

Merenje odnosa grananja Higosvog bozona na dva Z bozona

Cilj ovog rada bio je merenje odnosa grananja Higosvog bozona na dva Z bozona kako bi se utvrdilo koliko često se taj proces dešava u prirodi. Korišćeni su podaci iz CERN-a dobijeni simulacijom budućeg eksperimenta CLIC na energiji od 3 TeV. Pri sudaru snopa e^+ i e^- posmatran je događaj u kome se W^+W^- fuzijom dobija Higosv bozon, pri čemu se on dalje raspada po jednačini $H \rightarrow ZZ^ \rightarrow q\bar{q}l^+l^-$. Primenom multivarijantne analize u okviru koje je korišćen BDTG metod dobijeni su rezultati za odnos grananja $(4.30 \pm 0.09)\%$. Ovi rezultati doprinose preciznijem određivanju osobina Higosvog bozona pri interakcijama sa drugim česticama.*

Uvod

Standardni model je teorija čestične fizike koja se bavi elementarnim subatomske česticama i njihovim međusobnim interakcijama. Uključuje teorije slabe i jake nuklearne i elektromagnetne interakcije. Ova teorija obuhvata i 17 elementarnih čestica, od kojih bozoni, uključujući i Higosv bozon, imaju celobrojni spin. Higosvo polje prostire se kroz ceo prostor i čestice pri interakciji sa poljem dobijaju masu. Higosv bozon ima kratak životni vek, pa ga je jako teško detektovati, te se on detektuje posredno, iz proizvoda raspada.

The Compact Linear Collider (CLIC) je budućí linearni elektron-pozitron sudarač. Energije u sistemu centra mase čestica na kojima će CLIC raditi su 380 GeV, 1.4 TeV i 3 TeV. Jedan od ci-

ljeva izgradnje CLIC-a je preciznije određivanje osobina Higosvog bozona. Prednost ovog sudarača je što se pri sudaru dve elementarne čestice dobija manji šum, nego pri sudaru složenih čestica (Milutinović-Dumbelović *et al.* 2014).

Ovaj rad bavi se određivanjem preciznosti kojom se može izmeriti odnos grananja Higosvog bozona na dva Z bozona pri energiji od 3 TeV-a. Teorijska procena odnosa grananja je oko 3% (Dittmaier *et al.* 2011). Korišćeni podaci predstavljaju rezultate dobijene simulacijom detektora CLIC-a. Primenom multivarijantne analize određena je vrednost odnosa grananja Higs na dva Z bozona, gde se Higosv bozon dobija W^+W^- fuzijom (slika 1).

Projekat

Cilj projekta je određivanje $\sigma(e^+e^- \rightarrow H\nu_e\bar{\nu}_e) \times \text{BR}(H \rightarrow ZZ^*)$, gde je σ poprečni presek za dati događaj, a BR odnos grananja Higosvog bozona na dva Z bozona. Pri sudaru pozitrona i elektrona posmatran je događaj u kome je u međuproizvodu dobijen par Z bozona, a u finalnom proizvodu par kvarkova i leptona. Kako je masa Higosvog bozona 126 GeV, a Z bozona 91 GeV, jedan Z bozon mora biti virtualne mase 35 GeV (Z^*).

Takođe, određivani su opsezi vrednosti svojstava koji su karakteristični za posmatrani događaj $e^+e^- \rightarrow H\nu_e\bar{\nu}_e$, $H \rightarrow ZZ^*$, $H \rightarrow q\bar{q}l^+l^-$ koji u ovoj analizi predstavlja signal (ν_e – elektronski neutrino, q i \bar{q} – kvark i njemu odgovarajući anti-kvark, l^+ i l^- – lepton i njemu odgovarajući anti-lepton).

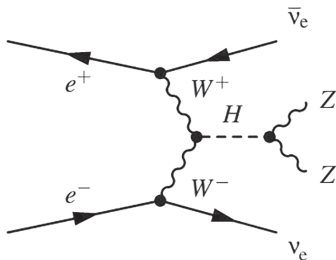
Jelena Ristić (1999), Beograd, Serdar Janka Vukotića 30/48, učenica 2. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

Nikola Maksić (1997), Beograd, Četvrta nova 43a, učenik 4. razreda Prve beogradske gimnazije

MENTORI:

Gordana Milutinović-Dumbelović, Institut za nuklearne nauke Vinča, Srbija

Vladimir Gligorov, Laboratorija za nuklearnu fiziku i visoke energije, Francuska



Slika 1. Fajnmanov dijagram nastanka Higsa W^+W^- fuzijom kao i njegovog raspada na dva Z bozona

Figure 1. Feynman diagram of the Higgs boson production via W^+W^- fusion and its decay to two Z bosons

Ostali raspadi Higsa predstavljaju šumove i podeljeni su u četiri grupe: $H \rightarrow bb$ (raspad Higsa na dva b kvarka), $H \rightarrow cc$ (raspad Higsa na dva c kvarka), $H \rightarrow gg$ (raspad Higsa na dva gluona) i ostali raspadi Higsa.

Podaci

Različiti raspadi Higsa (događaji) dobijeni su simulacijom CLIC-ovog detektora. Za svaki događaj je zahtevano da u krajnjim produktima raspada budu uključena tačno dva leptona. Leptoni su identifikovani na osnovu njihovih osobina koje su izmerene u simuliranim raspadima. U okviru jednog događaja, kombinovani su kvarkovi i leptoni kako bi se dobili kandidati za Z i Z^* bozone.

Podaci sa kojima je rađena ova analiza predstavljaju distribucije različitih svojstava raspada Higsa, tj. histograme. Za signal i svaki pojedinačni šum podrazumevan je po jedan histogram za svako svojstvo. U analizi korišćeno je 17 histograma različitih svojstava: m_H – invarijantna masa Higsa, m_Z – invarijantna masa Z bozona, m_{Z^*} – invarijantna masa virtuelnog Z bozona, $m_{Z_{qq}}$ – masa Z bozona rekonstruisana pomoću dva kvarka, $m_{Z_{leptons}}$ – masa Z bozona rekonstruisana pomoću leptona, $P(b)^{jet1}$ – verovatnoća da je prva čestica dobijena u raspadu b kvark, $P(b)^{jet2}$ – verovatnoća da je druga čestica dobijena u raspadu b kvark, $P(c)^{jet1}$ – verovatnoća da je prva čestica u raspadu c kvark, $P(c)^{jet2}$ – verovatnoća da je druga čestica dobijena u raspadu c kvark,

N_{PFO} – broj svih objekata koji su prepoznati kao čestice u događaju, Θ_H – polarni ugao čestice koja je kandidat Higsa, E_{vis} – ukupna energija u događaju, $E_{vis} - E_H$ je razlika ukupne energije i energije Higsa, p_T – komponenta nedostajućeg impulsa transverzalna snopu elektrona i pozitrona, y_{12}, y_{23}, y_{34} – tranzicione varijable. Posmatrani su histogrami svojstava signala (raspad Higsa na dva kvarka i dva leptona) i četiri šuma: $H \rightarrow bb$, $H \rightarrow cc$, $H \rightarrow gg$ i ostali raspadi Higsa.

Broj događaja signala koji je obrađivan u ovoj analizi je 9500, a šuma 110 506. Kao softverska podrška korišćen je C++ i TMVA paket za multivarijantnu klasifikaciju signala i šuma.

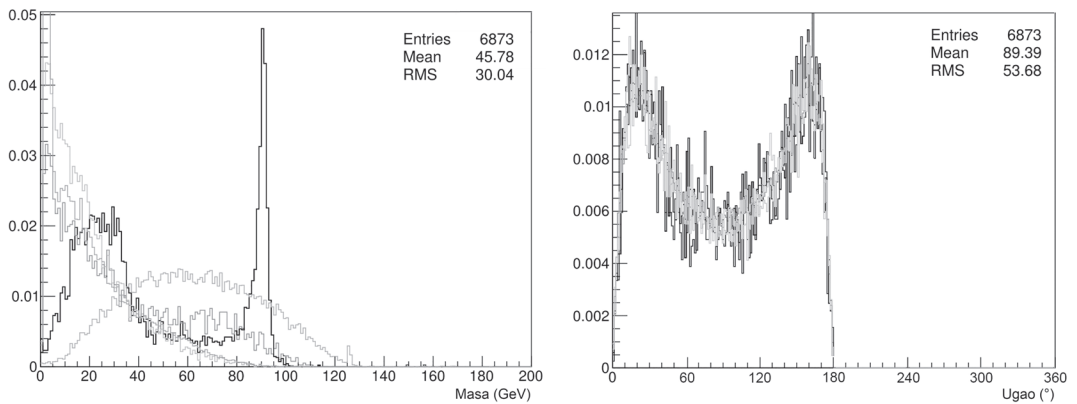
Preselekcija

Cilj preselekcije je da smanji broj događaja šuma, a zadrži što više događaja signala, radi tačnije analize. Za svako svojstvo upoređivani su histogrami za signal i odgovarajući histogrami svih šumova. Zatim je tražen opseg vrednosti svojstava za koji se zadržava preko 90% signala, a odbacuje što više šuma. Ukoliko se na histogramu signal i šum ne mogu jasno odvojiti, preselekcija se ne vrši za tu fizičku veličinu (slika 2).

Tako određeni opsezi za neka svojstva iznose: $P(c)^{jet1} < 0.85$, $P(c)^{jet2} < 0.85$, $E_{vis} > 110$, $m_H < 180$, $m_Z < 130$, $45 < NPFO < 135$, $m_{Z_{leptons}} < 100$, $Z_{qq} < 130$, $m_{Z^*} < 95$. Dakle, svi događaji čije vrednosti pomenutih svojstava nisu u posmatranom opsegu isključeni su iz dalje analize. Efikasnost signala i šumova dobijenih preselekcijom su: signal – 86.8%, $H \rightarrow bb$ – 71.4%, $H \rightarrow cc$ – 38.7%, $H \rightarrow gg$ – 72.2%, ostali raspadi Higsa – 50.4%. Preselekcijom je redukovan broj događaja šumova sa velikim poprečnim presekom.

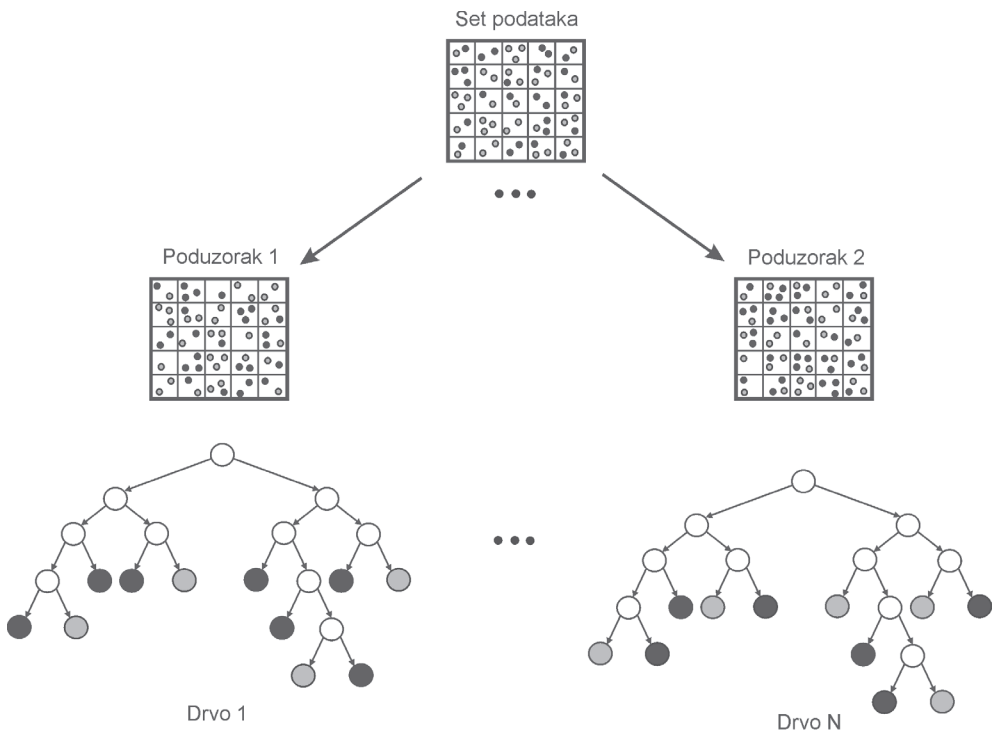
Multivarijantna analiza

Multivarijantna analiza odvaja signal od šuma koristeći razlike između svojstava, kao i razlike između njihovih međusobnih korelacija. Cilj multivarijantne analize je da se razgraniči koje osobine svojstava su karakteristične za signal, a koje za šum, kako bi se nepoznati događaj sa što većom tačnošću mogao prepoznati kao neki raspad Higsa. Sastoji se iz dva koraka – treninga i aplikacije.



Slika 2. Masa Z bozona (levo) i polarni ugao raspada Higsovog bozona (desno). Primeri grafika na koje je moguće odrediti opseg preselekcijom i primer na koje nije. Crnom linijom je označena distribucija signala, a sivom distribucije za različite šumove.

Figure 2. Mass of the Z boson reconstructed from two leptons (left) and the polar angle of the decay of Higgs boson (right). Example where preselection is valid for determining the range of values and example where it is not. Black color refers to signal distribution, whereas gray shows distribution for different backgrounds.



Slika 3. Šematski prikaz Boosted Decision Treea i efektivne podele ravni

Figure 3. Schematic representation of the Boosted Decision Tree and effective plane division

Trening

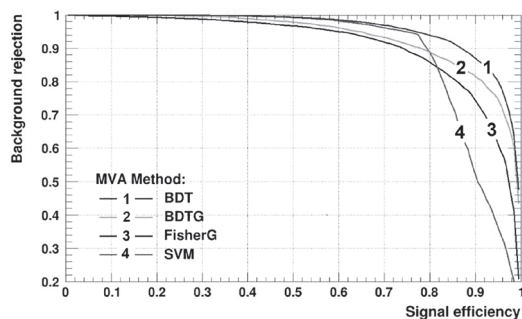
U treningu je korišćena jedna četvrtina ukupnog broja događaja (i signala i šuma), pri čemu je za svaki događaj poznato koji je raspad u pitanju. Na osnovu ovih događaja potrebno je prepoznati koje osobine raspada Higsa (vrednosti i korelacije između svojstava) određuju da je to signal. Osobine signala ne smeju biti previše specifično određene. U suprotnom, nepoznati događaji koji jesu signali se neće prepoznati (eng. overtraining). Takođe, ukoliko su osobine previše opšte, događaji koji su šumovi, prepoznavaće se kao signali. U okviru treninga obrađivane su četiri metode: BDT, BDTG, FisherG i SVM.

BDT (Boosted decision tree) predstavlja razgranatu strukturu uz pomoć koje se razdvajaju događaji signala i šuma. Grananje je zasnovano na vrednostima svojstava. Naime, svakom čvoru u drvetu se pridružuje broj. Čvor se grana na dva, pri čemu su sa leve, odnosno desne strane događaji čija je vrednost posmatranog svojstva manja, odnosno veća od vrednosti čvora. Tako se svi događaji rasporede u krajnje čvorove drveta. Posmatrajući sve krajnje čvorove u kojima ima više događaja signala, dobija se opseg vrednosti posmatranog svojstva karakterističan za signal. Proces razdvajanja događaja BDT-om po vrednosti svojstva se može efektivno predstaviti i kao podela ravni histograma na oblasti. Analogno, za oblast se određuje da li je karakteristična za signal ukoliko u njoj ima više događaja signala nego šuma (slika 3). U konstrukciji ovih drveta ne sme biti previše događaja signala da ne bi došlo do overtraininga.

Za BDT metodu, menjani su parametri na koje je ona osetljiva. Vrednosti parametara koji daju najbolju efikasnost BDT metode su: 3 za dubinu BDT-a, 3 za broj posmatranih drveta i 300 za broj događaja po jednom drvetu.

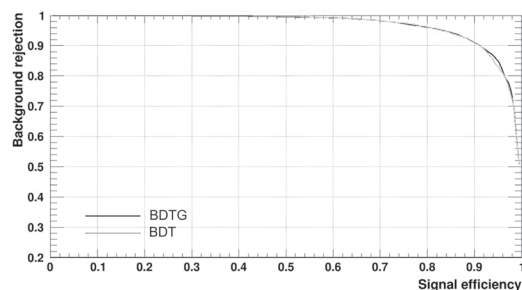
Dobijeni su grafici koji prikazuju zavisnosti efikasnosti signala i šuma koji ostaju nakon treninga (slika 4). Kako su rezultati dobijeni BDT i BDTG metodama značajno efikasniji, u daljoj analizi posmatrane su samo ove dve metode.

Dalje su menjani parametri koji utiču na obe metode. Svakom događaju, u zavisnosti od toga da li je signal ili šum, dodata je težina (vrednost poprečnog preseka za odgovarajući raspad Higgsa). Događaji sa većom težinom imaju veći uticaj



Slika 4. Procenat odbačenog šuma u zavisnosti od efikasnosti signala za četiri različite metode

Figure 4. The percentage of the rejected background depending on the efficiency of the signal for four different methods

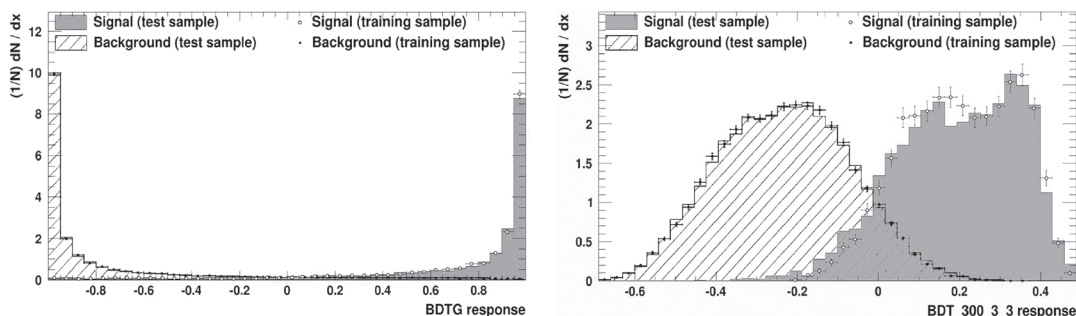


Slika 5. Procenat odbačenog šuma u zavisnosti od efikasnosti signala za BDTG i BDT metode nakon promene odgovarajućih parametara. Uočava se povećanje u efikasnosti obe metode, posebno BDTG.

Figure 5. The percentage of the rejected background depending on the efficiency of the signal for BDTG and BDT methods after fixing variational parameters. A rise in efficiency of both methods are noticeable, especially for BDTG.

na trening. Vrednosti težina za pojedinačne događaje su: signal: 244 fb, $H \rightarrow bb$: 136.9 fb, $H \rightarrow cc$: 6.9 fb, $H \rightarrow gg$: 21 fb, ostali raspad Higgsa: 51 fb. Posle dodatih težina svakom događaju, dobijen je grafik zavisnosti efikasnosti šuma i signala metoda (slika 5).

Obe metode vraćaju funkciju odziva (eng. response function). Ona svakom događaju dodeljuje verovatnoću da je to signal, odnosno šum.



Slika 6. Distribucije response funkcije za BDTG (levo) i BDT (desno) metodu. Tačke grafika predstavljaju procenu istreniranog programa da li je događaj signal ili šum. Poklapanje tačaka sa pravom distribucijom ukazuje na tačnost metode.

Figure 6. Distributions of the response function for BDTG (left) and BDT (right). Dots show the evaluation of the trained program whether that event is a signal or a background. Dots matching with the real distributions implies the method accuracy.

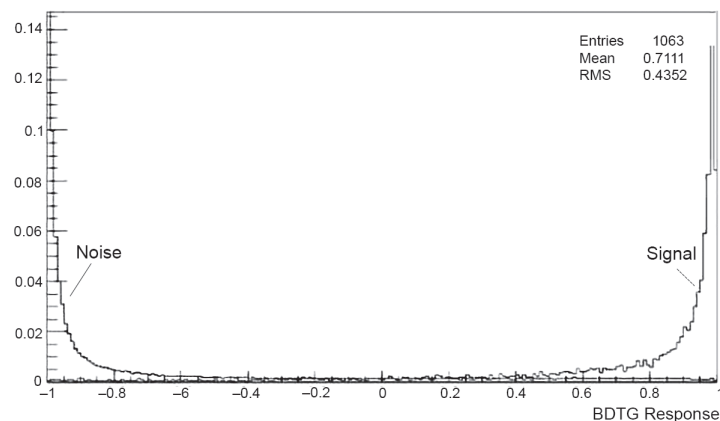
Dobijene su distribucije response funkcije (slika 6). Metodom BDTG dobijeno je jasnije razdvajanje signala i šuma od BDT metode. Pored toga, poklapanje procene treninga sa stvarnim događajima je veće kod BDTG metode, što dodatno ukazuje na njenu veću efikasnost. Upravo zbog toga, aplikacija je primenjena BDTG metodom.

Aplikacija

Aplikacija je primenjena na ostalim događajima, tj. na tri četvrtine od ukupnog broja svih raspada Higsovog bozona, BDTG metodom. Za

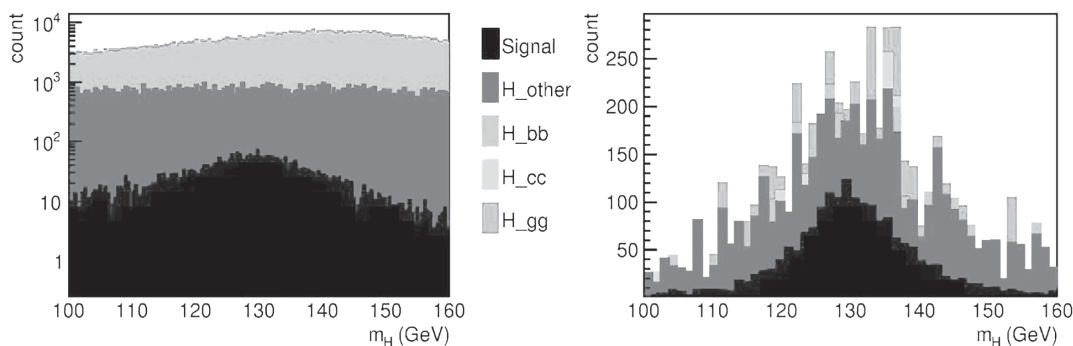
svaki događaj vraćena je vrednost response funkcije (slika 7).

Kako bi se dobio najbolji odnos grananja, posmatrani su samo događaji čija je vrednost response funkcije iznad različitih vrednosti (granica funkcije odziva). Za svaku granicu response funkcije računat je odnos grananja, kao statistička neodređenost merenja, po formuli $\frac{\sqrt{S+B}}{S}$, gde su S , odnosno B , ukupan broj signala, odnosno šuma nakon određivanja granice response funkcije, tj. nakon celokupne multivarijantne analize.



Slika 7. Distribucija response funkcije događaja signala i šuma korišćenih u aplikaciji

Figure 7. Response function distribution of signal and background event used in application



Slika 8. Distribucije invarijantne mase Higsu posle preselekcije (levo) i posle multivarijantne analize (desno)

Figure 8. Distribution of the invariant mass of the Higgs boson distribution after preselection (left) and after multivariate analysis (right)

Rezultati i diskusija

Vrednost granice response funkcije za koju je dobijen najmanji odnos grananja je BDTG-Response 0.96. Za statističku neodređenost merenja, tj. vrednost odnosa grananja dobijena je vrednost $(4.30 \pm 0.09)\%$. Dobijene su distribucije invarijantne mase Higosvog bozona nakon preselekcije, odnosno nakon multivarijantne analize (slika 8).

Zaključak

U ovoj analizi određen je odnos grananja Higosvog bozona na dva Z bozona. U analizi su korišćeni podaci dobijeni simulacijom CLIC detektora. Merenje $\sigma(e^+e^- \rightarrow H\nu_e\nu_e) \times \text{BR}(H \rightarrow ZZ^*)$ može biti određeno sa statističkom neodređenošću od 4.3%. Odnos grananja jednak je $(g_{HZZ^*} \cdot g_{HWW})^2 / \Gamma_H$, gde su g_{HZZ^*} i g_{HWW} konstante sprezanja Higosvog bozona sa Z i W bozonima, a Γ_H širina Higosvog bozona, veličina poznata iz teorije. Rezultati ove analize mogu se uključiti u računanje konstanti sprezanja Higosvog bozona. Standardnim modelom predviđeno je $g_{HWW} / g_{HZZ^*} = \cos^2\theta_w$, gde je θ_w Weinbergov ugao (Milutinović-Dumbelović *et al.* 2015), te bi rezultati analize mogli doprineti u proveravanju te predikcije.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se mentorima Gordani Milutinović-Dumbelović, sa Instituta za nuklearne nauke Vinča, i Vladimiru Gligorovom, sa instituta LPNHE u Parizu, za ideju projekta, nesebičnu pomoć, brze odgovore na sva naša pitanja, kao i za svu motivaciju i pozitivnu energiju koju su kao mentori pružili tokom celokupne izrade ovog projekta.

Literatura

Dittmaier S., Mariotti C., Passarino G., Tanaka, R. 2011. *Handbook of LHC Higgs cross sections: 1. Inclusive observables*. Geneva: CERN

Milutinović-Dumbelović G., Božović-Jelisavčić I., Grefe C., Lukić S., Pandurović M., Roloff P. 2014. Physics potential for the measurement of $\sigma(H\nu\nu) \times \text{BR}(H \rightarrow \mu^+\mu^-)$ at a 1.4 TeV CLIC collider. *CLICdp Note*, 2014-005.

Milutinović-Dumbelović G., Božović-Jelisavčić I., Robson A., Roloff P. 2015. Measurement of $\sigma(e^+e^- \rightarrow H\nu_e\nu_e) \times \text{BR}(H \rightarrow ZZ^*)$ and Higgs production in ZZ fusion at a 1.4 TeV CLIC collider. *CLICdp Conf*, 2015-004

Jelena Ristić and Nikola Maksić

Measurement of the Branching Ratio of the Higgs Boson Decay into a Z^+Z^- pair

The aim of the project was to determine the branching ratio of the Higgs boson decay into a Z^+Z^- pair in order to establish how often the process occurs. The data collected from CERN was constructed from a simulation of the future experiment CLIC at the energy of 3 TeV. At the collision of electron and positron beams, the production of the Higgs boson via W^+W^- fusion was observed, where it further on decays according to the equation $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow q\bar{q}l^+l^-$. Using multivariate analysis in which the BDTG method was used, the result of the branching ratio $(4.30 \pm 0.09)\%$ was obtained. This result contributes to the more precise measurement of the Higgs characteristics during interaction with other particles.

