

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Dario Hrupec

**Doprinos razvoju teleskopa MAGIC
za detekciju gama zračenja
iz kompaktnih kozmičkih objekata**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 1997.

Zahvaljujem dr. Danielu Ferencu (Institut Ruđer Bošković, Zagreb)
na brojnim savjetima i pomoći pri izradi rada te
dr. Ecartu Lorenzu (Max–Planck–Institute für Physik, München)
na ustupljenom softveru.

SADRŽAJ

1. UVOD	4
2. IZVORI KOZMIČKOG GAMA ZRAČENJA	7
3. PLJUSKOVI ČESTICA U ATMOSFERI	10
3.1. ČERENKOVLJEVO ZRAČENJE	13
4. EKSPERIMENT MAGIC	16
5. DETEKTORI OPTIČKOG ZRAČENJA	19
5.1. FOTOMULTIPLIKATORI S DINODAMA	19
5.2. HIBRIDNI FOTOMULTIPLIKATORI	22
6. IONSKA OPTIKA	23
6.1. SIMULACIJSKI PROGRAM SIMION 3D 6.0	24
7. NOVO RJEŠENJE HIBRIDNOG FOTOMULTIPLIKATORA	25
8. ZAKLJUČAK	41
9. LITERATURA	42
10. SAŽETAK	43

1. UVOD

Znanje o svemiru temelji se na činjenicama do kojih se uglavnom došlo istraživanjem zračenja iz svemira. To zračenje čine nabijene i neutralne čestice. Nabijene čestice skreću u elektromagnetskom polju pa se ne mogu povezati s izvorom. Pretpostavlja se da te čestice imaju ograničen doseg i da većinom potječu iz naše galaksije. Neutralne čestice šire se pravocrtno i mogu se povezati s izvorom pa su stoga zanimljivije za istraživanje kozmičkih objekata. Čine ih neutroni, neutritri i fotoni. Slobodni neutroni nisu stabilni pa im je i domet ograničen. Neutritri se teško detektiraju zbog izuzetno slabog međudjelovanja s materijom, no smatraju se perspektivnim izvorom zračenja jer mogu donijeti informacije iz najvećih dubina svemira. Od posebne su važnosti fotoni, odnosno elektromagnetsko zračenje, spektar kojih se proteže od 10^{-10} eV (radio valovi valnih duljina više desetaka kilometara) do vjerojatno čak 10^{20} eV (pri čemu imaju energiju kao teniska loptica u letu). Svako područje elektromagnetskog spektra (radio valovi, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, x zračenje, γ zračenje) donijelo je nova znanja o fizičkim zakonitostima i procesima u svemiru.

Prva opažanja i mjerenja u vidljivom dijelu spektra dovela su u XVI. stoljeću do otkrića zakona gibanja čime su postavljeni temelji klasične fizike iz koje se kasnije razvila kvantna fizika i teorija relativnosti. Istraživanje područja radio valova iz svemira rezultirala su otkrićem pulsara (brzotirajućih neutronske zvijezde) i kvazara (QUAsi–Stelar RAdio object). Kvazari u radio spektru zrače više od 1000 puta snažnije nego naša galaksija (luminozitet se procijenjuje na 10^{29} W/Hz kod frekvencije od 178 MHz) [Du97]. U mikrovalnom području otkriveno je pozadinsko zračenje (cosmic background radiation) od 3 K što je pridonijelo stvaranju novih spoznaja o nastanku svemira. U gama području otkriveno je mnogo kompaktnih kozmičkih objekata, izvora visokoenergijskog gama zračenja, koji se poklapaju s poznatim objektima otkrivenim u drugim dijelovima spektra. Gama astronomija otkrila je i objekte koji nisu katalogizirani, jer u drugim dijelovima spektra dosad nisu opaženi. Valja spomenuti i otkriće iznimno intenzivnih provala gama zračenja (gama ray burst) koje se povremeno javljaju iz raznih dijelova neba i predstavljaju veliku zagonetku u astrofizici.

Gotovo cijeli spektar kozmičkog gama zračenja danas je dostupan mjerenjima i djelomično je istražen, osim područja od 20 do 300 GeV. Područje gama zračenja koje se proteže od 0.5 MeV do vjerojatno čak 10^{20} eV proučavano je detektorima na satelitima te instrumentima na površini Zemlje. Atmosfera nije propusna za gama zračenje pa su opsežnija istraživanja počela tek pojavom satelita. No, sateliti imaju gornji energijski prag od 20 GeV jer su im dimenzije ograničene pa je detekcijska površina relativno mala (oko 0.1 m^2).

Tok gama zračenja iz svemira naglo pada s energijom (približno kao $E^{-2.7}$) pa je tako za visoke energije i malu detekcijsku površinu vjerojatnost detekcije minimalna.

Zbog nepropusnosti atmosfere i ograničenja satelita valjalo je razviti metode detekcije gama zračenja na samoj površini Zemlje. Poznato je da visokoenergijska čestica pri prolazu kroz tvar (u ovom slučaju atmosferu) stvara pljusak novih čestica. Pljusak čestica u atmosferi (engl. *air shower*, njem. *luftschaue*) koristi se kao sredstvo, a atmosfera iznad teleskopa dio je detektora. Poznavanje fizike pljuskova omogućuje mjerenje visokoenergijskog kozmičkog zračenja na površini Zemlje. Kao rezultat znanja o osnovnim procesima u pljuskovima (bremsstrahlung, tvorba parova, Čerenkovljevo zračenje, nuklearna međudjelovanja, ionizacija) slijedi način razlikovanja gama pljuskova (koji čine oko 1% svih pljuskova) od hadronskih pljuskova.

Kozmičko zračenje vrlo visokih energija (preko 10 TeV) stvara veliki pljusak pa nabijene čestice dopiru sve do površine Zemlje gdje se mogu detektirati. Pljuskovi manjih energija zaustavljaju se visoko u atmosferi (npr. pljusak u kojem primarna čestica ima 20 GeV zaustavlja se na oko 8 km nadmorske visine) tako da do površine Zemlje dopiru Čerenkovljeva i fluorescentna svjetlost te dio miona. Čerenkovljeva svjetlost nastaje prolaskom nabijene čestice kroz tvar kad je brzina čestice veća od brzine svjetlosti u tvari. Ona ima dobro definiran smjer Čerenkovljevim kutom. Za razliku od toga fluorescentna svjetlost nastaje pobudom molekula u zraku pa je izotropna te ne donosi toliko informacija kao Čerenkovljeva svjetlost. Primarne gama zrake manje energije stvaraju u atmosferskom pljasku i manje čestica pa je za detekciju takvog pljaska potrebna veća efikasnost detekcije Čerenkovjevih fotona. Dosadašnji detektori gama zračenja smješteni na Zemlji imaju najniži prag od oko 300 GeV. Da bi se istražio još neistraženi energijski interval gama zračenja od 20 do 300 GeV potrebno je:

- (1) povećati *efektivnu detekcijsku površinu* za detekciju Čerenkovjevih fotona;
- (2) poboljšati *kvalitetu detekcije Čerenkovjevih fotona*: detektor mora imati visoku kvantnu efikasnost, mali šum i odlično vremensko razlučivanje koje poboljšava odnos signal / šum.

Novi međunarodni eksperiment MAGIC, kojega je grupa s IRB-a suosnivač, zamišljen je kao odgovor na sve te zahtjeve. Osnovni mu je zadatak istražiti energijski interval kozmičkog gama zračenja od 20 do 300 GeV. Velika efektivna površina za detekciju Čerenkovljenih fotona u MAGIC eksperimentu dobit će se uporabom teleskopa promjera 17 m, a visoka kvantna efikasnost uporabom posebno prilagođenih hibridnih fotomultiplikatora koji predstavljaju novo tehnološko rješenje detektora optičkog zračenja. Fotomultiplikatori s dinodama nisu dovoljno dobri zbog mnoštva dinoda koje osim umnažanja elektrona umnažaju i statističke fluktuacije. Zbog toga fotomultiplikator s dinodama nije dovoljno osjetljiv da bi utvrdio detekciju pojedinačnog fotona (kvantna efikasnost i omjer signal / šum su premali).

Hibridni fotomultiplikator sadrži vakumsku cijev u kojoj se elektroni izbačeni iz fotokatode ubrzavaju (princip fotomultiplikatora s dinodama) te sustavom elektrostatskih leća fokusiraju na poluvodičku fotodiodu male površine gdje stvaraju mnoštvo elektron–šupljuna parova (princip poluvodičkog detektora).

Problem koji se javlja kod postojećih izvedbi hibridnih fotomultiplikatora, unatoč visokom vakuumu (dva reda veličine većem od vakuuma u fotomultiplikatoru s dinodama), prisustvo je pozitivnih iona koje elektroni visoke energije izbijaju iz fotodiode i okolnog materijala. Ti se pozitivni ioni ubrzavaju prema fotokatodi i udaraju u nju. Tako nastaju naknadni pulsevi (after pulsing) tj. unutrašnji šum detektora što bitno otežava motrenje Čerenkovjevog zračenja iz atmosfere. Osim toga nastaju i trajna oštećenja pa se fotokatoda troši. Stoga je problem pozitivnih iona potrebno riješiti. Tvrtka Intevac patentirala je otklonsku pločicu (finger deflector) kojom se pozitivni ioni otklanjaju. Međutim, pozitivni ioni svejedno se ubrzavaju do visokih energija te dio njih udara u fotokatodu, a ostatak u elektrode i stijenke cijevi pa problem u biti nije riješen.

Glavni je zadatak ovog rada pronaći kvalitativno novo rješenje problema pozitivnih iona. Ono je pronađeno u obliku potencijalne barijere koja je stavljena ispred fotodiode tako da onemogućuje prolaz pozitivnih iona s fotodiode prema fotokatodi. Barijera je ostvarena umetanjem pozitivne elektrode u postojeću ionsku optiku Intevacovog hibridnog fotomultiplikatora. Osnovna prednost pred Intevacovim dizajnom je ta što se pozitivnim ionima uopće ne dopušta ubrzavanje do visokih energija, pa nema opasnosti od naknadnih pulseva i oštećenja fotokatode.

Problem dizajna ionske optike fotomultiplikatora suviše je zamršen da bi se rješenje moglo analitički proračunati. Zato je korišten simulacijski program SIMION 3D 6.0 [Da96]. To je program za prostorno modeliranje

problema ionske optike.

Ovako modificirani hibridni fotomultiplikatori bit će smješteni u kameru teleskopa MAGIC, a možda će se koristiti i u eksperimentu ALICE u CERN-u. Autor radi s grupom za studiju tvari u ekstremnim uvjetima s IRB-a na daljnjem pojednostavljenju ionske optike hibridnog fotomultiplikatora kako bi se snizila cijena uređaja, zatim na poboljšanju vremenskog razlučivanja te na primjeni ideje potencijalne barijere za rješavanje problema pozitivnih iona kod fotomultiplikatora s dinodama.

Ovaj je rad koncipiran tako da su najprije objašnjeni izvori kozmičkog gama zračenja (*drugo poglavlje*) te pljuskovi čestica u atmosferi i Čerenkovljevo zračenje (*treće poglavlje*). Eksperiment MAGIC predstavljen je u *četvrtom poglavlju*. U *petom poglavlju* govori se o detektorima optičkog zračenja od kojih su detaljnije opisani fotomultiplikatori s dinodama i hibridni fotomultiplikatori. Ionsku optiku objašnjava *šesto poglavlje* koje donosi i opis simulacijskog programa SIMION namijenjenog modeliranju ionske optike. Novi dizajn hibridnog fotomultiplikatora kojim je riješen problem pozitivnih iona predstavljen je u *sedmom poglavlju*.

2. IZVORI KOZMIČKOG GAMA ZRAČENJA

Kozmičke zrake su visokoenergijske čestice koje iz svemira dolijeću na Zemlju i čine dio prirodne radioaktivnosti na Zemlji (ostala prirodna radioaktivnost potječe od radioaktivnih elemenata koji se nalaze u Zemljinoj kori). Otkrivene su još početkom stoljeća izbijanjem elektroskopa izvan područja radioaktivnih elemenata te potvrđene eksperimentima s balonima u atmosferi.

Pod kozmičkim zrakama podrazumijevamo visokoenergijske nabijene čestice i fotone visoke energije (gama zrake). Visokoenergijska gama astronomija, kao dio istraživanja kozmičkog zračenja, dugo je bila bez značajnih događanja i tek se zadnjih desetljeća počela naglo razvijati (s pojavom istraživačkih satelita i brzih računala). Danas se to područje naziva *high energy astroparticle physics* i predstavlja izuzetno zanimljivo i obećavajuće područje u kojem se naročito ističe primarni interes svih fundamentalnih istraživanja – shvaćanje svemira.

Danas je istraženo skoro cijelo poznato područje gama zračenja od 0.5 MeV (gama zraka iz anihilacije elektrona i pozitrona) do vjerojatno čak 10^{20} eV. Neistražen je ostao jedino energijski procjep od 20 do 300 GeV jer su mjerenja bila nedostupna iz tehničkih razloga. Na energijama do 20 GeV opažen je (satelitskim detektorima) veliki broj gama izvora dok je na energijama iznad 300 GeV opaženo (detektorima smještenim na površini Zemlje) tek nekoliko izvora. To ukazuje da se u ovom do sada nepristupačnom dijelu spektra događaju dramatični efekti. Razlog bi mogao biti u prisustvu infracrvenog pozadinskog zračenja koje potječe iz vremena ranog svemira, a međudjeluje s visokoenergijskim gama zračenjem. Mjerenjem kozmičkog gama zračenja u energijskom intervalu od 20 do 300 GeV povezali bi se podaci s nižeg i višeg energijskog područja te dobio potpuni skup kalibriranih podataka. To je neophodno za testiranje fundamentalnih teorija visokoenergijskih procesa formiranja zvijezda i galaksija.

Pretpostavlja se da su izvori kozmičkog gama zračenja kompaktni kozmički objekti, ostaci supernova te vjerojatno anihilacija SUSY čestica i raspadi topoloških defekata.

Pod kompaktnim kozmičkim objektima podrazumijevamo aktivne galaktičke jezgre, pulsare i crne rupe. Zajedničko im je svojstvo ogromna gustoća tvari zbog gravitacijskog sažimanja. Velika masa u malom obujmu stvara snažno gravitacijsko polje koje privlači čestice međuzvezdanog plina. Padajući prema kompaktnom kozmičkom objektu te se čestice jako ubrzaju pa u sudarima oslobađaju veliku energiju zračenjem. Takav se proces zove *akrecija*. Pri akreciji se u zračenje pretvori oko 10% mase mirovanja akrecijskog plina ili 100 puta više nego u nuklearnim reakcijama. Tako su akrecijski sustavi najmoćniji kozmički strojevi, jer imaju najveći poznati koeficijent iskorištenja.

Aktivne galaktičke jezgre

Pretpostavlja se da je u središtu galaksija gustoća materije tako velika da gravitacijska sila sažima tvar u masivnu crnu rupu. Opažanja u radio području npr. ukazuju na supermasivnu crnu rupu mase od 10^7 masa Sunca u središtu galaksije NGC1068 [Be97]. Crna rupa je također akrecijski sustav. Čestice koje padaju prema njoj ubrzavaju se do visokih energija i sudaraju međusobno te nastaju nove čestice i zračenje. Zbog dinamike sustava aktivna galaktička jezgra emitira mlazove gama zračenja duž osi rotacije, dok se akrecijski plin skuplja u ravnini rotacije tvoreći tzv. akrecijski disk. Kvazari (QUAsi–Stelar RADio object) koji su najprije otkriveni u radio području, a poslije i u gama području zapravo su aktivne galaktičke jezgre koje su izuzetno snažni izvori zračenja iz kompaktnog središta [Du97]. Udaljenost aktivnih galaktičkih jezgri mjeri se u stotinama milijuna svjetlosnih godina, a mjerenjem njihovog spektra možemo

saznati kako ti izuzetno snažni visokoenergijski "akceleratori" rade.

Pulsari

Pulsari su neutronske zvijezde koje vrlo brzo rotiraju oko svoje osi (period je reda veličine 1 sekunde). Nastaju gravitacijskim sažimanjem zvijezde koja je potrošila svoje nuklearno gorivo i nema više dovoljan pritisak zračenja koji bi gravitacijsku silu držao u ravnoteži. Gravitacijska sila postaje jača od nuklearne i razbija jezgre atoma pa cijela zvijezda postaje jedna velika jezgra sastavljena od neutrona. Pretpostavlja se da su u središtu uvjeti toliko ekstremni da nastaje kvark–gluon plazma. Zbog zakona sačuvanja momenta impulsa sažimanje vodi na sve bržu rotaciju.

Snažno promjenjivo magnetsko polje, reda veličine 10^9 T, ubrzava nabijene čestice u okolini pulsara do visokih energija pa njihovim sudarima nastaju nove čestice i gama zračenje. Zračenje se emitira u mlazovima duž osi rotacije i sa Zemlje se može opaziti samo kad je os okrenuta prema Zemlji. Zbog brze rotacije pulsara tok zračenja je isprekidan pa se opažaju samo pulsevi. Pulsari su otkriveni u radio–području, a kasnije su opaženi i u drugim dijelovima spektra, ali čini se da u dijelu dostupnog gama spektra pulsari zrače približno kontinuirano.

Ostaci supernova

Nakon eksplozije supernove tvar naglo ekspandira u prostor. Gustoća tvari brzo se smanji pa govorimo o ekspandirajućem plinu kao ostatku supernove. Taj se plin širi u drugi plin u međuzvezdanom prostoru pa nastaju sudari čestica u kojima se emitira gama zračenje. Glavni je proces inverzno Comptomovo raspršenje u kojem visokoenergijski elektron udara u foton male energije te nastaje visokoenergijski foton (gama zraka) i elektron male energije.

Anihilacija SUSY čestica

Gama astronomija može razjasniti i neka pitanja fundamentalne teorije čestica koja predviđa postojanje SUSY čestica (SUper SYmmeric particles) za koje se pretpostavlja da čine tamnu tvar (dark mater). Tamna tvar je tvar koja ima masu i međudjeluje gravitacijskom silom, ali se na drugi način ne opaža. Pretpostavke o tamnoj tvari javile su se stoga što je za objašnjenje nekih opaženih pojava (npr. rotaciju spiralnih galaksija) nedostajala masa. SUSY čestice mogle bi se opaziti pri anihilaciji u kojoj nastaju dvije gama zrake. Mali je udarni presjek za tu pojavu moguće kompenzirati velikom gustoćom tamne tvari. Očekuje se da bi u središtu galaksije tamna tvar bila dovoljno gusta kako bi se mogla opaziti anihilacija SUSY čestica. Jedna gama zraka nastala pri anihilaciji SUSY čestice i antičestice nosila bi po prilici energiju koja odgovara masi SUSY čestice, a procjenjuje se na oko 80 do 500 GeV (što je neostvarivo za današnje akceleratora). No, u spektru kozmičkog zračenja iz središta galaksije mogao bi se pronaći vrh u tom energijskom području.

Raspadi topoloških defekata

Topološki defekti su posljedice spontanog lomljenja simetrije pri ekspanziji i hlađenju svemira. Može se naime dogoditi da u jednom dijelu svemira vakuum poprimi jednu strukturu, a drugom neku drugu ravnopravnu strukturu. Na dodiru tih dvaju vakuuma postoji (ovisno o dimenzionalnosti problema) domenski zid, kozmička struna ili monopol. Takve mogućnosti sasvim prirodno proizlaze iz teorija koje proširuju Standardni Model. Pretpostavlja se da bi moglo doći do raspada takvih struktura, tj. prijelaza na niži nivo vakuuma pri čemu bi se emitiralo gama zračenje.

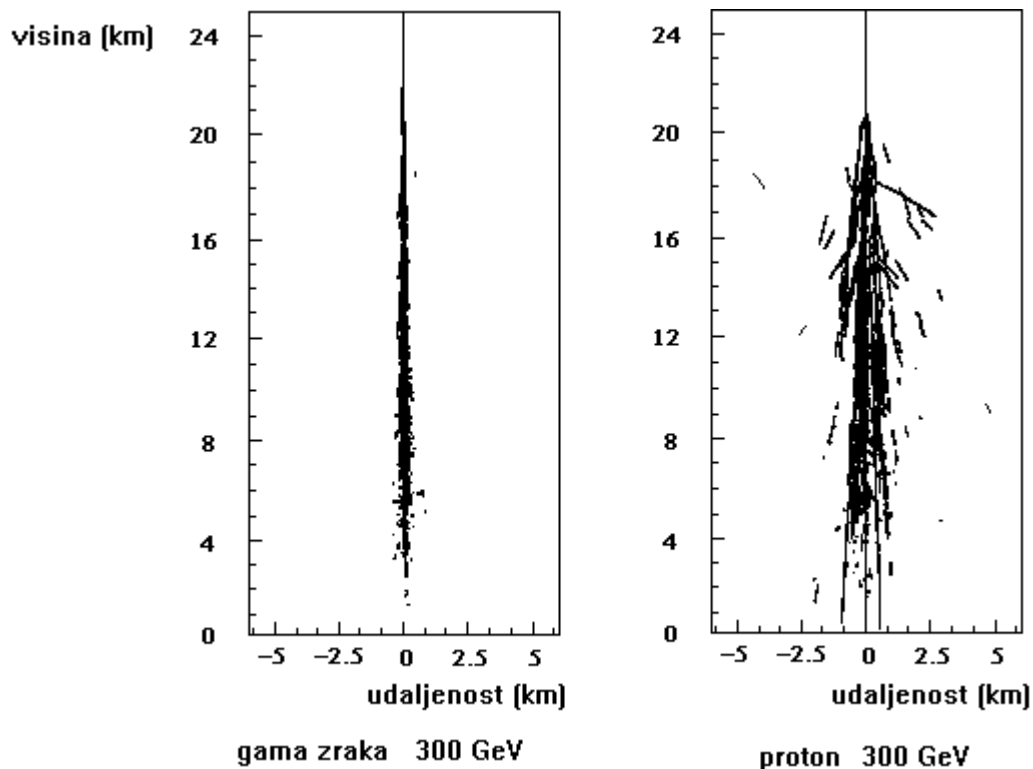
Nepoznati izvori

Svi dosad navedeni izvori kozmičkog gama zračenja proizlaze iz teorija koje su barem dijelom eksperimentalno potvrđene. Otkrivene su međutim i takve pojave kod gama zračenja za koje se o izvoru samo nagađa. Radi se o provalama gama zračenja (gamma ray bursts) koje sateliti uočavaju otprilike jednom dnevno iz različitih područja neba. Za proces u kojem nastaju provale gama zračenja procijenjeno je da se u vremenu od oko jedne minute oslobodi energija veća od 10^{45} J (što odgovara 10^{30} hidrogenskih bombi)!! Preciznim mjerenjem vremenske i energijske ovisnosti provala gama zračenja, koje se planira u eksperimentu MAGIC, moglo bi se puno saznati o toj potpuno neobjašnjenju pojavi koja danas predstavlja veliku zagonetku u astrofizici.

U sljedećem poglavlju polazi se od pljusku čestica u atmosferi kao metode koja omogućuje detekciju kozmičkog gama zračenja iznad 20 GeV.

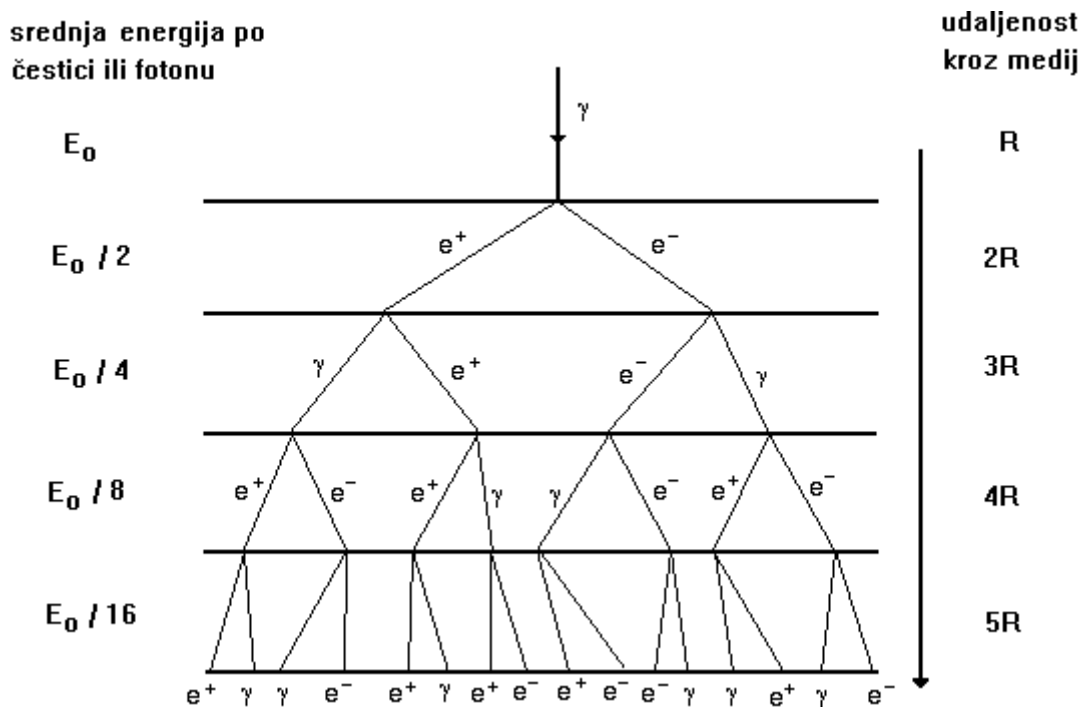
3. PLJUSKOVI ČESTICA U ATMOSFERI

Kozmičko zračenje pri upadu u Zemljinu atmosferu izaziva pljuskove čestica. Razlikujemo gama pljuskove i hadronske pljuskove.



SLIKA 1. Simulacija gama pljuska i hadronskog pljuska čestica u atmosferi. Tragovi nabijenih čestica dobiveni su Monte Carlo simulacijom (programom Corsika 4.50) za upadnu gama zraku od 300 GeV i proton od 300 GeV [Yo96]. Mjerila na apscisi i ordinati su različita. Gama pljusak je za istu energiju uži i manje raspršen od hadronskog pljuska što omogućuje razlikovanje gama pljuskova od hadronskih pljuskova.

Gama pljusak nastaje upadom kozmičke gama zrake u atmosferu. Dominantni procesi u početku su tvorba parova i zakočno zračenje (bremsstrahlung). Tako se umnažaju elektroni, pozitroni i fotoni. Prosječna energija čestice smanjuje se sve dok ionizacija ne postane dominantan proces čime prestaje nastanak novih čestica, a to znači kraj pljuska. No, atmosfera propušta Čerenkovljevu svjetlost koju u njoj stvaraju ultrarelativističke nabijene čestice. Tako se na površini Zemlje može posredno detektirati pljusak koji je počeo i završio visoko u atmosferi. To je posebno važno za VHE (Very High Energy) područje (10 GeV do 100 TeV), jer je energija previsoka za detekciju pomoću instrumenata na satelitima, a preniska da bi uslijedio razvoj pljuska nabijenih čestica koje bi u dovoljnom broju doprle do površine Zemlje.



SLIKA 2. Model čestičnog pljuska u atmosferi izazvanog upadom kozmičke gama zrake [Lo93]. Visokoenergijski foton stvara elektron–pozitron par. Elektron i pozitron bremstrahlungom stvaraju visokoenergijske fotone. Ovi fotoni ponovo stvaraju elektron–pozitron parove itd. Pljusak prestaje kada prosječna energija čestice padne ispod kritične energije E_c . Tvorba parova i bremstrahlung tada više nisu dominantni procesi. Gama pljuskovi čine oko 1% svih pljuskova.

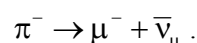
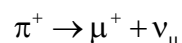
U modelu prikazanom na gornjoj slici E_0 je energija upadne kozmičke gama zrake, a R je veličina vezana interakciju

fotona tj. uz radijacijsku duljinu x_0 . Za broj fotona vrijedi $N = N_0 \cdot e^{\frac{x}{x_0}}$.

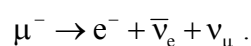
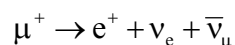
R je udaljenost nakon koje broj fotona padne na polovicu tj. $R = x_0 \cdot \ln 2$. Nakon udaljenosti nR broj čestica (elektrona, pozitrona i fotona) je 2^n , a prosječna energija po čestici je $E_0/2^n$.

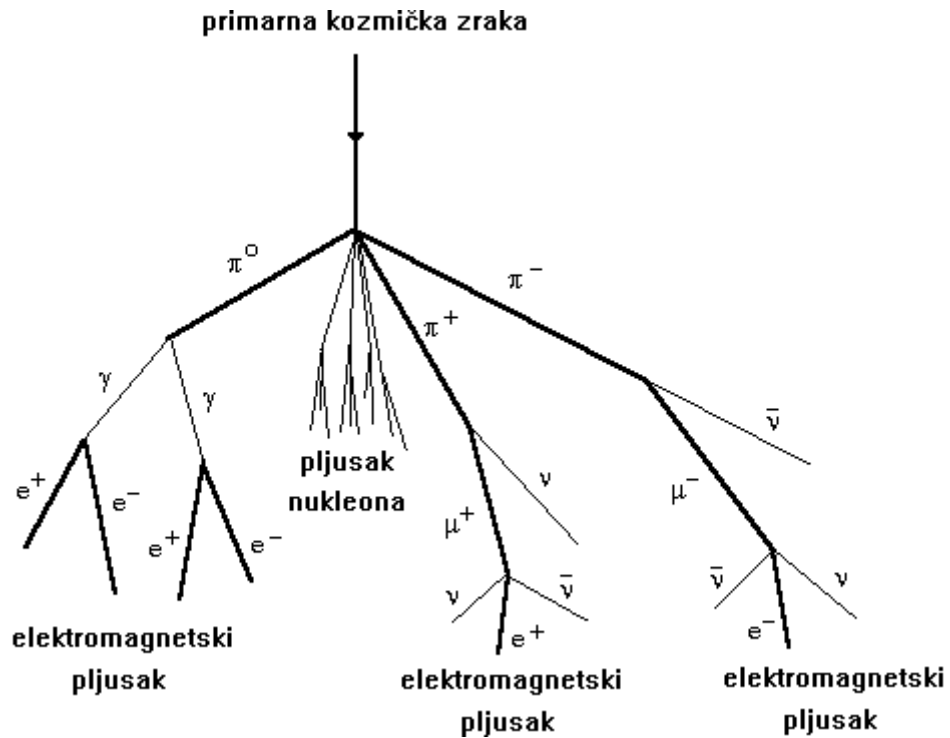
Elektroni i pozitroni čine 2/3, a fotoni 1/3 ukupnog broja čestica u elektromagnetskom pljusk.

Hadronski pljusak nastaje upadom visokoenergijskog kozmičkog hadrona u atmosferu. Uglavnom se radi o protonima, alfa česticama i jezgrama željeza. Zbog hadronskog međudjelovanja nastaje kaskada čestica, najviše piona. Neutralni pioni raspadaju se na dvije gama zrake ($\tau = 1.78 \cdot 10^{-16}$ s). Nabijeni pioni raspadaju se na mione ($\tau = 2.55 \cdot 10^{-8}$ s):



Mioni se dalje raspadaju na elektrone ($\tau = 2.2 \cdot 10^{-6}$ s):





SLIKA 3. Model čestičnog pljuska u atmosferi izazvanog upadom kozmičkog hadrona [Lo93]. Sekundarni nukleoni stvaraju pione dok im energija ne padne ispod ≈ 1 GeV. Neutralni pioni raspadaju se na dvije gama zrake. Nabijeni pioni raspadaju se na mione, a ovi na elektrone. Zbog dilatacije vremena (Lorentzov faktor $\gamma > 20$) mioni mogu stići i do površine Zemlje i čak prodrijeti duboko ispod površine tla. Hadronski pljuskovi čine oko 99% svih pljuskova.

Analize pljuskova čestica u atmosferi temelje se na Monte Carlo simulacijama (npr. simulacijskim programom Corsika 4.50) u koje su uključena sva znanja o međudjelovanjima visokoenergijskih čestica s materijom. Samo sofisticiranim analitičkim metodama moguće je razlučiti gama pljuskove od hadronskih.

Razmotrimo najprije međudjelovanje visokoenergijskih hadrona s materijom.

Prolaskom kroz tvar visokoenergijski hadron može uzrokovati:

- (1) ionizaciju i pobuđenja atoma i molekula;
- (2) razaranje kristalne strukture i molekularnih lanaca;
- (3) nuklearna međudjelovanja.

Pri upadu kozmičkog zračenja u atmosferu, što je ovdje predmet interesa, važni su procesi (1) i (3).

Razmotrimo prvo ionizaciju koja nastaje prolaskom visokoenergijskog nukleona kroz tvar. Elektronima u tvari nukleon predaje tek mali dio svoje kinetičke energije i gotovo se ne otklanja od početnog pravca. Gubitak energije po jedinici puta kroz tvar u relativističkom slučaju daje BETHE-BLOCH-ova formula za *ionizacijski gubitak energije*

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 e^4 N_e}{4\pi \epsilon_0^2 m_e v^2} \left[\ln \left(\frac{2\gamma^2 m_e v^2}{I} - \frac{v^2}{c^2} \right) \right].$$

dE/dx je zaustavna moć materijala.

Za visokoenergijske elektrone ova je formula nešto drukčija, jer se radi o međudjelovanju čestica istih masa. Imajući u vidu razvoj pljuskova čestica u atmosferi, najvažnija pojava za visokoenergijske elektrone je bremsstrahlung ili zakočno zračenje.

Visokoenergijski foton međudjeluje s materijom na tri načina:

- (1) fotoelektričnim efektom;
- (2) Comptonovim raspršenjem;
- (3) tvorbom elektron–pozitron parova.

Fotoelektrični efekt dominantan je proces za energiju fotona $h\nu \ll m_e c^2$. Foton može izbaciti vezani elektron iz atoma ili molekule, ako je $h\nu > E_{\text{VEZANJA}}$.

Pri Comptonovom raspršenju foton predaje dio svoje energije elektronu. Frekvencija fotona se smanjuje, a valna se duljina povećava prema formuli:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\vartheta) .$$

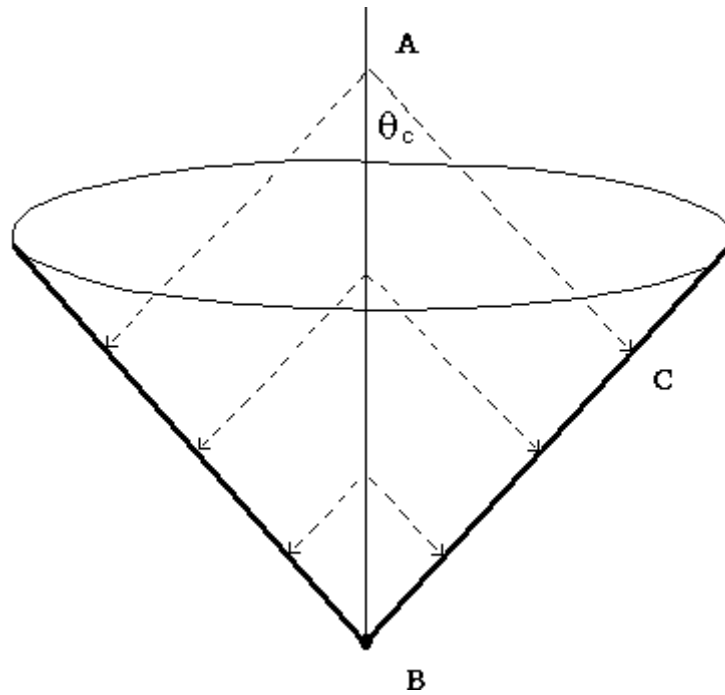
ϑ je kut raspršenja fotona u odnosu na početni smjer.

Tvorba parova moguća je za $h\nu > m_e c^2$ samo u polju jedne druge čestice. U slobodnom prostoru raspad fotona na elektron-pozitron par nije moguć jer se ne mogu istovremeno zadovoljiti zakon sačuvanja energije i zakon sačuvanja impulsa.

3.1. ČERENKOVLJEVO ZRAČENJE

Nabijena čestica koja se giba kroz tvar brzinom većom od brzine svjetlosti u tvari, emitira svjetlost. Tu je pojavu 1937. godine prvi opazio Čerenkov pa se po njemu naziva Čerenkovljeva svjetlost. Emisija fotona javlja se pod dobro definiranim kutom ϑ koji ovisi o brzini $\cos\vartheta = \frac{c/n}{v}$,

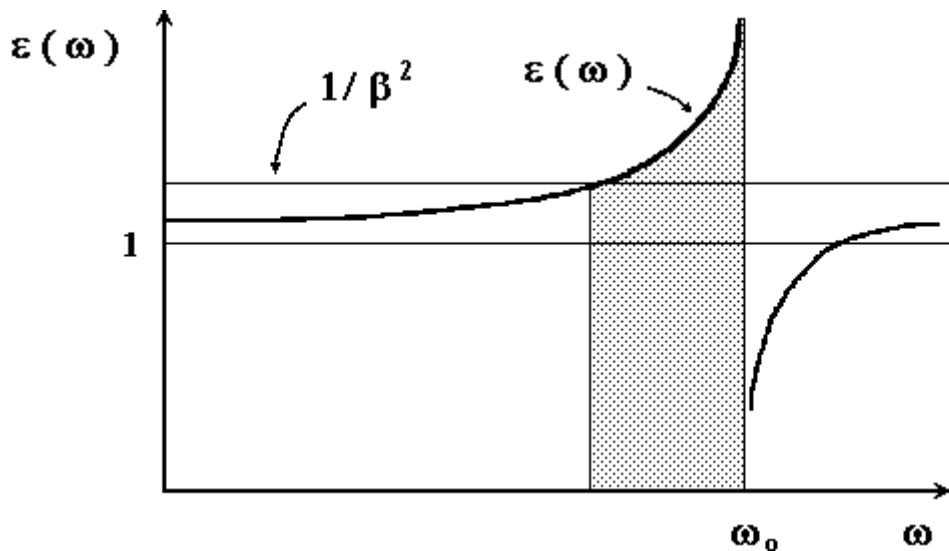
gdje je v brzina čestice, n indeks loma tvari, a c/n brzina svjetlosti u tvari [Ka94]. Na slici 4. prikazan je nastanak Čerenkovljeve svjetlosti. Čerenkovljevi fotoni oblikuju valnu frontu u obliku stošca.



SLIKA 4. Čerenkovljev svjetlosni stožac [Ka94]. Kut θ_c određen je smjerom brzine čestice (od A do B) i smjerom širenja elektromagnetskog vala (od A do C). Svjetlosna fronta kasni za česticom pa se tako formira stožac. Kut θ_c raste s dubinom atmosfere, do najviše 1.3° .

Čerenkovljevo zračenje emitira se u tvari (samo u tvari čestica može putovati brže od svjetlosti) pa je i interval valnih duljina svjetlosti karakteristika tvari. Na slici 5. vidi se interval frekvencija unutar kojeg mogu biti emitirani Čerenkovljevi fotoni.

Uvjet $\epsilon(\omega) > 1/\beta^2$ slijedi iz zahtjeva da je θ realan tj. $\cos \theta > 0$. Indeks loma n i električna permitivnost medija ovise o frekvenciji elektromagnetskog vala i povezani su relacijom $n^2 = \epsilon$. Što je brzina čestice veća, to je šire područje frekvencija Čerenkovljeve svjetlosti.



SLIKA 5. Čerenkovljeva vrpca [Ja74]. Zračenje se emitira samo u osjenčanom području frekvencija gdje je $\varepsilon(\omega) > 1/\beta^2$. U zraku je to područje vidljive i ultraljubičaste svjetlosti. Na apscisi je frekvencija elektromagnetskog vala ω , a na ordinati električna permitivnost medija $\varepsilon(\omega)$. ω_0 rezonantna je frekvencija medija, a $\beta = v/c$.

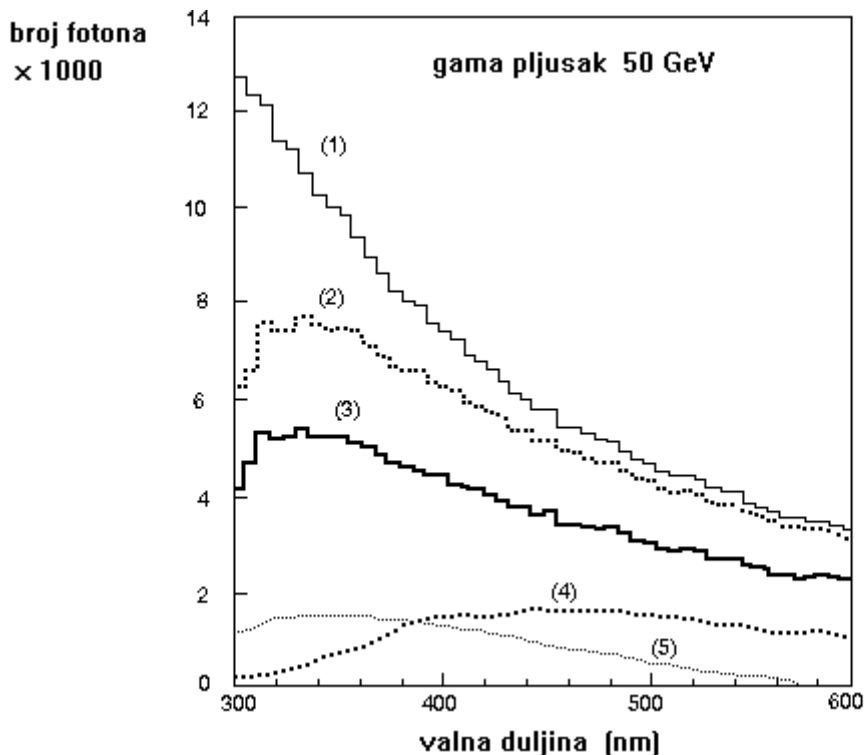
Čerenkovljevo zračenje u atmosferi stvaraju nabijene čestice iz pljuska koji je iniciran upadom kozmičke zrake u atmosferu. U gornjim slojevima atmosfere, gdje je gustoća zraka vrlo mala, Čerenkovljev kut je također malen. S porastom dubine atmosfere raste indeks loma pa se i θ_c povećava, do najviše 1.3° (za $\beta \approx 1$, na morskoj razini) [Ka94]. Svi Čerenkovljevi fotoni iz jednog pljuska padnu unutar promjera od oko 200 m na razini tla.

Čerenkovljev spektar opada s kvadratom valne duljine $\frac{dN}{d\lambda} \propto \frac{1}{\lambda^2}$ [Ka94]. Prigušenje je druga važna činjenica kojom je određen oblik spektra Čerenkovljevog zračenja u atmosferi. Zbog prigušenja spektar naglo opada u ultraljubičastom području.

Za pljuskove čestice koji ne dopiru do površine Zemlje informacije o upadnoj kozmičkoj zraci dobivamo isključivo detekcijom Čerenkovljevog zračenja. Na taj se način istražuje kozmičko gama zračenje od 20 do 300 GeV u eksperimentu MAGIC.

4. EKSPERIMENT MAGIC

Na slici 6. prikazan je spektar Čerenkovljevog zračenja za gama pljusak od 50 GeV.



SLIKA 6. Spektar Čerenkovljevih fotona dobiven je Monte Carlo simulacijom Čerenkovljeve svjetlosti za gama pljusak od 50 GeV [Br96]. Prikazan je početni spektar i spektri nakon različitih gubitaka.

1. Čerenkovljev spektar. Simulacija je napravljena programom Corsika (4.50). Broj fotona monotonno opada s porastom valne duljine.
2. Fotoni skupljeni MAGIC teleskopom, nakon prolaska kroz atmosferu. U atmosferi se prigušuje ultraljubičasti i plavi dio spektra.
3. Fotoni koji dopiju u kameru MAGIC teleskopa. Zrcala teleskopa posebne su izvedbe kako bi refleksija bila najveća moguća, no gubici i ovdje postoje.
4. Efektivni broj fotona nakon što se uzme u obzir kvantna efikasnost GaAsP fotokatode. U području od 400 do 600 nm očita je prednost GaAsP fotokatode u usporedbi s bialkalnom fotokatodom. Prema plavom dijelu spektra kvantna efikasnost više nije tako dobra. Zato je na prozorčiću ispred fotokatode predviđeno korištenje wavelength shiftera. Radi se o tankom sloju materijala koji apsorbira fotone plavog područja, a emitira fotone nešto niže energije (veće valne duljine) tj. pomiče spektar prema crvenom dijelu.
5. Efektivni broj fotona nakon što se uzme u obzir kvantna efikasnost bialkalne fotokatode umjesto GaAsP fotokatode.

Originalni spektar Čerenkovljevog zračenja koji pada s λ^2 prikazuje krivulja (1). Nakon prolaska kroz atmosferu prigušuje se naročito ultraljubičasti dio spektra pa do reflektora teleskopa dolaze Čerenkovljevi fotoni čiji je spektar dan krivuljom (2). Dio fotona izgubi se i pri reflektiranju u kameru teleskopa i rezultatni spektar pokazuje krivulja (3). Konačno kvantna efikasnost fotomultiplikatora u kameri smanjuje broj detektiranih fotona tako da preostaje spektar oblika (4) ili (5) ovisno o vrsti korištenih fotomultiplikatora.

Broj Čerenkovljevih fotona koji je ionako mali, nakon svih ovih gubitaka bitno je smanjen. Iz oblika rezultantnog spektra slijede zahtjevi na eksperiment kojim se želi detektirati Čerenkovljeve fotone iz gama pljuska u području od 20 do 300 GeV.

Zato se u eksperimentu MAGIC koristi veliki parabolični reflektor promjera 17 m i hibridni fotomultiplikatori s GaASP fotokatodom visoke kvantne efikasnosti pomaknute prema crvenom dijelu spektra. Veća osjetljivost u crvenom dijelu spektra, a manja u plavom potrebna je i zato da bi se smanjio vanjski šum. Naime, mjerenja je potrebno provoditi i pod mjesečinom, a spektar raspršene mjesečeve svjetlosti isti je kao i spektar raspršene sunčeve svjetlosti tj. pretežno plavi.

MAGIC je novi međunarodni eksperiment kojeg je grupa s IRB-a suosnivač [Ba96]. Osnovni mu je zadatak istražiti kozmičko gama zračenje u energijskom intervalu od 20 do 300 GeV. Da bi se to moglo učiniti valja razviti tehnologiju potrebnu za konstrukciju Čerenkovljevog teleskopa nove generacije. Spomenuti je interval još neistraženi dio elektromagnetskog spektra kozmičkog zračenja. Atmosfera nije propusna za gama zračenje pa se ono detektira ili instrumentima na satelitima ili posebnim metodama na površini Zemlje. Područje do 20 GeV istraženo je satelitima. Mala detekcijska površina satelita, oko 0.1 m^2 , uzrok je gornjeg praga u energiji. Tok kozmičkog zračenja pada s energijom približno kao $E^{-2.7}$, stoga je za visoke energije potrebna i velika efektivna detekcijska površina. Kozmičko zračenje detektira se na površini Zemlje pomoću pljuska čestica u atmosferi. Pljuski kod kojih čestice ne dopiru do površine Zemlje, detektiraju se preko Čerenkovljeve svjetlosti. Zbog male efikasnosti prikupljanja fotona, dosadašnji Čerenkovljevi teleskopi imali su donji energijski prag od oko 300 GeV. Tako je ostao neistražen energijski interval od 20 do 300 GeV. Eksperiment MAGIC istražiti će prvi put to područje. Zahvaljujući značajnom povećanju osjetljivosti moći će se bolje proučiti i područja koja su već ispitivana. Istraživanje je orijentirano na kompaktne kozmičke objekte: aktivne galaktičke jezgre (u središtima kojih se pretpostavljaju masivne crne rupe), kvazare (najudaljenije poznate objekte u svemiru), pulsare (brzorotirajuće neutronske zvijezde), binarne sustave, ostatke supernova i druge. Predviđa se otkriće 100 do 1000 novih izvora gama zračenja, a moguća su i otkrića novih fenomena (anihilacija SUSY čestica, eksplozije crnih rupa, raspadi topoloških defekata). Pretpostavka da se važni astrofizički procesi moraju događati u ovom energijskom području proizlazi iz velike razlike broja izvora koji su opaženi iznad i ispod energijskog procjepa.

Spuštanje energijskog praga s dosadašnjih 300 GeV na 20 GeV bit će ostvareno korištenjem velikog reflektora i vrlo osjetljive kamere. MAGIC teleskop imat će parabolično zrcalo promjera 17 m. Na taj će se način postići velika efektivna površina za detekciju Čerenkovljevih fotona. Kamera teleskopa bit će postavljena blizu žarišta, 17 m od zrcala. Današnji Čerenkovljevi teleskopi imaju kameru koja se sastoji od fotomultiplikatora s dinodama. Njihove karakteristike ne zadovoljavaju zahtjeve eksperimenta MAGIC jer ne omogućuju razlučivanje pojedinačnog fotona. Pozadinski šum noćnog neba uvijek je prisutan, no moguće je smanjiti unutrašnji šum detektora. Poboljšanje zrcala i kamere zahtijeva nova tehnološka rješenja. Broj detektiranih fotona bit će za red veličine veći, nego kod najboljih današnjih Čerenkovljevih teleskopa. Kamera će se sastojati od matrice hibridnih fotomultiplikatora visoke kvantne efikasnosti, malog unutrašnjeg šuma i odličnog vremenskog razlučivanja.

Istraživanja kozmičkog gama zračenja u navedenom energijskom području pomoći će razumijevanju međudjelovanja visokoenergijskih gama s mikrovalnim pozadinskim zračenjem od 3 K. Planira se i precizno mjerenje gama ray burstova, iznenadnih provala gama zračenja. Gama burstovi predstavljaju zagonetku u visokoenergijskoj astrofizici. Javljaju se slučajno iz različitih smjerova neba.

Intenzitet im je vrlo velik, a energija raste s vremenom. Precizno mjerenje energijskog spektra samo jedne provale gama zračenja pomoći će shvaćanju ove pojave. Lagana konstrukcija teleskopa omogućit će usmjeravanje u bilo koji

dio neba za manje od 60 s, nakon što satelit javi koordinate opaženog gama bursta.

Najbolji postojeći Čerenkovljev teleskop je WHIPPLE u Arizoni (SAD) s pragom od 300 GeV. Trenutno najbolji satelitski detektor ERGET uskoro završava s radom, a sljedeći satelit za istraživanje gama zračenja GLAST bit će lansiran tek 2006. godine. Cijena eksperimenta MAGIC tek je 1% cijene satelita, a omogućit će promatranje slabih izvora i istraživanje detalja koje GLAST neće moći vidjeti.

Eksperiment MAGIC tako je koncipiran da ima veliku detekcijsku površinu (kako bi uhvatio što više Čerenkovljevih fotona), visoku kvantnu efikasnost i nisku razinu šuma. Za to je potrebna nova tehnologija, hibridni fotomultiplikatori s GaAsP fotokatodom. Ti fotomultiplikatori kao i fotomultiplikatori s dinodama koji su se do sada koristili za detekciju Čerenkovljevih fotona opisani su u sljedećem poglavlju kao detektori optičkog zračenja.

5. DETEKTORI OPTIČKOG ZRAČENJA

Detektori optičkog zračenja su uređaji koji pretvaraju svjetlosnu energiju u električni signal pomoću fotoelektričnog efekta ili tvorbe parova elektron–šupljina u poluvodiču.

Kod fotoelektričnog efekta foton izbacuje elektron iz tvari. Ako se taj elektron ubrza može pri udaru u tvar izbaci sekundarne elektrone. Tako se elektroni mogu umnožiti da se dobije mjerljivi električni signal. Na taj način radi fotomultiplikator s dinodama.

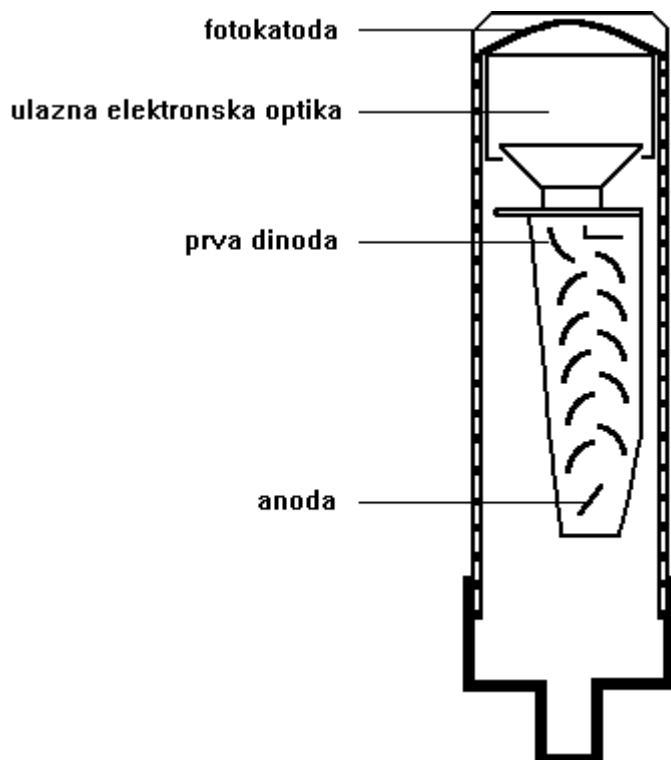
Foton vidljive svjetlosti ima energiju reda veličine eV, koliko je i potrebno da se u poluvodičkoj tvari stvori elektron–šupljina par. Ako se takva poluvodička tvar stavi u električno polje mogu se razdvojiti elektroni i šupljine te i u ovom slučaju dobiti mjerljivi električni signal. Na ovaj način radi fotodioda. Fotodioda je vrlo jednostavan uređaj, ali potreban je relativno veliki intenzitet upadne svjetlosti da bismo dobili dovoljno elektrona za mjerljivi električni signal. To je nedostatak zbog kojeg se fotodioda ne može direktno koristiti za detekciju Čerenkovljevih fotona u atmosferskom čestičnom pljusk.

Naprotiv, fotomultiplikatori s dinodama već se koriste u tu svrhu. Njima se može detektirati i svjetlost malog intenziteta. Međutim, u eksperimentu MAGIC traži se raspoznavanje pojedinačnog fotona. To fotomultiplikatori s dinodama i bialakalnom fotokatodom ne mogu ostvariti zbog prevelike fluktuacije broja elektrona na dinodama. Jedini detektor koji odgovara zahtjevima eksperimenta MAGIC je hibridni fotomultiplikator koji ima visoku kvantnu efikasnost, mali unutrašnji šum i odličnu vremensku rezoluciju.

U sljedećim se odlomcima pobliže opisuju fotomultiplikatori s dinodama i hibridni fotomultiplikatori.

5.1. FOTOMULTIPLIKATORI S DINODAMA

Fotomultiplikatori su osjetljivi uređaji s elektronskom cijevi koji pretvaraju svjetlost u mjerljivu električnu struju [Le87]. Sastoje se od fotokate, fokusirajućih elektroda (elektronska optika), anode i dinoda smještenih u vakuumsku cijev. Za vrijeme rada elektrode su pod visokim naponom. Tipični fotomultiplikator prikazan je na slici 7.



SLIKA 7. Fotomultiplikatorska cijev predočena je shematskim dijagramom [Le87]. Između fotokatore i prve dinode smještena je elektronska optika tj. niz elektroda s određenim naponima. Time je ostvarena takva raspodjela potencijala u prostoru da elektroni bez obzira na mjesto emisije putuju prema prvoj dinodi. Udarom u dinodu elektroni iz nje izbacuju sekundarne elektrone i tako se broj elektrona umnožava. Dolaskom na anodu elektroni su toliko umnoženi da predstavljaju mjerljivi električni signal.

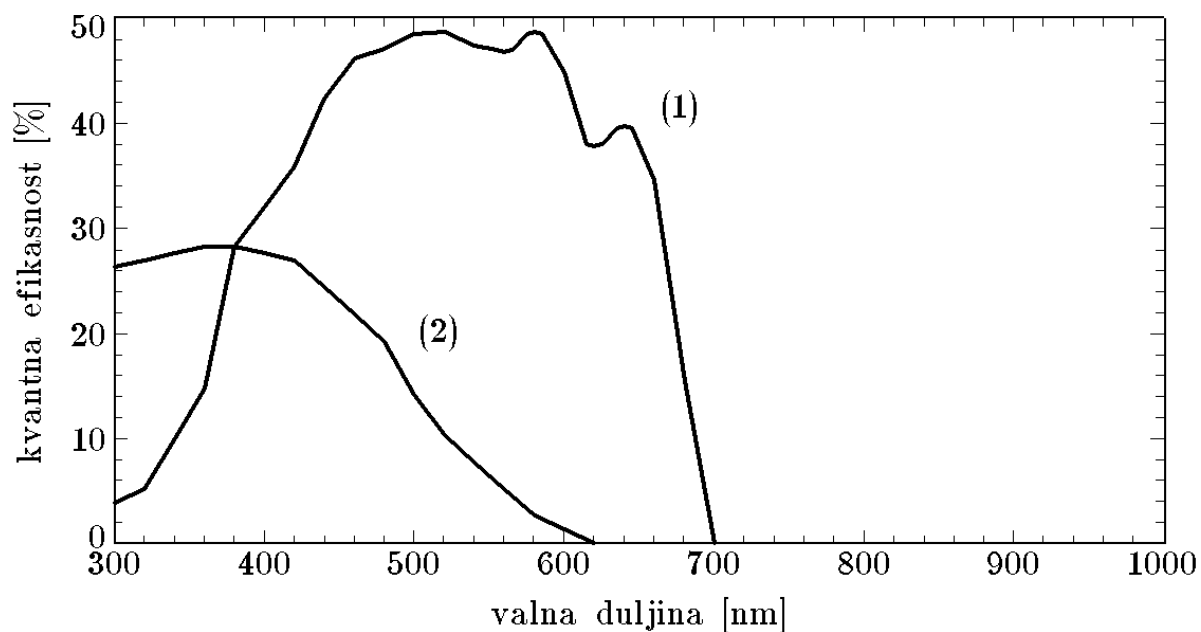
Foton pri udaru u fotokatodu može iz nje izbaciti elektron (fotoelektrični efekt). Izbačeni elektron ubrzava se i usmjerava prema prvoj dinodi. Udarom u dinodu prenosi dio svoje energije elektronima u dinodi što uzrokuje emisiju sekundarnih elektrona. Oni se ubrzavaju prema sljedećoj dinodi gdje se oslobađa još više elektrona. Kroz niz dinoda tako nastaje kaskada elektrona (za jedan upadni foton 10^5 do 10^7 elektrona ovisno o broju dinoda i naponu ubrzanja). Ova kaskada daje na anodi struju koja se može pojačati i analizirati.

Fotoelektrični efekt opisan je Einsteinovom formulom $E = h\nu - \phi$, gdje je $h\nu$ je energija fotona, ϕ je izlazni rad, a E kinetička energija izbačenog elektrona.

Za izazivanje fotoelektričnog efekta foton mora imati frekvenciju veću od $\nu_{\text{MIN}} = \phi / h$.

Iako je za $\nu > \nu_{\text{MIN}}$ moguć fotoelektrični efekt, njegova je vjerojatnost daleko od jedinice (ovisi o tvari i frekvenciji). Zato se definira kvantna efikasnost:

$$\eta = \frac{\text{broj oslobodjenih fotoelektrona}}{\text{broj upadnih fotona}} .$$



SLIKA 8. Kvantna efikasnost GaAsP fotokatode (1) i bialkalne fotokatode (2) u ovisnosti o valnoj duljini [Br96].

Bialkalna fotokatoda ima premalu kvantnu efikasnost, naročito u crvenom području, da bi se mogla koristiti u eksperimentu MAGIC.

Fotomultiplikator s dinodama najčešće ima bialkalnu fotokatu, no da ima i GaAsP fotokatu svejedno nije dobar za eksperiment MAGIC. Nepovoljna je karakteristika fotomultiplikatora s dinodama fluktuacija broja elektrona na dinodama pa stoga takvi fotomultiplikatori ne mogu razlučiti pojedinačni foton.

Ukupni dobitak elektrona g (gain) proporcionalan je s V^n gdje je V napon dinode, a n broj dinoda. Iz ove relacije slijedi relativna promjena dobitka elektrona $\frac{dg}{g} = n \frac{dV}{V}$. Fluktuacije u dobitku proporcionalne su fluktuacijama napona, ali uvećanog onoliko puta koliko uređaj ima dinoda. Tako će fluktuacija napona od 1% za fotomultiplikator s 10 dinoda uzrokovati fluktuaciju dobitka od čak 10%. Ova se posljedica može smanjiti korištenjem stabilnijeg izvora.

Postoje i statističke fluktuacije koje ne ovise o naponu, a javljaju se zbog neravnomjerne produkcije sekundarnih elektrona na pojedinim dinodama. One se također umnažaju na dinodama i vrlo ih je teško smanjiti na mjeru potrebnu za razlučivanje pojedinačnog fotona.

5.2. HIBRIDNI FOTOMULTIPLIKATORI

Hibridni fotomultiplikator je optoelektronički senzor koji je spoj vakuumske cijevi i poluvodičke fotodiode. Vakuumska cijev sadrži ionsku optiku, ali nema dinoda. Funkciju sustava dinoda i anode preuzima poluvodička fotodioda i u njoj se elektroni umnažaju. Hibridni fotomultiplikator ima tako samo jedan stupanj multiplikacije pa je izbjegnuto umnažanje fluktuacija broja elektrona.

Fotoni iz fotokatode izbijaju elektrone koji se onda ubrzavaju u vakuumskoj cijevi te fokusiraju na fotodiodu. Prikupljanje elektrona u hibridnom fotomultiplikatoru puno je efikasnije nego u fotomultiplikatoru s dinodama.

Fotokatoda se nalazi na visokom naponu (npr. -10 kV) u odnosu na fotodiodu koja je na nultom potencijalu. Razlika potencijala od 10 kV daje elektronima pri udaru u fotodiodu energiju od 10 keV. Zahvaljujući toj energiji jedan elektron koji padne na fotokatodu stvara u njoj na tisuće parova elektron–šupljina. Broj parova elektron–šupljina (multiplikacijski faktor) može se približno dobiti dijeljenjem energije elektrona s 3.6 eV, koliko je potrebno za stvaranje para u siliciju. Tako se na izlazu dobije dovoljno jak signal koji se može analizirati. Multiplikacijski faktor hibridnog fotomultiplikatora veći je za dva reda veličine od multiplikacijskog faktora u fotomultiplikatoru s dinodama, u prvom stupnju umnažanja.

Razvoj hibridnih fotomultiplikatora počeo je 1991., a danas već postoje komercijalne izvedbe npr. IPD (Intensified Photo Diode) tvrtke Intevac (SAD) [Br96] i HPD (hybrid photodetector) tvrtke Hamamatsu Photonics (Japan) [Su96].

Kolaboracija MAGIC će najvjerojatnije s jednom od te dvije tvrtke postići dogovor o izradi hibridnog fotomultiplikatora prema našem rješenju koje će zadovoljavati potrebe eksperimenta MAGIC (visoka kvantna efikasnost, mali unutrašnji šum i odlična vremenska rezolucija). Takav detektor moći će se koristiti i pod mjesečinom te za opažanja pod velikim zenitnim kutom.

Glavni je zadatak ovog rada smanjiti unutrašnji šum hibridnog fotomultiplikatora tj. na zadovoljavajući način riješiti tzv. problem pozitivnih iona. Zato je potrebno napraviti novi dizajn ionske optike.

6. IONSKA OPTIKA

Ionska optika područje je fizike koji se bavi usmjeravanjem iona pomoću elektrostatskih ili magnetostatskih leća. Naziv je uzet po analogiji sa svjetlosnom optikom u kojoj se svjetlost usmjerava pomoću optičkih leća. Elektrostatska leća konfiguracija je elektrostatskog polja ostvarenog raspodjelom elektroda posebnih oblika i potencijala, a s ciljem da se putanje iona zakrive na određeni način. Magnetostatske leće nisu korištene u ovom radu pa se u daljnjoj raspravi ne spominju. Postoje značajne razlike između ionske i svjetlosne optike. Optička leća ima dobro definirane oštre rubove i svjetlosna se zraka lomi na samom rubu. Polumjer loma beskonačan je svugdje (tj. putanje su pravci), osim na rubovima leće gdje je približno nula. U ionskoj optici putanje čestica svijaju se zbog promjene jakosti polja. Polumjer loma mijenja se postepeno. Željeni oblik elektrostatskog polja mnogo je teže odrediti, za razliku od oblika optičke leće, jer je on rezultat zamršenog međudjelovanja oblika, potencijala i prostornog rasporeda elektroda. Elektrostatski polumjer loma u pojedinoj točki prostora definira se tako da se normalna komponenta elektrostatske sile (okomita na brzinu čestice) izjednači s centripetalnom silom.

$$qE_n(\mathbf{r}) = \frac{mv^2(\mathbf{r})}{R(\mathbf{r})} \quad \Rightarrow \quad R(\mathbf{r}) = \frac{E_k(\mathbf{r})}{q} \cdot \frac{2}{E_n(\mathbf{r})}$$

E_n je normalna komponenta elektrostatskog polja, E_k je kinetička energija čestice, a m , q i v su masa, naboj i brzina čestice. Elektrostatski polumjer loma proporcionalan je kinetičkoj energiji po jedinici naboja. Svi ioni s istim početnim položajem, istim početnim smjerom i istom početnom kinetičkom energijom po jedinici naboja imat će u elektrostatskom polju identične putanje. Važan je zaključak da u elektrostatskom polju putanje ne ovise o masi. No, putanje zato ovise o početnoj kinetičkoj energiji. Dok se fotoni vidljive svjetlosti razlikuju u energiji za manje od faktor dva, ioni se mogu razlikovati za mnogo redova veličine. Zato se u ionskoj optici često koriste jaka početna ubrzanja, kako bi se smanjile razlike u početnoj energiji.

Putanja iona u elektrostatskom polju može se izračunati prema jednadžbi:

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}(\mathbf{r}) = q\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -q\nabla\Phi(\mathbf{r}) .$$

\mathbf{F} , \mathbf{E} i Φ su sila, električno polje i potencijal, a m , q i r su masa, naboj i položaj čestice.

To je jednadžba gibanja nabijene čestice u elektrostatici. Potencijal u prostoru, u kojem se gibaju ioni, računa se prema Laplaceovoj jednadžbi $\nabla^2\Phi(\mathbf{r}) = 0$ s elektrodama kao rubnim uvjetima.

Analitičko rješenje može se pronaći u jednostavnijim slučajevima. Za zamršenije probleme, kao što je dizajn ionske optike hibridnog fotomultiplikatora, postoje simulacijski programi.

6.1. SIMULACIJSKI PROGRAM SIMION 3D 6.0

U ovom je radu korišten program SIMION 3D 6.0 tvrtke Princeton Electronics Systems [Da96]. Ovaj je program prvobitno zamišljen samo za analizu elektrostatskih leća, ali se s vremenom razvio u snažan alat za prostorno modeliranje zamršenih problema ionske optike, čak cijelih instrumenata. On omogućava definiciju željenog prostornog rasporeda elektroda proizvoljnih oblika i potencijala. U zadanom području proračunava se prostorna raspodjela potencijala prema Laplaceovoj jednačbi s elektrodama kao rubnim uvjetima. U programu je moguća definicija iona i prikaz njihovih putanja, zatim snimanje vremena proleta, položaja i brzina iona. Naročito je koristan prikaz potencijalnog reljefa (dvije su dimenzije prostorne, a treća predstavlja potencijal) jer se njime može predočiti utjecaj određene raspodjele potencijala na česticu. Takav je prikaz ekvivalentan prostornom reljefu u gravitacijskom polju gdje tijelo u svakoj točki plohe tog reljefa ima određenu potencijalnu energiju.

Ovim simulacijskim programom napravljen je novi dizajn ionske optike hibridnog fotomultiplikatora tj. riješen problem pozitivnih iona.

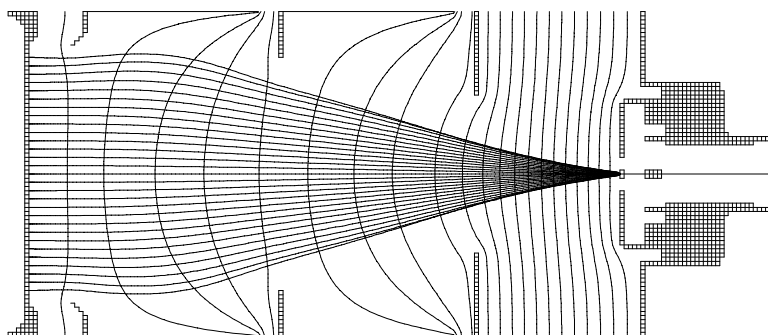
7. NOVO RJEŠENJE HIBRIDNOG FOTOMULTIPLIKATORA

Djelatnost grupe s Instituta Ruđer Bošković usmjerena je na dizajn hibridnog fotomultiplikatora koji će zadovoljavati potrebe eksperimenta MAGIC, ali i potrebe novog tipa Čerenkovljevog detektora za eksperiment ALICE u CERN-u. Pri tome su posebni zahtjevi:

- (1) spriječiti ubrzanje i udar pozitivnih iona u fotokatodu i ostale elektrode te stijenke detektora;
- (2) postići relativno nizak radni napon uređaja iz sigurnosnih razloga;
- (3) postići čim bolje vremensko razlučivanje detektora;
- (4) do krajnosti pojednostavniti ionsku optiku uređaja i time sniziti njegovu cijenu;
- (5) riješiti integraciju hibridnih fotomultiplikatora u matricu kamere eksperimenta MAGIC.

U ovom radu prikazano je rješenje problema pozitivnih iona i prilagodba uređaja na niži radni napon. Rješenje je demonstrirano na Intevacovom hibridnom fotomultiplikatoru, IPD-u (Intensified Photo Diode). Tu se još ne radi o našem konačnom izboru uređaja, stoga što je takav tip fotomultiplikatora presložen i preskup, a niti vremensko razlučivanje detektora nije još optimalno.

No, razmotrimo najprije Intevacov IPD. Taj hibridni fotomultiplikator ima GaAsP fotokatodu promjera 18 mm, fotodiodu promjera 0.6 mm, a udaljenost od fotokatode do fotodiode iznosi 31 mm. Kućište ima oblik valjka visine i promjera od 45 mm. Na jednoj je osnovici fotokatoda, a na drugoj priključak za koaksijalni kabel. U vakuumskoj cijevi vrlo je visoki vakuum od 10^{-6} Pa koji je za dva reda veličine veći od vakuuma u tipičnim fotomultiplikatorima. Fotokatoda je na potencijalu -10 kV, a fotodioda na potencijalu nula. Tri fokusirajuće elektrode usmjeravaju elektrone s fotokatode na fotodiodu. Na slici 9. prikazan je presjek IPD-a s putanjama elektrona i ekvipotencijalama.



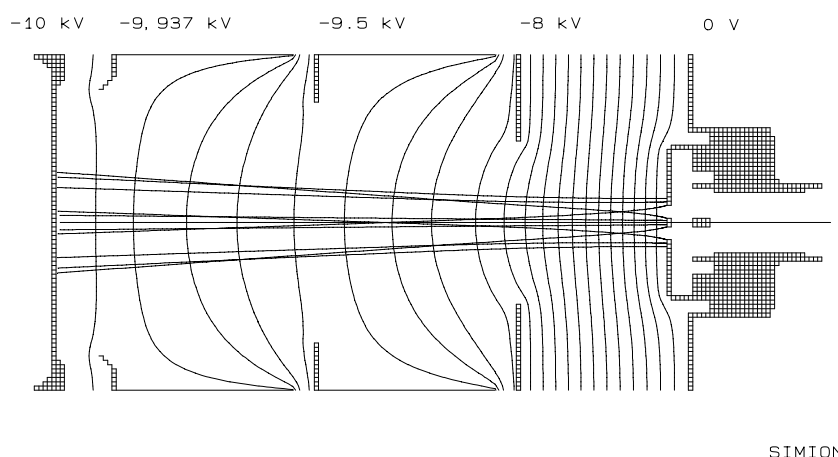
SIMION

SLIKA 9. Fokusiranje elektrona (reprodukcija Intevacovog rješenja).

Problem pozitivnih iona

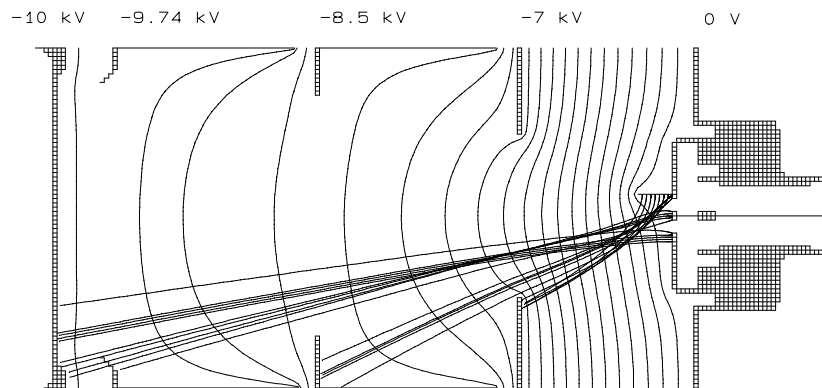
Elektroni emitirani s fotokatode i fokusirani u fotodiodu imaju dovoljno visoku energiju (5 keV) da iz fotodiode i okolnog kućišta izbiju pozitivne ione. Radi se o ionima atoma koji nisu sastavni dio kristalne rešetke poluvodiča nego predstavljaju onečišćenja. Takvi atomi smješteni su uz površinu i slabije su vezani. U prvom redu to je cezij kojim se u tehnološkom procesu obrađuju poluvodiči (kako bi se smanjio izlazni rad elektrona), zatim atomi plinova iz zraka koji su udifundirali u kristalnu rešetku poluvodiča dok još nije bio u visokom vakuumu. Izbačeni pozitivni ioni ubrzavaju se i udaraju u fotokatodu i ostale elektrode te u stijenke detektora. Elektroni koji pri tome mogu biti izbačeni uzrokuju naknadne impulse. Osim toga pozitivni ioni oštećuju fotokatodu koja se tako s vremenom troši. Taj problem u ovom radu nazivamo problemom pozitivnih iona i on predstavlja ozbiljnu smetnju u radu svakog pa i hibridnog fotomultiplikatora.

U eksperimentu MAGIC problem pozitivnih iona naročito je naglašen jer je signal jako slab, a vanjski je šum jak (noćno nebo i mjesecina) pa je potrebno smanjiti unutrašnji šum detektora na najmanju moguću vrijednost.



SLIKA 10. *Problem pozitivnih iona (reprodukcija Intevacovog rješenja). U ovoj izvedbi ionske optike (prva verzija IPD-a) nije obraćena pažnja na pozitivne ione koji mogu biti izbačeni s fotodiode. Na slici se vide ioni H^+ početne energije 10 eV koji lete od fotodiode prema fotokatodi.*

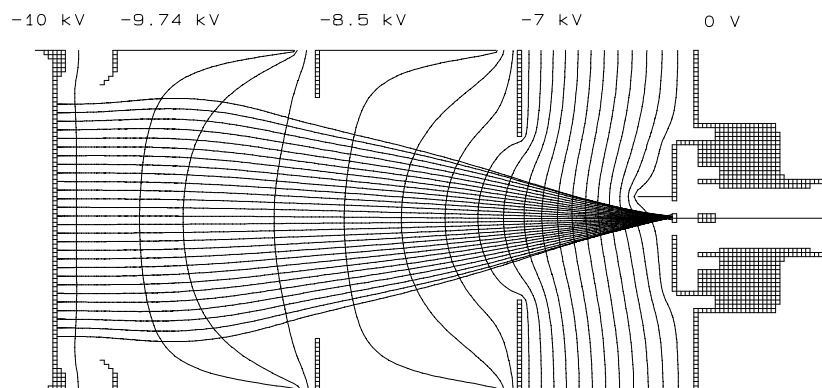
Problem pozitivnih iona Intevac je pokušao riješiti umetanjem otklonske pločice u blizini fotodiode kojom se pozitivni ioni otklanjaju u stranu. No, pozitivni se ioni svejedno ubrzavaju do visokih energija te udaraju u stijenke vakuumske cijevi, elektrode pa i samu fotokatodu. Mjerenja su pokazala da je unutrašnji šum smanjen [Br96], ali problem nije u potpunosti riješen.



SIMION

SLIKA 11. Otklanjanje iona (reprodukcija Intevacovog rješenja s otklonskom pločicom). Problem pozitivnih iona nije u potpunosti riješen jer značajan broj pozitivnih iona ipak udara u fotokatodu te izaziva ranije spomenute probleme. Ioni koji udaraju u stijenke cijevi i elektrode također su izvor problema jer oslobađaju nove ione i elektrone.

Otklonska pločica deformira elektrostatsko polje u blizini fotodiode što ima značajan utjecaj na pozitivne ione, ali vrlo mali utjecaj na elektrone. Slika 12. pokazuje da je fokusiranje elektrona skoro isto kao i u slučaju bez otklonske pločice.



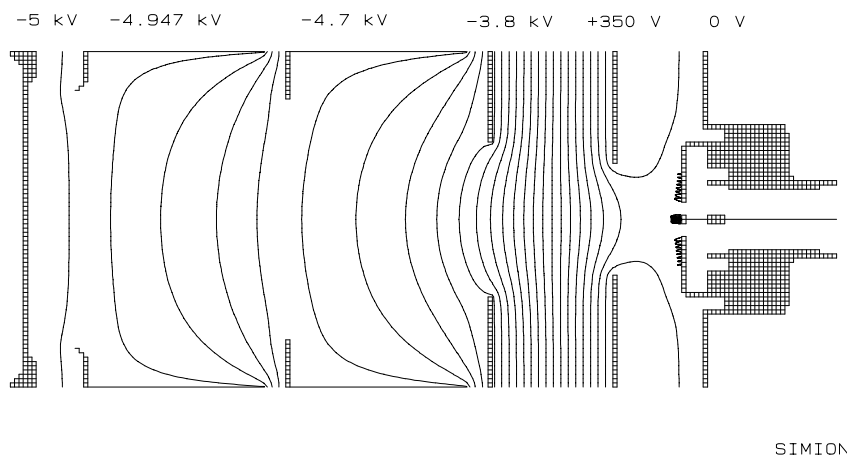
SIMION

SLIKA 12. Fokusiranje elektrona (reprodukcija Intevacovog rješenja s otklonskom pločicom).

Novo rješenje problema pozitivnih iona

Sa slike 11. vidi se da će problem pozitivnih iona biti na zadovoljavajući način riješen tek onda kad se pozitivnim ionima uopće ne dopusti ubrzavanje do visokih energija.

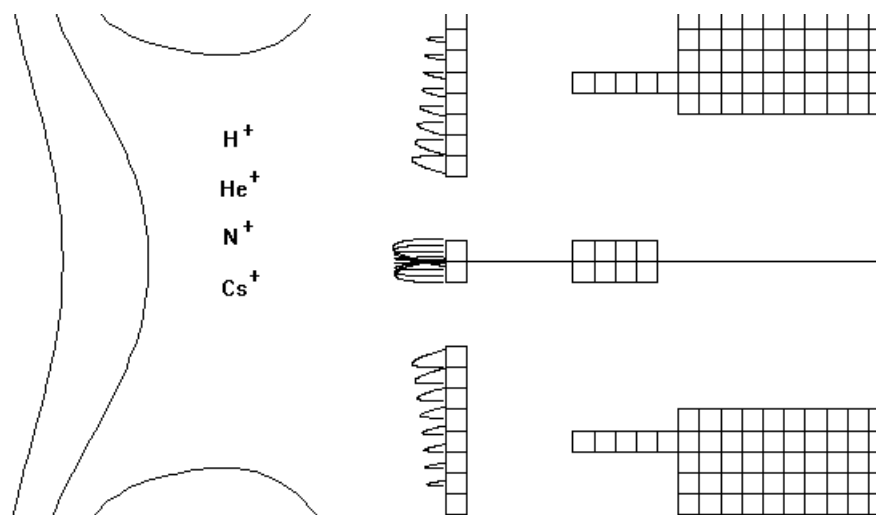
Na slici 13. prikazan je presjek novog rješenja hibridnog fotomultiplikatora i putanje pozitivnih iona izbačenih s fotodiode i okolnog kućišta. Pozitivni ioni uspijevaju se tek malo odvojiti od fotodiode jer ih potencijalna barijera, stvorena pozitivnom elektrodom, vraća natrag.



SLIKA 13. *Zaustavljanje pozitivnih iona pomoću potencijalne barijere. Ispred fotodiode vide se putanje pozitivnih iona. Radi se o H^+ ionima početne kinetičke energije od 10 eV. Oni se odvajaju od fotodiode i okolnog kućišta te kreću prema fotokatodi, ali ih potencijalna barijera vraća natrag.*

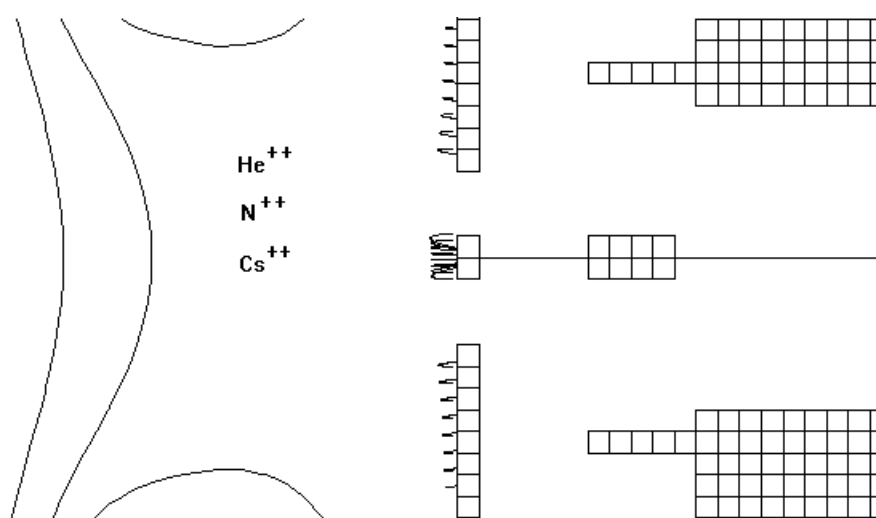
Prednosti novog rješenja problema pozitivnih iona pomoću potencijalne barijere očite su u odnosu na Intevacovo. U novom rješenju nema ubrzanja pozitivnih iona do visokih energija pa tako ni naknadnih impulsa ni oštećenja fotokatode. Rješenje također zadržava aksijalnu simetriju.

Kako u elektrostatskom polju putanja nabijene čestice ne ovisi o masi, svi ioni s istim početnim uvjetima (vektorom položaja i brzine) te istom kinetičkom energijom po jedinici naboja imaju iste putanje [Da96]. Zato su putanje jednostruko ioniziranog cezija, dušika ili helija iste kao i putanje iona H^+ . Slika 14. predstavlja povećanje slike 13. u području fotodiode tako da se vide putanje pojedinih iona.

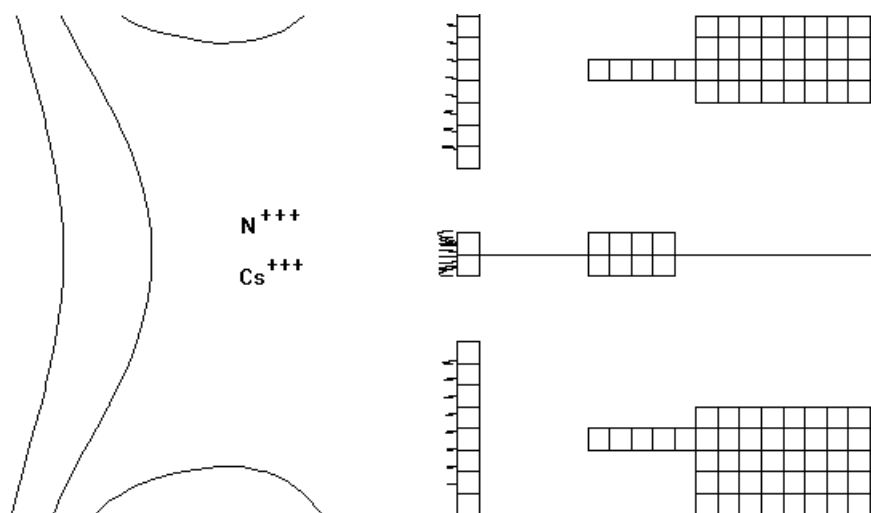


SLIKA 14. Putanje jednostruko ioniziranih atoma početne kinetičke energije od 10 eV.

Za višestruko ionizirane atome situacija više nije ista kao što se vidi iz simulacije putanja dvostruko ioniziranih atoma na slici 15. i trostruko ioniziranih atoma na slici 16.



SLIKA 15. Putanje dvostruko ioniziranih atoma početne kinetičke energije od 10 eV.

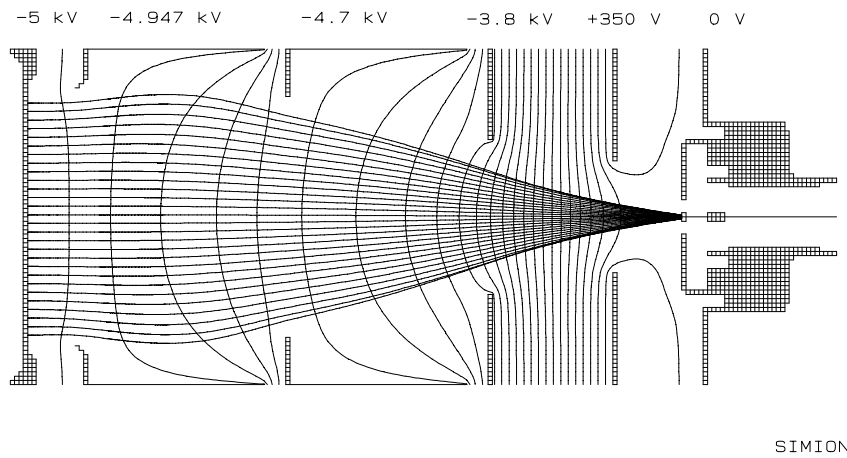


SLIKA 16. Putanje trostruko ioniziranih atoma početne kinetičke energije od 10 eV.

Opaža se da su putanje iona kraće što je naboj iona veći (uz istu početnu energiju iona). Najveću opasnost zato predstavljaju jednostruko ionizirani atomi i na njih jedino treba obratiti pažnju. Ako potencijalna barijera spriječi prolaz jednostruko ioniziranih atoma, onda sigurno sprječava prolaz i za višestruko ionizirane atome.

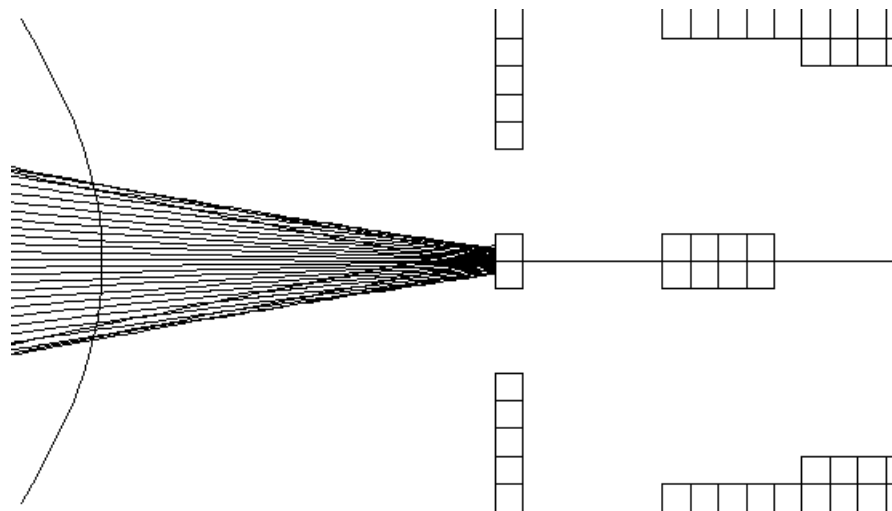
Prvi od zahtjeva (spriječavanje ubrzanja i udara pozitivnih iona u fotokatodu i ostale elektrode te u stijenke detektora) u potpunosti je riješen primjenom ideje potencijalne barijere.

Drugi zahtjev (postići niži radni napon uređaja iz sigurnosnih razloga) odnosi se na razliku potencijala između fotodiode i fotokatode. Matrica hibridnih fotomultiplikatora predstavljat će kameru teleskopa MAGIC koja će se nalaziti na otvorenom prostoru. Zbog mogućeg utjecaja vlage koristit će se niži napon npr. od 5 kV umjesto 10 kV. Ispod 5 kV ne bi trebalo ići jer tada elektron koji udara u fotodiodu stvara u njoj premalo elektron–šupljina parova. Uz novi potencijal fotokatode i izmijenjenu ionsku optiku (dodatak pozitivne elektrode) valjalo je potencijale fokusirajućih elektroda podesiti tako da se ostvari dobro fokusiranje elektrona u fotodiodu. Slika 17. prikazuje presjek hibridnog fotomultiplikatora i potencijale elektroda kojima je ostvareno dobro fokusiranje.

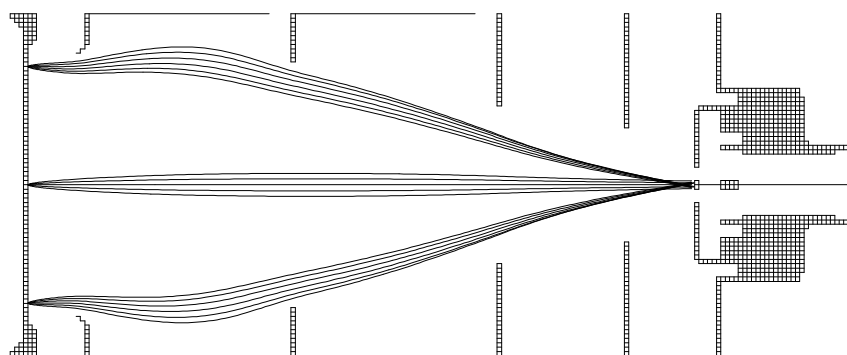


SLIKA 17. Fokusanje elektrona u novom rješenju hibridnog fotomultiplikatora. Prikazana je srednja ravnina presjeka i putanje elektrona od fotodiode do fotokatode.

Na slici 18. povećano je područje oko fotodiode sa slike 17. kako bi se bolje vidjelo fokusiranje elektrona u fotodiodu.



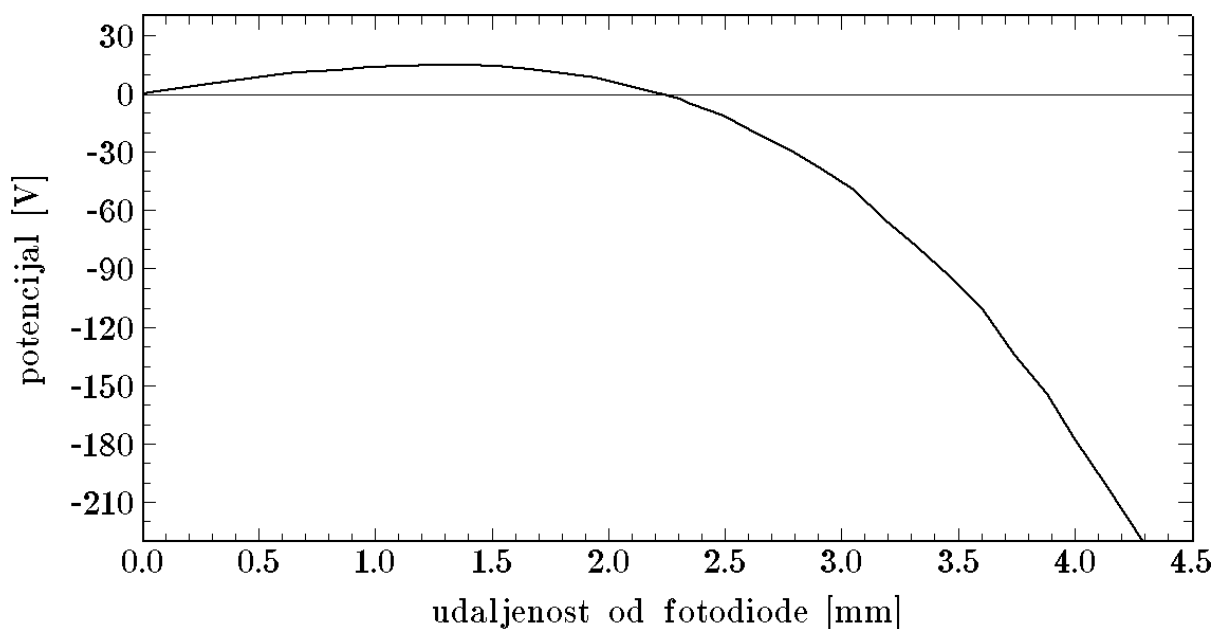
SLIKA 18. Povećani prikaz žarišta.



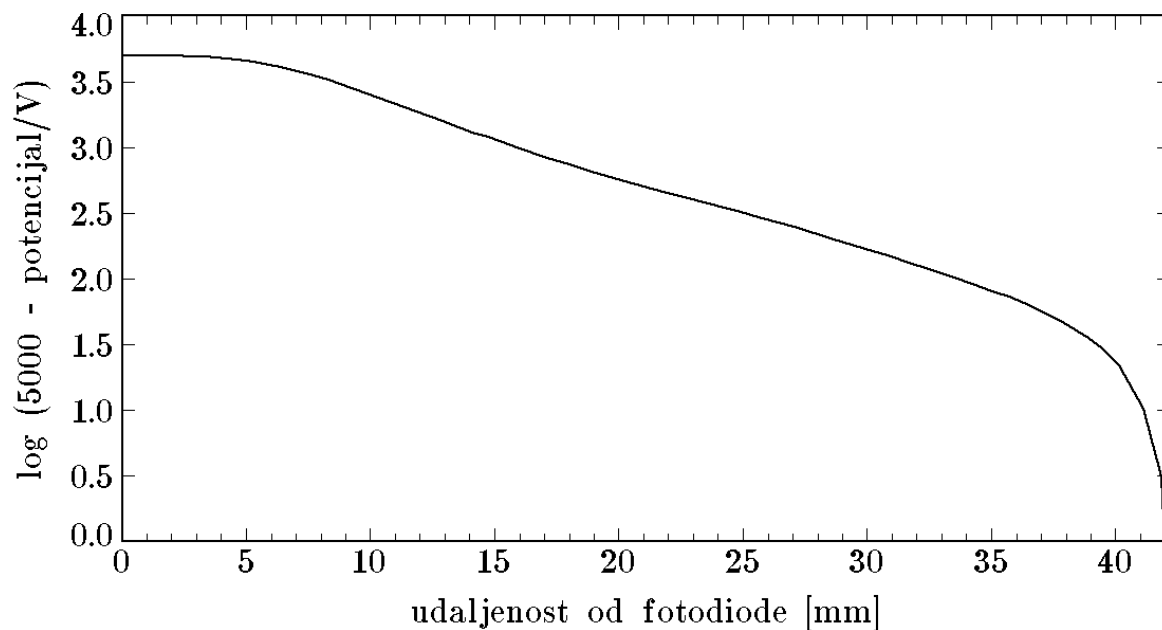
SIMION

SLIKA 19. Fokusiranje elektrona koji su početno raspršeni. Svaka grupa elektrona odaslana je iz iste početne točke, ali s različitim početnim usmjerenjem. Putanje se razlikuju ovisno o početnom usmjerenju, ali svi elektroni ipak padaju na fotodiode.

Slike 20. i 21. prikazuju potencijal na središnjoj osi od fotodiode prema fotokatodi s time da je na slici 20. prikazano područje neposredno ispred fotodiode (potencijalna barijera), a na slici 21. potencijal na cijeloj osi od fotodiode do fotokatode.

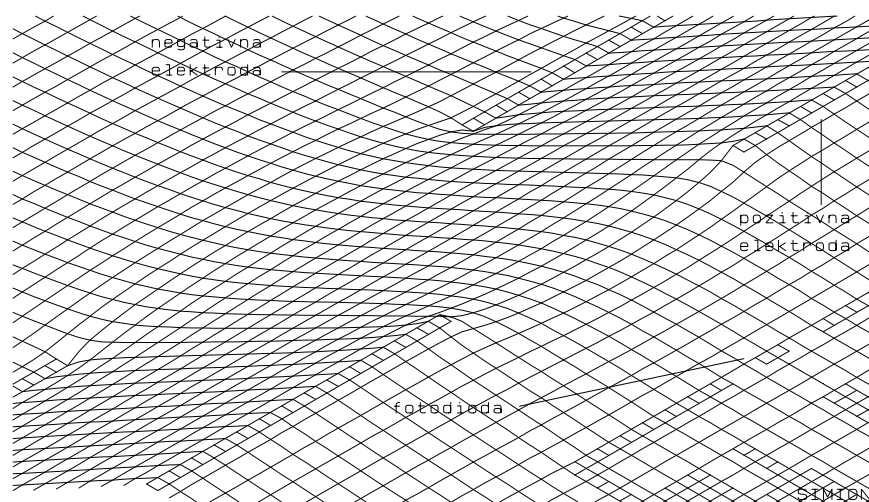


SLIKA 20. Potencijalna barijera na osi detektora za pozitivne ione koji izlijeću s fotodiode. Umetanjem pozitivne elektrode napona 350 V i promjera otvora 7.2 mm na udaljenosti 4.3 mm od fotodiode stvorena je potencijalna barijera visine 15 V, što onemogućava prolaz pozitivnih iona prema fotokatodi.

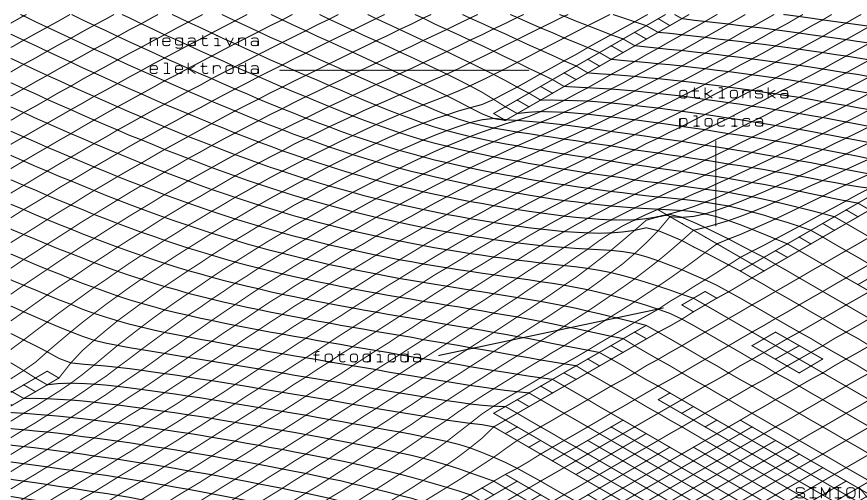


SLIKA 21. Potencijal na osi od središta fotodiode do središta fotokatode. Fotodiode je na položaju nula, a fotokatoda na položaju od 42 mm. Potencijalna barijera sa slike 18. toliko je mala da se u usporedbi s cijelom razlikom potencijala ne uočava.

U simulacijskom programu SIMION potencijalna barijera može se predočiti prostorno pomoću potencijalnog reljefa. Slika 22. prikazuje potencijalnu barijeru za pozitivne ione novog rješenja hibridnog fotomultiplikatora, a slika 23. potencijalnu jamu za pozitivne ione Intevacovog IPD-a.

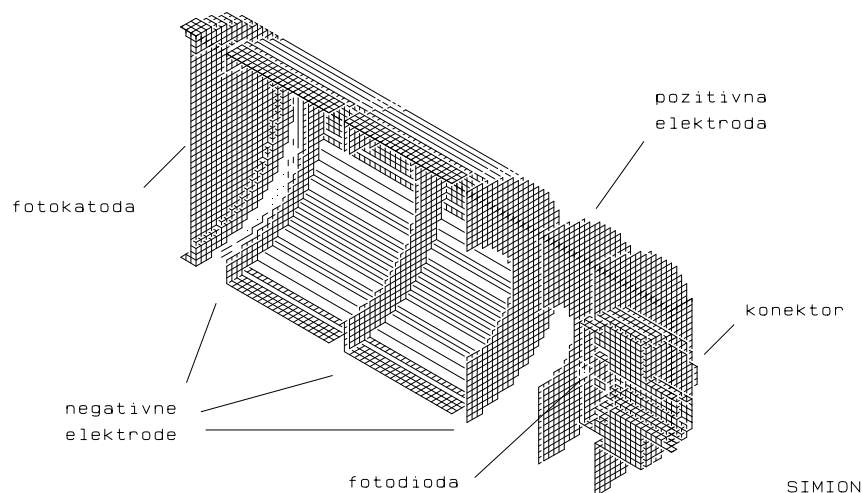


SLIKA 22. Prikaz potencijalne barijere za pozitivne ione pomoću potencijalnog reljefa za novo rješenje hibridnog fotomultiplikatora.



SLIKA 23. *Prikaz potencijalne jame za pozitivne ione pomoću potencijalnog reljefa za Intevacov IPD. Uočava se nagli pad od fotodiode prema fotokatodi. Otklonska pločica daje nagib u stranu tako da pozitivni ioni dobivaju tangencijalnu komponentu ubrzanja te se otklanjaju u stranu.*

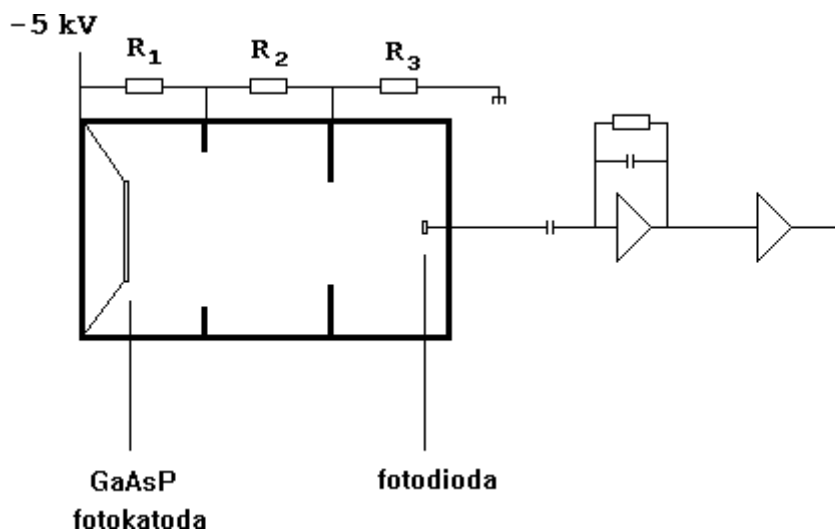
Prostorni prikaz presjeka modificiranog IPD-a prikazan je na slici 24.



SLIKA 24. *Cijeli fotomultiplikator prikazan je trodimenzionalno, prerezan na pola. Promjer fotokatode je 15 mm, promjer fotodiode 0.6 mm, a udaljenost između fotokatode i fotodiode iznosi 42 mm. Novost u odnosu na IPD predstavlja pozitivna elektroda čiji su napon i širina tako podešeni da je stvorena potencijalna barijera koja onemogućava prolaz pozitivnih iona prema fotokatodi.*

Da se upotpuni prikaz hibridnog fotomultiplikatora, na slici 25. pokazano je spajanje hibridnog

fotomultiplikatora s pozadinskom elektronikom.

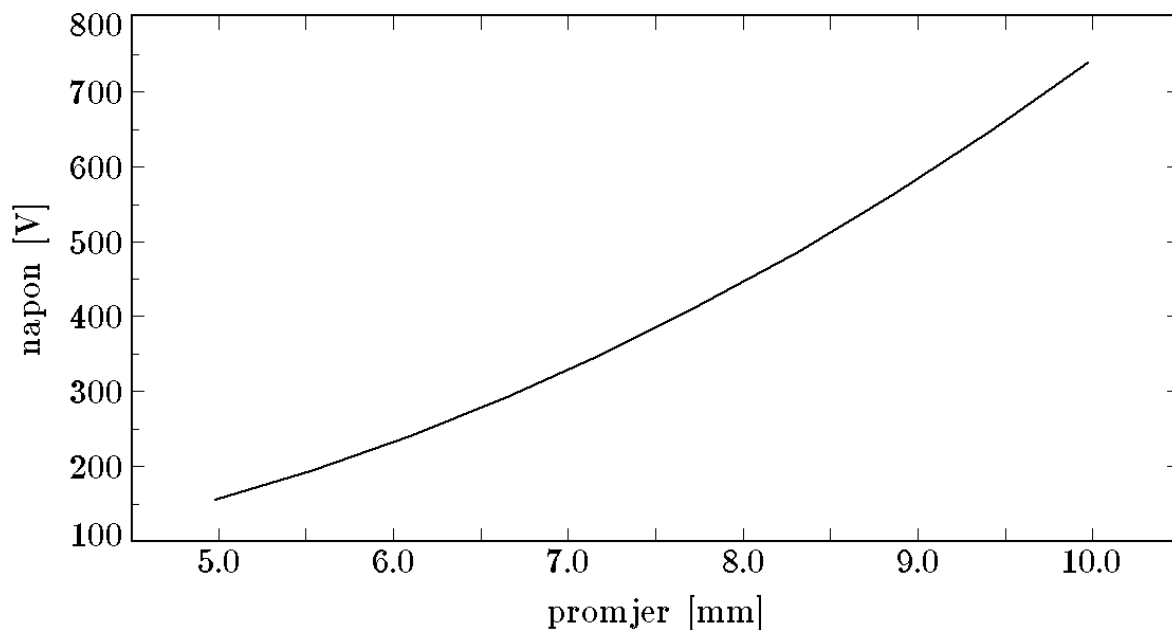


SLIKA 25. *Elektronički sklop za očitavanje signala s IPD-a. Na izlaz hibridnog fotomultiplikatora spaja se pojačalo koje je od fotodiode odijeljeno kapacitorom. Potencijali fokusirajućih elektroda izvedeni su dijeljenjem napona s jednog izvora koji mora biti vrlo stabilan zbog dobrog fokusiranja.*

Za novo rješenje hibridnog fotomultiplikatora napravljene su i neke analize kojima su i kvantitativno prikazani pojedini parametri detektora.

Potencijali elektroda

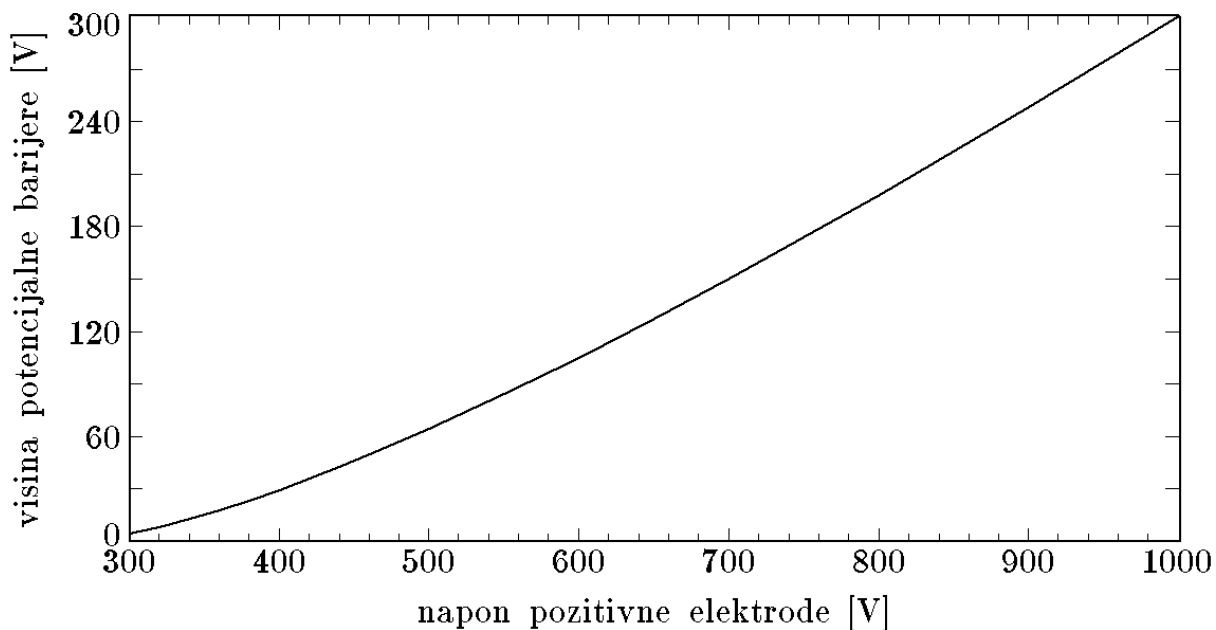
Željena visina potencijalne barijere za pozitivne ione može se postići izborom odgovarajućih parova iznosa napona pozitivne elektrode i širine otvora pozitivne elektrode. Slika 26. npr. prikazuje koji su naponi pozitivne elektrode potrebni da bi se za određenu širinu otvora pozitivne elektrode ostvarila potencijalna barijera visine (15.0 ± 0.1) V.



SLIKA 26. Ovisnost širine otvora pozitivne elektrode o naponu pozitivne elektrode za potencijalnu barijeru od 15V.

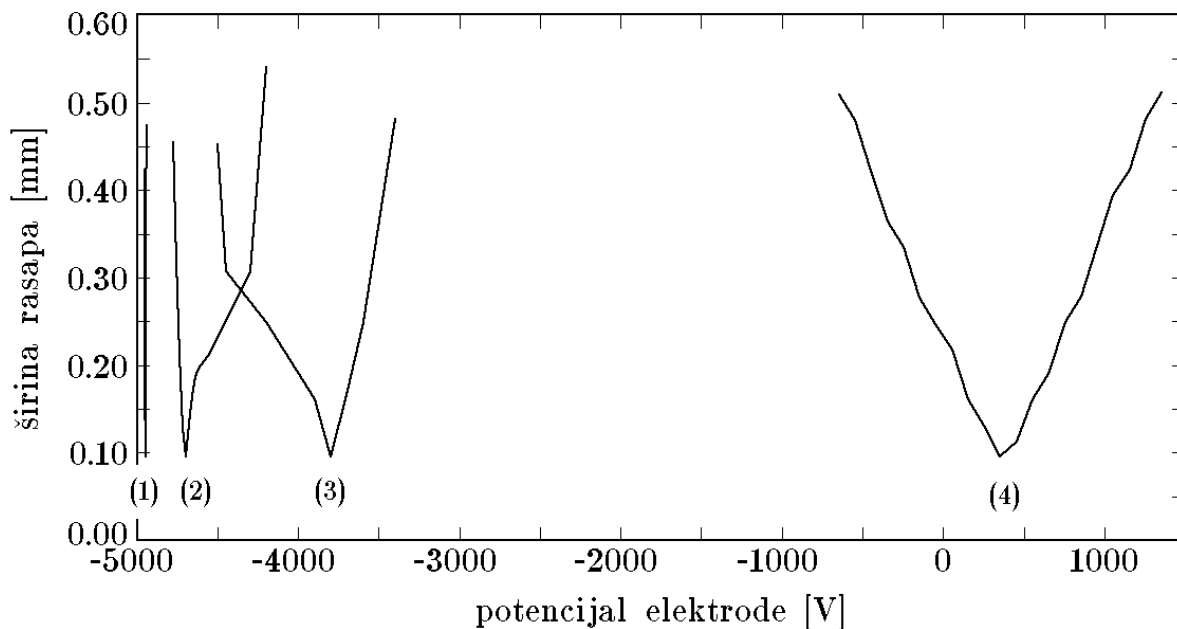
Poželjno je da s jedne strane širina otvora pozitivne elektrode bude čim veća kako bi se izbjegli udari elektrona u elektrode i stijenke vakuumske cijevi. S druge je strane za veći otvor pozitivne elektrode potreban i veći napon čija je gornja granica stvar tehnološkog rješenja.

Ako se odlučimo za određenu širinu otvora pozitivne elektrode, onda promjenom napona pozitivne elektrode možemo mijenjati visinu potencijalne barijere. U ovom je radu korištena procjena da će maksimalna kinetička energija pozitivnih iona izbačenih s fotokatode biti oko 15 eV. U tijeku je teorijski proračun maksimalne energije pozitivnih iona, a planira se i eksperiment kojim bi se izmjerila energijska raspodjela pozitivnih iona izbačenih s fotodiode. Ukoliko bude potrebno, visina se potencijalne barijere lako može promijeniti, a njezina ovisnost o naponu pozitivne elektrode prikazana je na slici 27.



SLIKA 27. *Visina potencijalne barijere u ovisnosti o naponu pozitivne elektrode uz zadanu širinu otvora pozitivne elektrode od 7.2 mm.*

Kad se govori o potencijalima fokusirajućih elektroda, valja pokazati koliki je njihov utjecaj na promjenu širine rasapa elektrona na području fotodiode. Takvu ovisnost pokazuje slika 28.



SLIKA 28. *Ovisnost širine rasapa elektrona na fotiodiodi o potencijalu svake pojedine elektrode. Za svaku fokusirajuću elektrodu mijenjan je potencijal u pozitivnom i negativnom smjeru (pri čemu potencijali ostalih elektroda nisu mijenjani) te je promatrana širina rasapa elektrona na području fotodiode. Opaža se da je važnost elektrode (1) daleko najveća. Male promjene potencijala prve elektrode imaju veliki utjecaj na širinu rasapa elektrona u području fotodiode. Što je elektroda udaljenija od fotokatode, to je njezin utjecaj manji.*

Iz podataka prikazanih na slici 28. može se zaključiti da izvor napona na koji su spojene negativne elektrode i fotokatoda mora biti vrlo stabilan jer promjene u naponu kvare fokusiranje elektrona u fotodiode. Izvor napona na koji je spojena pozitivna elektroda ne mora biti naročito stabilan jer male promjene napona pozitivne elektrode nemaju veliki utjecaj na fokusiranje elektrona.

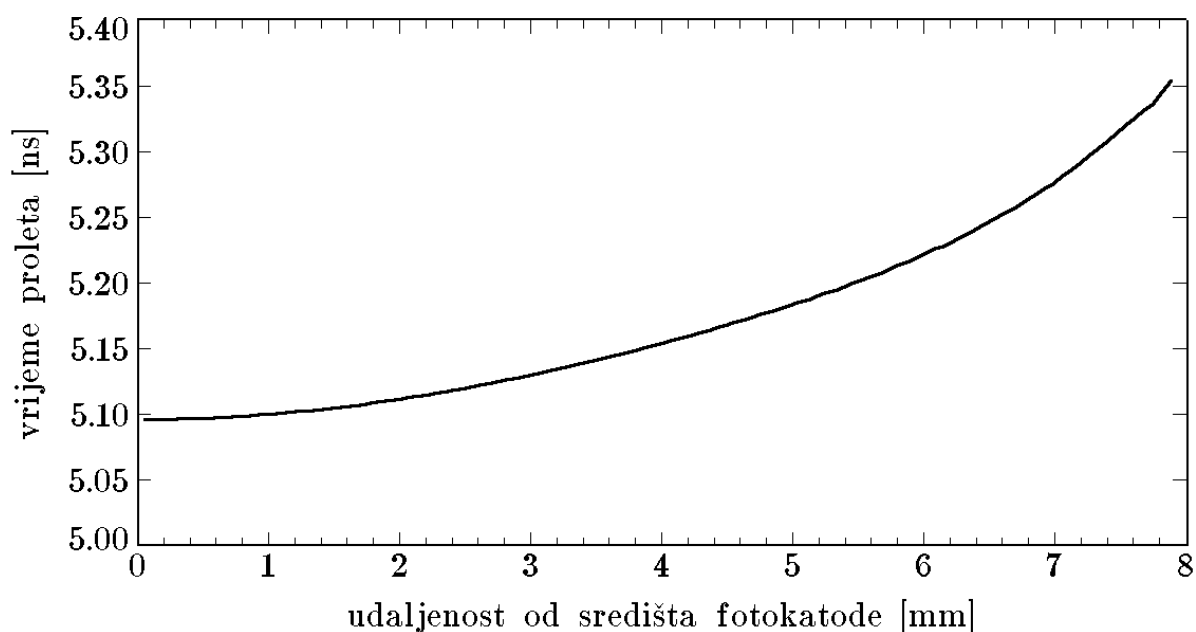
Pri dizajnu ionske optike fotomultiplikatora općeniti su zahtjevi:

- (1) dobro fokusiranje (svi elektroni, bez obzira na mjesto emisije, moraju pasti u zadano područje);
- (2) dobro vremensko razlučivanje (svi elektroni, bez obzira na mjesto emisije, moraju imati što sličnija vremena proleta od fotokatode do fotodiode).

Iako ovaj rad prvenstveno rješava problem pozitivnih iona, napravljene su i analize fokusiranja te vremenskog razlučivanja postojećeg rješenja koje mogu poslužiti kao početni parametri za daljnja usavršavanja hibridnog fotomultiplikatora.

Vremena proleta

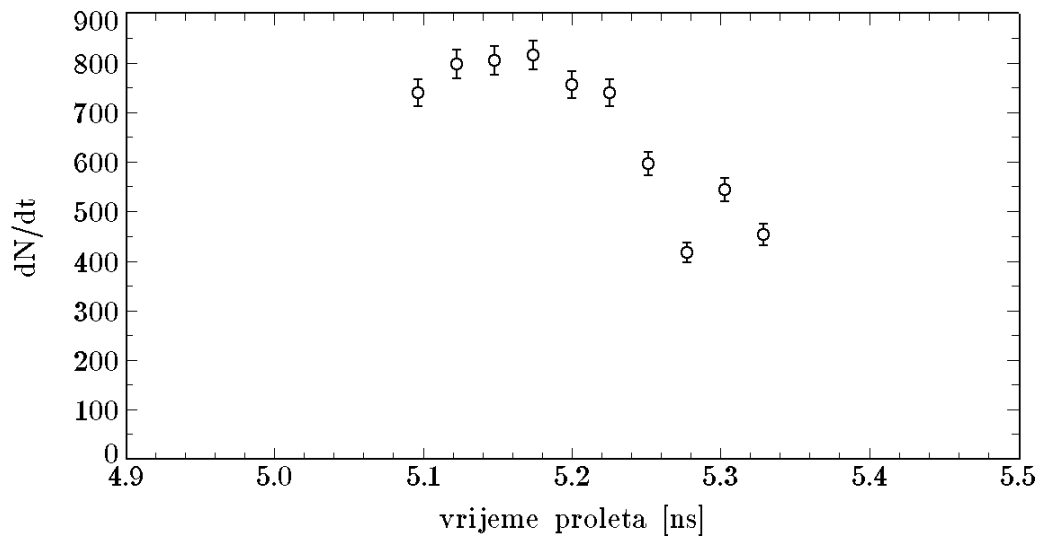
Elektroni emitirani s različitih mjesta na fotokaturi dolaze do fotodiode po različitim putanjama. Zbog konzervativnosti elektrostatskog polja, svi elektroni dobivaju na kraju isti iznos brzine (koja odgovara kinetičkoj energiji od 5 keV), ali su im vremena proleta različita. Za predstavljenu ionsku optiku vremena proleta iznose oko 5 ns, a najveća i najmanja vrijednost razlikuju se za 258 ps. Na slici 29. prikazana je krivulja iz koje se može očitati vrijeme proleta za bilo koju točku fotokatode s koje elektron može biti emitiran.



SLIKA 29. Simulirano je vrijeme proleta elektrona koji izlijeću s fotokatode (s početnom energijom od 0.1 eV) te udaraju u poluvodičku fotodiode. Vrijeme proleta ovisi o polumjeru tj. o udaljenosti mjesta emisije elektrona, tako da elektron emitiran u središtu fotokatode putuje do fotodiode 5.096 ns, dok elektron emitiran s ruba fotokatode putuje do fotodiode 5.354 ns. Razlika ovih vremena jest $\Delta t_{\text{TOT}} = 258$ ps.

Ukupna razlika vremena proleta ne daje pravu sliku o vremenskom razlučivanju, jer elektroni ne dolaze jednako često iz središta i s rubova fotokatode. Zato je napravljena simulacija u kojoj se elektroni emitiraju jednoliko s

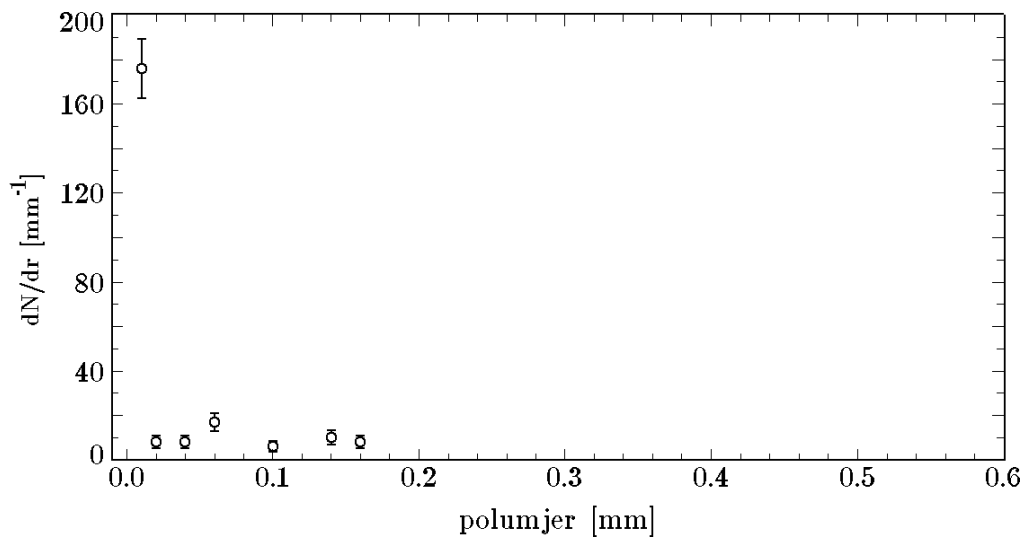
cijele površine fotokatode pa je raspodjela vremena proleta prikazana na slici 30.



SLIKA 30. *Raspodjela vremena proleta elektrona emitiranih jednoliko s površine cijele fotokatode.*

Fokuseranje

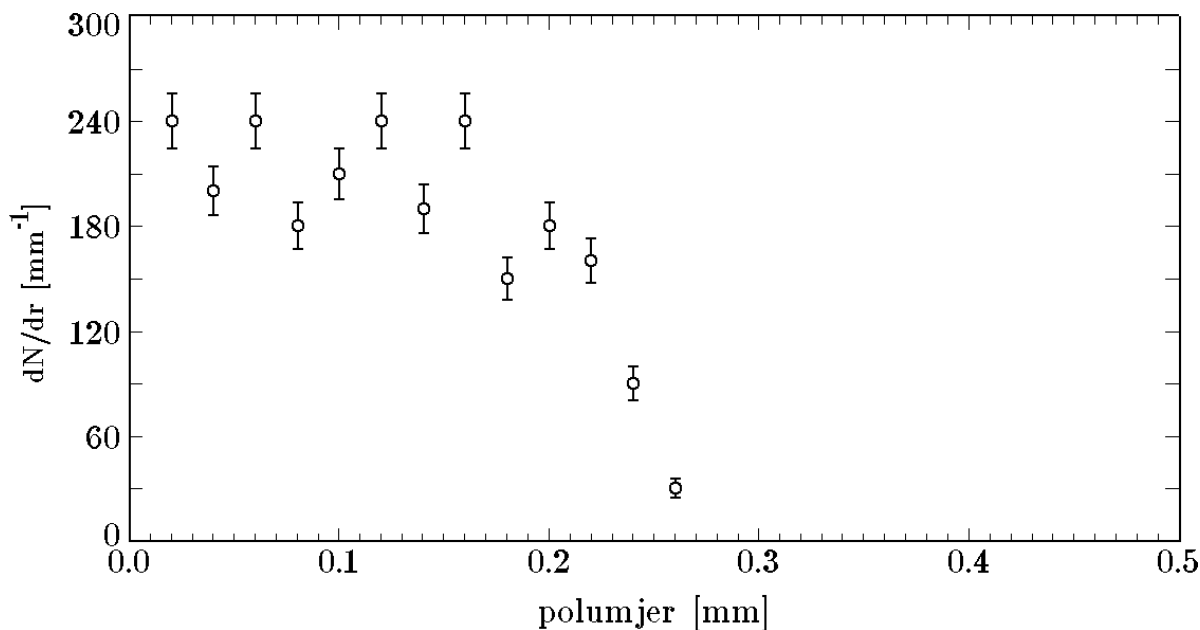
Da bismo vidjeli koliko dobro predstavljena ionska optika fokusira elektrone, razmotrimo raspodjelu elektrona na području fotodiode.



SLIKA 31. *Radijalna raspodjela elektrona bez početnog raspršenja u ravnini fotodiode. Velika većina elektrona pada u malo područje oko središta fotodiode. Svi elektroni u simulaciji emitirani su u smjeru okomitom na površinu fotokatode s početnom energijom od 0.1 eV.*

Elektroni su emitirani jednoliko s površine cijele fotokatode. Za svaki je elektron zabilježena udaljenost točke udara (u područje ravnine fotodiode) od središta fotodiode (polumjer). Na slici 31. prikazana je ovisnost broja elektrona o polumjeru za elektrone koji nisu početno raspršeni.

Ovakva simulacija napravljena je da se pokaže kako dobro može biti žarište odnosno rasap elektrona na području fotodiode. U stvarnosti su elektroni nakon emisije s fotokatode raspršeni prema termičkoj raspodjeli u energiji i smjeru. Slika 32. prikazuje radijalnu raspodjelu elektrona koji jesu početno raspršeni.



SLIKA 32. Radijalna raspodjela elektrona s početnim raspršenjem u ravnini fotodiode. Elektroni su odaslani s jednakom vjerojatnošću po površini cijele fotokatode sa slučajnom početnom energijom iz intervala $[0, 0.2]$ eV i slučajnim početnim smjerom. Za svaki elektron zabilježen je polumjer udara u ravnini fotodiode.

Početno raspršenje elektrona u energiji i smjeru dovodi do proširenja rasapa elektrona u ravnini fotodiode, no svi su elektroni ipak pali unutar promjera od 0.54 mm. Dakle, s gledišta fokusiranja fotodiode se može još smanjiti.

8. ZAKLJUČAK

Istraživanje kozmičkog gama zračenja u dosad neistraženom energijskom području od 20 do 300 GeV može donijeti odgovore na mnoga važna pitanja u astrofizici. Npr. nalaze li se u središtima aktivnih galaktičkih jezgri masivne crne rupe, što se krije iza zagonetne pojave iznenadnih i intenzivnih provala kozmičkog gama zračenja, postoje li SUSY čestice i tamna tvar, kako kozmičko gama zračenje međudjeluje s infracrvenim pozadinskim zračenjem, kako nastaje gama zračenje u okolini pulsara i crnih rupa te općenito koji se fizički procesi odvijaju u okolini kompaktnih kozmičkih objekata? Kako bi se spomenuto energijsko područje moglo istražiti valja razviti novu generaciju Čerenkovljevih teleskopa s reflektorom velike površine i kamerom velike kvantne efikasnosti, odličnog vremenskog razlučivanja te malog unutrašnjeg šuma.

Eksperiment MAGIC moći će zadovoljiti sve postavljene zahtjeve i obuhvatiti cijeli neistraženi interval od 20 do 300 GeV zahvaljujući reflektoru promjera 17 m i kameri sastavljenoj od matrice hibridnih fotomultiplikatora. Hibridni fotomultiplikator je novo tehnološko rješenje detektora optičkog zračenja kojim se može detektirati pojedinačni foton, no postojeće izvedbe još uvijek ne zadovoljavaju sve zahtjeve eksperimenta MAGIC pa su potrebna daljnja poboljšanja. Osnovni problem predstavljaju pozitivni ioni koje elektroni izbacuju s područja fotodiode stvarajući tako unutrašnji šum detektora.

U radu je predstavljen hibridni fotomultiplikator tvrtke Intevac kojim problem pozitivnih iona nije riješen na zadovoljavajući način, te novi dizajn ionske optike kojim je problem pozitivnih iona u hibridnom fotomultiplikatoru u potpunosti riješen.

Umetanjem pozitivne elektrode ispred fotodiode stvorena je potencijalna barijera za pozitivne ione koja im ne dopušta ubrzanje do visokih energija. Tako pozitivni ioni oslobođeni s fotodiode i okolnog prostora više ne predstavljaju opasnost za fotokatodu tj. ne mogu izazvati naknadne impulse niti oštećenja fotokatore. Unutrašnji šum detektora stoga je značajno smanjen što je izuzetno važno za eksperiment kao što je MAGIC gdje je od presudne važnosti povećati odnos signal/šum.

Rješenje je demonstrirano na Intevacovom hibridnom fotomultiplikatoru kao njegava modifikacija. Međutim, ideja potencijalne barijere predstavlja jedno općenito rješenje koje se može primjeniti i šire npr. kod fotomultiplikatora s dinodama.

Autor i dalje radi s grupom za studiju tvari u ekstremnim uvjetima s IRB-a na usavršavanju detektora Čerenkovljevih fotona, ne samo za eksperiment MAGIC nego i za eksperiment ALICE u CERN-u. Planira se do krajnosti pojednostavniti ionska optika smanjenjem broja elektroda. Također se radi na poboljšanju vremenskog razlučivanja detektora, a razmatra se i mogućnost novog tipa hibridnog fotomultiplikatora s preslikavanjem fotokatore na matricu fotodioda čime bi se bitno poboljšalo razlučivanje cijele kamere teleskopa MAGIC.

9. LITERATURA

- [Be97] M. C. Begelman and J. Bland–Hawthorn, A well–fed black hole, *Nature* 385 (1997) 22.
- [Du97] J. Dunlop, Dinosaurs of the universe, *Physics World* Jan. 1997, 39.
- [Br96] S. M. Bradbury et al., Test of the new hybrid INTEVAC intensified photocell for the use in air Cherenkov telescopes, *Nucl. Instr. and Meth. A* (1996).
- [Su96] M. Suyama et al., Compact HPD, *IEEE Nuclear Science Symposium*, 1996.
- [Ba96] J. A. Barrio et al., The MAGIC Telescope Project for the Study of Cosmic Gamma-Rays above 15 GeV, 1996.
- [Yo96] T. Yoshikoshi, Detection of Very High Energy Gamma Rays from the Direction of the Vela Pulsar, dissertation, Tokyo, ICRR, 1996.
- [Da96] D. A. Dahl, SIMION 3D Version 6.0, User's Manual, Princeton Electronic Systems, Princeton, 1996.
- [Ka94] A. Karle, Entwicklung eines neuartigen atmosphärischen Tscherenkovdetektors und Messungen an hochenergetischer Kosmischer Strahlung zwischen 15 und 1000 TeV, Dissertation, Ludwig–Maximilians–Universität, München, 1994, Kapitel 1–2.
- [Lo93] M. S. Longair, *High Energy Astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993, chapters 1–5.
- [Le87] William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer Verlag, Berlin, 1987, chapters 8–10.
- [Ja74] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley and Sons, New York, 1975, chapter 13.

10. SAŽETAK

Cilj je eksperimenta MAGIC istražiti još neistraženi dio elektromagnetskog spektra kozmičkog gama zračenja, područje od 20 do 300 GeV. Ispod 20 GeV istraženo je detektorima na satelitima, a iznad 300 GeV Čerenkovljevim teleskopima i detektorima nabijenih čestica na površini Zemlje.

Istraživanja su usmjerena na kompaktne kozmičke objekte (aktivne galaktičke jezgre, pulsare, binarne sustave) u okolini kojih nastaje visokoenergijsko gama zračenje kao i na ostatke supernova, anihilaciju SUSY čestica itd.

Kozmičko zračenje u spomenutom energijskom intervalu stvara toliko kratke pljuske čestica u atmosferi da do površine Zemlje dopiru samo Čerenkovljevi fotoni. Kako je broj tih fotona malen detekcija mora biti vrlo efikasna pa će zato u kameru teleskopa biti ugrađeni hibridni fotomultiplikatori koji imaju visoku kvantnu efikasnost, mali unutrašnji šum i odlično vremensko razlučivanje. Ti fotomultiplikatori predstavljaju novo tehnološko rješenje, a spoj su vakuumske cijevi i poluvodičkog detektora.

Karakteristike postojećih hibridnih fotomultiplikatora još uvijek ne odgovaraju potrebama eksperimenta MAGIC. Glavni problem predstavljaju pozitivni ioni koji stvaraju unutrašnji šum detektora. U ovom radu prikazano je novo rješenje problema pozitivnih iona pomoću potencijalne barijere koje je u potpunosti zadovoljavajuće pa se može očekivati primjena, ne samo za potrebe eksperimenta MAGIC nego i šire.