

Optimizacija Niza Čerenkovljevih teleskopa (CTA) pomoću Monte Carlo simulacija

Mario Petričević

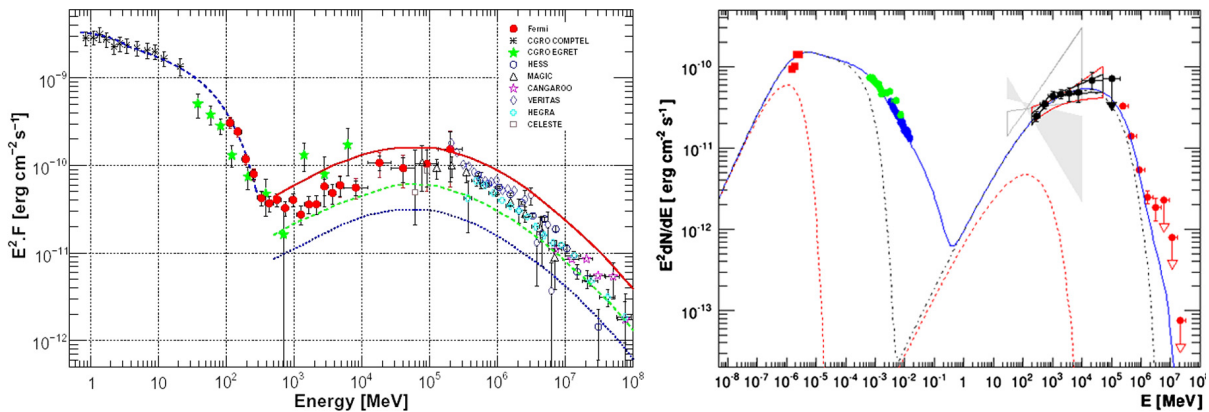
26. siječnja 2016.

Sažetak

Pomoću Monte Carlo simulacija u programu CORSIKA simulirani su pljuskovi čestica nastalih uslijed interakcija fotona, elektrona i protona s atomima atmosfere. Simulacije su potrebne radi što boljeg odabira lokacije, broja pojedinih vrsta teleskopa i njihovog prostornog rasporeda. Rezultati koje smo dobili u obliku krivulja osjetljivosti pokazali su da je diferencijalna osjetljivost bolja u konfiguraciji s četiri u odnosu na konfiguraciju s tri teleskopa, ali i da je potrebno više simulacija kako bi krivulje prekrile predviđeni raspon energija.

1 Gama-zračenje

Područje gama-astronomije odgovara fotonima energije iznad 0,5 MeV. Najviše detektirane energije iznose oko 100 TeV. Za nastanak kozmičkih gama-zraka odgovorna su dva različita procesa. Elektroni i pozitroni visoke enrgije interagiraju s poljem zračenja teških jezgi (N, O, Ar). U magnetskim poljima proizvode sinkrotronske fotone čije energije ne prelaze područje niskoenergijskog gama-zračenja. Elektroni i pozitroni mogu putem inverznog Comptonovog efekta ubrzati pozadinske fotone inače nižih energija do vrlo visokih. Ovi procesi nazivaju se leptonskim. U gustim područjima međuzvezdanog medija visokoenergijski protoni i jezgre interagiraju s materijom putem nuklearnih interakcija što često dovodi do nastanka neutralnih mezona, posebice π^0 mase mirovanja $135MeV/c^2$. Kinematika raspada $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ pokazuje da, bez obzira na spektar ulazne čestice, spektar gama-zraka ima maksimum pri $m_0c^2/2 \approx 68MeV$ nakon čega opada karakteristično za netermalne izvore gamma-zračenja: $\propto E^{-\alpha}$ gdje je α spektralni indeks.



Slika 1: Spektralne energetske distribucije $E^2 d^3 N_\gamma / (dE dt dS)$ dvaju različitih netermalnih izvora od radio do VHE γ -područja - Rakove maglice (lijevo) i aktivne galaktičke jezgre PKS2155-304 (desno). Preuzeto s [2].

Mnogi izvori detektirani iznad 100 MeV emitiraju i netermalne fotone duž elektromagnetskog spektra. Budući da diferencijalni udarni presjek γ -zraka $d^3 N_\gamma / (dE dt dS)$ brzo opada

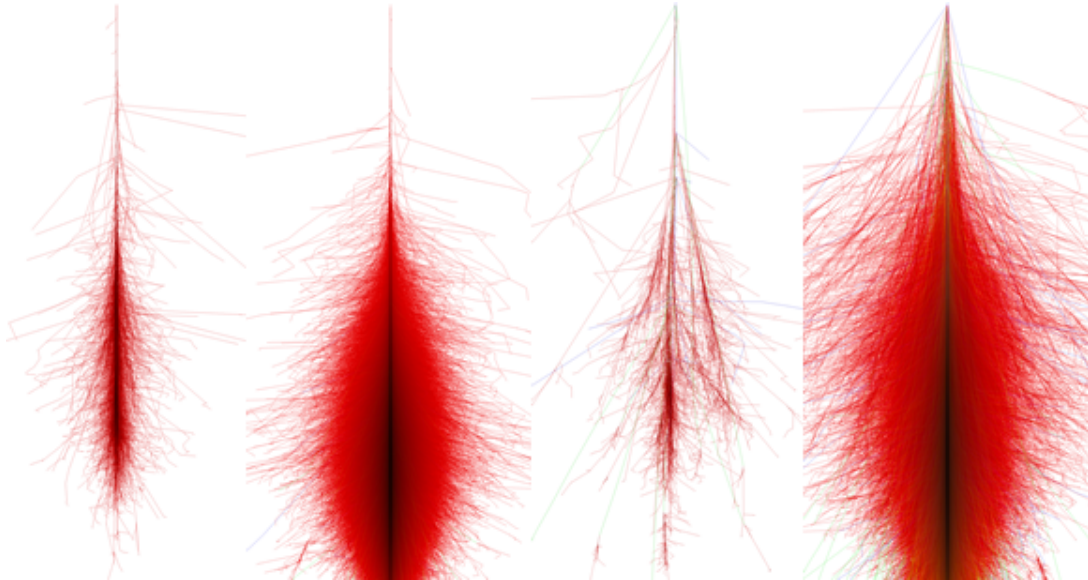
s energijom, korisno je uvesti veličinu spektralna energetska distribucija (SED):

$$E^2 \frac{d^3 N_\gamma}{dE dt dS} = E \frac{d^3 N_\gamma}{d \ln E dt dS} \quad (1)$$

koja predstavlja snagu po jedinici površine po $\ln E$. Na slici 1 vidimo dvije izražene komponente. Prva dolazi od sinkrotronskog zračenja, a druga od inverznog Comptonovog efekta. Mogući izvori γ -zračenja su pulsari, "pulsar wind nebulae", supernove, ostaci supernove, neki binarni sustavi i centar Mliječne staze. Ekstragalaktički izvori uključuju aktivne galaktičke jezgre (AGN), "starburst galaxies" i bljeskove γ -zraka (GBR). Zabilježeni su i izvori bez očitog para na drugim energijama.

2 IACT i CTA

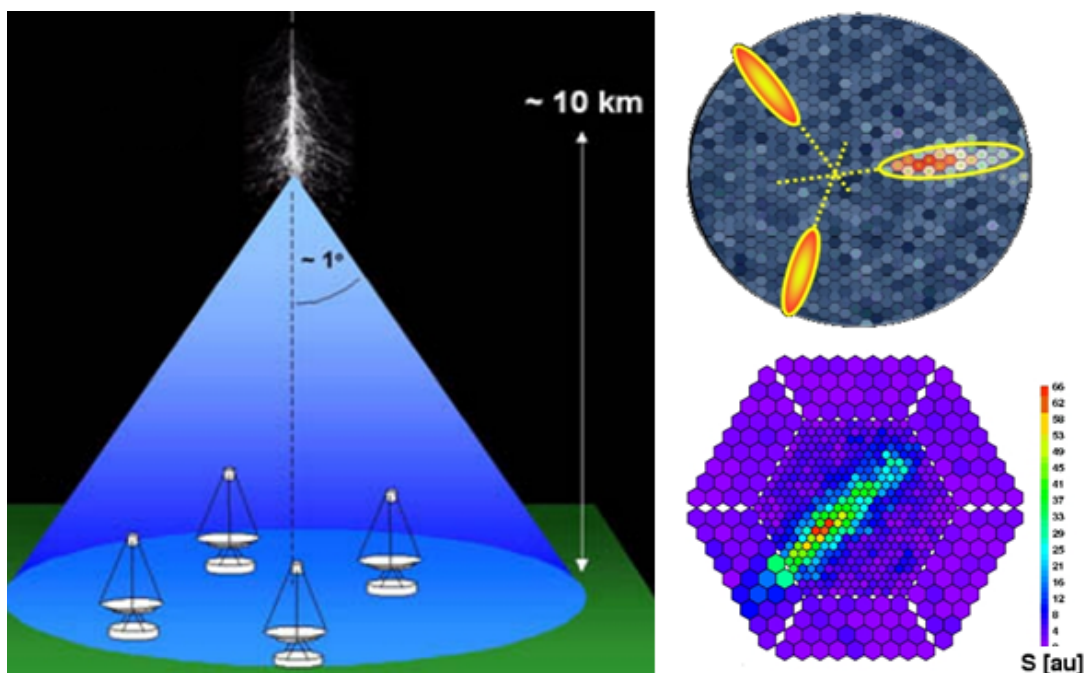
γ -zrake nose informacije o najnasilnijim i najenergičnijim procesima u svemiru, a njihovo opažanje moguće je tek zadnjih 25 godina zbog razvoja IACT (imaging air Cherenkov telescopes). Trenutni IACT instrumenti poput Zemaljskih H.E.S.S., MAGIC i VERITAS te Fermi i AGILE satelita detektirali su oko 150 γ -izvora. Niz Čerenkovljevih teleskopa (Cherenkov Telescope Array, CTA) je planirani opservatorij s ciljem povećanja osjetljivosti, kutne razlučivosti, raspona energije i pokriva čitavog neba. Usporedba s postojećim instrumentima prikazana je na slici 4. Zbog zadnjeg cilja bit će izgrađen na obje hemisfere (50-100 teleskopa po lokaciji). Na južnoj će biti raspoređeno nešto više teleskopa jer južno nebo pokriva većinu naše galaksije. Zbog očekivanog većeg broja izvora viših energija (do PeV) na južnom nebu, tamo će biti potrebna i veća osjetljivost na tim energijama. Međunarodna kolaboracija uključuje više od 1000 članova iz 27 zemalja.



Slika 2: Vizualizacija pljuskova. Redom: foton energije 100 GeV, foton energije 100 TeV, proton energije 100 GeV i proton energije 100 TeV [6].

Zbog niskog toka visokoenergijskih (Very High Energy, VHE) fotona, potrebna je velika površina detektora. Primjera radi, najsajajni izvor gama-zračenja, Rakova maglica, ima tok od tek 6 fotona $\text{m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ [1] što isključuje satelite tipične površine detektora od 1 m^2 . Zemaljski detektori imaju veću površinu, ali ne detektiraju VHE fotone već kaskade (pljuskove) čestica nastalih nakon interakcije VHE fotona s atomima u atmosferi. Te sekundarne čestice mogu se detektirati izravno na velikim nadmorskim visinama ili neizravno pomoću Čerenkovljevog zračenja koje emitiraju jer putuju brže od svjetlosti u atmosferi (Slika 2). Postojeći IACT imaju osjetljivost od 1% toka Rakove maglice u rasponu 0.1-1 TeV za vrijeme promatranja od 25 h.

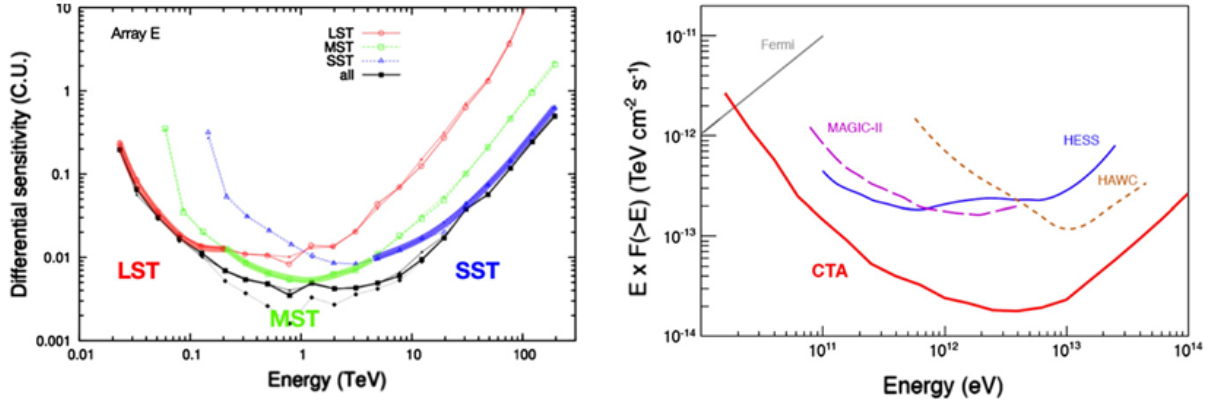
Cilj CTA je povećana osjetljivost za faktor 10 u rasponu od ispod 100 GeV do iznad 300 TeV. Povećanje raspona energije (u odnosu na dosadašnjih 100 GeV-10 TeV [3]) moguće je



Slika 3: Prikaz stereoskopskog određivanja smjera upadne čestice. Kut na slici lijevo tipično iznosi do $1,5^\circ$. Gore desno: rekonstrukcija smjera pomoću tri teleskopa. Dolje desno: oblik signala fotona na jednoj kameri. Preuzeto s [5].

zbog kombinacije teleskopa različitih veličina. Za detekciju **ispod 100 GeV** (do nekoliko desetaka GeV) potrebno je učinkovito sakupiti svjetlost. Teleskopi bi trebali pokriti oko 10% površine na koju pada Čerenkovljeva svjetlost (Čerenkovljev bazen). S obzirom na brojne pozadinske događaje i učestalost događaja, ova površina može biti relativno mala (10^4 m²). Za CTA predviđen je mali broj (≤ 4) međusobno blisko smještenih velikih teleskopa (Large-size telescope, **LST**) promjera zrcala 23 m. LST-ovi se moraju moći brzo usmjeriti kako bi omogućili brzi odziv (repointing time) na upozorenja o gama bljeskovima (Gamma ray burst, GBR). Detekciju u rasponu **0.1-10 TeV** obavljat će teleskopi srednje veličine (**MST**) čija zrcala imaju promjer 12 m, a međusobno su udaljeni oko 100 m. Osjetljivost u odnosu na postojeće instrumente povećana je zbog većeg broja teleskopa čime čime je prekrivena veća površina, a i bolje će se moći stereoskopski odrediti smjer upadne γ -zrake (Slika 3) - dovoljna su dva teleskopa i dobro mjerenje. Po prvi put će površina prekrivena teleskopima biti veća od površine Čerenkovljevog bazena - moguća je uniformna detekcija "duž bazena", a dio zabilježenih slika nalazi se na optimalnoj udaljenosti od osi pljuska čestica (70-150 m) gdje je intenzitet svjetlosti velik, a fluktuacije male. Za energije **iznad 10 TeV** glavnu prepreku predstavlja mali broj događaja - spektar netermalnih γ -izvora opada s negativnom potencijom. Također, fotoni viših energija tvorit će i veći Čerenkovljev bazen. Čerenkovljevi fotoni tako se mogu detektirati i izvan tipičnog radijusa bazena od 150 m. Rješenje je postavljanje velikog broja malih teleskopa (Small-sized telescope, **SST**) površina zrcala nekoliko m² i međusobno udaljenih prikladno za veći bazen (100-200 m). Alternativni postav, također nazvan SST, čini manji broj teleskopa površine zrcala 10-20 m² koji mogu detektirati pljuskove i na udaljenostima ≥ 500 m. Potonji mogu biti međusobno udaljeni nekoliko stotina metara ili grupirani u jako udaljene subklustere. Oba postava imaju svoje prednosti i mane.

Ovaj rad promatra osjetljivost LST-ova na jednoj od predloženih lokacija na južnoj hemisferi (Slika 5). Sam raspored određen je geografskim i drugim uvjetima.



Slika 4: **Lijevo:** Diferencijalna osjetljivost u jedinicama toka Rakove maglice za jedan od predloženih rasporeda čitavog niza. Tanke linije s malim simbolima prikazuju mali utjecaj smanjenog dinamičkog raspona (omjera signala najmanjeg i najevećeg korisnog intenziteta). Tanka crna linija prikazuje osjetljivost bez utjecaja pozadinskih elektrona. **Desno:** Integrirana osjetljivost za CTA i slične instrumente u sličnim uvjetima. Preuzto s [3].

3 CORSIKA

CORSIKA¹ (**CO**smic **R**ay **SI**mulations for **KA**scade) je program za proučavanje pljuska čestica. Originalno je razvijen radi simulacija za KASCADE² eksperiment. Za konstrukciju pljuska nakon upada čestice visoke energije u atmosferu koriste se Monte Carlo simulacije i svo znanje jakih i elektromagnetskih interakcija. Zbog ipak nepotpunog poznavanja interakcija i vremena izvođenja programa, programi ovog tipa koriste brojne aproksimacije. U radovima ih je nepraktično ili nemoguće sve navoditi pa tako rezultati mogu varirati od grupe do grupe.

Prije pokretanja programa u ulaznoj datoteci definiraju se parametri pljuska. Kao primarne čestice u odvojenim simulacijama definirali smo γ -foton, elektron i proton. Elektroni, protoni i normalno noćno nebo se tretiraju kao pozadina, a od željenih događaja razlikuju se po obliku signala u kameri.

Zbog kratkog vremena poluživota nije moguće odabrati vektorske mezone, rezonancije i čestice sa šarmom. Ostali parametri su npr. rasponi zenitnog i azimutnog kuta, visina prve interakcije, prva meta, model atmosfere, atmosferski parametri za pojedini sloj, granice slojeva, mionski tip raspršenja, magnetsko polje Zemlje, geografski položaj itd. Atmosfera se (ugrubo) sastoji od 78.1% N₂, 21% O₂ i 0.9% Ar. Spomenuti parametri određuju ovisnost gustoće u pojedinom sloju, a o gustoći ovise skoro sve interakcije od interesa. Interakcije neutrina su zanemarene zbog iznimno malog udarnog presjeka te se pretpostavlja da neometano prolaze kroz atmosferu. Prvu metu moguće je odabrati (N, O, Ar, ostalo) ili prepustiti slučajnom odabiru (prema zastupljenosti).

Nabijana čestica (u ovom slučaju uglavnom elektroni i pozitroni) emitira Čerenkovljevo zračenje ako je njezina brzina veća od lokalne brzine svjetlosti. Svakim korakom prolaska kroz atmosferu ispituje se uvjet

$$nv/c = n\beta > 1 \quad (2)$$

Program aproksimira indeks loma n izrazom

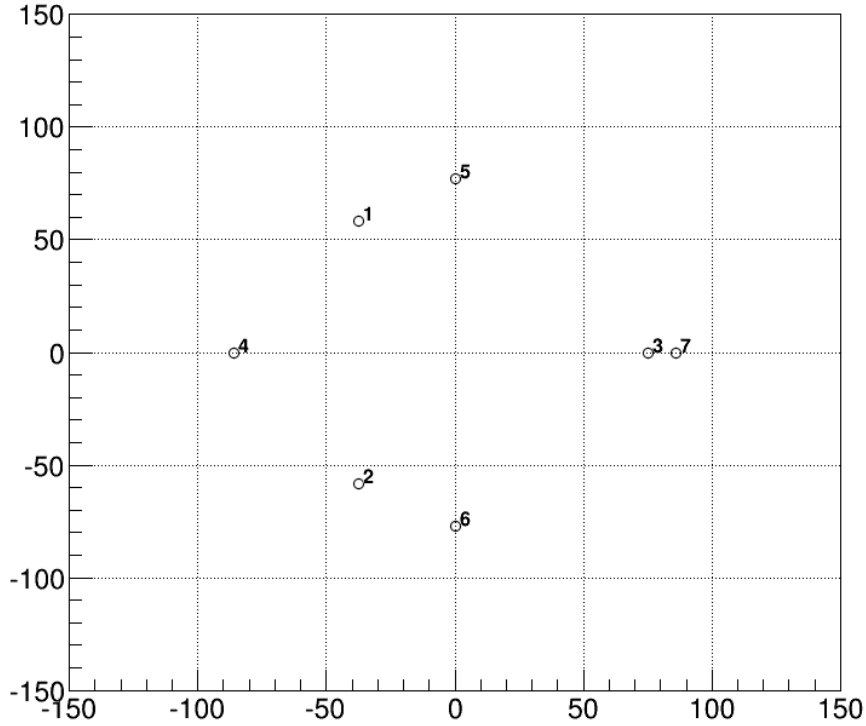
$$n = 1 + 0.000283\rho(h)/\rho(0) \quad (3)$$

gdje je $\rho(h)$ lokalna gustoća. Ovisnost n o valnoj duljini je zanemarena. Broj fotona N_C emitiranih po jedinici duljine putanje s pod kutem θ_C računa se prema

$$\frac{dN_C}{ds} = 2\pi\alpha \int \frac{\sin^2\theta_C}{\lambda^2} d\lambda. \quad (4)$$

¹<https://www.ikp.kit.edu/corsika/>

²<https://web.ikp.kit.edu/KASCADE/>



Slika 5: Jedan od predloženih rasporeda LST-a. Paranal, Čile (ESO).

Granice integracije određene su pojasom unutar kojeg je detektor osjetljiv. Određuju se s ostalim ulaznim podacima ovisno o detektoru. α je konstanta fine strukture, a kut θ_C pod kojim je foton emitiran u odnosu na smjer upadne zrake dan je s

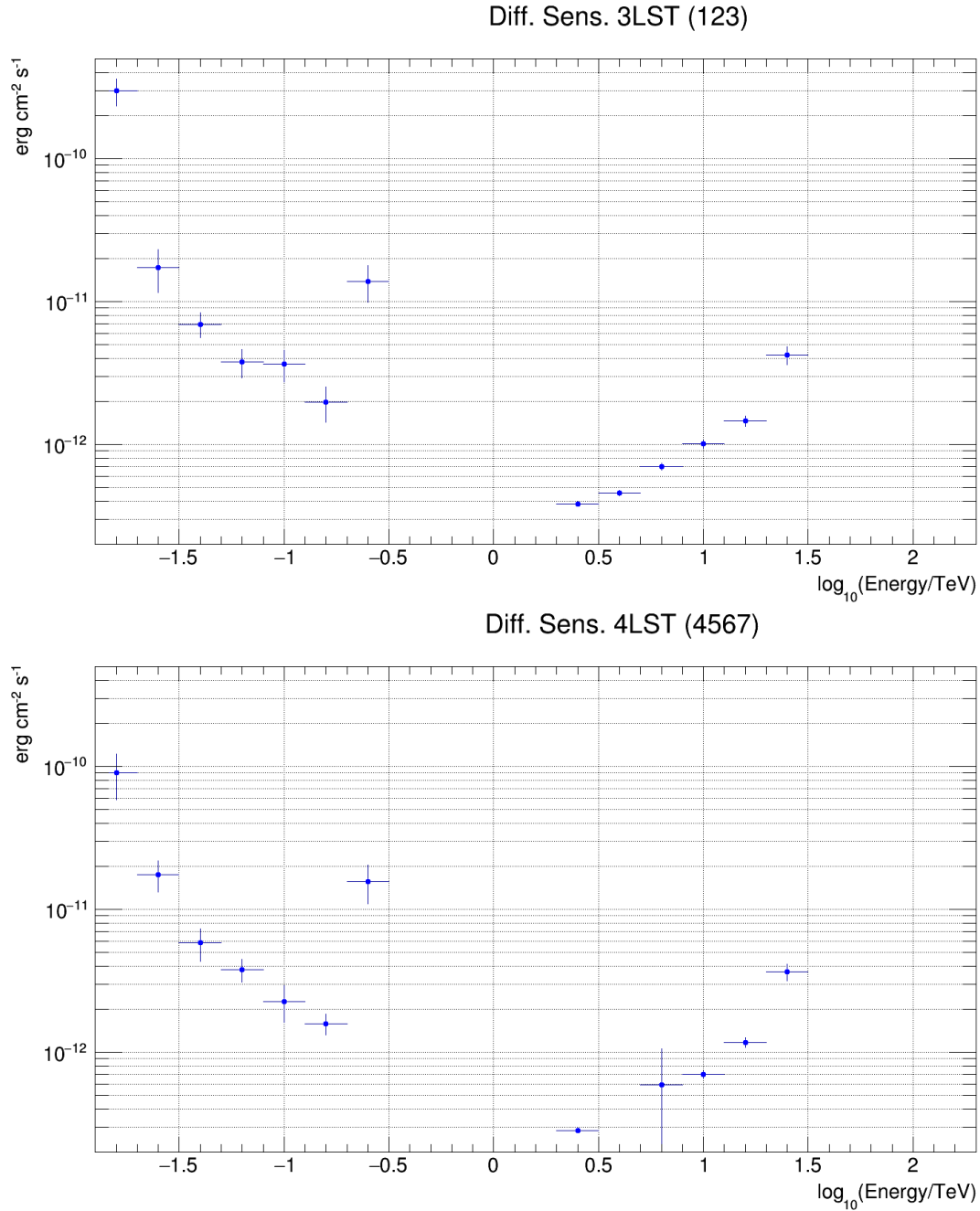
$$\theta_C = \arccos \frac{1}{\beta n}. \quad (5)$$

Putanja svake nabijene čestice podijeljena je u manje dijelove tako da je unutar svakog dijela emitiran manji broj fotona od prethodno definirane vrijednosti (photon bunch). Umjesto pojedinih fotona ova se gomila fotona tretira kao cjelina radi znatne uštede računalnih resursa. Azimutalni kut emisije svake gomile određuje se nasumično. Koordinate upada na ravninu detektora se računaju i pohranjuju. Atmosferska apsorpcija Čerenkovljevih fotona je zanemarena, ali se može naknadno uzeti u obzir ukoliko se pohrani i visina svake gomile.

S obzirom da je površina Čerenkovljevog bazena reda veličine 10^5 m^2 te da je riječ o ogromnim količinama podataka, u simulaciji smo bilježili intenzitet samo na potencijalnim lokacijama teleskopa. Također, nije realno da ćemo registrirati γ -fotone koji u atmosferu upadaju jako daleko od CTA. Tako jedan od parametara određuje radijus unutar kojeg će se simulirati upad čestica u atmosferu što znatno olakšava provedbu simulacije. Slika 5 prikazuje jedan od predloženih rasporeda LST-ova u Čileu. Cilj CTA je i pokriće čitavog neba. Stoga će rijetko svi teleskopi promatrati isti izvor. Želimo pronaći diferencijalnu osjetljivost za razne konfiguracije teleskopa. U ovom seminaru promatramo diferencijalnu osjetljivost dviju konfiguracija - **123** i **4567**.

4 Osjetljivost LST-ova

Osjetljivost teleskopa (integrirana) u praksi se definira kao integrirani tok izvora iznad energije za koju broj (nepozadinskih) događaja N_{excess} podijeljen sa korijenom broja pozadinskih događaja $\sqrt{N_{bkg}}$ iznosi 5 nakon 50 sati efektivnog promatranja. Donja granica



Slika 6: Diferencijalne osjetljivosti konfiguracija triju (gore) i četiriju teleskopa (dolje) - konfiguracije 123 i 4567 sa slike 5.

energije odgovara vrhu Monte Carlo distribucije sa spektrom sličnim spektru Rakove maglice (nagiba -2.6). Definicije i tablice s raznim vrijednostima integrirane osjetljivosti na primjeru MAGIC teleskopa dane su u [4]. Diferencijalna osjetljivost definirana je kao i integrirana osim što su podaci podijeljeni u pet koraka po dekadi energije [4].

Sa slike 6 vidimo da krivulja diferencijalne osjetljivosti pada niže dodatkom jednog teleskopa. Najbolje osjetljivosti leže u području 2-3.16 TeV. 1 C.U. (Crab Unit) je intenzitet zračenja Rakove maglice i iznosi $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Dobivene osjetljivosti iznose $3 \cdot 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (3LST) i $3 \cdot 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (4LST) ili $12,5 \cdot 10^{-6}$ C.U. (3LST) i $8,3 \cdot 10^{-6}$ C.U. (4LST) pri energiji 2,5 TeV. Osjetljivost se često izražava i u mCrab (mili-Crab) jedinici. Obje konfiguracije prividno nisu najosjetljivije u području predviđenom za taj tip teleskopa - ispod 100 GeV. Razlog najvjerojatnije leži u nedovoljnom broju simulacija. S druge strane, rezultat nije loš usporedimo li ga sa zadanim ciljevima čitavog CTA navedenih

u [3] - osjetljivost od $2 \cdot 10^{-13}$ erg cm⁻² s⁻¹ pri 1 TeV. Dobiveni rezultati bit će prezentirani na općem sastanku kolaboracije CTA u Münchenu koji traje od 25. do 29. siječnja 2016.

Literatura

- [1] arXiv:1510.05675
- [2] B. Degrange, G. Fontaine, Introduction to high-energy gamma-ray astronomy, Comptes Rendus Physique
- [3] B.S. Acharya, et al., Introducing the CTA concept
- [4] arXiv:1409.5594
- [5] <http://isdc.unige.ch/cta/>
- [6] <http://www.ast.leeds.ac.uk/fs/showerimages.html>