fazi sa ulazom što omogućava da se dobije ista snaga primljena iz signala i referentnog dela prekidačkog ciklusa. Ovaj metod može biti upotrebljen sa modulacijom pojačanja pre ili posle mešača u superheterodinom sistemu.

2.2.11.7 Prijemnik na principu dodavanja šumova. Ovaj prijemnik u originalu nazvan "NOISE-ADDING RECEIVER (NAR)", je specijalan tip modulisanih prijemnika u kome je tačno određen iznos šumova periodično dodat (50% u radnom ciklusu) ulazu prijemnika. Sinhrono detektovani izlaz tada sadrži informaciju potrebnu da se koriguje fluktuacija pojačanja prijemnika, slika 26.

Sistem NAR je posebno privlačan za nisko-šumne sisteme (< 20K). Verzija ovog tipa veoma nisko šumnog prijemnika je razvi-



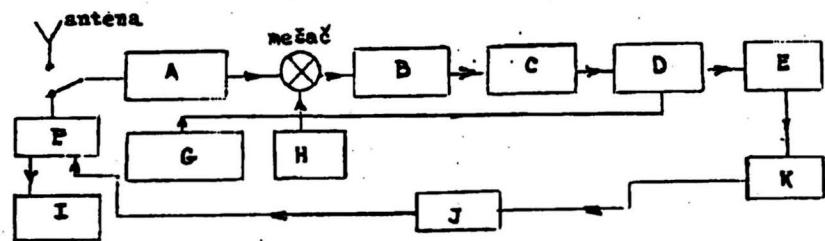
Slika 26:

jena za upotrebu pri NASA za projekat u ispitivanju "DUBOKIH PROSTORA SVEMIRA". U ovom sistemu prijemnika važna je amplituda dodatih šumova kao i stabilnost izvora šumova. Nestabilnost u izvoru šumova prouzrokuje efekat nestabilnosti to jest varijaciju pojačanja.

2.2.11.8 Servo kontrolisani prijemnici. Kod ovih prijemnika šumovi od strane izvora i referentnog izvora su celo vreme izbalansirani i jednaki. Neprekidni šumovi izvora se unose u referentni deo prekidačkog kola. Nivo ovih signala je kontrolisan servo sistemom. U ovom slučaju prijemnik se nalazi u petlji servo sistema. Izlazni signal ovog sistema je vrednost nivoa smetnji kojima se želi balansirati sistem. Do nedavno sistem se upotrebljavao za opseg decimetarskih i metarskih talasnih područja uz PIN diodnih atenuatora i upotrebom izvora smetnji od poluprovodničkih elemenata; sistem se može upotrebiti i u mikrotalasnom području. Na slici 27 je blok šema prijemnika.

2.2.12 Prijemnici za specijalne svrhe

Do sada opisani prijemnici se u glavnom upotrebljavaju u problemima gde se zahtevaju kontinualna merenja. Postoji veliki broj specijalnih tehnika da bi se ovakvi sistemi osposobili



Slika 27: A – r.f. pojačavač; B – i.f. pojačavač; C – detektor; D – sinhroni demodulator; E – nisko propusni filter; F – generator šuma; G – prekidačko kolo i demodulator sa drajverom; H – lokalni oscilator; I – rekorder; J – kontrolna jedinica; K – servo pojačavač

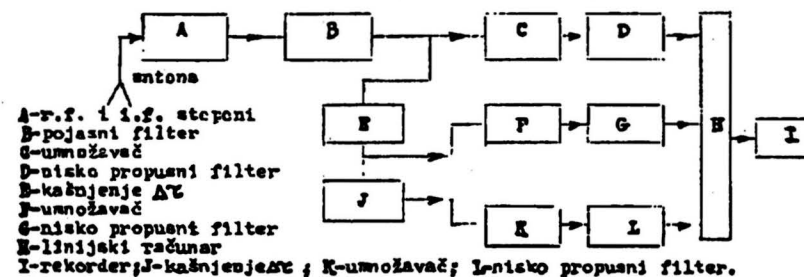
za upotrebu u specijalne svrhe kao spektralna posmatranja. Ovi prijemnici se upotrebljavaju u merenjima sunčevih radio emisija, emisija pulsara, radio spektralnih linija i vrlo daleko razdvojenih interferometarskih sistema.

2.2.12.1 Prijemnici spektralnih linija. U ovoj vrsti prijemnika se pojedini stepeni razlikuju od onih za kontinualna merenja. U delu radio učestanosti to jest ulaznom stepenu glavne razlike su: sistem mora biti sa jednim bočnim opsegom što isključuje upotrebu degenerativnih parametarskih pojačavača, lokalni oscilator služi kao prekidač učestanosti a ne snage. U medjufrekventnom delu prijemnik mora da ima zadovoljavajuće razdvajanje učestanosti to jest selektivnost da bi se mogao tačno meriti profil posmatranih spektralnih linija. Postoje tri metode kojima se postiže odgovarajuća rezolucija.

2.2.12.2 Višekanalni spektrometri. Najdirektniji metod za ostvarenje visoke frekventne rezolucije preko širokog opsega je upotreba višekanalnih prijemnika. U ovakvim sistemima medjufrekventni opseg je podeljen u veći broj odvojenih uskih kanala sa tipičnim vrednostima širine kanala 1, 10, ili 100 KHz.

2.2.12.3 Jednokanalni podešavajući spektrometri. Druga mogućnost pristupa izvodjenja spektrometra je podešavanje jednog uskopojasnog kanala učestanosti koja se meri. Takav sistem se koristi za posmatranje linijskog spektra atoma vodonika iz spoljnih galaksija. Ovde se pojavljuje problem kalibracije pojačanja i širine opsega kod raznih učestanosti.

2.2.12.4 Autokorelacioni spektrometri. Drugi pristup ovoj tehnici je upotreba autokorelacione tehnike. Zbog prisustva informacija o spektru primljenog signala u autokorelacionoj funkciji postoji mogućnost izvršenja autokorelacije širokog opsega signala kod medjufrekventne učestanosti i ostvarenja Furijeve transformacije na autokorelacionu funkciju da bi se dobi spektar. Osnovna blok šema sistema je data na slici 28.



Slika 28:

Autokorelaciona funkcija se može ostvariti ili analognom ili digitalnom tehnikom. Digitalno izvodjenje je bolje zbog stabilnosti. Semplovanje velikog broja bitova (puna amplituda) ovakvog sistema je bila ograničena velikim vremenom da se ostvari potrebno umnožavanje. Da bi se izbeglo preterano vreme procesa a da bi se postigao široki opseg (zahteva se visoka vrednost semplovanja) razradjena je tehnika takozvanog jednog-bitna koja se široko primenjuje. Osetljivost takvog spektrometra je samo 64% u uporedjenju sa mnogo-bitnim korelacionim sistemom.

Razvojem brzih digitalnih logičkih jedinica predložen je dvo-bitni korelacioni sistem. Pokazalo se da takav sistem ima isto stabilno pojačanje kao jedno-bitni sistem dok mu se osetljivost povećala na 88% u odnosu na više bitni sistem.

2.2.12.5 Polarizacioni prijemnici. Mnoga zračenja koja se ispituju u radio astronomiji su vrlo često polarizovana. Za takva posmatranja se želi odrediti stanje polarizacije primljenog zračenja. Osnovna metoda za posmatranje polarizovane emisije je okretanje linearno polarizovane antene oko pravca posmatranja. Tada će se pojaviti linearna polarizacija kao sinusoida na izlazu prijemnika. Poboljšanje ove tehnike je izvedeno sa dve antene: dva dipola upravna jedan na drugi, a ulaz u prijemnik je napajan prekidnim signalom između ove dve antene. Primenjena metoda ima nedostatak u usaglašavanju antena kao i rotacije koje prouzrokuju promene u pojačanju a na izlazu prijemnika se pojavljuju kao lažna polarizacija.

2.2.13 Opšti uslovi pri radu prijemnika

Nestabilni sistemi nisu pogodni za primenu u astronomiji. Da bi se sistemi stabilizovali mora se voditi računa o sledećem:

- prijemnik mora biti na konstantnoj temperaturi okoline sa promenom manjom od 1 K.
- osigurati dobro sve mehaničke spojeve upotrebljenih komponenti kao i sve spojeve u sistemu.
- regulacija napona napajanja mora biti izvanredno dobra.
- potrebno je održati konstantan nivo snage lokalnog oscilatora, ili konstantan prednapon u slučaju kod upotrebe tunnel diode i parametarских pojačavača.

2.2.14 Važni momenti u konstruisanju radiometarskih sistema

Da bi se postigao maksimum osetljivosti nekog radiometarskog sistema, nije dovoljno ostvariti samo stabilnost i osetljivost primenog sistema. Navešćemo nekoliko važnih činjenica pri konstrukciji takvog sistema:

- Antene moraju biti tako konstruisane da optimiziraju prijem signala sa sakupljačkih površina a da minimiziraju rasipanje.
- Kablovsko slabljenje, fazna karakteristika i rezonanca se moraju strogo uzeti u obzir kod dugačkih kablova.
- Izbor radio učestanosti i širina opsega moraju biti proporcionalni sa interferentnim radio-učestanostima okoline.
- U interferometarskom sistemu upotreba r.f. predpojačavača pri svakoj anteni pomaže da se izbegne efekat linijskih gubitaka (u pojačanju, faznim promenama i tako dalje).

3 O zvezdanim spektrima (opšti pojmovi)

Spektri se dele prema poreklu na emisione i apsorpcione a prema strukturi na linijske, trakaste i neprekidne. Linijski spektri potiču iz atoma iz njihovih pobudjenih stanja. Trakasti ili band spektri su posledica molekularnih stanja materijala iz veze više atoma. Dobijene informacije pomoću trakastih spektara korisno služe za klasifikaciju stanja molekula i njihovih unutarnjih veza. Kontinualni spektar ima poreklo u usijanim čvrstim telima i može se smatrati kao ekvivalent beskonačnom broju linija i traka čije poreklo leži u atomskom i molekularnom stanju čvrstog tela.

Obe vrste spektara, i emisioni i apsorpcioni, karakterišu pojedine atome i molekule bez obzira gde se oni nalaze. Zato se kvalitativna analiza može vršiti sa velikom tačnošću za neki posmatrani materijal. Pošto je intenzitet linija direktno proporcionalan broju atoma to jest molekula, koji učestvuju u emisiji, odnosno u apsorpciji to se i količina tog elementa u tragovima može odrediti - kvantitativna analiza. Apсорpcione metode daju bolje rezultate. Apсорpcija radijacija daje odgovor na tri pitanja: koje talasne dužine su apsorbovane, zašto su se apsorbovale baš te radijacije kao i koliko se radijacija apsorbuje pod određenim uslovima.

Spektroskopske metode su osetljivije od hemijskih i daju više podataka o samoj strukturi materije koja se proučava. Čitav niz elemenata kao helium, cezium, rubidium i drugi pronadjeni su ovom metodom.

Ako je gas u atomskom stanju i podvrgne se dejstvu električne ili termičke eksitacije gas može da emituje. U zavisnosti od graničnog pritiska spektar može biti "neprekidan" vrlo sličan spektru usijanog čvrstog tela. Preovladjuje intenzitet svetlosti određene boje u zavisnosti od temperature koja vlada na emitujućoj površini. Pomenuti granični pritisak nije manji od pritiska koji odgovara potpunoj jonizaciji svih atoma u posmatranom gasu.

Zatim se javlja tako zvani "linijski" spektar koji se sastoji od nekoliko sjajnih monohromatskih linija pod uslovom da je pritisak

manji od graničnog pritiska. Sjajne linije kod visokih frekvencija prelaze u neprekidan spektar.

Ako kroz gas u atomskom stanju prolazi svetlost koja potiče od tela sa neprekidnim spektrom pojaviće se apsorpcione linije koje se nalaze na istim talasnim dužinama odnosno na mestima kao i emisione linije koje karakterišu posmatrani gas, to je Kirhoffov zakon. Apсорpcione linije sa Sunca zovu se Fraunhoferove. Ako je gas u molekularnom stanju, spektralne linije (apsorpcione ili emisione) zamenjuje "trakasti spektar". On je obrazovan od mnogobrojnih linija koje se slivaju u traku, koje se, posmatrane instrumentima, razlažu u mnoštvo finih linija. Vrlo hladne zvezde daju ovakve spektre.

3.1 Spektar Sunca i drugih zvezda

Neprekidan spektar će biti emitovan iz centralnih delova zvezde gde vlada pritisak od više miliona tona po kvadratnom santimetru. Ako se zračenje kreće ka spoljašnjim slojevima ono nailazi na dobro definisan omotač-fotosferu. Ka periferiji pritisak vrlo brzo opada, na relativno kratkim dužinama od par stotina kilometara duž poluprečnika pritisak se menja od stotinu kg/cm^2 pa do na $0,01 \text{ kg/cm}^2$. Izvan fotosfere pritisak sve više opada a ti gasovi stvaraju hromosferu. Kod našeg Sunca (jedina zvezda kod koje se ona može neposredno posmatrati) hromosfera je relativno tanka. Spektar tog sloja je okarakterisan većim brojem emisionih linija.

Iznad ovog sloja opaža se korona čiji je spektar takodje emisioni, izvanredno slab i relativno neprimetan u opštem spektru Sunca. Kod izvesnih zvezda sa vrlo prostranim atmosferama javlja se smeša sjajnih i tamnih linija. Sjajne linije su iz perifernog sloja. To su zvezde sa emisionim linijama. Medjutim, kod većine zvezda najvažnije i najmnogobrojnije su linije koje nastaju u omotačima. One su proizvod mnogobrojnih emisija, apсорpcija i reemisija koje se događaju u dubljim slojevima.

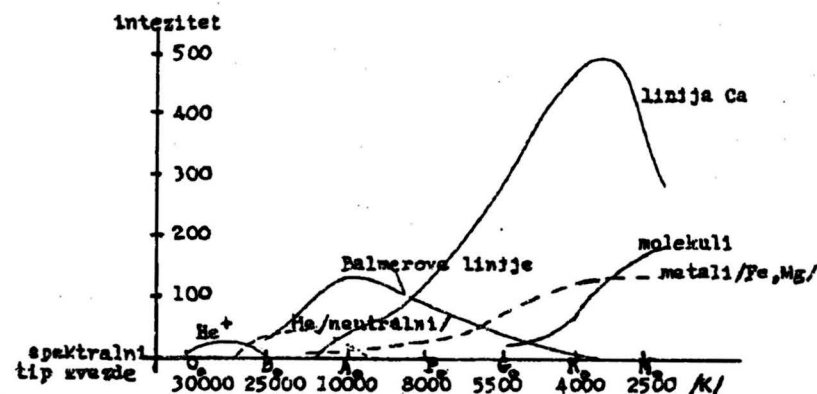
3.2 Interpretacija intezivnosti različitih linija u zvezdanom spektru

Kombinovanjem Bolcmanove i Saha formule dobija se zadovoljavajuća interpretacija različitog intenziteta raznih spektralnih linija. Saha formula uključuje temperaturu T , potencijal V , koji je funkcija stepena jonizacije i elektronskog pritiska P_e koji predstavlja pritisak gasa slobodnih elektrona. Za odredjivanje intenziteta Balmerove serije važan je odnos N_2/N gde je N_2 broj atoma u drugom energetskom nivou a N ukupan broj atoma, neutralnih i jonizovanih.

Ako se napiše sledeći odnos

$$\frac{N_2}{N} = \frac{N_2}{N + N^+} = \frac{N_2/N}{1 + N^+/N} \cdot \frac{N_2/N_1}{1 + N^+/N_1}$$

u ovom odnosu brojitelj je dat Bolcmanovom a imenitelj formulom Saha. Na slici 29, gde je prikazan dijagram vidi se da odnos ove dve veličine raste do 10 000 K kada prolazi kroz maksimum, a zatim opada ka visokim temperaturama. Linije jonizovanog kalcijuma imaju vrlo izražen maksimum oko 5000 K a intezivne su i na temperaturi Sunca oko 6000 K. Spektralni B tip zvezde (oko 25 000 K) je ranije nazivan heliumski a tip A (oko 10 000 K) nazivan je vodoničnim, iz slike 29 se vidi da je to greška.



Slika 29:

Temperatura zvezde A i B je dovoljno velika da jako eksitira njihov helijum ili vodonik (to su elementi sa velikim potencijalom eksitacije). Ako se podje od zvezda tipa M_0 do tipa A_0 , vidi se kako Balmerove linije postaju sve jače sa porastom temperature. Balmerove linije slabe u tipu B, jer ovde viša temperatura sve više jonizuje atom, dok protoni ne učestvuju u izmenama zračenja. Linije neutralnog helijuma se pojavljuju tek oko 8000 K da bi nestale oko 28000 K, linije jonizovanog helijuma javljaju se oko 25000 K do 30000 K, između 25000 i 28000 ove dve vrste linija se javljaju zajedno. Na ovaj način dobija se približna predstava spektra zvezda datog spektralnog tipa ako se na gornjoj slici povuče prava paralelna ordinati. Ovaj približni račun ne pokazuje da li odgovarajuće spektralne linije leže u vidljivom delu spektra ili ne. Odredjivanje relativnih količina raznih elemenata u zvezdanoj atmosferi predstavlja veliki problem, čak i ako se aproksimativno usvoji da sve zvezde imaju isti hemijski sastav.

3.2.1 Spektri ostalih gasova

Ostali gasovi imaju više serija spektralnih termova. Elektroni su raspoređeni u više slojeva, a samo su donji slojevi popunjeni. Dva spoljna sloja mogu biti nepopunjena (manje od 8 elektrona u sloju). Za emitovanje vidljive svetlosti su odgovorni valentni ili optički elektroni. Linije koje odgovaraju X-zracima, vrlo malih talasnih dužina nastaju usled kretanja elektrona u nižim slojevima. Tu je vrlo izraženo umnožavanje linija. Vide se dupleti, tripleti i multipleti koji idu i do petnaest komponenti, postoje međutim i linije koje ostaju jedinstvene. Svi prelazi ne vrše se istom verovatnoćom, najmanje verovatni su najsporiji prelazi. Izvesni prelazi dugo vremena su smatrani zabranjenim, međutim oni su samo manje verovatni. Izvesna verovatnoća postoji i u slučaju ako je gustina gasa vrlo mala, to se događa u nekim maglinama naše galaksije gde srednja gustina ne prelazi 10^{22} gr/cm³. U njima se pojavljuju tako zvane zabranjene linije spektra koje u stvari pripadaju dva ili tri puta jonizovanom kiseoniku i jonizovanom azotu.

3.2.2 Popunjenost različitih nivoa. Bolcmanova formula

Broj N atoma u zvezdanoj atmosferi koja se nalazi u ravnoteži nekog elementa na bilo kom energetskom nivou može se smatrati stacionarnim, to važi i za broj slobodnih jona i elektrona. Odnos N_b/N_a broja atoma u jedinici zapremine koji se nalaze u energetskim stanjima a i b dat je Bolcmanovom formulom,

$$\frac{N_b}{N_a} = \frac{g_b}{g_a} e^{-\frac{\chi_{ab}}{kT}} \quad (3.1)$$

gde je k Bolcmanova konstanta, T je temperatura, a χ_{ab} razlika energije za stanje a i b . Veličine g_a i g_b predstavljaju statičke težine nivoa a i b . Uvodjenjem numeričkih vrednosti jednačina postaje:

$$\log \frac{N_b}{N_a} = -\frac{5040}{T} E + \log \frac{g_b}{g_a} \quad (3.2)$$

Ako se za atom vodonika uzme $b = 2$, $a = 1$, a odnos $g_2/g_1 = 4$, $E = 10,2$ V, vrednost potencijala rezonancije, tada je $\log(N_2/N_1) = 0,6 - 5040/T$ 10,2. Neka je temperatura Sunca $T = 5040K$, vrednost $\log(N_2/N_1) = -9,6$ to jest daje vrednost od samo 25 atoma u višem stanju n^02 na sto milijardi u nižem stanju n^01 , što pokazuje zašto su Balmerove linije u spektrima nebeskih tela nižih temperatura slabe i pored toga što je vodonik najobilniji element.

3.2.3 Uzroci pomeranja, širenja, udvajanja spektralnih linija (praktična razmatranja)

Teorijski se može predvideti mesto u spektru, intenzitet i struktura spektralnih linija prema hemijskom sastavu i obimu elementa. Medjutim postoje izvesni efekti koji mogu uticati na linijski spektar kao: Doplerov efekat, Zemanov efekat, Komptonov efekat, Ajnštajnov efekat, obični i medjuatomska Starkov efekat.

3.2.3.1 Doplerov efekat. Ako se izvor zračenja (zvezda) kreće relativnom radijalnom brzinom V_r u odnosu na posmatrača,

u ovom slučaju Zemlja, dolazi do pomeranja spektralnih linija i to: prema ljubičastom delu spektra - ako se izvor približava Zemlji, posmatraču, a prema crvenom - ako se izvor udaljava od Zemlje, posmatrača. Ovako ponašanje predstavlja modifikaciju talasnih dužina koju daje teorija - smanjenje u slučaju približavanja, a povećanje u slučaju udaljavanja. Ovaj fenomen za sva talasna kretanja dat je obrascem

$$\Delta\lambda = \lambda \frac{V_r}{c}$$

Pomak spektralne linije meren linearno na spektru sa tačnošću $\pm 500\text{nm}$ pri spektralnoj disperziji od $0,0001\text{nm}$ omogućava odredjivanje radijalne brzine sa tačnošću od 100 m/sec. Ovo važi ma koliko bilo udaljeno posmatrano nebesko telo. Doplerov efekat omogućuje odredjivanje rotacije nebeskog tela vidljivog prividnog poluprečnika kao i kretanje zvezda ili drugih objekata (kvazara, glaksije itd). Doplerovo pomeranje $\Delta\lambda$ je proporcionalno talasnoj dužini λ , što predstavlja karakterističnu odliku ovog efekta. Radio astronomija je zabeležila zračenje neutralnog vodonika talasne dužine od $21,105$ cm koje je približno $400\,000$ puta osetljivije na Doplerov efekat od svetlosnog zračenja.

3.2.3.2 Zemanov efekat. Gas podvrgnut jakom magnetnom polju daje spektar u kome se opaža, pri posmatranju normalnim na magnetno polje da se utrostručavaju i kružno polarizuju linije koje leže simetrično oko centralne nepomerene linije. Pri posmatranju u pravcu linija sila magnetnog polja, opažaju se bočne, linearne polarizovane komponente, dok centralna linija iščezava. Upotrebom kvantne teorije može se na osnovu ovoga izračunati vrednost magnetnog polja.

3.2.3.3 Komptonov efekat. Pri sudaru fotona sa elektronom on skreće gubeći pri tom energiju to jest učestanost mu se smanjuje i svetlost postaje crvenija. Ovaj efekat se praktično ne registruje u vidljivom delu spektra gde bi dostigao jedva 10^{-6}nm .

3.2.3.4 Ajnštajnov efekat. Pomak ka crvenom nastaje ako svetlost emituje telo vrlo velikog gravitacionog potencijala. Ovo je rezultat opšte teorije relativnosti. Potencijal je direktno proporcionalan masi tela, a obrnuto proporcionalan poluprečniku. Ajnštajnov efekat se nalazi na granici posmatranja čak i ako je poluprečnik manji i od stotog dela poluprečnika Sunca (beli patuljci).

3.2.3.5 Štarkov efekat - obični i medjuatomska. Prisustvo jakog električnog polja prouzrokuje efekat sličan Zeemanovom. Na ovaj efekat su naročito osetljive linije vodonika i heliuma. Ovaj efekat je naročito primetan kod belih patuljaka gde su gustine veoma velike i vodonikove linije postaju vrlo široke.

Za dve zvezde istog spektralnog tipa temperatura će biti viša kod patuljaka nego kod džinova. Spektralne linije patuljaka biće šire i izraženije (jače termičko kretanje, mnogobrojni sudari medju česticama, izraženiji Štarkov efekat).

4 Instrumenti u spektroskopiji

Optičkom spektroskopskom analizom se dolazi do podataka do kojih se ni na koji drugi način ne bi moglo doći. Dobijeni podaci su veoma tačni i krajnje precizni koje ni jedna druga metoda ne može da obezbedi. Tačne analize stanja atoma i molekula koriste se metodom kvantne mehanike, koja je u stanju da pomoću spektara pruži suštinu prirode elemenata i stanja materije uopšte. Mnogo puta teorijski to nije potupno moguće, zato se kombinuju empirijske metode i teorijska razmatranja tako da zajednički pružaju velike mogućnosti u razumevanju strukture atoma i njihovih kombinacija.

U astronomiji je spektroskopska analiza elemenata pružila mogućnost da se dodje do kvantitativnih i kvalitativnih podataka o sastavu nebeskih tela. Spektroskopskom analizom je sa sigurnošću utvrđen sastav materije na nebeskim telima. Mnogi elementi su pre konstatovani na Suncu i nebeskim telima nego na Zemlji, i pri tome je nadjeno da se mnogi atomi u zvezdama nalaze u specijalnim uslovima koje je nemoguće ostvariti u laboratorijama, a koji nedvosmisleno pokazuju o stanju materije u prostoru.

4.1 Spektrometar

Spektrometar je uređaj za skanirajuće merenje spektara sa različitim tehničkim izvodjenjima, obično elektronskim fotomultiplikatorom ili poluprovodničkim prijemnikom što zavisi od talasnih dužina.

4.2 Spektroskop

Spektroskop analizira vidljivu svetlost što se konstatuje okom (subjektivno).

4.3 Spektrograf

Spektrograf analizira spektar uz reprodukciju spektrograma na fotografskoj ploči ili nekom drugom dvodimenzijonalnom prijemu (NPR. CCD).

4.4 Spektrofotometar

Spektrofotometar (Mikrofotometar ili Mikrodensitometar) je uređaj koji mereći snimljeni spektrogram daje kvantitativne rezultate inteziteta svetlosti po pojedinim talasnim dužinama. Njime se mogu meriti i inteziteti linija nekog izvora.

Monohromator izdvaja vrlo uzan opseg učestanosti nekog spektra.

4.5 Osnovni elementi optičkog spektrometra

Svaki optički spektrometar ima tri osnovna elementa: prorez kao

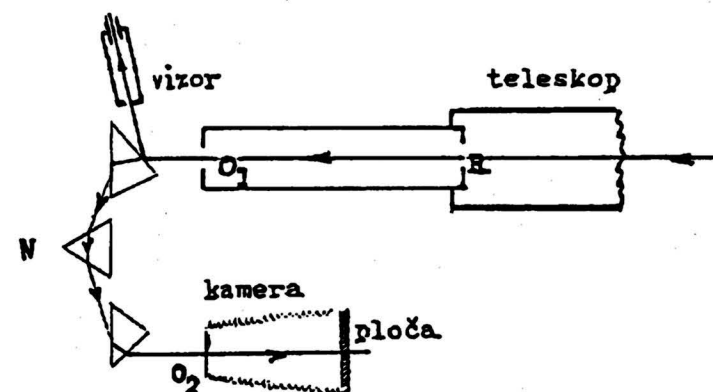
sekundarni izvor svetlosti, prizmu ili optičku rešetku kao disperzioni element i detektor za odgovarajući opseg posmatranja to jest merenja. Kvalitet spektrometra se posmatra kroz sledeće veličine. Linearna disperzija je mera razlaganja spektrometra i definisana je kao $\Delta\ell/\Delta\lambda$ gde je $\Delta\ell$ razmak između dve linije na spektrogramu u (mm) u odnosu na razliku talasnih dužina tih linija u nm. Faktor ploče je recipročna vrednost $\Delta\lambda/\Delta\ell$ i ponekad je pogodnija veličina. Ugaona disperzija se definiše kao $\Delta\theta/\Delta\lambda$ to jest odnos ugla između zraka dveju linija u odnosu na razliku talasnih dužina.

Sposobnost spektrometra da razlikuje spektralne linije malih razlika u talasnim dužinama je moć razlaganja spektrometra. Definiše se kao $\lambda/\Delta\lambda$, gde je $\Delta\lambda$ razlika između talasnih dužina dveju linija sličnog intenziteta koje instrument može da razdvoji pri nekoj talasnoj dužini λ . Moć razlaganja kod velikih spektrografa ide i do 600 000 pri upotrebi rešetke.

4.6 Spektrografi u astronomiji

4.6.1 Spektrograf sa prizmom.

Ako se disperzija složene svetlosti vrši pomoću prizmi, prizme moraju biti u položaju minimalne devijacije, tako da svaka prizma bude postavljena simetrično u odnosu na pravac upadne i prelomljene svetlosti upotrebom kolimacionog sočiva u čijoj se žiži nalazi tačkasti izvor svetlosti, zatim dolazi disperzioni sistem i sabirno sočivo na izlazu sistema prizmi. To sočivo predstavlja objektiv fotografske komore. Upotrebom više uzastopnih prizmi, obično tri, postiže se veća disperzija i razdvojna moć.



Slika 30:

Slika 30 predstavlja spektrograf sa prorezom i sistemom od tri prizme. R je prorez na koji pada lik zvezde. Prorez je u žiži ahromatičnog sočiva O_1 (objektiv kolimatora). N je sistem od tri prizme, O_2 je objektiv fotokamere sa pločom na kojoj se dobija spektar. Deo nazvan vizor služi za posmatranje zvezde dobijen refleksijom sa prve prizme. To je ujedno i kontrola da li se lik zvezde sve vreme nalazi na prorezu.

Spektar zvezde se javlja u principu kao crta bez primetne debljine, jer je slika zvezde tačka. Potrebno je tu sliku proširiti, a najjednostavniji način je da se prorez orijentiše paralelno dnevnom kretanju a zatim se lagano pomera kretanje ekvatorijala po rektascenziji. U ovom slučaju postoji opasnost da se izgubi deo spektra,

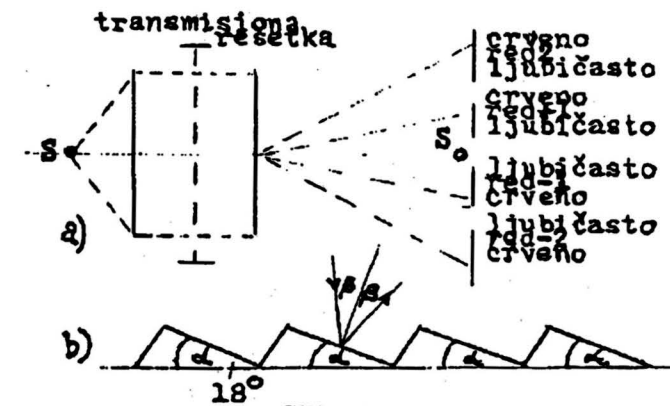
zato što prelamanje kroz atmosferu nije isto za sve talasne dužine, pogotovu ako je zvezda daleko od zenita. Bolji je postupak da se ili ceo spektrograf, ili samo fotografska ploča lagano oscilatorno kreće oko ravnotežnog položaja. Dobri instrumenti postižu disperziju reda veličine 1 mm/nm kod talasnih dužina u blizini 430 nm. Talasne dužine su određene do na 1/10 000 nm.

4.6.2 Spektrograf sa rešetkom

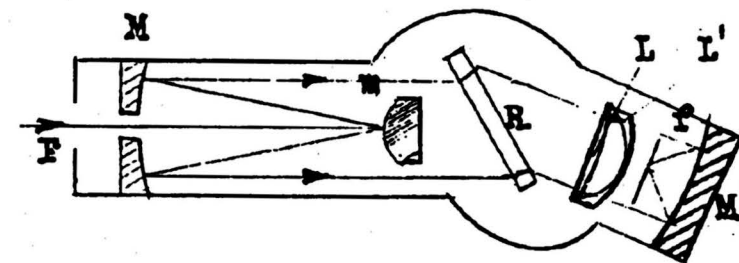
Refleksione rešetke se vrlo mnogo upotrebljavaju u astronomiji. To su vrlo precizno izglacane staklene ploče na kojima su urezane ekvidistantne brazde u tankom sloju aluminijuma nanesenog na staklenu ploču. Na toj reflektujućoj površini je ostvarena periodična pertubacija po jednoj dimenziji čiji je korak deo mikrometra do nekoliko desetina mikrometara. Obično se ureže 500 i više zarezova po milimetru i cela rešetka ima i do 200 000 crta. Ako se rešetka osvetli paralelnim snopom svetlosti, ona se reflektuje ili prolazi ne samo u pravcu određenim zakonima refleksije ili pravolinijskog prostiranja već, se takodje prostire i u nekoliko drugih pravaca koji odgovaraju interferencionim maksimumima. Od talasne dužine zavisi položaj maksimuma što izaziva fenomen disperzije. Ako je izvor višebojni (polihromatski) kod tipa rešetke koja nije refleksionog tipa će se videti slika 31a koja bi se javila kada ne bi bilo rešetke, a sa svake strane te slike-spektri dotičnog svetlosnog izvora. Red spektara je označen sa +1, +2, +3, ..., -1, -2, -3.

Disperzija se povećava sa redom spektara. Kod tzv. (nekoncentrišuće, neusmerene) optičke rešetke spektri višeg reda postaju sve slabiji jer se data količina svetlosti prostire na veću površinu, a i korisni presek snopa svetlosti postaje manji. Posmatranje ljubičastog i infracrvenog dela spektra je olakšano upotrebom refleksionih rešetki zato što bi ta zračenja, a naročito ultra ljubičasto, bila apsorbovana u staklenim prizmama ili transmisionim rešetkama. Optičkom rešetkom dobija se mnogo veća disperzija od one koju bi davala prizma iste veličine.

Spektrograf sa rešetkom opservatorije Maunt Wilson dozvolja-



Slika 31:



Slika 32:

va razdvajanje dveju linija koje se razlikuju za 2,5 pm, a koje se nalaze u blizini talasne dužine 590 nm. Razmak ovih linija na ploči iznosi 0,125 mm. U ovakvoj situaciji, ako je mikrometerski mikroskop i male jačine, mogu da se mere talasne dužine sa tačnošću i do 1/10 000 dela nm. Nekad se spektri u izvesnim domenima viših redova preklapaju: ovaj nedostatak se izvesnim metodama može potpuno otkloniti ili dovoljno umanjiti selektivnim filtrima ili dodatnom spektralnom disperzijom ispred proreza osnovnog spektrografa.

Rešetke se redovno upotrebljavaju za izučavanje sjajnih

nebeskih tela a u fizici zvezda od momenta kada se postiglo da se oko 70% upadne svetlosti koncentriše u jedan jedini spektar oko određene talasne dužine. Specijalni profil zarezeta rešetke je omogućio ovu koncentraciju. Zarezi su u obliku pravouglanih trouglova (tako zvana lesvičasta rešetka). Ako je ugao $\alpha = 18^\circ$, slika 31b, a rešetka ima 600 zarezeta po milimetru, maksimum koncentracije za prvi red biće oko $\lambda = 0,98\mu\text{m}$ za drugi red oko $\lambda = 0,49\mu\text{m}$ to jest oko sredine vidljivog dela spektra.

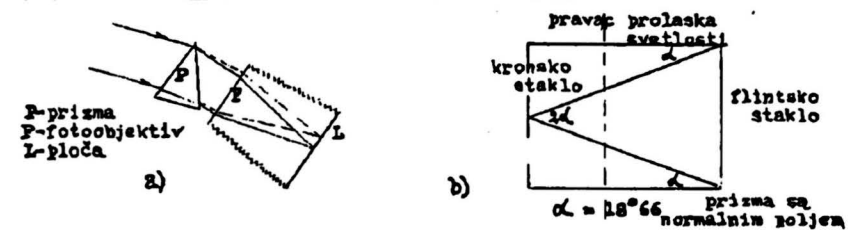
4.7 Zvezdani spektrograf

sa rešetkom, sl. 31b, ima kao kolimator mali Kasegrenov teleskop obrnuto montiran (parabolično ogledalo M i hiperbolično ogledalo m), transmisionu rešetku R , a objektiv kamere je sferno ogledalo M' čije su aberacije korigovane pomoću dva sočiva L i L' . Slika se obrazuje na filmu f koji je lako zakrivljen jer objektiv M' nije aplanatičan.

4.8 Spektrografi bez proreza

Spektrografom sa prorezom zvezde moraju biti posmatrane jedna po jedna što čini mernu metodu vrlo sporom. Upotrebom prizmatične komore, slika 33a, ovi nedostaci se mogu eliminisati. Uredjaj se sastoji od prizme postavljene u položaj minimalne devijacije ispred fotografskog objektiva sa širokim vidnim poljem. Na fotografskoj ploči će se pojaviti spektri svih zvezda koje se nalaze u vidnom polju, ivica prizme je usmerena paralelno pravcu dnevnog kretanja. Ista montaža se može izvesti i sa rešetkom, a uredjaj može biti montiran na teleskop. Kod ovog instrumenta postoji nedostatak: upadni ugao nije isti za sve zvezde i disperzija varira od tačke do tačke polja. Ovo se može otkloniti tako zvanom prizmom sa normalnim poljem koju je dao Ferenbah, slika 33b.

Ona se sastoji od prizme od flintskog stakla sa uglom 2α uz koju su priljubljene dve prizme od krunskog stakla sa uglom α , ceo sistem se ponaša kao ploča sa paralelnim stranama. Izborom određenih indeksa prelamanja stakla od koga su napravljene



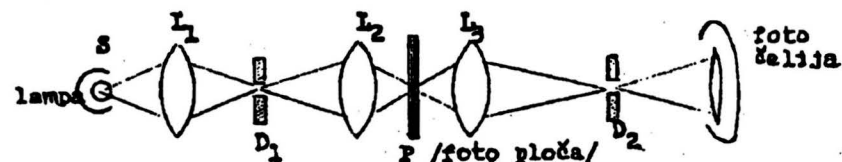
Slika 33:

prizme postiže se prostiranje svetlosti bez prelamanja za određeno zračenje 422 nm, a da je pri tome dosta očuvana rezidualna disperzija. Metodom koju je predložio Švarcfield i upotrebom Ferenbahove prizme može se meriti radijalna brzina slabih zvezda koje se nalaze u polju instrumenta. Metoda se sastoji u uzimanju dve fotografije istog zvezdanog polja, pre i posle obrtanja prizme, snimci su malo pomereni po visini u odnosu jedan na drugi. Iz tako dobijena dva spektra iste zvezde, koja su okrenuta na suprotne strane, meri se rastojanje medju linijama istih elemenata. Ono odgovara dvostrukoj vrednosti daljine koja bi odvajala svaku liniju od takve idealne linije koja se ne bi pomerila pri rotaciji prizme. Ta je linija 422 nm. Ovaj reper omogućuje određivanje položaja posmatrane linije i izvodjenje radijalne brzine zvezde. Zbog toga, potrebno je prethodno poznavati radijalne brzine nekoliko zvezda izmerenih pomoću spektrografa sa prorezom tako da ove zvezde služe kao etaloni. Ovaj instrumentat je mnogo doprineo astronomiji u poznavanju vasiona.

4.9 Spektrofotometri kao registratori

Precizno fotometrijsko analiziranje fotografski snimljenih zvezdanih spektara je jedna od najčešćih najtipičnijih operacija u astrofizici. Spektar je na fotografskoj ploči, a za merenje koristi se

spektrofotometar koji je sastavljen od sistema sabirnih sočiva, dijafragmi i fotoćelije koja meri razlike u jačini svetlosti koja prolazi kroz ploču za vreme skaniranja spektra, slika 34.



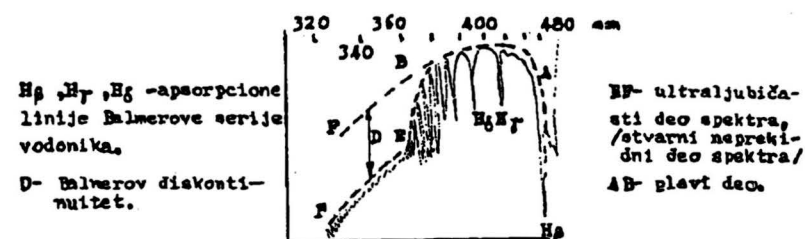
Slika 34: Dijafragme D_1 i D_2 ograničavaju merenu oblast ploče i eliminišu parazitnu svetlost

Tako se dobija kriva zacrnjenja koja pokazuje gustinu, na primer pri prolazu preko apsorpcionih linija. Na ovaj način moguće je odrediti širine i intenzitet linija to jest odnose inteziteta raznih linija istog spektra. Takodje se može obaviti ispitivanje spektralne raspodele energije u spektru zvezde. Ovde se radi o energiji neprekidnog fona, izuzevši spektralne linije. Na slici 35 je dat spektrofotometrijski dijagram jedne zvezde koji je analiziran pomoću registrujućeg mikrofotometra.

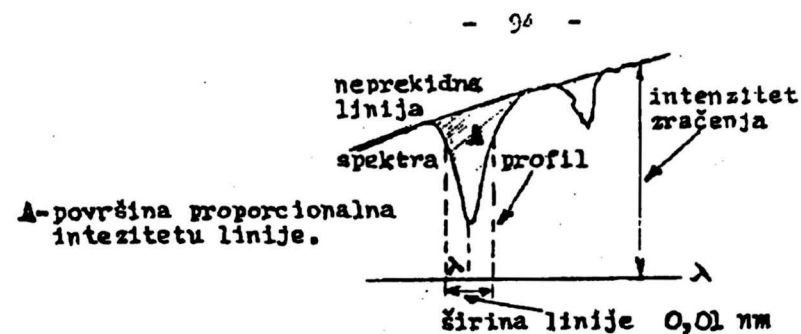
Na slici se kod talasne dužine $\lambda = 365$ nm opaža karakterističan diskontinuitet u nivou energije koji odgovara neprekidnom fonu, nazvan Balmerov diskontinuitet, koji igra važnu ulogu u astrofizici.

Na slici 36 se vide detalji profila linije registrovane na mikrofotometru. Vidi se dubina linije, njena širina na polvini dubine i površine koja je proporcionalna intezitetu linije.

Vrlo je važan i parametar nazvan ekvivalentna širina linije. To je interval talasnih dužina, u okolini linije, u kome je površina ispod nivoa kontinuuma ista kao i površina proporcionalna intezitetu linije.



Slika 35:

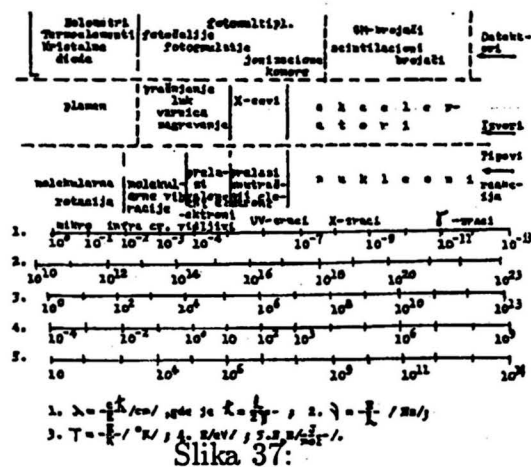


Slika 36:

4.10 Raspodela spektralnih oblasti

Na slici 37 data je delimična raspodela elektromagnetskog spektra oko vidljivog dela sa nekim karakteristikama dobijenih eksperimentalnim putem. Može se konstatovati da je deo zajedničkog spektra elektromagnetskog zračenja. Tačna podela prema talasnim dužinama nije moguća zbog preklapanja opsega, medjutim potrebno je birati detektor koji će davati najbolje rezultate u merenom opsegu.

Iz slike se vidi da se za oblast mikro talasa, infracrvenih i jednog dela vidljivih talasa kao detektori (prijemnici) upotreblja-



Slika 37:

vaju, bolometri, termoparovi (termoelementi) i kristalne diode. Za oblast vidljivih talasa, UV-talasa, X-talasa i jednog dela opsega γ -talasa upotrebljavaju se fotomultiplikatori, fotoćelije, jonizacione komore, Golej-ćelije i foto emulzije. Za oblast γ -talasa upotrebljavaju se, GM-brojači kao i scintilacioni brojači.

4.11 Spektrograf u praktičnom izvodjenju sa osnovnim karakteristikama

Date karakteristike su generalne i pokazuju na koji način su izvedeni današnji spektrografi.

- Teleskop od 193 cm - tip KUDE
 spektralni opseg 300-1100 nm
 disperzija 0,32-8 nm/mm
 prijemnik fotografska ploča ili film
- Teleskop od 120 cm - tip NJUTONOV
 spektralni opseg 350-510 nm
 disperzija 29 nm/mm
 prijemnik fotografska ploča ili film
- Teleskop od 152 cm - tip KUDE
 spektralni opseg 310-950 nm
 disperzija 0,72-3,1 nm/mm
 prijemnik samo film

- Teleskop od 193 - tip KASEGREN
 spektralni opseg 640-1000 nm
 disperzija 0,3-24 nm/mm
 prijemnik brojač fotona
- Teleskop od 152 cm - tip KUDE
 spektralni opseg 370-1000 nm
 disperzija 0,3-24 nm/mm
 prijemnik foto ploča i elektronska kamera
 Lalemand-Dišnes

- Teleskop od 193 cm - tip KASEGREN
 spektralni opseg 750-1100 nm
 disperzija 5,10,23 nm/mm
 prijemnik solid-state Reticon
- Teleskop od 152 cm - tip KUDE
 spektralni opseg 370-510 nm
 disperzija 8 nm/mm - Šmit komora
 prijemnik fotografska ploča ili elektronska cev RCA
- Teleskop od 80 cm i 193 cm - tip KASEGREN
 spektralni opseg 390-480 nm
 disperzija 4 nm/mm kod 426 nm
 prijemnik film

5 Prijemnici za razne spektralne oblasti

U dosadašnjem izlaganju opisivali smo razne tipove prijemnika za radioopseg. Ovde ćemo dati pregled prijemnika za ostale oblasti spektra elektromagnetnih talasa. Više ćemo se zadržati na optičkom opsegu, iz razumljivih razloga, a zatim ćemo ukratko opisati prijemnike i za druge spektralne oblasti.

5.1 Čovečije oko

Čovečije oko je jedini prirodni prijemnik za elektromagnetne talase i ono reaguje samo u opsegu (4 do 7) 10^2 nm. Oko ima približno sferni oblik prečnika 27 mm sa ispupčenim prednjim delom. Spoljni beli omotač je providan na ispupčenom delu i naziva se rožnjača. Na celom zadnjem delu oko je prekriveno crnom opnom isprepletano krvnim sudovima (sudovnjača). Kroz omotač prolazi očni živac koji se širi u tanka nervna vlakna koja se u sudovnjači završavaju tako zvanim štapićima i čepićima i samo su oni osetljivi na svetlost, a njihov skup se zove mrežnjača. Unutrašnjost oka je podeljena na dve komore nejednake veličine, nekom vrstom providnog bikonveksnog sočiva, kristalnim očnim sočivom prečnika oko 10 mm i srednjeg indeksa prelamanja 1,40 prednja manja komora je ispunjena bistrom tečnošću indeksa 1,336 koja ujedno sadrži i obojenu dijafragmu (dužicu), okrugli otvor u njoj naziva se zenica. Prečnik zenice menja se u zavisnosti od osvetljenja, od 2 mm pri punoj Sunčevoj svetlosti do 6 mm u mraku. Zadnja komora je ispunjena pihtijastim, staklastim telom indeksa 1,336. Rožnjača igra ulogu sfernog dioptera a očno sočivo ulogu konvergentnog sočiva, tako da se na mrežnjači obrazuje realan, obrnut i veoma mali lik predmeta. Mrežnjača je najneosetljivija na mestu gde očni živac ulazi u očnu jabučicu to je slepa mrlja, a maksimum vizuelne oštine je lokalizovan u tako zvanoj žutoj mrlji.

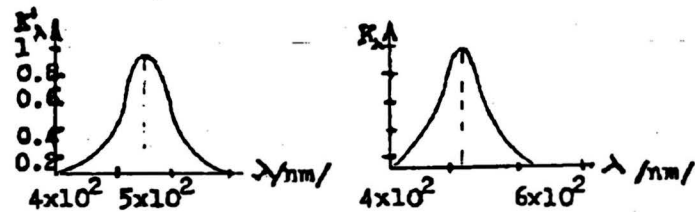
5.1.1 Redukovano oko

Posmatrano sa optičke tačke gledišta oko je ekvivalentno sfernom diopteru koji razdvaja vazduh, sa indeksom 1, od očne tečnosti indeksa 1,336. Teme je negde iza rožnjače i poluprečnik iznosi oko 6 mm. Njegov centar koji predstavlja optički centar oka nalazi se oko 15 mm ispred mrežnjače, na kojoj je njegova žiža-lik. Ovako predstavljano oko naziva se redukovano.

5.1.2 Spektralna osetljivost oka

Ova osetljivost se obično izražava tako zvanom krivom vidjenja. Ako je $E_{\lambda} d_{\lambda}$ najmanja veličina monohromatske osvetljenosti oka pri kojoj čovek vidi svetlo a λ_0 talasna dužina pri kojoj je oko najosetljivije tada je najmanja osvetljenost E_{λ_0} potrebna za osećanje svetlosti. Odnos $K_{\lambda} = E_{\lambda_0}/E_{\lambda}$ određuje spektralnu osetljivost ili krivu vidjenja noćnog neba (čepićasto vidjenje). Pri noćnom vidjenju čepići omogućavaju samo grubu razliku medju bojama, čepićima se ne razlikuju boje. Promena prečnika zenice ne omogućava uvek da se osvetljenost mrežnjače održi na jednom istom nivou. Naime, različita osvetljenja u astronomskoj praksi prelaze devet redova veličine; fon neba i svetlo zvezda su oko 3×10^{-4} luksa, a Sunčevo svetlo je 3×10^5 luksa, medjutim zenica može da kompezuje slabljenje samo dva reda veličine. Tako zvana tamna adaptacija oka se vrši veoma polako, do 1 časa provedenog u tami (punoj).

Za dnevno vidjenje spektralna osetljivost može biti određena po veličini odnosa energetskih monohromatskih sjajeva $B_{\lambda'_0}$ i B_{λ} ili osvetljenosti sa talasnim dužinama λ'_0 i λ koje pri vidjenju osećamo kao subjektivno jednake, i ovde je λ'_0 talasna dužina pri kojoj je oko najosetljivije. Analogno prethodnom, relativna osetljivost dnevnog (štapičastog) vidjenja je $K'_{\lambda} = B_{\lambda'_0}/B_{\lambda}$, slika 38 pokazuje da kriva dnevnog vidjenja dostiže maksimum osetljivosti na $\lambda'_0 = 555$ nm, dok je kod noćnog vidjenja $\lambda_0 = 513$ nm znači pomera se ka kraćim talasnim dužinama.



Slika 38:

5.1.3 Granica osetljivosti oka

Zvezde šeste zvezdane veličine su vidljive za oko potpuno adaptirano na mrak. Ovo je granica osetljivosti oka. Ako je prečnik zenice 6 mm, oko od zvezde osme veličine prima fluks $3,410^{-14}$ lm (lumena), sa svetlosnim ekvivalentom $0,5810^{-3}$ W/lm što predstavlja $1,9710^{-14}$ W/sec. Pri $\lambda_0 = 513$ nm kvant svetlosti ima energiju $h = 3,8710^{-17}$ Joule, znači da na granici osetljivosti oko prima 50 kvanta u sekundi.

5.1.4 Kontrastna osetljivost oka

U nedostatak čovječeg oka spada i to da je nespošobno da razlikuje male promene sjaja kod malih objekata bez obzira na uslove osvetljenja. Iz zakona Veber-Fehnerovog datog u diferencijalnoj formi neka je ΔJ najmanja razlika nadražaja, sjaja ili osvetljenosti dva izvora jedan pored drugog koji daju minimalan fon osetljivosti oka, S , pri nivou J . Tada je $\Delta S = c\Delta J/J$ ili $\gamma = \Delta J/J = \frac{1}{c}\Delta S$. Veličina γ se naziva "granicom kontrastne osetljivosti vidjena". Pri sjaju od približno 0,001 sb, γ je 1-2% i brzo raste kad sjaj postane manji, tako pri 10^{-5} sb je 5-6%, pri 10^{-7} sb — a to je srednji sjaj maglina na nebu — $\gamma = 30\%$ da kod 10^{-9} sb raste do 100%. Vidljivost svetlih tačaka zavisi od fona, na potpuno crnom nebu vidljive su zvezde 6^m , dok na fonu noćnog neba — 10^{-8} sb

— vidljive su zvezde oko 5^m , a na fonu dnevnog neba oko 0,3 sb - može se videti Venera samo za vreme njenog najvećeg sjaja -4^m , 3. Zbog toga što površinski sjaj ne raste pri primeni optike, teleskop nam pomaže da vidimo slabe magline samo zato što uvećava vidljivi uglovni prečnik a pošto je njihov kontrast na fonu neba toliko mali da mnoge od njih ostaju nevidljive za oko, one se mogu videti samo na fotografiji. Samo tri magline su vidljive golim okom, M31, u Andromedi, Veliki i Mali Magelanov oblak samo zahvaljujući velikim uglovnim radiusima. Prema Rikovom zakonu za male predmete, po kome površinski sjaj i površina posmatranih predmeta imaju jednaku vrednost u različitom fonu koji ih okružuje, objekt koji ima uglovni poluprečnik od $1'$ i sjaj od 10^{-5} sb razlikuje se upravo tako, kao i drugi objekt sa sjajem 10^{-7} sb i uglovnim prečnikom od $10'$. Ovde se radi o broju štapića koji učestvuju u procesu vidjenja.

Jačina svetljenja noćnog neba bez mesečine je približno 10^{-8} sb. Jačina svetljenja neonske lampe je 0,1 sb. Jačina punog Meseca gledana kroz atmosferu je 0,25 sb. Jačina svetljenja obične stearinske sveće je 0,5 sb.

5.2 Upotreba fotografije u astronomiji

Fotografska ploča smeštena u žižnu ravan teleskopa igra veliku ulogu u astronomiji i zamenila je čovečije oko u mnogim posmatranjima. Ploča se ponaša kao precizan i vrlo osetljiv brojač fotona pod uslovom da se vodi računa o pragu osetljivosti, ispod koga ploča ne registruje fotone-ako se pojavi suviše mali broj u jedinici vremena. Pri pragu saturacije koji takodje postoji za suviše veliki broj fotona po jedinici vremena, fotografska ploča se ponaša kao loš brojač, pri čemu se veliki broj fotona gubi beskorisno t.j. upijen je ili rasejan. Takva slika je beskorisna za bilo kakvu analizu. Potrebno je aproksimativno 1000 fotona da se dobi samo jedno razvijeno zrnce srebra, a za upotrebljivu sliku zvezde potrebni su približno milioni fotona. Vrlo duge ekspozicije unutar ovih vrednosti omogućuju dobijanje izvanredno finih slika objekata veoma slabog sjaja nevidljivih za vizuelna posmatranja.

Na takvim snimcima mogu se vršiti merenja relativnih položaja zvezda kao i fotometrijska i spektrografska merenja. Zrnca emulzije su otprilike 0,2 mikrometra tako da je ovim određena jedna vrsta moći razdvajanja, ispod koje se dva bliska objekta fotografski ne mogu razdvojiti.

5.2.1 Fotografska emulzija kao prijemnik zračenja

Za obične fotografije koristi se želatinska emulzija sa bromidom srebra bez hromatskog senzibilizatora. Maksimalna osetljivost tada odgovara plavo-ljubičastom to jest oko 0,45 mikrometara. Ove ploče su neosetljive na svetlost žute, zelene a naročito crvene boje, to su obične ploče. Tako zvane izohromatske ploče su osetljive na crvenu i žutu svetlost, a žuti filter omogućava slabljenje plavih i ljubičastih zračenja. Ovakvim postupkom se dobija spektralna raspodela osetljivosti vrlo blizu 0,57 mikrometara. Merenja na ovim pločama se nazivaju fotovizuelna merenja, zato što su ta merenja u principu ista sa vizuelnim posmatranjima. Ploče senzibilizirane za infracrveni deo spektra omogućavaju opažanje vrlo velikog broja relativno hladnih zvezda, temperature zračenja manje od 2000 K. Znači, pruža se mogućnost za kvantitativno izučavanje raspodele intenziteta u spektru zračene energije koju emituje takva zvezda.

Negativan lik koji se nalazi na foto ploči je dokumenat o stanju predmeta fotografisanog u datom momentu. Sve što je na negativu može se posmatrati i meriti, ovo je naročito važno pri fotografisanju zvezdanih polja kada se na negativu dobijaju likovi desetine i stotine hiljada zvezda od kojih svaka može da postane predmet posebnih izučavanja.

5.2.2 Granice osetljivosti fotografske emulzije

Eksperimentalno je dokazano da svaki apsorbirani kvant svetlosti izdvaja jedan atom metalnog srebra. Medjutim ovo nije kriterium osetljivosti fotoploče. U praksi za obrazovanje jednog zrna potrebno je deset kvanata svetlosti, ali ne skuplja svako zrno pri slabim osvetljenostima svih deset kvanata. U stvari, jedno iza-

zvano zrno veoma uslovno može biti uzeto za prag osetljivosti fotografske ploče. Preimucstvo fotografskih metoda posmatranja je ne u tome što je fotografska emulzija sposobna da prikuplja dejstvo svetlosti u toku vremena a oko nije, jer oko reaguje na količinu svetlosne energije u jedinici vremena, a fotografska emulzija na ukupnu količinu energije zračenja koja je u nekom intervalu vremena njome bila apsorbirana.

5.2.3 Gustina fotografskog lika

Neka na negativ pada svetlost čiji intezitet ostaje posle prolaska svetlosti kroz neosvetljenu emulziju (čistu ploču) jednak I_0 , medjutim prolazeći kroz zacrnjeno mesto u negativu, svetlost će biti oslabljena usled apsorpcije i rasejanja i dobićemo intezitet I . Odnos I_0/I služi kao izraz zacrnjivosti posmatranog mesta na negativu. Prema Veber-Fehnerovom zakonu za osobine ljudskih čula može se napisati

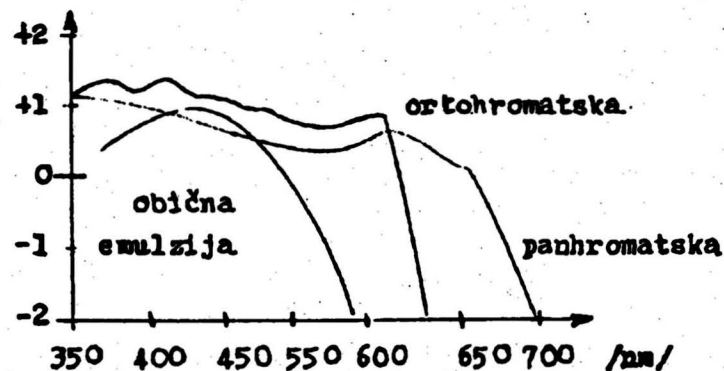
$$D_1 = \log \frac{I_0}{I},$$

ova veličina se naziva fotografsko zacrnjivanje ili gustina fotografskog lika.

5.2.4 Spektralna osetljivost fotografskih emulzija

Spektralna osetljivost neke emulzije S_λ na posmatranoj talasnoj dužini naziva se recipročna vrednost količine svetlosne energije koja padne na jedinicu površine emulzije i pri tom izazove datu gustinu fotografskog lika, pri datim uslovima razvijanja i fiksiranja. Neka je gustina $D = 0,2$ i neka je E_λ monohromatska energetska osvetljenost neophodna za dobijanje ove gustine na negativu, tada je spektralna osetljivost $S_\lambda = 1/E_\lambda$. Pri maksimalnoj osetljivosti E je $0,0210^{-7}W$. Nanos srebro bromida ne apsorbuje svetlost talasne dužine većih od 550 nm. U ultraljubičastom domenu njegova osetljivost ide veoma daleko ali zato pri talasnim dužinama 190-170 nm foto filmovi skoro u potpunosti gube osetljivost usled apsorpcije svetlosti u želatinu. Pri

još kraćim talasnim dužinama - oblast rentgena - osetljivost fotoemulzije se obnavlja. Na slici 39 je kriva osetljivosti obične emulzije od srebro bromida. Maksimum osetljivosti takvih emulzija nalazi se u ultra-ljubičastom delu spektra to jest $\lambda < 400$ nm.



Slika 39:

One su takodje veoma osetljive i u plavom i u ljubičastom delu spektra, medjutim osetljivost praktično pada na nulu kod zelene svetlosti, baš tamo gde je oko vrlo osetljivo. Raznim dodatnim sredstvima nanesenim u malim količinama na već gotovu fotografsku emulziju povećava se osetljivost emulzije na žutu svetlost, narandžastu i infracrvenu, a da osnovna osetljivost na plavo ostaje nepromenjena, ovaj postupak se naziva optička senzibilizacija. Osetljivost se povećava do skoro 1300 nm. Emulzije koje su osetljive na žute zrake zovu se ortohromatske, a one koje reaguju na narandžaste i crvene panhromatske. Prefiks izoizopanhromatska znači da je taj film uz izvesne dodatke osetljiv i u zelenom delu spektra. Emulzije osetljive na infracrvenu svetlost odlikuje se niskom osetljivošću i nisu trajne. Ne mogu se postići značajne osetljivosti u oblasti talasnih dužina većih od 1400 nm, zato se u ovoj oblasti spektra upotrebljavaju osetljiviji poluprovodnički prijemnici zračenja.

Zacrnenje fotografske ploče nije proporcionalno vremenu ekspozicije i stvarni zakon je vrlo složen. Ipak je konstatovano da, ako se radi na vrlo niskim temperaturama, osetljivost ohladjenog

filma se povećava petostruko; linearni zakon je zadovoljen i važi kod viščasovnih ekspozicija a takodje iščezava pojava saturacije usled difuzije u osetljivom sloju. Ova zadnja osobina je naročito važna: pri fotografisanju dalekih galaksija mora se pribeci dugotrajnim ekspozicijama da bi se registrovali njihovi periferni delovi. Centralni delovi, koji su najinteresantniji jer sadrže "jezgro" galaksije, javljaju se tada u obliku osvetljenih površina u kojima se ne može razaznati nikakav detalj.

Ove osobine imaju i moderne emulzije za fotografiju u boji. Pod izvesnim uslovima, boja nebeskog tela je funkcija njegove temperature. Ovo je tačno ne samo za zvezde nego i za mnogobrojne magline u unutrašnjosti Galaksije, osvetljene-difuznom ili reflektovanom svetlošću - susednim zvezdama, koje se tako mogu indentifikovati.

Upotreba fotografskih ploča sa emulzijama definisanim u skladu sa mejdunarodnim konvencijama, kao i upotreba monohromatskih filtera sa precizno definisanom i uskom propusnom trakom, pruža izvanredno sredstvo za klasifikaciju i merenje zračenja koje dolazi sa zvezda. Najčešće se vrši fotografisanje u šest boja: ultraljubičastoj, ljubičastoj, plavoj, zelenoj, crvenoj i infracrvenoj. Merenjem zvezdanih veličina na fotografskim pločama posle prolaska svetlosti zvezde kroz šest navedenih filtera može se za svaku zvezdu odrediti kriva raspodele primeljene energije u funkciji talasne dužine. Tako dobijene krive karakterišu ne samo spektralni tip zvezde no i njenu klasu sjaja: zvezda patuljak, džin, superdžin itd. Konstantuje se da su, za isti spektralni tip, džinovi mnogo bogatiji u infracrvenom, a patuljci u ultraljubičastom.

5.3 Bolometri-toplotni senzori zračenja

Sastoje se od otpornika oblikovanih u vidu tanke pločice koja pod dejstvom toplotnog zračenja menja temperaturu a time i otpornost koja se lako meri. Takodje se grade i na principu termoparova, pri čemu se radi povećanja osetljivosti koriste baterije od 10-20 termoparova. Aktivni krajevi termoprava se pričvršćuju

na zacrnjenu pločicu koja je izložena zračenju, dok su referentni spojevi zaklonjeni od zračenja i služe za kompenzaciju promena temperature okoline. Toplotni senzori se kao apsorberi ponašaju slučno crnom telu u najširem rasponu talasnih dužina, počev od vidljive oblasti, pa do preko $1000 \mu\text{m}$. Konstantna spektralna osetljivost bolometra predstavlja prednost u poredjenju sa promenljivom spektralnom osetljivošću poluprovodnika, ali zato im je osetljivost dosta manja od osetljivosti poluprovodničkih pretvarača u njihovom radnom opsegu talasnih dužina.

Otporni bolometri mogu biti od metalnih otpornika ili termistora. Obično se u kućištu nalaze dva senzora, od kojih je jedan aktivni to jest izložen je zračenju a drugi je zaklonjen i služi za kompenzaciju temperature okoline. Otpornost im je velika i na sobnoj temperaturi je reda od $1 - 3 \text{ M}\Omega$, pa napon napajanja može biti visok (iznad 100 V). Pri merenju toplotnog zračenja bolje je koristiti naizmenični režim rada nego jednosmerni, jer se pojačanje signala dalje vrši pomoću naizmeničnih pojačavača koji su po pravilu stabilniji od jednosmeranih.

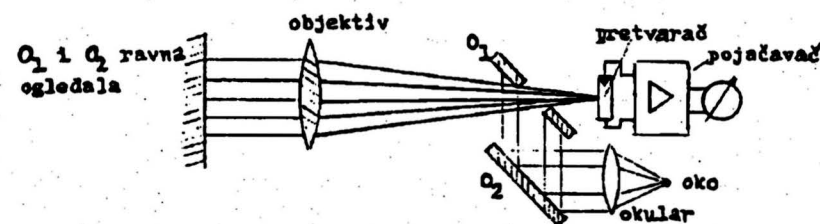
Druga vrsta bolometara - metalni bolometri - su napravljeni od filma debljine desetak μm naparenog na podlozi od kvarca sa relativno velikom površinom od par mm^2 . Tipične otpornosti iznose oko $100 \text{ }\Omega$. Vremenska konstanta je oko 1 ms , dok ranije spomenuti imaju vremensku konstantu oko 30 do 40 milisekundi, ali znatno veću osetljivost od bolometara na podlozi.

Jedan od kriteriuma za vrednovanje karakteristika bolometara je prag osetljivosti koji predstavlja minimalnu snagu zračenja koja se pri datim uslovima rada može detektovati. Prag osetljivosti se definiše kao snaga (u naizmeničnom režimu rada) pri kojoj je korisni napon jednak efektivnoj vrednosti napona šuma. Osetljivost radiacionih senzora karakteriše i detektivnost $D = S/P_s (\text{m Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1})$, gde je S površina senzora a P_s je snaga ekvivalentnog šuma koji je srazmeran kvadratnom korenu površine. Interesantno je zapaziti da je detektivnost nezavisna od učestanosti. Kvalitetni senzori imaju veću detektivnost.

Termistorski bolometar ima prag osetljivosti $2 \cdot 10^{-10} \text{ (W)}$ a detektivnost $1,95 \cdot 10^4$ pri 10 Hz dok bolometar sa baterijom ter-

moparova ima prag osetljivosti $(0,7-2) 10^{-11} \text{ (W)}$ a detektivnosti $1,410^7$ ali zato vremensku konstantu od $5-300 \text{ ms}$ u odnosu $1,5-30$ kod termistorskih bolometara.

Osnovni delovi bolometarskih uređaja su optički sistem, radijacioni senzor i merni lanac za obradu i indikaciju dobijenog električnog signala. Materijal sočiva optičkih sistema upotrebljenih u bolometarskim uređajima treba da ima što manje slabljenje, tj. što bolju transparentiju u celokupnoj oblasti talasnih dužina u kojoj se emituje značajni deo energije upadnog zračenja. Za talasne dužine veće od $4 \mu\text{m}$ sva su stakla praktično neprovidna. U oblasti srednjeg i dalekog infracrvenog zračenja optički sistemi se najčešće konstruišu primenom ogledala čija optička svojstva ne zavise od talasne dužine toplotnog zračenja, slika 40.



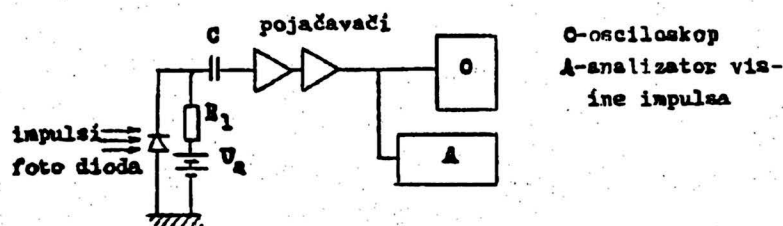
Slika 40:

Velicine merene bolometrom i termoelementom se označavaju m_{rad} (radiometri). Posle izvršene korekcije za apsorpciju i ekstinkciju stavlja se oznaka m_{bol} . Zraci koji prolaze kroz otvor ogledala O_1 padaju na pretvarač dajući izlazni napon do oko 10 mV .

5.4 Fotoćelije, fotomultiplikator, jonizacione komore

Nabrojani elementi mernih uređaja upotrebljavaju se kao detektori zračenja u talasnom opsegu od $10^2 \mu\text{m}$ pa do $10^{-5} \mu\text{m}$, mada te granice nisu oštro označene t.j. zalaze u opsege talasnih dužina koje su niže t.j. više od naznačenih. Rad fotoćelije se zasniva na pojavi nazvanoj fotoelektrični efekat, koji se dešava pri upadu elektromagnetnih talasa određenih talasnih dužina na neke materijale (metale, neke poluprovodnike) koji mogu emitovati elektrone. Ispostavlja se da je broj

emitovanih elektrona proporcionalan upadnom fluksu koji prima katoda. Koeficijent proporcionalnosti menja se sa talasnom dužinom merenog zračenja. Ova osobina omogućava da se fotoćelije koriste za fotometrijska merenja, na slici 41 data je osnovna šema mernog uređaja sa fotoelementom za brojanje čestica.



Slika 41: Pojačavači su implusni sa promenljivim pojačanjem i vremenskim konstantama porasta i opadanja

Današnja tehnologija omogućava izgradnju mozaik elemenata površine i do 400 mm^2 sa silikonskim fotodiodama čiji broj ide i do više hiljada komada a rastojanje izmedju pojedinačnih ćelija je manje od $15 \mu\text{m}$.

Fotomultiplikator je uređaj koji takodje radi na fotoelektričnom efektu u kome se broj elektrona povećava pomoću sekundarne emisije. Fotokatoda je kao i kod obične fotoćelije na koju

pada mereno zračenje da bi se preko tako zvanih dinoda fotoelektroni umnožavali i najzad stigli na anodu, koja je vezana u anodno kolo. Elektroni se umnožavaju zbog toga što je svaka sledeća dinoda sa višim naponom i stvara se takvo polje koje ubrzava elektrone, kako one sa ranijih, tako i prethodne dinode. Za rad su potrebni naponi od 800 do 2000 V. Izlazna struja je, u određenim granicama, srazmerna upadnom fluksu. Struja na anodi može biti reda nekoliko mA, dok tako zvana struja mraka, koja se javlja bez upada svetlosti na katodu iznosi samo nekoliko nA. Radni napon mora da bude veoma stabilan da bi se izbegle greške merenja. Pojačanje struje je reda veličine i do milion puta, zbog toga se danas vrlo često upotrebljava u spektrografima umesto fotografske ploče.

Jonizaciona komora je zatvoren sud u kome se nalazi neki gas i ako se taj gas izloži zračenju odgovarajućih talasnih dužina, nastaje jonizacija gasa t.j. stvaranje jona, koja pod dejstvom električnog polja izazivaju pojavu električne struje koja se može meriti.

Gajger-Milerova brojačka cev takodje spada u jonizacione komore i zbog svojih praktičnih kvaliteta često je u upotrebi. To je staklena cev ispunjena mešavinom plemenitog gasa, alkoholnih i halogenih para. U unutrašnjosti su dve elektrode, jedna je postavljena uzduž ose staklene cevi i ona je pozitivno naelektrisana dok je druga, cilindrično metalna obloga, koja je negativna. Elektrode brojača su pod naponom od oko 1200 V, neophodan za udarnu jonizaciju. Uz dodatne elemente elektronike ovim brojačem se mogu brojati beta i alfa čestice a takodje se mogu registrovati rendgenski i gama zraci.

5.5 Scintilacioni brojač

Ovaj brojač obuhvata talasne dužine $10^{-5} \mu\text{m}$ do $10^{-8} \mu\text{m}$ i time pokriva ceo opseg gama zračenja. Ovaj detektor zračenja je napravljen od fluorescirajućeg materijala koji pri sudaru sa iks ili gama zracima emituje male bljeskove svetlosti. Efekt scintilacije odgovara pojavi fluorescencije. Scintilacioni brojač se u prin-

cipu gradi zajedno sa fotomultiplikatorom. Scintilacioni kristal se postavi pred fotokatodu fotomultiplikatora i svetlosni bljeskovi izbijaju elektrone iz fotokode. Na anodnom otporu fotomultiplikatora nastaju naponski impulsi koji se mogu dalje obradivati prema želji.

5.6 Registratori

To su uređaji koji u mernom lancu fizičkih veličina čine završni deo na kojima se očitavaju krajnje vrednosti izmerenih veličina. Registratori mogu biti analogni i digitalni. U registratore spadaju merači napona-voltmetri, struja-ampermetri, učestanosti-frekvencmetri, zatim galvanometri instrumenti velikih osetljivosti kojima se mere vrlo male struje, mali električni naponi i male količine elektriciteta. Registratori - XY pisači omogućavaju prijem podataka-rezultata merenja koji se mogu predstaviti u obliku grafika. Za sve registratore bez obzira na njihov tehnološki razvoj i stepen usavršenosti izvodjenja potrebno je i neophodno pridržavati se nekoliko sledećih pravila:

- ako su merenja dugotrajna, više dana ili nedelja, važno je ceo merni lanac ostaviti uključen neprekidno da se postignuti, stabilni temperaturni ambijent ne menja, tako da fluktuacija temperature ne utiče na izmerene veličine.
- svi merni uređaji a naročito regulator moraju korektno da budu uzemljeni, po mogućstvu u jednu zajedničku tačku.
- izlazni stepen iz mernog lanca t.j. njegov izlaz mora da bude apsolutno prilagodjen ulaznom stepenu regulatora. Znači, izlazna impedanca mora biti tačno prilagodjena ulaznoj impedanci regulatora, u protivnom mogu se očekivati veliki gubitci i netačnost rezultata.
- pri postavljanju regulatora na merno mesto obratiti pažnju da se ne nalazi u jakom magnetnom ili električnom polju jer isti takodje mogu prouzrokovati razne smetnje.

- ako je u merni lanac uključen i računar i pri tom se uspostavi da su rastojanja izmedju mernih instrumenata i računara veća od par desetina metara potrebno je obezbediti interfejs za prenos podataka na dugačka rastojanja.

Potrebno je napomenuti da ovih nekoliko gornjih pravila ili sugestija važe bez obzira na sadašnji ili budući tehnološki razvoj instrumenata.

6 Primena računara

Postoje dva osnovna načina za upotrebu digitalnih računara. Na koji način će se upotrebiti zavisi najviše od toga kako će se podaci potrebni za upravljanje, koji dolaze spolja unositi u računar, tj. kako će se gotov rezultat prezentirati korisnicima. Korisnici skupljene podatke unose u računar i posle obrade služe se dobivenim rezultatima. Ovakav način rada se zove of-lajn. Za ovakav način rada se uglavnom koriste digitalni gotovi sistemi koji su već snabdeveni sa svim potrebnim komponentama. Ovo podrazumeva da moraju imati spoljne jedinice tzv. terminale. Ove jedinice služe za unošenje podataka u računar kao i za pokazivanje rezultata. Ovakav način rada se najčešće primenjuje kod velikih računarskih sistema.

Drugi način rada se zove on-lajn i u ovom slučaju podaci dolaze direktno u računar bez posredstva čoveka, sa mesta gde se generišu u obliku električnih impulsa po električnim vodovima i zato se ovaj način naziv on-lajn. Pošto je prenos podataka pomoću električnih impulsa veoma brz, kaže se da se program i prenos podataka odvija u realnom vremenu - real time. Ovaj način rada je danas karakterističan za upotrebu mikro računara. Isti su zbog svojih prednosti vrlo upotrebljivi za upravljanje različitim procesima u šta se može uračunati i njihova upotreba i u astronomiji tj. u kontroli, praćenju posmatranja i obradi podataka. Kod ovih računara tretiranje perifernih jedinica je potpuno ravnopravno sa unutrašnjim, t.j. tretiranje spoljnih jedinica čije su adrese uključene u adresno polje računara bez obzira na to da li je po sredi jedna lokacija memorije koja samo očitava (ROM) ili RAM ili jedinica povezana sa nekim spoljnim procesom.

6.1 Način povezivanja računara sa procesom

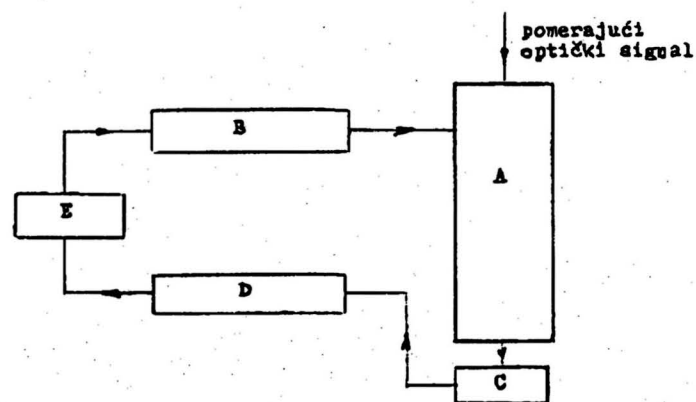
Najpre treba razraditi odgovarajuće upravljačke, kontrolne ili merne algoritme kojima se na odgovarajući način rešava postavljeni zadatak. Zatim se taj algoritam unosi u računar pomoću programa napravljenih upotrebom nekog programskog

jezika. Medjutim, osim programa za rad u datom procesu moraju postojati i odgovarajući uređaji koji povezuju računar sa odvijajućim programom. Od specifičnosti procesa zavise i ti dodatni uređaji i njihove karakteristike i zato se ti sklopovi u mnogim pojedinostima mogu veoma razlikovati. Oni se mogu podeliti u dve osnovne grupe: senzore (merne pretvarače) i izvršne organe. Parametri koje primaju senzori i pretvaraju ih - obično - u analogne električne signale (struju ili napon) zavise od vrste kontrole i mogu biti razne fizičke veličine: temperatura, ugao, pritisak, fluks svetlosti, zračenje (radioaktivno) itd. Broj parametara koji se uzima pri nekoj kontroli može biti veći broj uz odgovarajući broj senzora čiji izlazi moraju biti pretvoreni u digitalne impulse i tek onda se unose u računar. Doduše postoji mogućnost, iako manja da senzori daju neke parametre i direktno u digitalnom obliku.

Računar radi vrlo velikom brzinom i to mu omogućava pristup velikog broja ulaznih veličina koje se opet sa druge strane ne menjaju tako brzo (sem u specijalnim slučajevima). Na primer, neka je ulaznim mestima u proseku potreban program od 75 instrukcija, a da je digitalnom računaru potrebno po dve mikrosekunde za izvodjenje jedne instrukcije, tada bi računar utrošio na jednom kontrolnom mestu 150 mikrosekundi, a to znači da bi računar svake sekunde mogao poslužiti preko 6500 različitih mernih mesta ako bi radio samo taj posao. Mnoge se fizičke veličine ne menjaju tako brzo (temperatura) tako da ih nije potrebno obradivati svake sekunde. Ovo su dovoljni razlozi za primenu digitalnih računara za njihovu primenu u kontroli i praćenju raznih fizičkih veličina.

Uobičajeni lanac sa pratećim uređajima za izvodjenje neke kontrole više fizičkih veličina ima obično sledeće uređaje: senzore sa digitalnim ili analognim izlazom, digitalni i analogni multiplekser, analogno digitalni pretvarač, interfejs za ulaz podataka, računar, ovo je deo ulaznog lanca. Izlazni lanac se sastoji iz: interfejsa za izlaz podataka, digitalno analogni pretvarač, demultiplekser, prilagodjenje izlaznih podataka izvršnim organima, izvršni organi koji deluje na proces i na kraju uređaji za

prikazivanje podataka (monitor, štampač itd). Potrebno je reći nešto o uređaju koji se zove interfejs, odnosno medjusklop. Njegov je zadatak da uskladi rad između dve različite jedinice koje normalno ne bi mogle da se spoje između sebe. Iz ovog proizilazi da upravljanje tj. kontrola može biti bilo kakva i da se može uzeti ma koji digitalni računar. Iz ovog razloga i interfejsi moraju biti specifični za svaki određeni posao. U stvari, specifičnosti konkretnog upravljanja tj. kontrole se moraju prilagoditi ili uređajima u lancu računara ili programom. Na slici 42 je data blok šema za automatsko upravljanje teleskopa.



Slika 42:

- A - teleskop, koji skuplja svetlosne signale koji se iz nekih uzroka pomeraju, na primer, atmosferska refrakcija, geometrijska deformacija instrumenta itd.
- B - deo računarskog lanca koji vrši promenu koordinata.
- C - Uredjaj koji zamenjuje oko posmatrača u kome se nalaze pojačavači sa fotomultiplikatorom.
- D - deo računarskog lanca u kome se nalazi interfejs za ulaz u motor, a koji vrši izračunavanje i sredjivanje (korekciju) dobijenih signala iz prethodnog stepena.

E - motor, koji preko pojačavača snage vrši korekciju koordinata.

DODATAK: Medjunarodni sistem jedinica (jedinice SI)

Nastao je kao posledica potrebne direktne medjunarodne saradnje tehničara, fizičara, meteorologa i drugih stručnjaka. Medjunarodnim (internacionalnim) sistemom jedinica odabrano je za sve grane nauke osnovnih jedinica iz kojih mogu da se izvedu ostale. Pri tome su za osnovne fizičke veličine odnosno jedinice usvojene sledeće:

- za dužinu metar (m)
- za masu kilogram (kg)
- za vreme sekunda (s)
- za jačinu električne struje amper (A)
- za temperaturu kelvin (K)
- za jačinu svetlosti kandela (cd)
- za količinu gradiva (materije) mol (mol).

Ostale jedinice su izvedene iz osnovnih, na osnovu odgovarajućih fizičkih zakona i definicija.

Ovaj sistem jedinica skraćeno se zove: m-kg-s ili SI.

Razlika u odnosu na tehnički sistem je jedinica za silu, koja je izvedena i Njutnovog zakona $F = ma$. Ona iznosi 1 kg m/s^2 i naziva se njutn (N). Prednost ove jedinice je da je izvedena od mase 1 kg i ubrzanja m/s^2 , u tzv. koherentnom sistemu, a veća je od sitne jedinice, din. U tehničkom sistemu, sila od 1 kp definisana je kao sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje približno $9,81 \text{ m/s}^2$, pa imamo:

$$1 \text{ kp} = 9,81 \text{ kgm/s}^2 = 9,81 \text{ N}$$

$$1 \text{ N} = 1/9,81 \text{ kp}$$

Osnovne jedinice

fizička veličina	naziv	oznaka	naziv	oznaka	definicija jedinice
1. Dužina:	metar	m	mikrometar	μm	$1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$
			nanometar	nm	$1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$
2. Masa:	kilogram	kg	miligram	mg	$1\text{mg}=10^{-6}\text{kg}$
			mikrogram	μg	$1\mu\text{g}=10^{-9}\text{kg}$
3. Vreme: (interval):	sekunda	s	mikrosek.	μs	$1\mu\text{s}=10^{-6}\text{s}$
			nanosek.	ns	$1\text{ns}=10^{-9}\text{s}$
4. Jačina električne struje:	amper	A	miliamper	mA	$1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$
			mikroamper	μA	$1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$
			nanoamper	nA	$1\text{nA}=10^{-9}\text{A}$
5. Temperatura:	kelvin	K			
6. Jačina svetlosti:	kandela	cd			
7. Količina gradiva (materije):	mol	mol	milimol	mmol	$1\text{mmol}=10^{-3}\text{mol}$
			mikromol	μmol	$1\mu\text{mol}=10^{-6}\text{mol}$

Izvedene i ostale jedinice SI sistema

fizička veličina	naziv	oznaka	naziv	oznaka	definicija jedinice
1. Ugao u ravni:	radijan	rad			
2. Prostorni ugao:	steradian	sr			
3. Frekvencija učestanost:	herc	Hz	gigaherc	1GHz	$1\text{GHz}=10^9\text{Hz}$
			megaherc	1MHz	$1\text{MHz}=10^6\text{Hz}$
			kiloherc	1KHz	$1\text{KHz}=10^3\text{Hz}$
4. Zapreminska masa, gustina:	kilogram po kubnom metru	kg m^{-3}			
5. Maseni protok:	kilogram u sekundi	kg s^{-1}			
6. Zapreminski protok:	kubni metar u sekundi	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$			
7. Sila:	njutn	N	$1\text{N} = \frac{1\text{kg } 1\text{m}}{\text{s}^2}$		$1\text{MN}=10^6\text{N}$ (mega)N $1\text{daN}=10\text{N}$ (deka)N $1\text{mN}=10^{-3}\text{N}$ (mili)N
8. Pritisak, napon u mehanici, modul elastičnosti, modul smicanja:	paskal njutn po metru kvadratnom	Pa	$1\text{Pa} = \frac{1\text{N}}{1\text{m}^2}$	gigapaskal megapaskal kilopaskal milipaskal	$1\text{GPa}=10^9\text{Pa}$ $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ $1\text{KPa}=10^3\text{Pa}$ $1\text{mPa}=10^{-3}\text{Pa}$
9. Dinamička viskoznost:	paskalsekunda	Pas	$1\text{Pas} = \frac{1\text{Pa } 1\text{m}}{\text{s}}$		
10. Energija, rad količina toplote:	djul, (vatsekunda)	J, Ws	$1\text{J}=1\text{N } 1\text{m}$ $1\text{Ws}=1\text{J}$		
11. Snaga, energetski fluks, termički fluks	vat	W	$1\text{W} = \frac{1\text{J}}{1\text{s}}$	gigavat megavat kilovat milivat mikrovat	$1\text{GW}=10^9\text{W}$ $1\text{MW}=10^6\text{W}$ $1\text{KW}=10^3\text{W}$ $1\text{mW}=10^{-3}\text{W}$ $1\mu\text{W}=10^{-6}\text{W}$
12. Entropija termički kapacitet:	djul po kelvinu	J/K	$1\text{J/K} = \frac{1\text{J}}{1\text{K}}$		
13. Specifična toplota	djul po kilogram kelvinu	J/kgK	$1\text{J/K} = \frac{1\text{J}}{1\text{kg } 1\text{K}}$		
14. Naelektrisanje količina elektrisanja	kulon	C	$1\text{C} = 1\text{A}$ $1\text{s} = 1\text{As}$	μc nc	$1\mu\text{C} = 10^{-6}\text{C}$ (mikro) C $1\text{nC} = 10^{-9}\text{C}$ (nano) C

fizička veličina	naziv	oznaka	naziv	oznaka	definicija jedinice
15. Električni napon, elektromotorna sila, električni potencijal	volt	V	$1V = 1W/1A$	MV KV mV μV	$1MV = 10^6V$ $1KV = 10^3V$ $1mV = 10^{-3}V$ $1\mu V = 10^{-6}V$
16. Električna otpornost	om	Ω			
17. Električna provodnost	simens	S			
18. Električna kapacitivnost	farad	F	$1F = \frac{1C}{1V}$	μF nF	$1\mu F = 10^{-6}$ (mikro)F $1nF = 10^{-9}$ (nano)F $1pF = 10^{-12}$ (piko)F
19. Induktivnost	henri	H	$1H = \frac{1V}{1A/s}$	mH	$1mH = 10^{-3}$ (mili)H
20. Magnetna indukcija	tesla	T	$1T = \frac{1N}{1m \cdot 1A}$		
21. Magnetni fluks	veber	Wb	$1Wb = 1T \cdot 1m^2 = 1Vs$		
22. Luminacija	kandela po kvadratnom metru	$cd \cdot m^{-2}$	$1cd/m^2 = \frac{1cd}{1m^2}$		
23. Svetlosni fluks	lumen	lm	$1lm = 1cd \cdot 1sr$		
24. Osvetljenost	luks	lx	$1lx = \frac{1lm}{1m^2}$		
25. Aktivnost radioaktivnog izvora	bekerel	Bq	$1Bq = \frac{1}{1s}$		
26. Apsorbovana doza	grej	Gy	$1Gy = \frac{1J}{1kg}$		
27. Molarna masa	kilogram po molu	$kg \cdot mol^{-1}$	$1kg \cdot mol^{-1} = \frac{1kg}{1mol}$		
28. Koncentracija materije	mol po kubnom metru	$\frac{mol}{m^3}$	$1mol/m^3 = \frac{1mol}{1m^3}$		
29. Površinski napon	njutn po metru	N/m			
30. Gustina termičkog fluksa	vat po kvadratnom metru	W/m^2			
31. Permeabilnost	henri po metru	H/m			
32. Molarna energija	djul po molu	J/mol			
33. Molarna entropija	djul po molu kelvinu	J/mol K			

Neke jedinice koje nisu uključene u SI.

fizička veličina	naziv	oznaka	definicija jedinice
1. Dužina	angstrom milimikron mikron	A m μ μ	$1A = 10^{-10}m$ $1m\mu = 10^{-9}m$ $1\mu = 10^{-6}m$
2. Ugao	stepen minut sekunda	° ' "	$1^\circ = \frac{\pi}{180} = 0,01745329 \text{ rad}$ $1' = \frac{\pi}{10800} \text{ rad} = 2,908882 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ $1'' = \frac{\pi}{648000} \text{ rad} = 4,848137 \cdot 10^{-6}$
3. Frekvencija	ciklus u sekundi	cps	$1cps = 1Hz$
4. Masa	atomska jedinica mase	amu	$1amu = \frac{1}{16}m(^{16}O) = 1,6600 \cdot 10^{-27}kg$
5. Sila	din kilogram-sila kilopond	dyn	$1dyn = 10^{-5}N$ $1kp = 9,80665 N$
6. Pritisak	bar (fizička) atmosfera milimetar živinog stuba	bar atm mmHg	$bar = 10^5 Pa$ $1atm = 101325 Pa$ $1mmHg = 133,322 Pa$
7. Rad energija	erg kilopondmetar kilovat-čas	erg kpm KWh	$1erg = 10^{-7}J$ $1kpm = 9,80665 J$ $1KWh = 3,610^6 J$
8. Snaga	konjska snaga	KS	$1KS = 735,499W$
9. Magnetski tok	maksvel	Mx	$1Mx = 10^{-8}Wb$
10. Gustoća magnetskog polja	gaus	G	$1G = 10^{-4}T$
11. Entropija	klauzius	Cl	$1Cl = 4,184 J K^{-1}$
12. Ekspozicija	rentgen	R	$1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C kg^{-1}$
13. Radio aktivnost	kiri radeford	Ci rd	$1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$ $1rd = 10^6 Bq$