

**UNIVERSITATEA din BUCURESTI
FACULTATEA de FIZICA
SCOALA DOCTORALA in FIZICA**

**INVESTIGAREA PROPRIETATILOR NEUTRINILOR
FOLOSIND DETECTORI DE VOLUME SENSIBILE MARI**

**- Teza de doctorat -
(rezumat)**

**Doctorand
DANIELA CHESNEANU**

**Conducator stiintific,
Prof.univ.dr. ALEXANDRU JIPA**

Bucuresti, 2012

1 Introducere

Fizica este o ramura a Științei care își propune să studieze și să permită înțelegerea proprietăților materiei la orice scală de energie, precum și comportamentul acesteia în diferite condiții. În secolul al XX-lea, Fizica a înregistrat un mare progres. În prima jumătate a acestui secol, Fizica fundamentală a fost dominată de teoria relativității, de teoria gravitațională a lui Einstein, și teoria mecanicii cuantice. În cea de-a doua jumătate a secolului s-a dezvoltat Fizica particulelor elementare prin descoperirea a sute de noi particule. Aceste noi cunoștințe din domeniul Fizicii Particulelor Elementare au dus la clarificarea evenimentelor ce au urmat după “Explozia primordială” (“Big Bang”) și au conferit o explicație rezonabilă pentru evoluția Universului de la momentul zero până în prezent. Fizica particulelor elementare și Cosmologia au făcut ca înțelegerea și cunoașterea să atingă un nivel de neimaginat când, în anul 1897, s-a stabilit experimental existența *electronului* și s-au determinat câteva dintre proprietățile sale fundamentale.

Obiectivele Fizicii particulelor elementare sunt de a stabili identitatea tuturor particulelor elementare din natură și de a determina modul în care ele interacționează pentru a da naștere lumii materiale. Au fost identificate patru interacții fundamentale: gravitațională, electromagnetică, slabă și tare. Fiecare dintre cele 4 forțe asociate interacțiilor respective este transmisă între particule prin schimbul unei alte particule: fotonul în cazul forței electromagnetice, W și Z în cazul forței slabe și gluonii în cazul forței tari. Gravitonul, care nu a fost observat experimental, se presupune că transmite forța gravitațională. Cu cele 12 particule de schimb și 4 interacții poate fi descris comportamentul materiei observate în Univers.

Un mare succes al Fizicii particulelor elementare a fost unificarea în același formalism a interacțiilor slabă și electromagnetică, care apar astfel ca două aspecte ale aceleiași forțe. Acest succes teoretic a fost încoronat experimental de descoperirea particulelor Z și W (bozonii intermediari) și de studiul proprietăților acestora.

Teoria acceptată astăzi pentru descrierea fenomenelor specifice din Fizica particulelor elementare este *Modelul Standard*. Modelul Standard al Fizicii particulelor elementare și interacțiilor este una dintre cele mai testate teorii din Fizică. Această teorie include forțele electromagnetice, tare și slabă, precum și particulele de schimb ale acestor interacții și explică foarte bine cum acționează aceste forțe asupra tuturor particulelor care stau la baza structurii materiei. S-a arătat că este o teorie în acord total cu experimentul, iar validitatea lui la nivel cuantic a fost probată cu succes prin unificarea interacției electromagnetice cu interacția slabă, numită și interacția electroslabă. În ciuda succesului predicțiilor sale dovedit prin compararea cu rezultatele experimentale, Modelul Standard are anumite limitări, ceea ce îl face să fie o teorie incompletă.

Există alte modele teoretice care completează deficiențele Modelului Standard prin extinderea Fizicii dincolo de Modelul Standard. Aceste extensii ale Modelului Standard prezic existența unei noi Fizici, care este favorizată să apară la scala TeV-ilor. O posibilă descoperire a acestei noi Fizici se va face în cadrul experimentelor la energii înalte folosind acceleratori de particule existenți sau proiectați pentru a fi construiți în viitor, precum și prin studierea interacțiilor cu materia ale particulelor de energii foarte mari care alcătuiesc radiația cosmică.

Atunci când termenul de “raze cosmice” se referă și la neutrini, atât la cei primari care vin din spațiu cât și la cei secundari care apar din dezintegrarea particulelor secundare ale cascadei (π , K, μ , etc.), trebuie să luăm în considerare că aceste particule calatoresc fără a interacționa, motiv pentru care sunt foarte greu de detectat. Neutrini sunt particule care nu interacționează în atmosferă și trec prin Pământ fără a pierde energie, deoarece sunt purtători numai de interacție slabă și gravitațională. Acest lucru necesită folosirea unor detectori de mari dimensiuni cu scopul de a mări probabilitatea de detecție a acestor particule. Mediul activ al detectorilor joacă un rol esențial datorită proprietăților sale. De exemplu, în 1965 Raymond Davis a folosit tancuri de mari dimensiuni cu mediul activ reprezentat de tetraclorura pentru a detecta neutrini solari prin intermediul reacției de captură a

neutrinilor in clor (dezintegrare beta inversa) [1].

Deoarece semnalele experimentale de la neutrini sunt greu de obtinut se acorda o atentie deosebita atat acestor semnale cat si fondului cosmic corespunzator. Au fost elaborate proceduri complicate pentru a identifica corect semnalele neutrinilor. Acest lucru favorizeaza constructia detectorilor de volume sensibile mari plasati in laboratoare subterane, cum ar fi, de exemplu, o mina de sare. Pe aceasta idee se bazeaza studiile realizate in cadrul acestei teze de doctorat, care prezinta simulari ale interactiilor neutrinilor cu nucleele, in curenti incarcati, pentru toate familiile de neutrini si nuclee ale gazelor rare, necesare pentru constructia detectorilor de volume sensibile mari.

Capitolul 2 reprezinta justificarea studierii fenomenelor rare si discuta aspecte teoretice generale ale Modelului Standard, iar la final contine o scurta prezentare a modelelor dincolo de Modelul Standard. Tot in acest capitol sunt prezentate contributiile avute in cadrul ramurii Fizicii la acceleratori de protoni si o scurta descriere a Fizicii fara acceleratori.

In capitolul 3 este realizata o introducere in Fizica si detectia neutrinilor proveniti din diverse surse. Aceasta sectiune porneste cu descrierea proprietatilor neutrinilor in Modelul Standard si se concentreaza, pe final, pe oscilatiile neutrinilor atat in vid cat si in materie.

Proiectul Laguna, infrastructura paneuropeană, care va putea adaposti in subteran o noua generatie de detectori de mari dimensiuni, cu volume totale ale volumelor sensibile cuprinse in domeniul $100.000 \text{ m}^3 - 1.000.000 \text{ m}^3$, este prezentat in capitolul 4. In cadrul acestui capitol se regasesc studii comparative apa-argon si argon-xenon realizate cu scopul de a identifica cea mai buna tehnologie de detectie pentru un viitor experiment proiectat pentru a cauta evenimente rare (dezintegrarea protonului) si a studia sursele de neutrini terestre si din Univers.

Capitolul 5 ofera o descriere a mecanismelor de interactie ale neutrinilor cu nucleele si prezinta simularile acestor procese in curenti incarcati (CC) realizate cu generatorul Monte Carlo, GENIE. In cadrul studiului interactiilor νN s-au determinat sectiunile eficace de interactie CC ale neutrinilor electronici cu nucleele de Argon, observandu-se o comportare diferita in cele doua regiuni de interes ale energiei: in jurul valorii de 1 GeV si la valori mult mai mari ale energiei. De asemenea s-au investigat stările finale corespunzatoare interactiilor $\nu_e + {}^{40}\text{Ar}$ de tip quasi-elastic, producere de rezonante si imprastiere adanc inelastica.

Capitolul 6 prezinta metodele de reconstructie a marimilor cinematice din interactiile neutrinnucleu. Pentru reconstructia energiei neutriniului au fost prezentate doua metode: metoda impulsului total care foloseste impulsul total al particulelor rezultate, si metoda quasi-elastica pentru reconstructia evenimentelor de acest tip in curenti incarcati. In ceea ce priveste reconstructia vmarimii transfer de impuls, Q^2 , s-au observat mici diferente intre cele doua metode de reconstructie intre cele doua seturi de evenimente generate cu si fara a lua in considerare interactia din starea finala.

Concluziile sunt cuprinse in capitolul 7.

Alegerea studierii interactiilor neutrinilor cu nucleele la energii de cativa GeV este justificata de nevoia de a intelege in detaliu aceste mecanisme de interactie, componenta importanta a experimentelor cu neutrini care studiaza fenomenul de oscilatie al acestor particule. Simularile cu generatorul Monte Carlo pentru neutrini, GENIE, ofera informatii detaliate despre particulele din starea finala ale acestor interactii pe baza carora poate fi realizata o reconstructie precisa a particulei incidente. Generarea de evenimente Monte Carlo pentru neutrini este o etapa importanta in simularea unui aranjament experimental real, deoarece programul proiectat pentru a simula raspunsul detectorului la trecerea particulelor prin volumul sau sensibil, GEANT, nu are o componenta validata pentru studiul neutrinilor.

2 Modelul Standard si Fizica noua

Modelul Standard al Fizicii particulelor elementare ofera posibilitatea de a descrie toate datele experimentale din fizica energiilor inalte in functie de proprietatile si interactiile elementelor de baza ale materiei (3 familii de cuarci si 3 familii de leptoni) si a particulelor care intermediaza interactiile dintre acestea. Studiul asemanarilor existente intre aceste familii a dus la consacrarea acestei teorii care include si interactiile dintre particulele elementare: electromagnetica, slaba si tare. Pana in prezent, toate incercarile de a integra si ultimul tip de interactie, gravitatiea, au esuat. In Modelul Standard fortele exercitate intre cuarci si leptoni sunt mediate de particule numite bozoni de etalonare. Desi Modelul Standard s-a dovedit a fi o teorie de succes, se considera ca nu este o teorie finala pentru descrierea lumii materiale. Motivele pentru a crede acest lucru sunt duble. In primul rand, exista un numar de fenomene care nu pot fi explicate in cadrul Modelului Standard. Acestea sunt: originea masei neutrinilor, originea materiei intunecate si a energiei intunecate, gravitatiea, bariogeneza. In alta ordine de idei, exista un numar de probleme, care fie au ramas nerezolvate fie solutiile integrate in Modelul Standard nu au nici o justificare, cum ar fi: mecanismul Higgs, problema unificarii, problema maselor si aromelor. Exista alte modelele teoretice care vin sa acopere deficientele Modelului Standard prin extinderea Fizicii dincolo de Modelul Standard. Aceste extensii ale Modelului Standard prezic o noua Fizica care este favorizata a se produce la scala TeV-ilor.

Fizica Energiilor Inalte

Fizica la acceleratori de particule

Scopul direct al Fizicii Particulelor Elementare, in ceea ce priveste frontiera energetica, este de a intelege unificarea interactiilor electromagnetica si slaba intr-o forta "electroslaba". Calatoria catre aceasta frontiera energetica incepe la acceleratori de particule. In timp ce acceleratori de protoni reprezinta cel mai puternic mijloc de a explora universul cuantic, acceleratori de electroni sunt cei mai precisi. Desi acceleratori de electroni pot fi folositi pentru a studia o gama larga de subiecte de fizica, programul actual se concentreaza pe studiul cuarcilor charm si bottom si pe studiul leptonilor tau.

Acceleratori de protoni sunt capabili sa produca cel mai intens fascicul de particule, oferind posibilitatea fizicienilor de a studia proprietatile materiei si fortele care guverneaza interactiile. In acelasi timp, acesti acceleratori pot recrea conditiile din Universul timpuriu, producand particulele care au fost in numar foarte mare imediat dupa "Explozia primordială" ("Big Bang"). Prin ciocnirea particulelor de protoni, alte particule, ca antiprotonii, miuonii, mezonii si neutrinii, pot fi produse pentru diverse tipuri de experimente care necesita fascicule formate din aceste particule.

In noiembrie 2009, frontiera energetica s-a mutat la Geneva, Elvetia, unde The Large Hadron Collider (LHC) a produs cel mai energetic fascicul de protoni la aproape 1.18 TeV. LHC functioneaza la CERN (Laboratorul European pentru Fizica Particulelor Elementare) intr-un tunel circular cu lungimea de 27 km, situat la distanta de 100 m in subteran si folosit in experimentele precedente de la LEP (Large Electron-Positron Collider). Tunelul adaposteste 2 linii de fascicul cu protoni circuland in directii opuse. Fasciculele se intalnesc in 6 puncte unde au loc ciocniri proton-proton. Inelul LHC-ului este format din 8 parti. In centrul a patru dintre aceste sectiuni sunt localizate 4 mari experimente: ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) [2], CMS (Compact Muon Solenoid) [3], ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [4] si LHCb (Large Hadron Collider beauty) [5].

Primele studii in cadrul experimentului ATLAS, folosind date reale, au vizat: performanta detectorului folosind miuoni din raze cosmice [6], comisionarea spectrometrului de miuoni folosind raze cosmice [7], masurarea sectiunilor eficace de producere ale jeturilor inclusive si ale evenimentelor cu doua jeturi in ciocnirile pp la energia in centrul de masa de 7 TeV [8], studiul interactiilor de contact ale cuarcilor in distributii unghiulare ale evenimentelor cu doua jeturi [9],

multiplicitatea particulelor incarcate si dependenta de impulsul transversal si pseudorapiditate [10], cautarea de noi particule care apar ca rezonante in starile finale cu doua jeturi [11], performanta detectorului ATLAS cu datele din primele ciocniri [12], explicarea pierderii de energie a jeturilor [13], pregatirea detectorului ATLAS pentru ciocniri Pb-Pb [14].

Diferite alte teste experimentale ale prevederilor (predicțiilor) Modelului Standard al Fizicii particulelor sunt realizate in mari colaborări internaționale, în mai multe mari laboratoare din lume ([15],[16],[17],[18],[19]).

Fizica fara acceleratori

Domeniul Fizicii fara acceleratori foloseste particule si fenomene naturale existente pentru a explora Fizica particulelor si astroparticulelor. Razele cosmice de energie mare, razele γ , neutrini solari, de la supernova si cei de la reactori nucleari sunt doar cateva surse de particule folosite pentru cercetare in acest domeniu.

In ultimul deceniu, experimentele din acest domeniu au dezvaluit informatii despre un Univers mult mai complicat decat credeau oamenii de stiinta. Materia obisnuita – tot ceea ce intra in componenta a tot ce vedem si putem atinge – reprezinta numai 4% din compozitia materie-energie a Universului. Restul este format din materie intunecata (23%) si energie intunecata (73%). Fizicienii cred ca materia intunecata tine galaxiile impreuna, insa este o forma a materiei care nu emite lumina si care interactioneaza slab cu materia obisnuita, fiind foarte greu de detectat prin metode de observare cunoscute. Energia intunecata poate fi responsabila pentru expansiunea rapida a Universului.

Programul de Fizica fara acceleratori joaca un rol din ce in ce mai important in domeniul Fizicii la Energii Inalte. In ceea ce priveste domeniul energetic, cercetarile din cadrul proiectelor ca SNO (Sudbury Neutrino Observatory) in Canada, the Pierre Auger Observatory in Argentina, si observatorul Super-K in Japonia au furnizat date experimentale, idei revolutionare si tehnici de detectie complementare celor furnizate de cercetarile de la acceleratori de particule.

Deoarece acceleratori de particule au ajuns la performanta de a produce particule exotice in conditii de laborator, cercetatorii au migrat de la a studia frontiera cosmica, folosind surse naturale, la studiul domeniului energetic folosind fascicule de electroni si protoni. Datorita inovatiilor tehnice care vin sa completeze cercetarile din domeniul Fizicii la acceleratori, programul de Fizica fara acceleratori a suferit o imbunatatire ducand la aparitia unui numar impresionant de experimente.

Neutrini reprezinta o alta arie de cercetare a frontierei cosmice. Desi trilioane de neutrini strabat trupurile noastre in fiecare secunda, ei nu lasa nici o urma. Numai in ultima vreme aceste particule – detectate initial in 1950 – au inceput sa-si dezvaluie secretele. De exemplu, doar in ultimii ani, fizicienii au descoperit la SNO in Canada si la observatorul Super-K in Japonia dovada existentei amestecului de neutrini, ceea ce poate fi inteles si explicat numai daca se accepta ipoteza ca neutrini sunt particule cu masa. Cercetatorii inca analizeaza datele experimentale, insa rezultatele obtinute pana in prezent indica nevoia de a intelege mult mai profund Fizica dincolo de Modelul Standard, si bineinteles ridica noi semne de intrebare. Care sunt masele neutrinelor si de ce valoarea acestora pare sa fie atat de mica? Exista alte tipuri de neutrini, altii decat cei cunoscuti? Fizica neutrinelor – fie ca acestia provin din surse astrofizice sau terestre – cauta raspunsuri la intrebari chiar mult mai importante, cum ar fi: Unde a disparut antimateria? si Se poate realiza unificarea tuturor fortelor intr-o singura forta? Rezultatele obtinute in cadrul unor experimente noi si foarte precise care studiaza neutrini din surse artificiale (reactori si acceleratori nucleari), ca experimentul Daya Bay din China, vor ajuta oamenii de stiinta sa raspunda la aceste intrebari fundamentale.

3 Bazele Fizicii neutrinoilor

Neutrino a fost propus prima data de W. Pauli in 1930 [20] ca fiind o particula neutra, fara masa si cu spin $\frac{1}{2}$, cu scopul de a rezolva problema neconservarii energiei in dezintegrarea β . Cealalta posibilitate era renuntarea la legea conservarii energiei în procese nucleare asa cum sugera, la un moment dat, Niels Bohr. Numele particulei propuse de W. Pauli, neutrino, a fost dat de Enrico Fermi, in anul 1931. Cativa ani mai tarziu, în anul 1934, Enrico Fermi publica modelul scalar al dezintegrarii β , care s-a constituit, de altfel, in prima teorie a interactiilor slabe. Aceasta teorie a lui Enrico Fermi, teorie care descrie si proprietatile neutrinoilor, a fost acceptata datorita modului corect în care a explicat spectrele de energie experimentale ale electronilor.

In anul 1953, a fost pusa in evidenta – prin metode directe – existenta neutrinoilor in experimentele realizate de Cowan si Reines la reactorul nuclear Savannah River, in Carolina de Sud. Ei au studiat un proces specific de dezintegrare β inversa, anume conversia interna inversa: $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$, folosind o tinta de apa si clorura de cadmiu (H_2O și $CdCl_2$). Diferenta dintre tipurile de neutrini a fost clarificata in anul 1961, in experimente desfasurate la Brookhaven National Laboratory (BNL). In aceste experimente a fost confirmata existenta neutrinoilor miuonici, investigandu-se reactia: $\nu_\mu + X \rightarrow \mu^- + X'$. Descoperirea in anul 1975 a celui de-al treilea lepton încarcat, taonul (τ), a implicat existenta unei a treia familii de neutrini, anume cea a neutrinoilor taonici, ν_τ . Prin masurare, in 1989, a largimii naturale a liniei specifice bozonului Z, din spectrul de masa, s-a confirmat faptul ca exista trei familii de neutrini ($N_\nu \approx 3$). Observarea directa a neutrinoilor tau a fost anuntata de colaborarea DONUT in anul 2000, la aproape 40 de ani dupa observarea pentru prima data a neutrinoilor electronici ν_e .

Un argument puternic pentru existenta neutrinoilor cu energie înalta din cosmos este observarea razelor cosmice cu energii înalte. Pentru energiile joase, de pana la 10^{14} eV, detectia de raze cosmice se poate efectua direct, prin masuratori cu instrumente plasate pe sateliti sau baloane [21]. Pentru energii inalte detectia indirecta a razelor cosmice necesita experimente in care nu se mai detecteaza particula primara direct ci se masoara particulele secundare create in urma interactiei primare cu atmosfera terestra (Fig. 1).

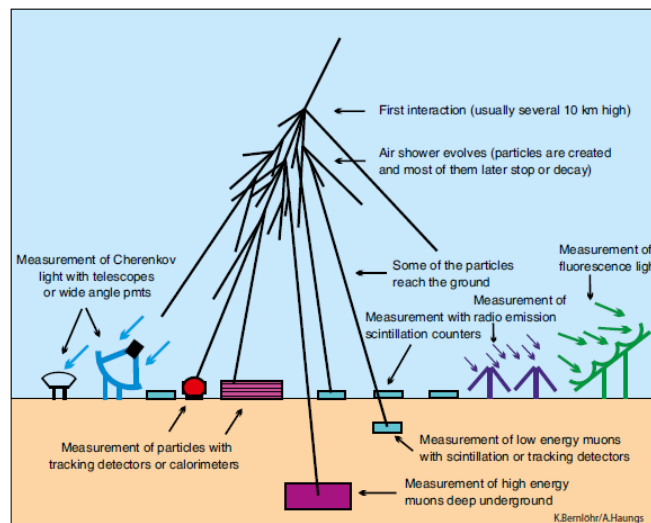


Fig. 1. Metode de detectie a razelor cosmice utilizate in experimente de detectie a razelor cosmice [21].

O particula primara de energie inalta interactioneaza cu nucleeele atmosferei si da nastere unor particule secundare care la randul lor sufera interactii si se propaga pierzand din energie. Aceasta avalansa de interactii genereaza o cascada (denumita cascada atmosferica extinsa, "extensive air shower", EAS). O parte din particulele cascadei ajung la nivelul solului unde sunt amplasate statii de detectie si astfel sunt inregistrate. Aceasta abordare indirecta este necesara deoarece fluxurile de particule sunt mici si aria de detectie necesara este foarte mare, de ordinul a km^2 , pentru experimentele plasate la sol, sau km^3 pentru cele in subteran. Fiind o detectie indirecta, dificultatile legate de reconstructia proprietatilor particulei primare si minimizarea erorilor duc la cresterea complexitatii acestui tip de experimente.

Neutrinii ca particule. Neutrinii, mesageri din Univers

La sfarsitul secolului XX, Fizica neutrinilor a oferit primele dovezi ale existentei unei noi Fizici dincolo de Modelul Standard [22]. Principalele contradictii au aparut in urma observarii fenomenului de oscilatie a neutrinilor in cadrul anumitor experimente ([23],[24],[25],[26]) care au stabilit ca masa neutrinului nu este zero asa cum se considera in cadrul Modelului Standard. Aceasta sectiune va porni cu descrierea proprietatilor neutrinilor in Modelul Standard si se va concentra, pe final, pe oscilatiile neutrinilor atat in vid cat si in materie.

Pe baza cunostintelor actuale despre neutriini, aceste particule pot oferi informatii pentru a investiga procesele fizice legate de producerea si propagarea lor, si in acelasi timp pentru a invata despre compozitia surselor din care ele provin [27].

4 Proiectul Laguna

Motivatia pentru constructia in Europa a detectorilor subterani cu volum sensibil mare pentru studiul Astroparticulelor

Experimentele subterane, datorita evolutiei Stiintei si Tehnologiei, au obtinut rezultate fundamentale pentru Fizica, precum solutia problemei neutrinilor solari, si semnale eperimentale pentru o Fizica noua in ceea ce priveste neutrinii fara masa si violarea aromei leptonilor, peste predictiile Modelului Standard al interactiilor particulelor elementare. In paralel, pentru a testa modelele de formare a stelelor, s-au impus limite asupra fluxului de neutriini proveniti de la supernova. Experimentul KamLand, beneficiind de cel mai mare detector cu scintilatori construit pana in prezent, a anuntat prima detectie a unui neutrin emis de elemente radioactive in interiorul Pamantului (geoneutriini), deschizand astfel noi posibilitati de investigare a interiorului acestuia. In curand, neutrinii vor putea fi studiatii intr-un fascicul accelerat provenit de la noul accelerator al noului institut japonez de la Tsukuba, JPARC, in experimentul T2K, fascicul directionat catre detectorul SuperKamiokande. Important este si faptul ca tot mai multe experimente subterane au marit limita timpului de viata al protonului in jurul valorii de 10^{31} ani.

Aceste rezultate au revolutionat modul de a intelege Fizica particulelor elementare si au deschis o noua fereastră spre Fizica dincolo de Modelul Standard. Aceasta noua Fizica, care implica existenta unor particule si forte noi, apare la scala energiilor foarte inalte, de ordinul a 10^{16} - 10^{20} GeV. Este necesar sa descoperim caracteristicile acestei Fizici noi pentru a putea raspunde la intrebari privind unificarea fortelor, originea masei neutrinilor si problema aromelor.

In timp ce la acceleratorul LHC de la CERN interactiile proton-proton, la energia maxima in sistemul centrului de masa de 14 TeV, vor oferi informatii despre Fizica la scala energiilor electroslabile (sau scala TeV-ilor), informatiile despre noua Fizica la energii ultrainalte, depasind energia LHC, vor fi obtinute in urma cercetarilor privind dezintegrarea protonului si determinarea parametrilor care descriu masele si amestecul de neutriini.

Noua generatie de detectori masivi subterani reprezinta un anumit tip de observator pentru

fenomenele fizice rare, ca dezintegrarea nucleonului sau detectia neutrinelor astrofizici. Se va prezenta potentialul fizic al celor trei tehnologii de detectie propuse ca o noua generatie de experimente subterane in Europa (Fig. 2). Cei trei detectori se bazeaza pe tehnici de detectie diferite inasa complementare: **GLACIER** (**Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment**)[[28],[29],[30], [31], [32)], **LENA** (**Low Energy Neutrino Astrophysics**)[[33],[34)] si **MEMPHYS** (**MEgaton MassPHYSics**)[35], toti avand volumul sensibil format din cantitati mari de lichid (Argon lichid, lichid scintilator si apa). Vor fi prezentate performantele celor 3 detectori in ceea ce priveste programul de fizica ce cuprinde studiul materiei instabile, detectia neutrinelor astrofizici si a geo-neutrinelor precum si folosirea acestor detectori in fascicule de neutrini de energie mare.

Evaluate individual cele trei tehnologii de detectie se caracterizeaza prin:

1. **MEMPHYS R&D** : Reprezentand cel mai ieftin material tinta, apa este singurul lichid avantajos pentru a fi folosit pentru detectori cu dimensiuni ce pot ajunge la cateva sute sau mii de ktone. Detectorii Cerenkov au rezolutie buna in energie, pozitie si unghi. Tehnologia este foarte bine testata in cadrul experimentelor IBM, Kamiokande si Super-Kamiokande [36].
2. **LENA R&D** : Experimentele care folosesc ca tinta lichidul scintilator au rezolutie energetica mare si ofera un prag scazut de energie. Sunt folosite la detectia particulelor de energie joasa ca neutrinii solari si geo-neutrinii. Detectorii cu lichid scintilator se bazeaza pe o tehnologie testata cu succes in cadrul experimentelor BOREXINO [37] si KamLand [38].
3. **GLACIER R&D** : Tehnologia de detectie a Camerei cu Proiectie Temporală cu Argon lichid (Lar TPC) are cea mai buna indentificare a topologiei interactiilor si dezintegrării particulelor in comparatie cu celelalte doua, datorita preciziei imaginilor oferite de camera cu bule. Aceasta tehnologie este multifunctionala si lucreaza foarte bine la o scala larga de energie a particulelor. Tehnologia a fost implementata in cadrul proiectului ICARUS([39],[40]). Un nou studiu R&D este necesar pentru a intelege cum se poate realiza extrapolarea acestei tehnici de detectie la mase mult mai mari.

Cei trei detectori au caracteristici complementare: au potential mare de descoperire, MEMPHYS va avea statistica mare, GLACIER va avea cel mai bun algoritm de reconstructie, LENA va avea pragul de energie cel mai mic. MEMPHYS si LENA sunt specializati in detectia de antineutrini, in timp ce GLACIER este superior in detectia neutrinelor.

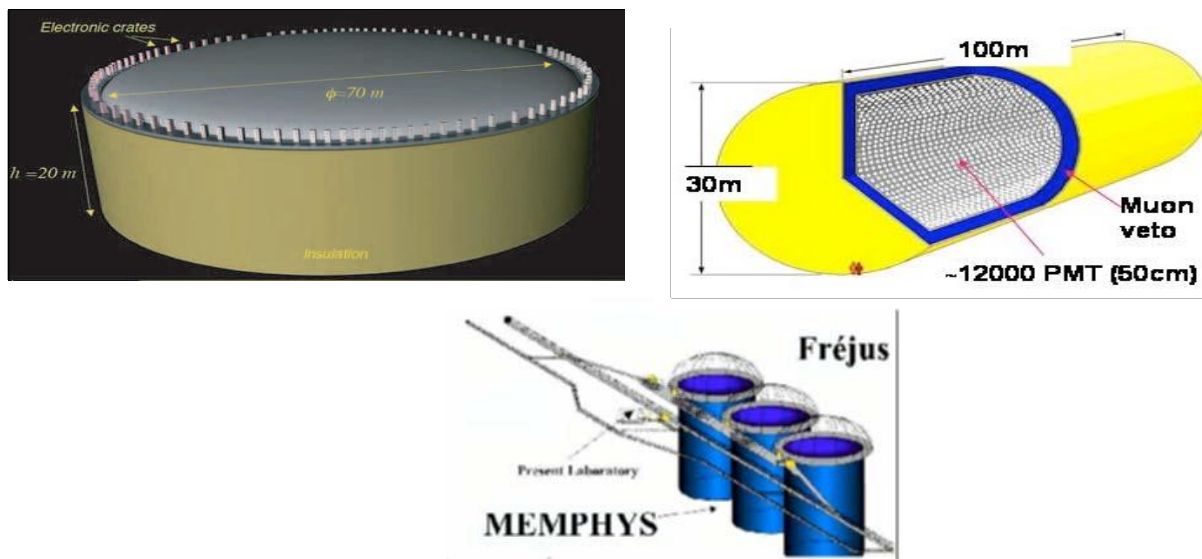


Fig. 2. Detectorii GLACIER, LENA si MEMPHYS [28],[33],[35]

Studii comparative apa - Argon lichid si Argon - Xenon

Atat detectorii Cerenkov cu apa, cat si detectorii cu Ar lichid vor avea in plus, fata de programul de fizica de la accelerator, un program de fizica care sa includa studiul neutrinelor atmosferici si solari, studiul neutrinelor de la supernova si dezintegrarea protonului.

Detectorii Cerenkov cu apa, cu volum sensibil de ordinul megatonelor sunt considerati urmasi ai detectorilor existenti, ca Super-Kamiokande; un exemplu de astfel de detector este detectorul Hyper-Kamiokande [41]. Pe de alta parte, tehnica de detectie bazata pe Ar lichid este considerata nesigura si aproape o solutie foarte greu de pus in aplicare in cazul detectorilor masivi. Densitatile apei si Argonului lichid sunt apropiate ca valoare, cu o crestere de 40% pentru Ar lichid iar lungimea de radiatie si lungimea de interactie sunt, de asemenea, similare chiar daca Ar lichid are aproximativ jumatate din lungimea de radiatie a apei. Puterea de franare a particulelor, dE/dx , este aceeaasi in apa si Ar lichid; prin urmare, atat interactiile neutrinelor cat si alte evenimente rare pot avea loc in ambele medii. Dintre toate tehnologiile de detectie existente, cele bazate pe apa si pe Ar lichid, sunt cele cu potentialul cel mai mare de a avea un program de fizica diversificat, incluzand atat fizica la accelerator cat si fizica fara accelerator. Asadar, este normal sa se analizeze ce tehnologie ar trebui implementata pentru noua generatie de detectori masivi subterani in urmatorul deceniu. Pe de o parte, camera cu proiectie temporala cu Ar lichid este superioara tehnologiei bazate pe apa din punct de vedere al preciziei imaginilor, dar pe de alta parte, experienta utilizarii in subteran a detectorilor Cerenkov cu apa este mult mai mare decat in cazul camerei cu proiectie temporala cu Ar lichid.

Intr-o configuratie ideala, printr-un program optim de fizica ar putea fi exploatata complementaritatea dintre cele doua tehnici de detectie cu scopul de a gasi raspuns la intrebari care nu au inca un raspuns.

Un avantaj al gazelor nobile in comparatie cu apa este proprietatea lor de a emite radiatie luminoasa mult mai intensa (luminiscenta) comparabil cu cea emisa de cristalele de NaI. Aceasta scintilatie se produce prin dezexcitarea unei molecule dimer ce are ca rezultat un singur foton UV. In plus, trebuie amintit ca in cadrul tehnicii de detectie bazata pe Ar lichid mediul este purificat pentru a putea asigura driftul electronilor pe distante mari, de unde rezulta excelenta capacitate de a propaga radiatia luminoasa. Ca si mediu activ, Xe are o proprietate foarte importanta observata numai la Ar lichid dintre toate celelalte gaze nobile, si anume, capacitatea de a produce atat particule cu sarcina, cat si scintilatie la trecerea unei particule prin mediu. Semnalele de la purtatorii de sarcina si de la scintilatie sunt complementare si anticorelate. Detectate simultan si cu precizie mare duc la masuratori precise ale proprietatilor particulelor, de la energie si pozitie pana la recunosterea tipului de particula. Tab. 1 centralizeaza proprietatile fizice ale Xe si Ar, proprietati importante pentru caracterizarea lor ca medii active de detectie. Numarul atomic (54) si densitatea ($\sim 3\text{g/cm}^3$) mai mari recomanda Xe ca un mediu mult mai eficient pentru a stopa radiatia.

Proprietati fizice	Ar	Xe
Punct de fierbere K @ 1 atm	87.3	165.0
Densitate [g/cm^3]	1.4	3.0
Lungime de radiatie [cm]	14.0	2.8
dE/dx [MeV/cm]	2.1	3.8
Scintilatie [γ/MeV]	40.000	42.000
Scintilatie λ [nm]	128	175

Tab. 1. Proprietatile fizice ale nucleelor de Ar si Xe

Gazele nobile prezinta cateva proprietati care le recomanda pentru a fi folosite ca mediu activ pentru detectorii de mari dimensiuni. Dintre acestea amintim: se pot obtine in cantitati foarte mari pe cale industrială. Argonul este al treilea cel mai abundent gaz in atmosfera dupa azot si oxigen, motiv pentru care se pot construi detectori de mari dimensiuni care functioneaza respectand principiile unor prototipuri mult mai mici. Sunt gaze care pot fi usor purificate: pentru detectia radiatiei, cele mai utilizate sunt gazele nobile argon (Ar), krypton (Kr) si xenon (Xe) datorita puterii mari de franare a radiatiei. Au densitati mari, ceea ce le recomanda a fi folosite ca tinte pentru detectia neutrinelor. Gazele nobile sunt relativ ieftine si pot fi produse in cantitati foarte mari, de ordinul tonelor, anual.

Datorita importantei acestor gaze nobile s-a realizat un studiu comparativ al interactiei neutrinelor cu aceste nuclee, folosindu-se un generator Monte Carlo pentru neutrini, GENIE [42].

Pentru tintele nucleare considerate, s-a calculat sectiunea eficace de interactie. Considerand ca in calculul sectiunii eficace totale de interactie a neutrinelui electronic imprastiat pe Ar si Xe in curenti incarcate (CC) intra contributiile a trei dintre cele mai importante interactii ale neutrinelor: imprastiere quasi-elastică (QES), producere de rezonante (RES) si imprastiere adanc inelastica (DIS), s-au calculat si reprezentat grafic in Fig. 3 cele 2 sectiuni eficace [43].

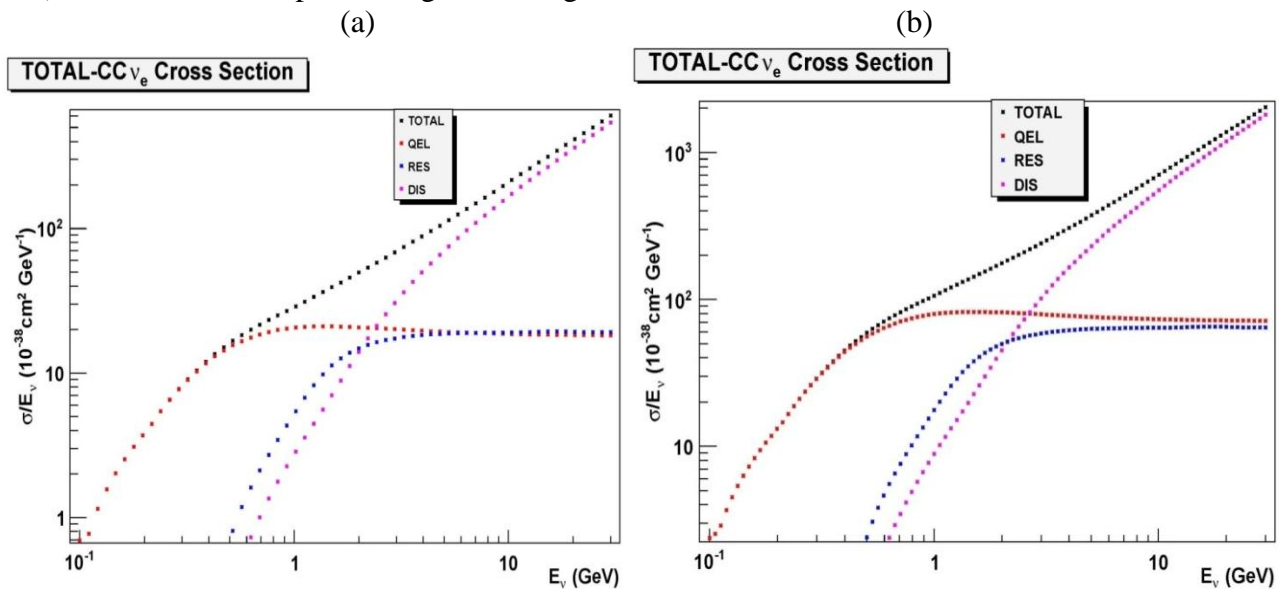


Fig. 3. Sectiunea eficace totala CC a ν_e imprastiat pe nucleul de Ar (a) si nucleul de Xe (b)[43]

Pentru ca in timpul ciocnirii neutrinelui electronic cu nucleonul din nucleu in sectiunea eficace intra contributia tuturor neutronilor, se poate observa ca pentru interactia cu ^{40}Ar aceasta are o valoare mai mica decat cea pentru interactia cu nucleul ^{128}Xe , deoarece numarul de neutroni ai ^{40}Ar (22) este mai mic decat numarul de neutroni ai ^{128}Xe (74).

Deoarece neutrinii provin din surse diferite, cum ar fi Soarele, atmosfera sau acceleratori de particule, si au energii cuprinse intr-un interval foarte mare, analiza s-a realizat pe 3 intervale de energie diferite corespunzatoare celor 3 familii de neutrini, si acoperind toate sursele din care acestia provin (Fig. 4).

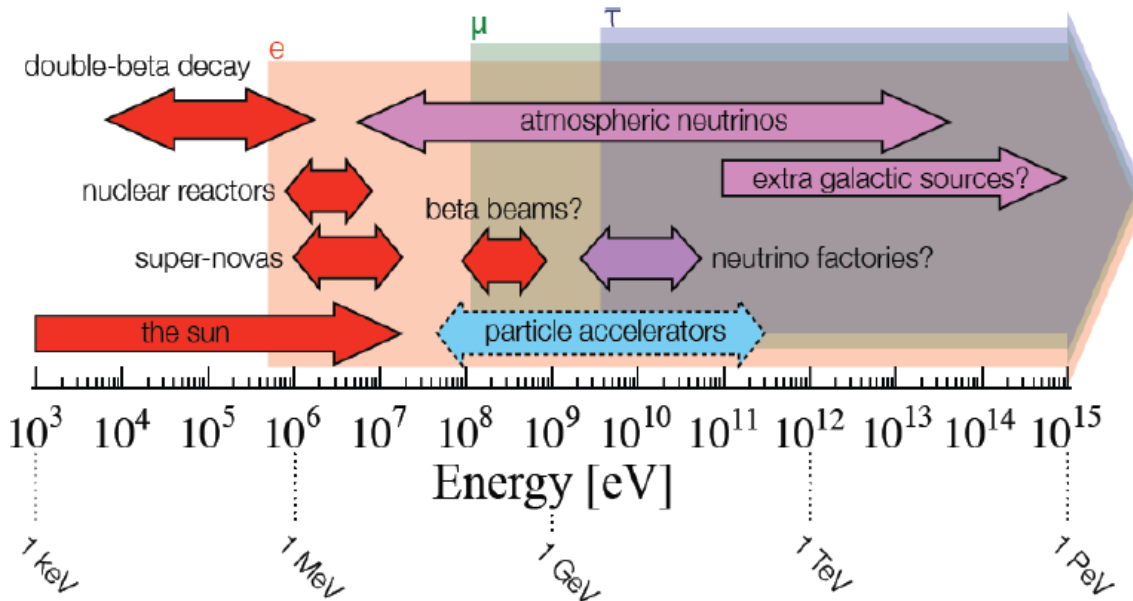


Fig. 4. Sursele familiilor de neutrini, ν_e, ν_μ, ν_τ [43]

S-au generat neutrini pe intreg intervalul de energie (0-300 GeV) la flux constant si s-a determinat spectrul energetic al neutrinelor care interactioneaza pentru a se putea face distinctie intre cele 3 familii de neutrini. Din Fig. 4 se poate observa ca intervalul de energie unde se regasesc numai neutrini electronici este (0-100 MeV), corespunzator unor surse ale neutrinelor ca Soarele, dezintegrarea beta dubla, reactorii nucleari sau supernova. Acesta este motivul pentru care s-au generat ν_e cu energia in acest interval si s-a reconstruit transferul de impuls pentru interactia cu cele 2 gaze nobile. S-a ales aceasta marime cinematica deoarece joaca un rol important in modelarea interactiilor neutrinelor. Fiind vorba despre intervalul de energie (0-100 MeV) se observa ca interactia dominanta este cea quasi-elastica unde in starea finala am un lepton si nucleoni. Sectiunea eficace a Xe este mai mare, asa cum se poate observa din Fig. 3, avand ca rezultat un transfer de impuls mai mare in cazul interactiei ν_e cu nucleul de Xe decat cu nucleul de Ar (Fig. 5).

Urmatorul interval de energie (100 MeV-4 GeV) corespunde familiilor de neutrini electronici si miuonici care provin din surse reprezentate de acceleratorii de particule sau atmosfera. Fiind in intervalul de energie de cativa GeV interactiile neutrinelor sunt predominant quasi-elastice si producere de rezonanta, inasa imprastierea adanc inelastica incepe sa contribuie la aceste energii si devine dominanta la energii mai mari. Din reprezentarile grafice ale marimii Q^2 s-a observat acelasi comportament diferit in cazul interactiilor neutrinelor cu cele 2 gaze (Fig. 6).

Ultimul interval de energie pe care s-a realizat aceasta analiza, (4-300 GeV), este comun tuturor familiilor de neutrini proveniti din atmosfera, de la fabrici de neutrini sau din surse extra-galactice. La aceste energii interactia imprastiere adanc inelastica devine dominanta, celelate doua tipuri de interactie ale neutrinelor avand o contributie minima. Diferenta observata in distributiile transferului de impuls pentru cele doua gaze se datoreaza sectiunii eficace de interactie a neutrinelor mai mare in cazul tinteii de ^{128}Xe decat a celei de ^{40}Ar (Fig. 7).

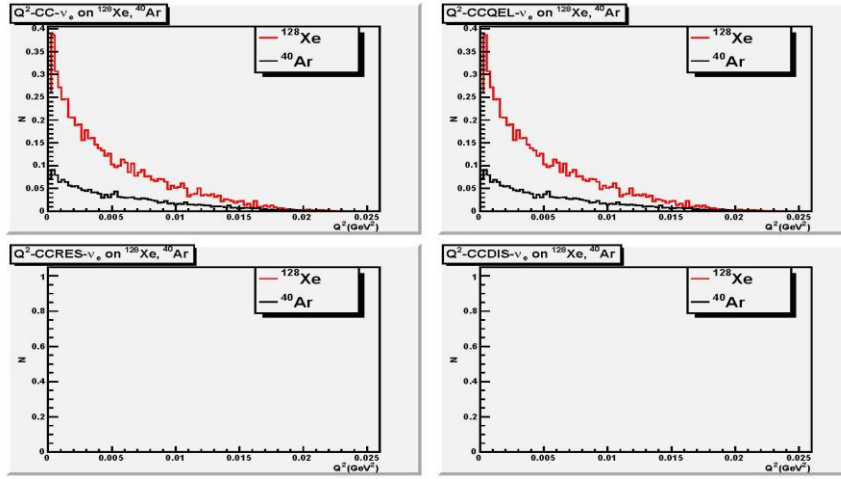


Fig. 5. Distributii de Q^2 pentru interactiile neutrinelor ν_e cu nucleele de Xe si Ar [43]

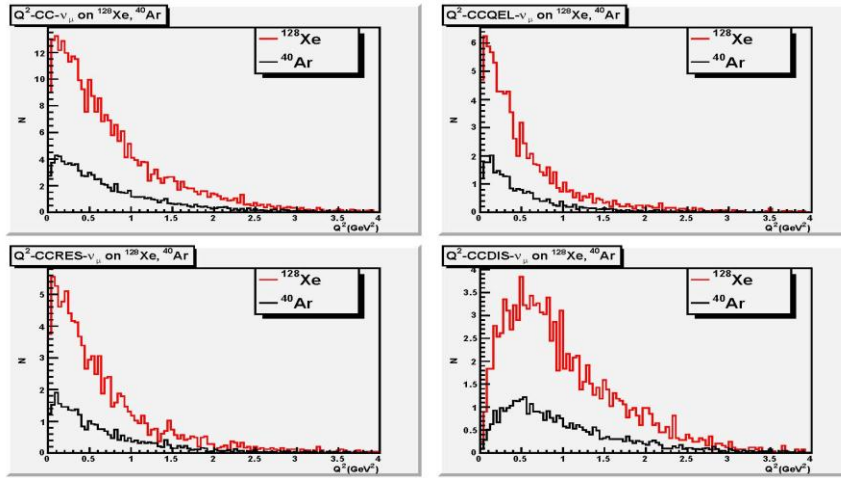


Fig. 6. Distributii de Q^2 pentru interactiile neutrinelor ν_μ in intervalul de energie 10^8-10^{10} eV [43]

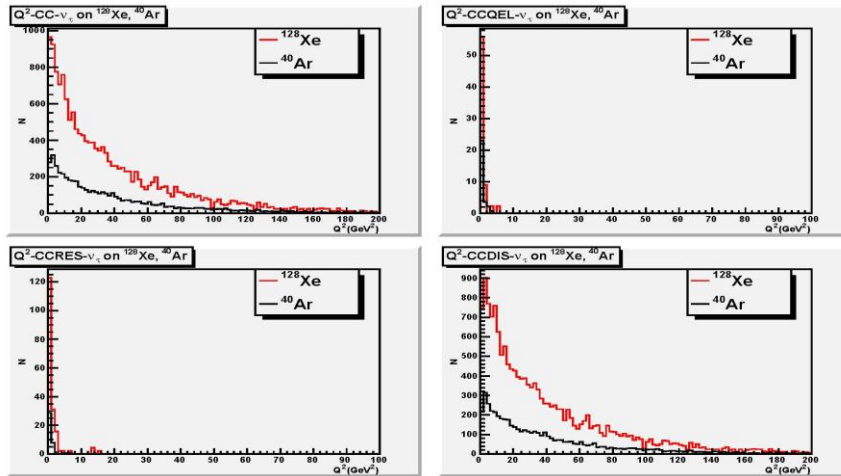


Fig. 7. Distributii de Q^2 pentru interactiile neutrinelor ν_τ de energie mare [43]

In urma analizei distributiilor de transfer de impuls la patrat s-a observat ca in intervalele de energie aflate la extremitatile intervalului principal de energie, (0-300 GeV), este dominant cate un anumit tip de interactie a neutrinelor, in timp ce la energia de cativa GeV apar toate tipurile de interactii. De asemenea, s-a observat ca transferul de impuls la patrat in cazul interactiei cu nucleul de Xe este mult mai mare decat in interactia neutrinelor cu nucleul de Ar, ceea ce il recomanda pentru a fi folosit ca mediu de detectie activ. Desi poate fi produs in cantitati mari, de ordinul tonelor pe an, Xe nu este foarte folosit ca volum sensibil pentru detectori de dimensiuni mari din motive economice: nu este un material ieftin. Acesta este motivul pentru care se foloseste pentru detectorii care au volumul sensibil de ordinul sutelor de kilograme, in timp ce pentru volumele sensibile mari, de ordinul ktonelor, este folosit Argonul lichid.

5 Interactiile neutrinelor

GENIE & Generatorii Monte Carlo pentru neutrini

Studiul interactiei neutrinelor cu nucleele este o componenta importanta a experimentelor cu baza lunga pentru oscilatiile neutrinelor. Acest studiu realizat la energii de cativa GeV este foarte complicat si presupune parcurgerea unor etape intermediare cum ar fi descrierea modelului nuclear, intelegerea sectiunii eficace de interactie νN , modelarea procesului de hadronizare, a transportului hadronilor in interiorul nucleului precum si a altor interactii secundare. Toti acesti pasi ar fi mult mai usor de rezolvat daca programul proiectat pentru a simula raspunsul detectorului la trecerea particulelor prin volumul sau sensibil, GEANT, ar avea o componenta validata pentru studiul neutrinelor. Deoarece acest program nu poate descrie interactia neutrinelor cu materia, exista o serie de pachete numerice si generatori Monte Carlo (MC) dedicate studiului acestui tip de interactie: GENIE ([44]), GiBUU [45], FLUKA [46], NEUT, NuWro si Nuance.

In cadrul Fizicii Particulelor Elementare, datorita complexitatii experimentului, simularea proceselor fizice este o metoda folosita cu scopul de a prezice rezultatele unui experiment. Cu ajutorul simularilor se pot evalua fezabilitatea si programul de fizica al unor experimente propuse pentru a fi realizate, se poate optimiza geometria detectorului, analiza seturile de date colectate si evalua erorile sistematice.

Pentru aceasta analiza s-a folosit versiunea GENIE 2.6.0 instalata pe un sistem de operare LINUX care a necesitat instalarea unor pachete externe precum: ROOT, LHAPDF [47], PYTHIA6 [48], si alte librarii C++. Utilizatorul are posibilitatea de a alege tinta nucleara, ceea ce este foarte important deoarece interactiile din starea finala (FSI) sunt influentate de numarul de protoni si neutroni din nucleu. Starea initiala reprezinta topologia particulelor produse in interactia primara a neutrinelor, in timp ce starea finala este topologia particulelor produse dupa interactii secundare cum ar fi procesul de reimprastiere din nucleu.

Instalarea generatorului GENIE consta in crearea fisierelor ce contin datele referitoare la sectiunile eficace totale calculate pentru un anumit nucleu tinta pe un interval de energie (valori prestabilite 0.1-100 GeV).

Punand toate informatiile impreuna se considera ca sectiunea eficace totala a unui proces $\nu_e N$ -CC este de forma [49]:

$$\sigma^{tot} = \sigma^{QEL} \oplus \sigma^{1\pi} \oplus \sigma^{2\pi} \oplus \dots \oplus \sigma^{1K} \oplus \dots \oplus \sigma^{DIS}$$

relatie ce poate fi aproximata, daca se considera ca interactiile de tipul νe^- nu contribuie la sectiunea eficace totala:

$$\sigma^{tot} = \sigma^{QEL} \oplus \sigma^{RES} \oplus \sigma^{DIS}$$

Dupa ce am calculat sectiunea eficace totala a unui proces $\nu_e N$ -CC, s-a observat ca la energii de cativa GeV interactiile neutrinelor au diverse surse (acceleratorii de particule, atmosfera) si sunt

predominant quasi-elastice (QE) si producere de rezonante cu obtinerea unui singur pion in starea finala (RES), desi ciocnirile adanc inelastice (DIS) incep sa devina importante la aceste energii (Fig. 8) ([50],[51]).

Experimentele care studiaza oscilatiile neutrinoilor atmosferici si a celor de la accelerator functioneaza in acest interval de energie si se bazeaza pe cunosterea sectiunii eficace de interactie a neutrinoilor. In trecut, sectiunea eficace pe acest interval de energie nu a fost la fel de mult masurata ca cea din ciocnirile adanc inelastice care domina la energii mult mai mari ale neutrinoilor.

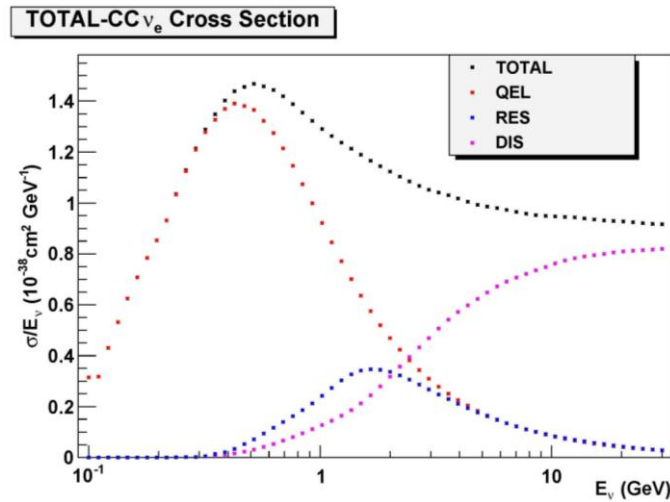


Fig. 8. Sectiunea eficace totala CC ca functie de energia neutrinoilor ([50],[51])

Studiul starilor finale in interactiile νN

In etapa urmatoare s-a generat un flux de neutrini electronici monoenergetici ($E_\nu = 3.2 \text{ GeV}$) de 50000 de evenimente care interactioneaza cu nucleele de ^{40}Ar (s-a ales aceasta stare initiala datorita caracteristicilor fascicolului de neutrini care ar putea fi trimisi de la CERN la mina Unirea, Slanic-Prahova si a volumului sensibil al detectorului GLACIER reprezentat de catre Argonul lichid).

Pentru inceput s-au analizat leptonii obtinuti in starea finala a interactiilor neutrinoilor electronici pentru care leptonul este invariabil un electron sau un neutrino electronic. Deoarece neutrinii obtinuti in starea finala nu pot fi vazuti in detector, s-a impus conditia ca leptonul din starea finala sa fie exclusiv un electron. In Fig. 9 se observa ca evenimentele de tip quasi-elastic in curenti neutri (NCQE) au disparut iar evenimentele de tip quasi-elastic in curenti incarcate (CCQE) depind liniar de energia electronului din starea finala, ceea ce poate indica existenta unei relatii intre sectiunea eficace si impulsul transferat nucleelor din tinta. Evenimentele obtinute in interactia producere de rezonante au o energie mult mai mica deoarece energia este folosita pentru a produce rezonanta Δ [51].

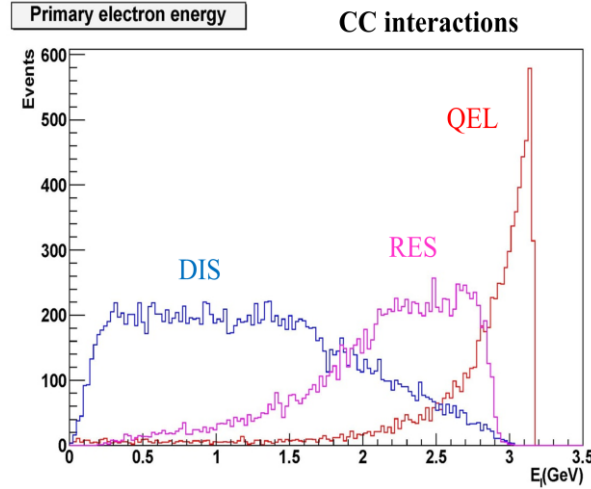


Fig. 9. Spectrul energetic al electronilor din sarea finala a interactiilor CC, $\nu_e + {}^{40}\text{Ar}$ ([50],[51])

In Fig. 10 este prezentata distributia unghiulara a electronilor din starea finala. Electronii produsi in interactiile CCQE sunt mult mai des emisi pe directia neutrinoi incident, acest lucru fiind o consecinta a cinematicii si a spectrului energetic din figura anterioara. Evenimentele RES au o distributie mult mai izotropa, desi exista totusi evenimente emise pe directia neutrinoi incident, datorita naturii inelastice a interactiei.

Fig. 11 prezinta o corelatie energie-unghi pentru electroni. Evenimentele produse in cadrul celor 2 interactii se raspandesc in doua zone diferite, ceea ce subliniaza motivul pentru care evenimentele CCQE sunt importante pentru reconstructia energiei neutrinoi incident. Aceste evenimente se gasesc de-a lungul unei benzi descrisa de ecuatie de reconstructie CCQE:

$$E_\nu = \frac{m_p E_l - \frac{1}{2} m_l^2}{m_p - E_l + p_l \cos \theta_l}$$

unde m_p este masa nucleonului, m_l, E_l, p_l reprezinta masa, energia si impulsul leptonului din starea finala, respectiv θ_l este unghiul dintre leptonul imprastiat si directia fascicolului incident. Daca consideram energia neutrinoi $E_\nu = 3.2$ GeV se obtine o relatie intre energia si unghiul leptonului. Se observa ca evenimentele produse in interactii RES se gasesc intr-o alta regiune caracterizata de o energie mai mica a leptonului din starea finala si nu se coreleaza cu ecuatie de reconstructie cinematica CCQE. Astfel, daca un eveniment RES este identificat gresit ca eveniment CCQE, ceea ce reprezinta o sursa importanta de fond in experimentele cu neutrini, energia neutrinoi va fi reconstruita la o valoare mult mai mica decat cea reala. Acest lucru subliniaza importanta de a intelege fondul datorat evenimentelor RES atunci cand se folosesc evenimente CCQE ca semnal [51].

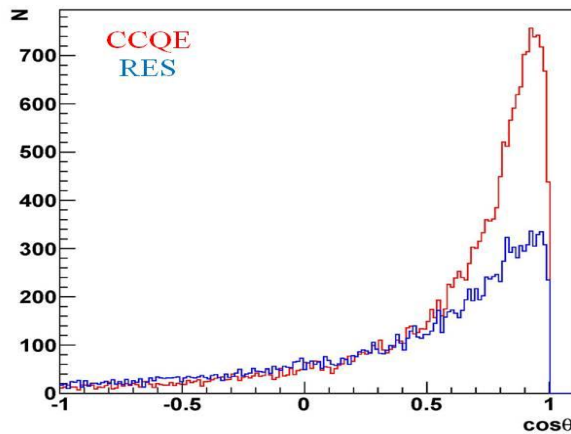


Fig. 10. Distributia unghiulara a electronilor produsi in interactiile CCQE si RES [51]

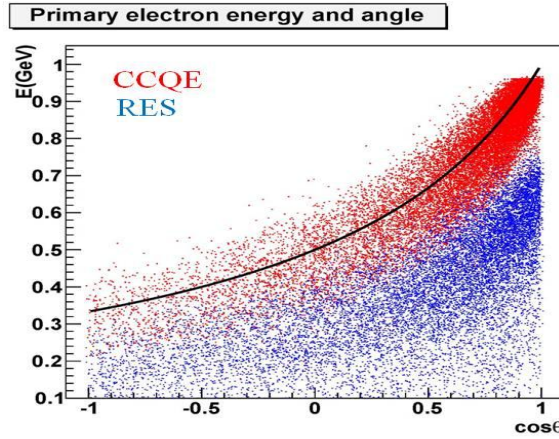


Fig. 11. Corelatie energie-unghi a electronilor din starea finala [51]

In continuare s-a realizat un studiu al hadronilor (pioni, protoni si nucleoni) din starea finala a interactiilor neutrinelor electronice. In cazul reprezentarii spectrului energetic al acestor particule (Fig. 12(a)) s-a observat existenta a doua picuri centrate pe valori diferite ale energiilor.

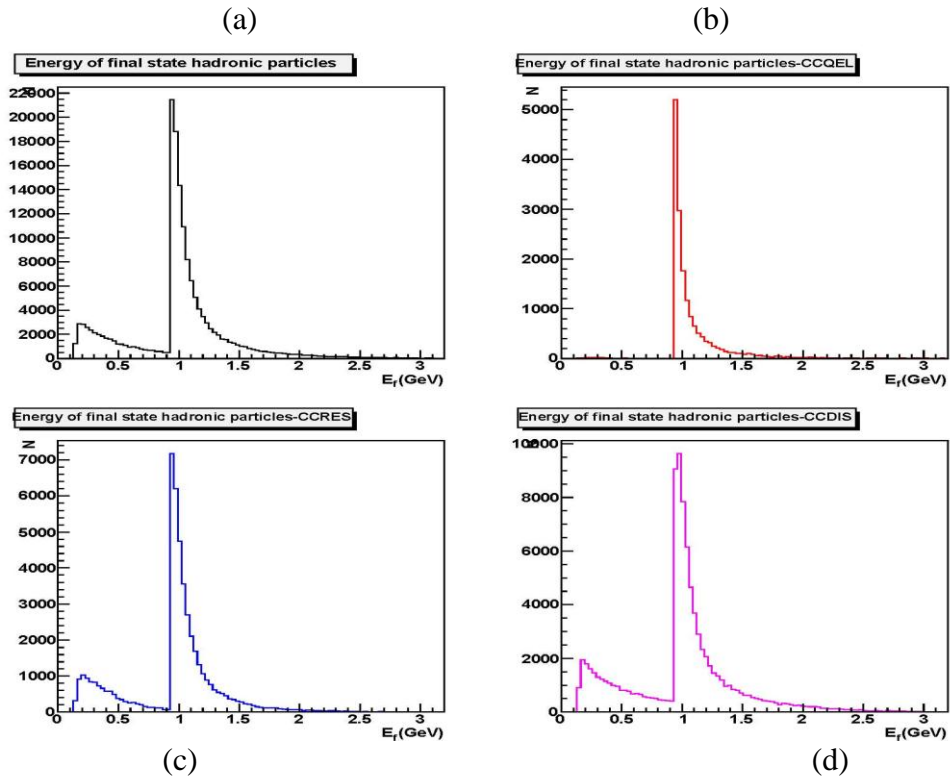


Fig. 12. Spectrul energetic al particulelor hadronice din starea finala a interactiilor neutrinelor electronice ([50],[51])

Punand conditia ca tipul de interactie sa fie quasi-elastic se observa o separare exacta a celui de-al doilea maxim in raport cu primul (Fig. 12(b)) ceea ce semnifica faptul ca acest maxim apartine protonilor si neutronilor obtinuti in starea finala a acestui tip de interactie (stiut fiind faptul ca din interactiile QE nu se obtin pioni in starea finala). Acest maxim este situat in jurul valorii de 1 GeV, ceea ce coincide cu rezultatul din cazul sectiunii eficace, conform caruia interactiile QE reprezinta procesele dominante in jurul acestei valori a energiilor. Picul este caracterizat de o energie mai mare

deoarece protonii si neutronii din starea finala sunt obtinuti direct si nu prin dezintegrarea unei alte particule. Prin urmare, primul pic din Fig. 12(a) va apartine pionilor produși in interactiile RES si este centrat in jurul unei valori mai mici a energiei datorita faptului ca evenimentele CC1 π provin din dezintegrarea rezonantei Δ^+ , pentru producerea careia folosesc o parte din energie (Fig. 12(c)). In Fig. 12(d) se regasesc evenimentele de tip imprastiere adanc inelastica [50].

Comparatie intre generatori Monte Carlo pentru neutrini

In continuare, pentru a valida rezultatele obtinute cu generatorul Monte Carlo pentru neutrini GENIE-2.6.0 am realizat o comparatie cu un alt generator de evenimente pentru neutrini, NEUGEN, folosit in cadrul experimentelor Soudan 2 si MINOS [52].

Modelele care descriu fizica din cadrul generatorului GENIE sunt aceleasi cu cele din cadrul generatorului NEUGEN, motiv pentru care exista o buna concordanta intre rezultate (Fig. 13), insa exista si exceptii, ca in cazul sectiunii eficace a evenimentelor de tip productie de rezonanta din interactia $\nu_\mu + {}^{56}\text{Fe}$ unde diferentele intre cei 2 generatori pot fi explicate prin faptul ca GENIE a fost mult mai dezvoltat in ultimii ani, realizandu-se o imbunatatire a largimii si a masei pentru sectiunea eficace a producerii de rezonante in curenti incarcati si curenti neutri, in timp ce modelele incluse in generatorul NEUGEN nu au mai fost studiate (Fig. 14).

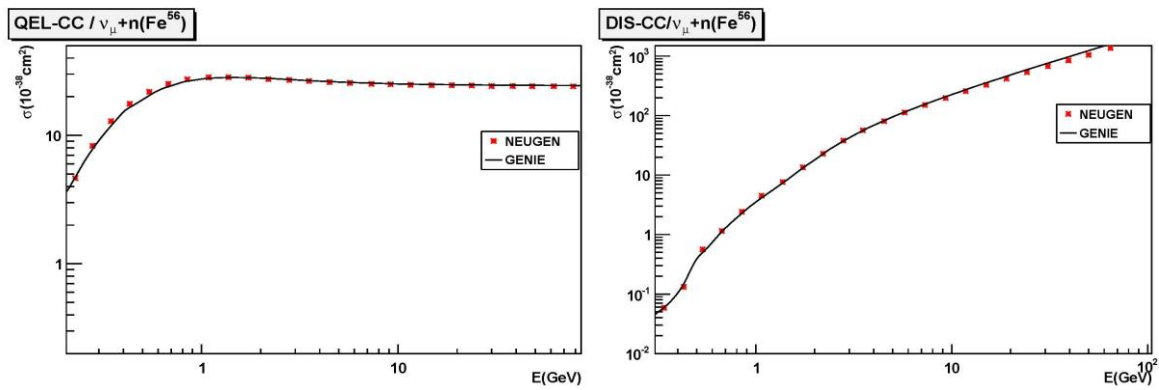


Fig. 13. Comparatie GENIE (linie)/NEUGEN(puncte) a sectiunilor eficace $\nu_\mu + n({}^{56}\text{Fe})$ [52]

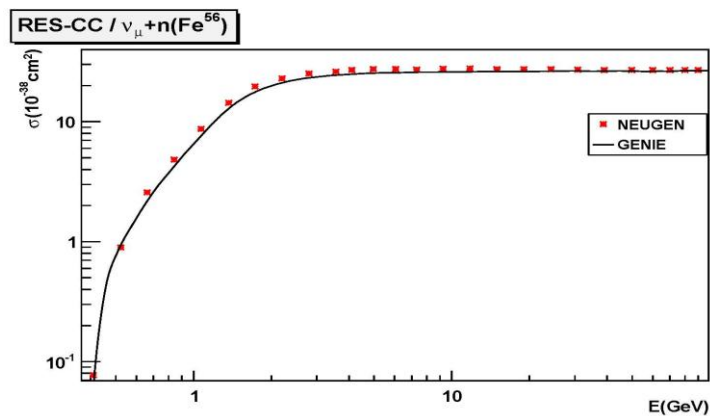


Fig. 14. Comparatie GENIE (linie)/NEUGEN(puncte) a sectiunilor eficace RES-CC/ $\nu_\mu + n({}^{56}\text{Fe})$ [52]

Sectiunea eficace de interactie a neutriniului miuonic, ν_μ , cu o tinta reprezentata de nucleonul liber, obtinuta in cadrul generatorului GENIE, impreuna cu banda corespunzatoare incertitudinilor sectiunii eficace totale, asa cum a fost evaluata in [53], este prezentata in Fig. 15 [54].

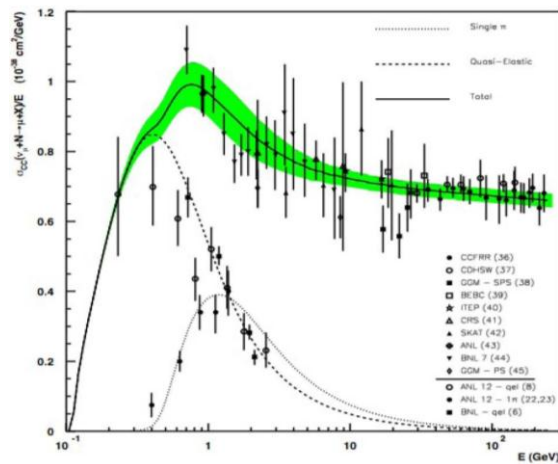


Fig. 15. Sectiunea eficace a procesului CC $\nu_\mu + N$ [55]. Banda verde corespunde incertitudinilor estimate ale sectiunii eficace totale a nucleonului liber. Datele experimentale sunt din [56] (CCFR), [57] (CDHSW), [58] (GGM-SPS), ([59],[60]) (BEBC), [61] (ITEP), [62] (CRS,SKAT), [63] (ANL),[64] (BNL) si [65] (GGM-PS).

In Fig. 16 este prezentata aceeași comparatie a datelor experimentale existente pentru sectiunea eficace CC pentru procesul $\nu_\mu + N$ cu predictiile generatorilor de evenimente NUANCE , NUX, NEUGEN [66].

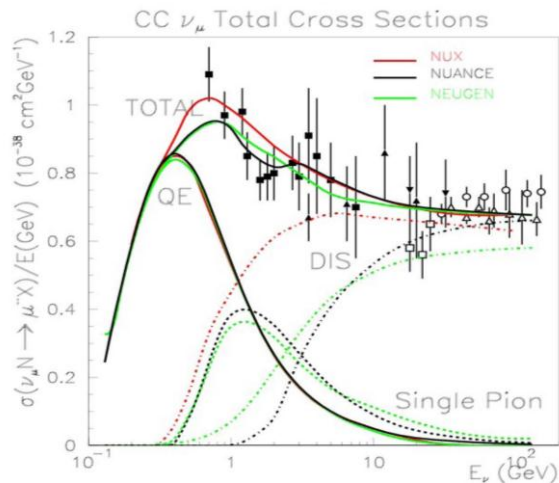


Fig. 16. Sectiunea eficace CC $\nu_\mu + N$ ca functie de energia neutrului [66]

Din reprezentarile de mai sus se poate observa ca diferentele intre predictiile generatorilor de evenimente Monte Carlo pentru neutrini nu sunt semnificative in ceea ce priveste sectiunea eficace a imprastierii neutrului pe nucleonul liber.

Dezvoltarile tehnologice recente ale acceleratorilor de particule care pot reprezenta surse de neutrini pentru experimentele care studiaza fenomenul de oscilatie al acestor particule au oferit posibilitatea de a cerceta in extenso interactiile neutrinelor de energie joasa. Experimentele actuale cu neutrini atmosferici si de la acceleratori functioneaza in intervalul de energie indicat in Fig. 17, si se bazeaza pe cunosterea sectiunilor eficace de interactie ale neutrinelor la aceste energii.

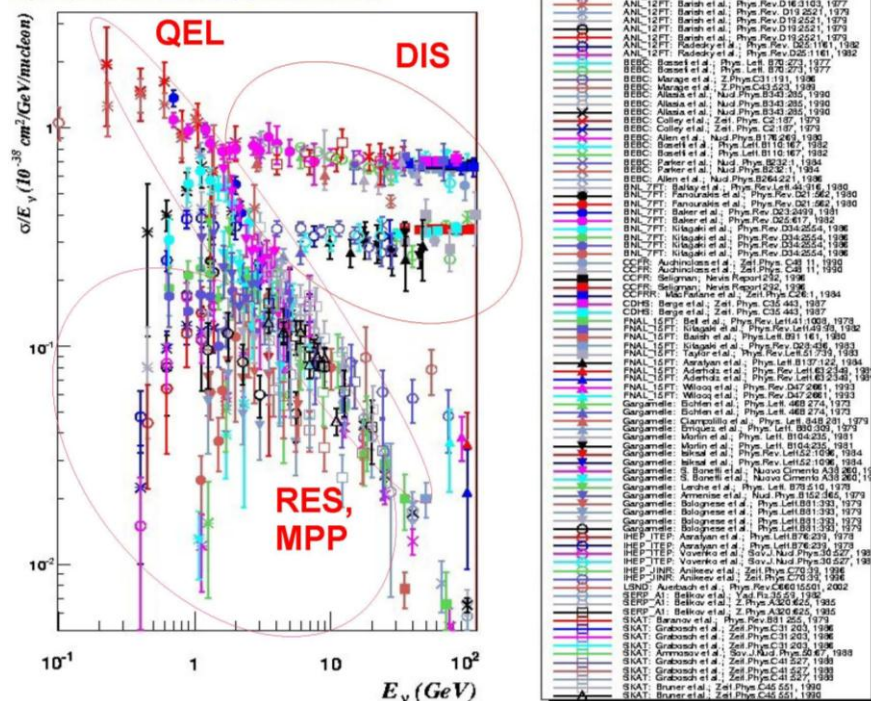


Fig. 17. Sectiunea eficace de interactie a neutrinoilor ca functie de energia particulei incidente (date experimentale)[55]

Din punct de vedere istoric, sectiunile eficace QE si RES pe acest interval de energie nu au fost la fel de mult studiate si masurate ca cele DIS, proces care este dominant la energii mult mai mari. Datele existente pentru aceasta regiune a energiei de cativa GeV au fost obtinute, in principal, din experimente cu camere cu bule, camere cu scanteie sau emulsii, care au functionat si au achizitionat date cu multi ani in urma.

Studiul interactiilor νN folosind detector cu Ar lichid

S-au generat 100.000 evenimente reprezentand interactiile neutrinoilor electronici ν_e cu nucleele de ^{40}Ar in intervalul de energie (0-5 GeV), corespunzatoare fluxului de neutrini care ar putea fi trimis de la CERN la mina de sare Unirea, Slanic-Prahova [67].

In prama etapa a analizei s-a generat fluxul de neutrini, specificand ponderea, codul pdg al particulei, pozitia si 4-impulsul acesteia. Suprafata de generare a fluxului de neutrini este un cilindru cu raza si directia fascicolului descrise de o functie constanta. Fascicolul de neutrini are directia axei $x(1, 0, 0)$ iar raza suprafetei de generare a fluxului este $R_T = 5$ m. Pentru o descriere completa a suprafetei de generare a fluxului de neutrini, se stabileste punctul de pornire al fascicolului la $(100, 0, 0)$, ceea ce inseamna ca neutrini se vor propaga pe distanta de 100 de metri intre punctul de pornire al fascicolului si locatia detectorului (Fig. 18).

Urmatoarea etapa este reprezentata de interactia fluxului de neutrini cu geometria detectorului (Fig. 19), scrisa in ROOT, si generarea evenimentelor. Geometria detectorului consta intr-un tanc plin cu Ar lichid si include descrierea in termeni de elemente chimice a tuturor materialelor din compozitia detectorului. GENIE propaga neutrini prin detector si calculeaza probabilitatea de interactie pentru fiecare tinta; poate decide astfel, unde si cu ce nucleu are loc interactia neutrinoilor. Daca interactia are loc, se genereaza evenimentul cinematic.

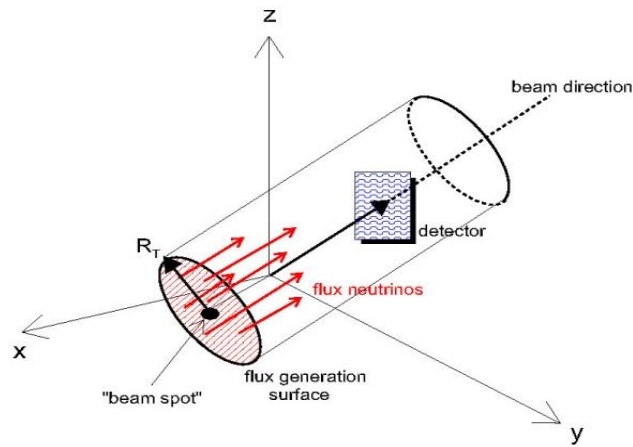


Fig. 18. Aranjamentul geometric pentru simularea interaciunilor νN [54]

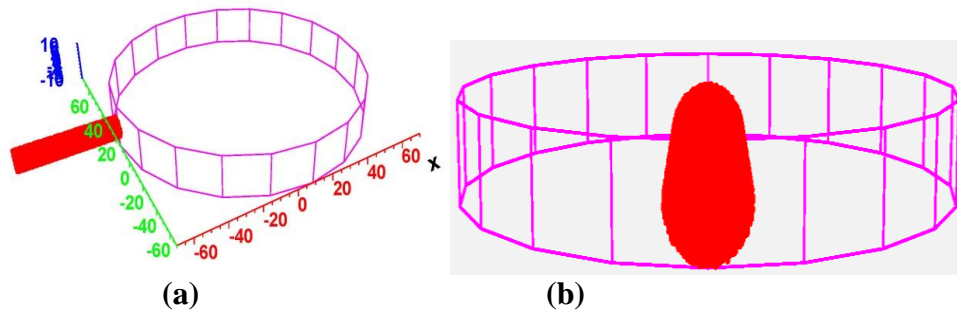


Fig. 19. Fluxul de neutrini si detectorul: inainte (a) si dupa interactia neutrinelor in volumul sensibil (b) [67]

In Fig. 20 este prezentat efectul convolutiei spectrului energetic al neutrinelor cu sectiunea eficace de interactie, obtinandu-se, astfel, numarul neutrinelor care interactioneaza in volumul sensibil reprezentat de Ar lichid. Fig. 20(a) reprezinta spectrul energetic al neutrinelor din fascicoul, in timp ce in Fig. 20(b) este prezentat spectrul energetic al neutrinelor care interactioneaza in detector. Valoarea medie a celor doua histograme se modifica de la 2.5 GeV la 3.2 GeV ca o consecinta a faptului ca pentru neutrini de energie joasa sectiunea eficace de interactie are valoare mai mica [67].

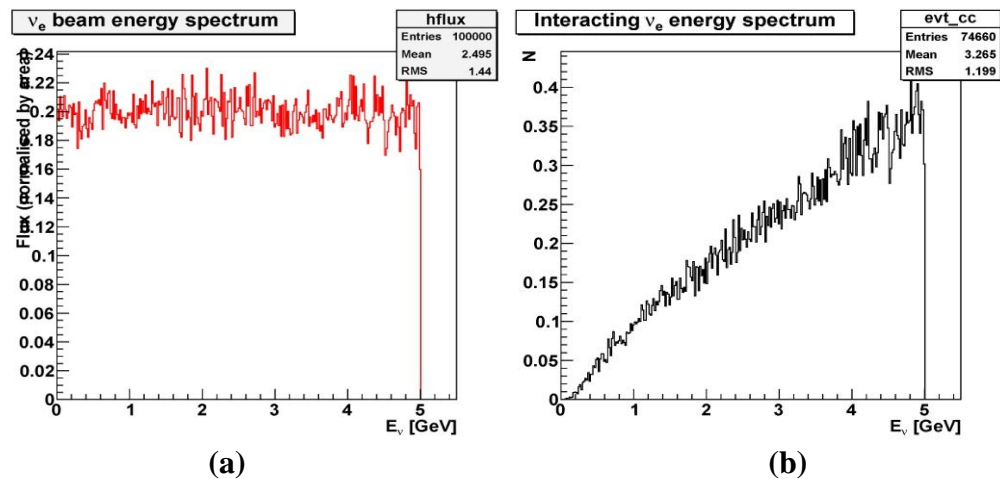


Fig. 20. (a) Spectrul energetic al neutrinelor din fascicoul; (b) spectrul energetic al neutrinelor care interactioneaza in detector (interactii CC) [67]

Spectrele energetice ale neutrinelor care interactioneaza in detector sunt prezentate in Fig. 21, pentru toate procesele fizice si pentru cele mai importante trei tipuri de interactii ale neutrinelor QE, RES si DIS. Pentru fiecare proces, neutrinul interactioneaza cu nucleonul din nucleu rezultand in starea finala leptoni si hadroni. Un rol foarte important il au interactiile dintre hadronii obtinuti in urma interactiei primare dintre neutrin si nucleon.

Din analiza acestor spectre energetice se observa ca interactiile DIS sunt dominante pe intervalul de energie analizat. Pentru cele trei tipuri de interactii studiate, interactiile CC reprezinta ~75% din totalul interactiilor neutrinelor, ceea ce este foarte important, deoarece in starea finala a acestor interactii se produce un lepton, care poate fi detectat si care permite reconstructia neutrinelui incident.

Tab. 2 prezinta probabilitatile de interactie ale neutrinelor pentru diferite tipuri de interactii. Interactiile CCDIS sunt cele mai probabile procese in intervalul de energie considerat [67].

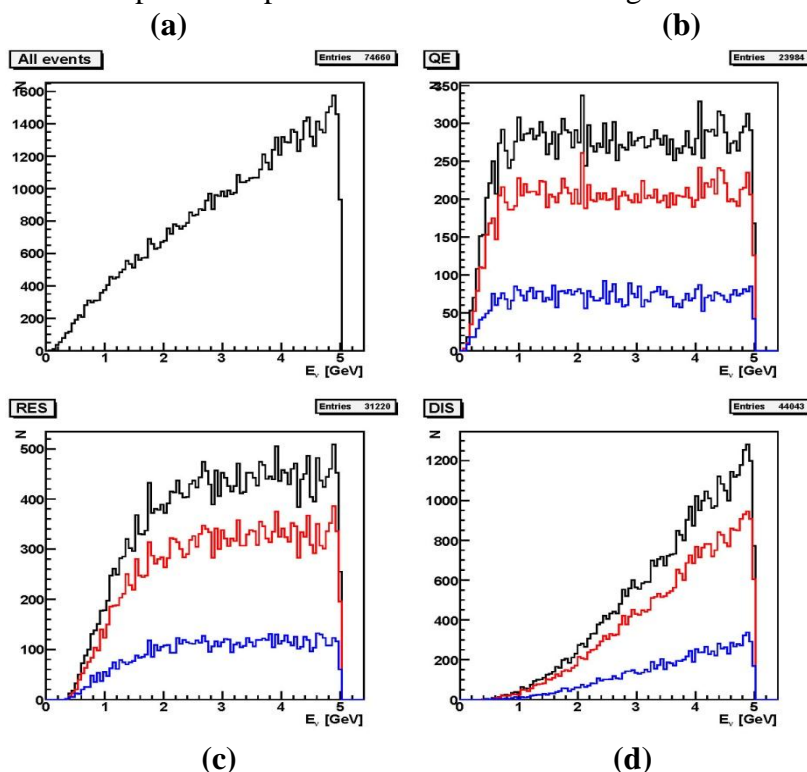


Fig. 21. Numarul de interactii in detector ca functie de energia neutrinelor (la flux constant): (a) – toate procesele fizice; (b) – QE, (c) – RES si (d) – DIS: rosu – interactii CC, albastru – interactii NC, negru – interactii CC+NC [67]

	CC [%]	NC [%]	Total [%]
QE	18	6	24
RES	23	8	31
DIS	33	11	44
Alte interactii	1	0	1
Total	75	25	100

Tab. 2. Probabilitatea relativa de interactie a neutrinelor in detector [67]

6 Metode de reconstrucție a marimilor cinematice în interacțiile νN

Metode de reconstrucție a energiei neutrinelor (E_ν)

Pentru această analiză s-a folosit GENIE, pentru a simula interacțiile neutrinelor cu nucleeele de ^{40}Ar , generând două seturi de 50.000 de evenimente cu și fără interacție în starea finală. Această analiză se bazează pe interacții ale neutrinelor în curenți încarcați (CC) și în special pe evenimente de tip quasi-elastic (CCQE), care sunt cele mai numeroase și ușor de reconstruit, ceea ce duce la erori sistematice mici. Pentru a reconstrui energia neutrinelor s-au luat în considerare două metode [68]:

- *Metoda impulsului total* folosind impulsul total al particulelor rezultate
- *Metoda Quasi-Elastica (QE)* folosind evenimente CCQE și considerând interacția un proces de două corpuri.

În cadrul metodei impulsului total se calculează impulsul total al particulelor rezultate care este egal (folosind anumite ipoteze) cu impulsul neutrinelor incident, deoarece impulsul total se conservă în timpul interacției. Este metoda cea mai simplă însă pentru precizie trebuie ca nucleonul din ținta să fie în repaus (fără impuls Fermi) și toate particulele să fie vizibile și să aibă impulsul ușor de reconstruit.

În cadrul metodei QE se poate calcula energia neutrinelor incident folosind formula de reconstrucție cinematică și presupunând ca nucleonul din starea inițială este în repaus. Pentru această metodă leptonul trebuie să fie corect identificat și reconstruit, ceea ce este, oricum, mult mai ușor decât reconstrucția tuturor particulelor produse în interacție, așa cum este necesar în cadrul metodei impulsului total.

Seturile de evenimente generate fără FSI (interacție în starea finală) sunt mult mai ușor de studiat și sunt folosite pentru a verifica metodele de reconstrucție, dar reconstrucția reală trebuie să ia în considerare evenimentele cu FSI. FSI influențează numărul și impulsul hadronilor care părăsesc nucleul (datorită absorbției), fapt ce micșorează calitatea reconstrucției în metoda impulsului total.

Calitatea reconstrucției energiei neutrinelor

Pentru evaluarea calității reconstrucției s-a reprezentat energia neutrinelor reconstruite din simulări în funcție de valoarea energiei obținută din calcule. Reconstrucția ideală este reprezentată de totalitatea punctelor aliniate de-a lungul diagonalei care străbate reprezentarea grafică. Cu cât punctele sunt situate la distanță mai mare de această diagonală cu atât reconstrucția energiei este mai slabă [69].

Prima figură prezintă calitatea reconstrucției energiei neutrinelor folosind metoda impulsului total; în Fig. 22(a) se presupune ca toate particulele sunt vizibile și reconstruite ideal. Chiar și în aceste condiții, datorită impulsului Fermi al nucleonului din ținta, se poate observa o împrăștiere a energiei neutrinelor. În Fig. 22(b) s-au impus condiții simple asupra vizibilității particulelor, luând în considerare ca particule vizibile electronii, miuonii, protonii, pionii încarcați și neutri. Pentru un număr mare de evenimente energia neutrinelor este mai mică datorită impulsului particulelor din starea finală considerate invizibile.

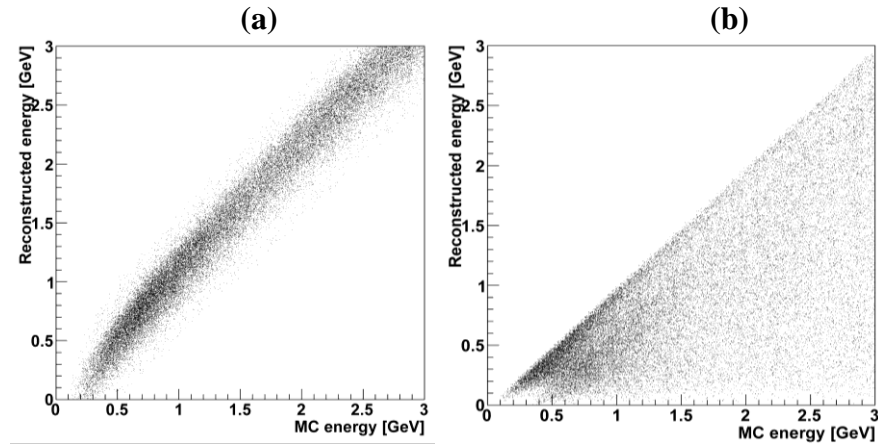


Fig. 22. Metoda impulsului total, evenimente CC (a) toate particulele din starea finala vizibile; (b) criterii de vizibilitate [69]

Rezultatele reconstructiei energiei neutrinoilor folosind metoda QE sunt prezentate in Fig. 23. Rezultatele se bazeaza exclusiv pe reconstructia electronilor, de aceea in anumite situatii metoda QE se poate dovedi a fi mult mai buna decat metoda impulsului total. In particular, este total independenta de conditiile pentru vizibilitatea particulelor introduse anterior, deoarece acestea influenteaza doar hadronii. In cazul ideal ar trebui folosite pentru reconstructie numai evenimente de tip CCQE, inasa problemele cu vizibilitatea protonilor si pionilor la energii mici face dificila selectia unui set de astfel de evenimente, motiv pentru care rezultatele sunt pentru toate tipurile de evenimente si pentru evenimente de tip CCQE. Fig. 23(a) prezinta reconstructia energiei neutrinoilor pentru toate evenimentele CC; rezultatul este oarecum similar cu cel obtinut pentru metoda impulsului total (Fig. 22(b)). Se poate observa existenta unui grup de evenimente cu energie mai mica -chiar sub diagonala- deoarece aceste evenimente au fost gresit identificate ca fiind de tip QE iar energia acestora a fost gresit calculata (in Fig. 23(b) aceste evenimente dispar). Cea mai buna reconstructie a energiei neutrinoilor se obtine pentru evenimentele de tip CCQE (Fig. 23(b)); dispersia punctelor poate fi pusa pe seama impulsului Fermi al nucleonului din tinta.

Rezultatele obtinute in cazul metodei QE sunt mult mai bune decat cele obtinute cu metoda impulsului total deoarece acestea se bazeaza numai pe reconstructia electronilor (leptonul din starea finala), fiind astfel independente de criteriul de vizibilitate introdus anterior [69].

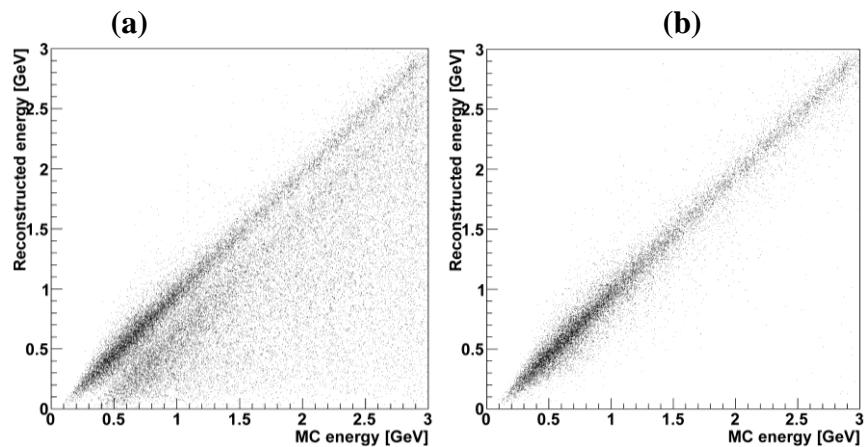


Fig. 23. Reconstructia energiei neutrinoilor prin metoda QE: (a) evenimente de tip CC; (b) evenimente de tip CCQE [69]

Pentru a putea finaliza aceasta analiza se vor compara rezultatele celor doua metode folosind un factor de calitate definit ca diferenta relativa intre energia reala si cea reconstruita: $\delta E = \frac{E_R - E_T}{E_T}$.

In Fig. 24 este prezentata comparatia celor doua metode de reconstructie a energiei neutrinilor in cazul a doua clase de evenimente: evenimente CC si evenimente de tip CCQE. In Fig. 24a distributia corespunzatoare metodei QE este mai larga, ceea ce semnifica faptul ca metoda este inferioara metodei impulsului total in cazul evenimentelor de tip CC. Pentru evenimentele de tip CCQE (Fig. 24b), metoda QE este mai potrivita deoarece distributia acestei metode este mult mai buna decat cea pentru metoda impulsului total.

Pentru evenimentele CCQE erorile metodei QE sunt uneori mai mari decat cele ale metodei impulsului total, luand in considerare conditia legata de vizibilitatea particulelor (imprastierea punctelor din Fig. 23(b) este semnificativ mai mare decat in Fig. 22(a)). Imprecizia metodei impulsului total se datoreaza impulsului Fermi al nucleonului care nu este luat in considerare in cadrul analizei.

Luand in considerare avantajele si dezavantajele celor doua metode descrise mai sus, se poate realiza o procedura optima de reconstructie:

- daca un eveniment este de tip CCQE (electron, proton) atunci se va folosi metoda QE pentru reconstructia energiei neutrinilor
- pentru toate celelalte evenimente CC se va folosi metoda impulsului total. Daca se poate identifica cu precizie ca un eveniment este de tip CCQE, nu este eficienta folosirea metodei impulsului total pentru reconstructia energiei neutrinilor.

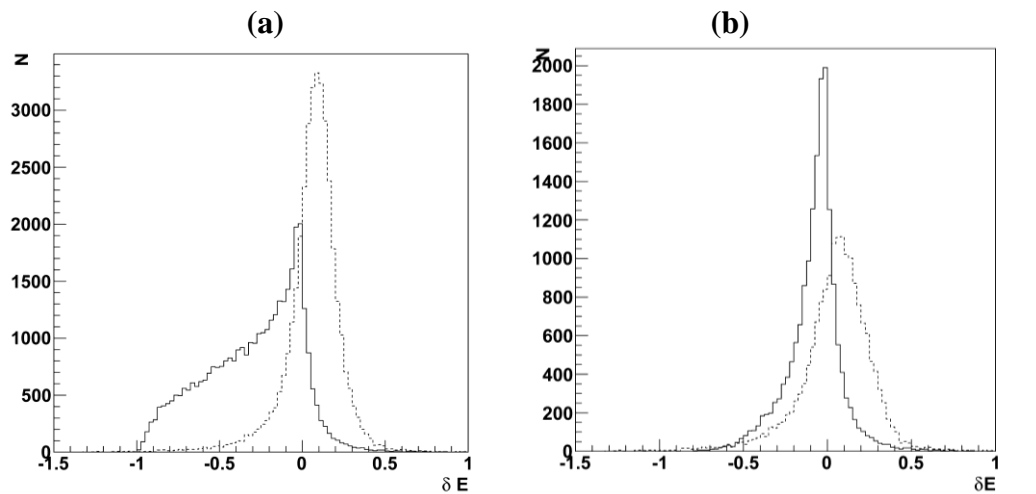


Fig. 24. Comparatie intre cele doua metode de reconstructie: (a) pentru evenimente CC; (b) pentru evenimente CCQE; linie continua– metoda QE, linie punctata – metoda impulsului total [69]

Reconstructia marimii cinematice transfer de impuls (Q^2)

Marimea Q^2 – transfer de impuls la patrat – joaca un rol important in modelarea interactiilor neutrinilor. Sectiunea eficace de interactie a neutrinilor cu nucleonii depinde de factorii de forma care sunt functii de Q^2 . Pentru a defini marimea Q^2 se analizeaza Fig. 25, reprezentarea schematica a interactiei neutrinilor cu tinta. Neutrino se imprastie pe nucleon producand in starea finala un lepton incarcat si hadroni. Q^2 se defineste ca transferul de impuls la patrat dintre vertexul leptonic si cel hadronic.

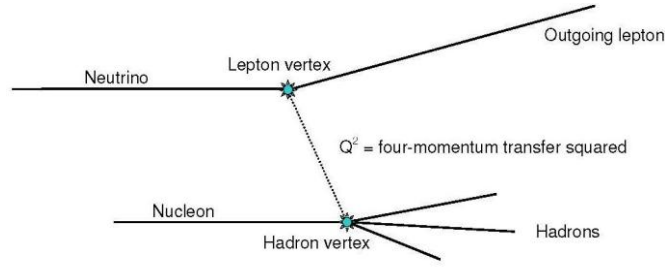


Fig. 25. Interactia neutrinului cu nucleonul cu vertexurile leptonic si hadronic [68]

Daca se cunosc toate proprietatile starilor initiala si finala, Q^2 poate fi calculat in doua moduri, unul folosind particule din vertexul leptonic si altul folosind particule din vertexul hadronic.

$$Q^2 = E^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)$$

Formula de mai sus se poate scrie folosind marimi ce caracterizeaza vertexul leptonic:

$$Q^2 = (E_\nu - E_{lep})^2 - \sum_{i=1,2,3} (p_{i\nu} - p_{ilep})^2$$

sau vertexul hadronic:

$$Q^2 = (E_N - E_{had})^2 - \sum_{i=1,2,3} (p_{iN} - p_{ihad})^2$$

unde indicele N inseamna nucleon, had inseamna vertex hadronic (p_{had} este impulsul total al particulelor ce rezulta din acest vertex) si lep este indicele pentru particulele din vertexul leptonic. Neutrino are aceeasi directie ca si fasciculul incident, de unde rezulta ca are impuls numai pe axa z , iar impulsul initial al nucleonului este impulsul Fermi.

In cadrul unui experiment real, energia neutrino (egala cu impulsul) si impulsul Fermi al nucleonului din tinta sunt marimi necunoscute. Daca se doreste reconstruirea marimii Q^2 trebuie sa se reconstruiasca energia neutrino (se iau in considerare erorile care apar din procesul de reconstructie) fie din vertexul leptonic, fie din vertexul hadronic, presupunand ca impulsul Fermi este neglijabil (acesta are valori mici de ordinul sutelor de MeV in comparatie cu energia neutrino care este de ordinul 1 GeV).

Calitatea reconstructiei marimii Q^2

Pentru a determina calitatea reconstructiei se vor face anumite ipoteze in legatura cu posibilitatile detectorului de a determina diferite proprietati ale particulelor. Se va presupune ca particulele pot fi perfect reconstruite cu scopul de a evalua impactul conditiei de a neglija impulsul Fermi al tinte. Fig. 26(a) prezinta o comparatie a valorilor reconstruite ale lui Q^2 (fara interactie in starea finala). Linia continua reprezinta valorile corespunzatoare vertexului leptonic. Acestea includ valori care pot fi aflate numai din simulari – de aceea se numesc valori *ideale* ale lui Q^2 . Linia intrerupta, pe de alta parte, se refera la calcule realizate pentru particulele din vertexul hadronic unde impulsul Fermi este neglijat. Valorile lui Q^2 obtinute astfel sunt considerate *observabile*. Comparatia dintre cele doua reprezentari grafice indica faptul ca exista efecte in momentul in care impulsul Fermi lipseste din calcule, deoarece acest impuls este inclus in simulari – valorile marimii Q^2 sunt vizibil imprastiate ajungand chiar si pana la valori negative.

Includerea interactiei din starea finala (FSI) introduce un alt factor de imprastiere care este vizibil in Fig. 26(b). In aceasta figura este reprezentata observabila Q^2 pentru evenimentele cu FSI si fara FSI. Imprastierea punctelor introdusa de includerea interactiei din starea finala este comparabila cu efectul pe care il are neglija impulsului Fermi. Acest lucru se datoreaza probabil disparitiei

unor valori ale impulsului in cadrul procesului de reinteractie (de exemplu absorbtia pionilor)[70].

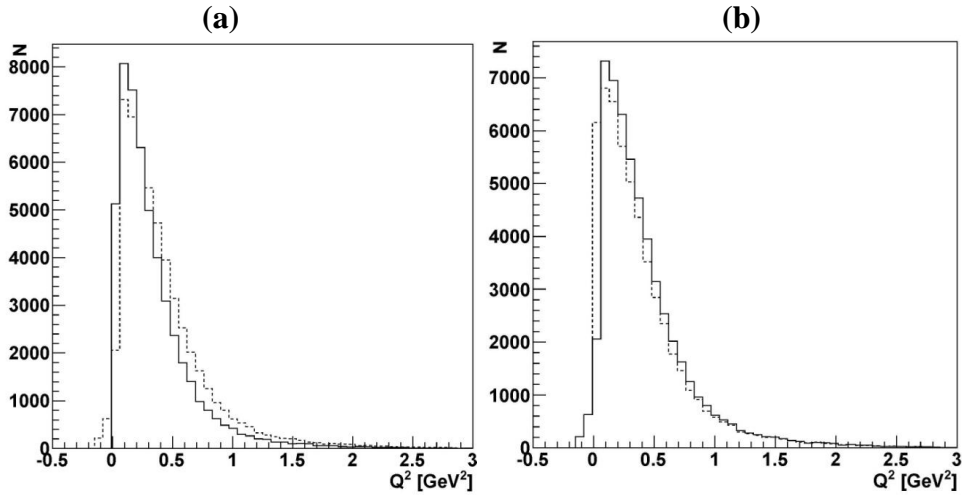


Fig. 26. Distributii de Q^2 pentru toate interactiile neutrinoilor; (a) Valori Q^2 ideale (linie continua) si observabile (linie intrerupta) pentru evenimente fara FSI. (b) Efectele FSI- valori Q^2 observabile pentru evenimente fara FSI (linie continua) si FSI (linie intrerupta) [70]

Alt obiectiv al acestei analize a fost studiul diferentelor aparute intre distributiile de Q^2 pentru diferite canale de producere a pionilor. S-au studiat doua astfel de canale:

- $\nu_e + p = e^- + p + \pi^+$, $\nu_e + n = e^- + n + \pi^+$ (producere CC de π^+), si
- $\nu_e + p = \nu_e + p + \pi^0$, $\nu_e + n = \nu_e + n + \pi^0$ (producere NC de π^0).

Rezultatele sunt prezentate in Fig. 27 si Fig. 28. Fig. 27 prezinta rezultatele obtinute pentru setul de evenimente generate fara FSI. Distributiile, normate la 1, sunt foarte asemanatoare, singura diferenta apare la distributia evenimentelor CC care are o valoare medie ceva mai mare.

Includerea interactiei din starea finala (FSI) schimba situatia deoarece o parte din pioni sunt absorbiti de nucleu (facand ca unele evenimente sa fie identificate ca fiind de alt tip decat cele din cazul in care nu exista FSI). Majoritatea evenimentelor pierdute cand se trece de la generare fara FSI si cu FSI sunt identificate ca fiind de tip QE tocmai datorita absorbtiei pionilor. Acest fapt modifica normarea celor doua distributii, facand ca numarul de evenimente sa scada semnificativ, lucru care se poate observa in ambele reprezentari din Fig. 28. Se observa, de asemenea, ca cele doua distributii sunt mult mai late decat cele obtinute pentru evenimentele generate cu FSI.

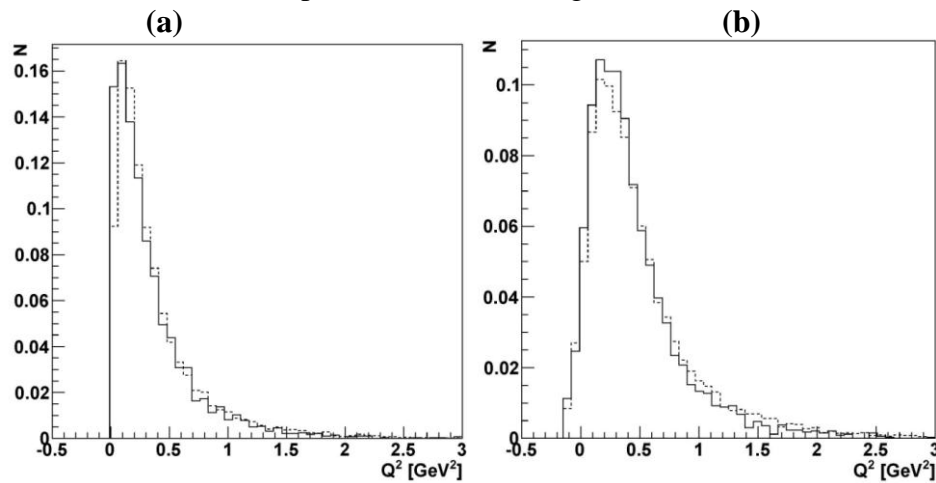


Fig. 27. Distributii de Q^2 pentru evenimente generate fara FSI pentru producere NC de π^0 (linie continua) si producere CC de π^+ (linie intrerupta). (a) – Q^2 ideal, (b) – Q^2 observabil [70]

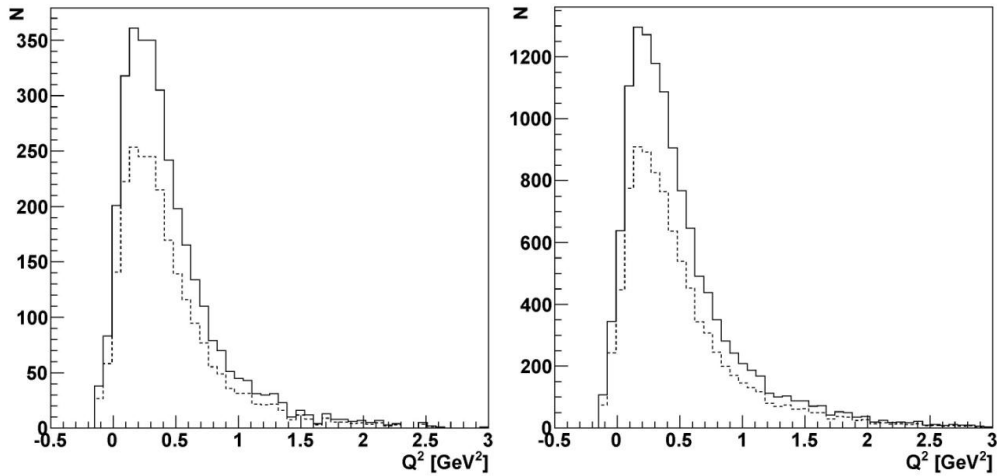


Fig. 28. Distributii de Q^2 observabil pentru evenimente generate fara FSI (linie continua) si cu FSI (linie intrerupta). (a) – productie NC de π^0 , (b) – productie CC de π^+ [70]

Concluzii si Perspective

Astazi, teoria acceptata in Fizica particulelor elementare este Modelul Standard al interactiilor si particulelor elementare, una dintre cele mai bine testate teorii din Fizică. In pofida acestui succes, existenta aspectelor neclarificate din Modelul Standard, cum ar fi originea masei neutrinelor, a condus si la ideea ca acesta este doar o componenta, aplicabila la energii joase, a unor teorii mult mai complexe care incep sa se manifeste la energii peste energiile de referinta din Modelul Standard, asa cum este prezentat si in capitolul 2.

In cadrul acestei teze de doctorat s-a realizat un studiu al interactiilor neutrinelor cu diferite nucleu, la energii de cativa GeV, acestea fiind o componenta importanta a experimentelor cu baza lunga care studiaza oscilatiile neutrinelor. Comparativ cu studiile similare care au fost efectuate pana in prezent si prezentate in literatura ([28],[71],[68]), studiul de fata introduce in plus urmatoarele aspecte:

- au fost considerate ca particule primare toate tipurile de neutrini si tipul de interactie primara neutrin-nucleon, mediata de bozonul incarcat (curenti incarcati, CC)
- simularile au fost efectuate considerand gazele rare ca mediu in care se produce interactia, gazele rare fiind astfel folosite ca mediu activ de detectie pentru detectorii de volume sensibile mari
- pentru simularea interactiilor neutrinelor cu nucleele s-a utilizat generatorul Monte Carlo pentru neutrini, GENIE, care modeleaza fizica interactiilor neutrinelor pe un interval de energie de la cativa MeV la cativa TeV pentru toate combinatiile de tinte nucleare si familii de neutrini.
- pentru a evidetia modul in care selectia evenimentelor influenteaza calitatea reconstructiei s-au studiat metodele de reconstructie a marimilor cinematice in interactiile νN , punandu-se accent pe marimile cinematice energia neutrinelor (E_ν) si transfer de impuls la patrat (Q^2).

Acest studiu, constand in calcule si simulari, investigheaza posibilitatile de a folosi gazele rare ca volume sensibile mari pentru detectia neutrinelor. Aceasta tehnica este deja folosita in experimente actuale, insa volumele sensibile sunt de ordinul ktonelor, in timp ce proiectul LAGUNA [31] studiaza posibilitatea folosirii volumelor sensibile de ordinul Mtonelor, asa cum se arata in capitolul 4. In acest scop, au fost realizate studii comparative intre mediile active reprezentate de apa, Argon si Xenon, punandu-se accent pe proprietatile fizice si pe tehnicile de detectie care pot fi dezvoltate pentru aceste medii.

Pentru a studia interaciunile neutrinelor cu nucleele volumului sensibil s-au realizat simulări cu un program, GENIE, proiectat special pentru acest scop, în capitolul 5. În cadrul acestui studiu s-a determinat secțiunile eficiente de interacție CC ale neutrinelor electronice cu nucleele de Argon, observându-se o comportare diferită în cele două regiuni de interes ale energiei: în jurul valorii de 1 GeV și la valori mult mai mari ale energiei. S-a observat că la energii de câțiva GeV interacțiile neutrinelor au diverse surse și sunt predominant quasi-elastice (QE) și de producere de rezonanțe cu obținerea unui singur pion în starea finală (deși ciocnirile adânc inelastice (DIS) încep să devină importante la aceste energii și să domine la energii mai mari). S-au investigat stările finale corespunzătoare interacțiilor $\nu_e + {}^{40}\text{Ar}$ de tip (QE), (RES), (DIS). Rezultatele au fost obținute cu GENIE într-o situație particulară: neutrini imprastați pe o țintă fixă reprezentată de un nucleu. Pentru a studia interacțiile νN în regiunea de energie de câțiva GeV s-au generat neutrini cu energia de 1 GeV și 3.2 GeV care au interacționat cu nucleul de ${}^{40}\text{Ar}$.

S-au generat evenimente folosind flux de neutrini care a fost trecut printr-o geometrie simplă a detectorului, determinându-se numărul neutrinelor care interacționează în detector. În acest scop, s-a urmărit efectul combinării fluxului de neutrini cu secțiunea eficientă de interacție a neutrinelor în materialul din detector și s-a observat că numărul de neutrini scade ca o consecință a faptului că secțiunea eficientă este mai mică pentru neutrini de energie joasă. De asemenea, în regiunea de energie studiată interacțiile de tip imprastiere adânc inelastică sunt importante și devin complet dominante la energii mai mari ale neutrinelor.

În următoarea etapă, capitolul 6, au fost studiate metodele de reconstrucție a marimilor cinematice din interacțiile νN , observându-se modul în care selecția evenimentelor influențează calitatea reconstrucției. Pentru reconstrucția energiei neutrinelor au fost prezentate două metode: metoda impulsului total care folosește impulsul total al particulelor rezultate, și metoda QE pentru reconstrucția evenimentelor de tip CCQE. Pentru a avea o procedură optimă de reconstrucție a energiei neutrinelor sugerez să se folosească metoda QE dacă un eveniment poate fi identificat cu precizie ca fiind de tip CCQE, și metoda impulsului total pentru toate celelalte tipuri de evenimente CC. Dacă evenimentele sunt separate eficient în clase CCQE și CCnonQE nu este necesară folosirea metodei impulsului total pentru clase de evenimente CCQE.

În ceea ce privește reconstrucția mării transfer de impuls, Q^2 , s-au observat mici diferențe între cele două metode de reconstrucție, între cele două seturi de evenimente generate cu și fără FSI. Dacă se analizează numai interacțiile cu producere de pioni factorul care influențează normarea și forma distribuțiilor de Q^2 este selecția evenimentelor și mai puțin reconstrucția lor. Este important de specificat că toate aceste considerații nu țin cont de modificările introduse de un detector asupra vizibilității particulelor, modificări ce au un impact foarte mare asupra valorilor acestor observabile.

Perspective

Prezentul studiu deschide perspective ale unor studii care pot fi realizate în viitor. Până în prezent, în cadrul acestui studiu, a fost luat în considerare răspunsul detectorului, folosind geometria acestuia scrisă într-un program ROOT în cadrul generatorului Monte Carlo, GENIE. Se intenționează implementarea geometriei detectorului în codul GEANT, proiectat pentru a simula răspunsul detectorului la trecerea prin volumul sensibil a particulelor obținute în starea finală a interacției primare a neutrinelor cu nucleele simulate cu GENIE.

Simultan, se vor studia interacțiile miuonilor proveniți din raze cosmice care pot interacționa cu un mediu compact cum este sarea. Pentru simularea interacției miuonilor cu roca se va folosi un program dedicat: MUSIC [72]. Programul a fost creat pentru a simula interacția miuonilor cu diferite tipuri de roca, ținând seama de o serie de factori de natură geologică: structura rocii, densitatea, etc.

Simulările reprezintă punctul de start în proiectarea și implementarea unui experiment real. Ele ne ajută să înțelegem anumite aspecte însă oferă numai o vedere ideală asupra modului în care se poate realiza un experiment și a ceea ce se poate studia în cadrul acestuia. Astfel, pentru a fi capabili

sa evaluam modificarile introduse de un detector asupra studiilor realizate, este nevoie de compararea cu datele experimentale care vor fi obtinute in cadrul experimentului ArDM cu un prototip al detectorului Glacier cu volum sensibil de 1 tona.

Bibliografie

- [1] R. Davis, *Phys. Rev.* , vol. 97, p. 766, 1955.
- [2] G. Aad, **D.Chesneanu** et al., "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider," *JINST 3:S08003*, 2008.
- [3] The CMS Collaboration, "Technical Design Report," *CERN-LHCC-2006-001*.
- [4] The ALICE Collaboration, "ALICE Technical proposal for a Large Ion collider Experiment at the CERN LHC," *CERN-LHCC-95-71*.
- [5] The LHCb Collaboration, "LHCb Technical Design Report. Reoptimized detector design and performance," *CERN-LHCC-2003-030*.
- [6] G.Aad,...**D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons," *Eur.Phys.J.C*, vol. 71, no. 3, 2011.
- [7] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays," *Phys Lett B*, vol. 688, no. 1, pp. 21-42, 2010.
- [8] G.Aad,...**D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Measurement of inclusive jet and dijet cross sections in proton-proton collisions at 7 TeV centre-of-mass energy with the ATLAS detector," *Eur.Phys.J.C*, vol. 71, no. 2, 2011 .
- [9] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Search for Quark Contact Interactions in Dijet Angular Distributions in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC," *Phys. Lett. B*, vol. 694, pp. 327-345, 2011.
- [10] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Charged-particle multiplicities in pp interactions at $\sqrt{s} = 900$ GeV measured with the ATLAS detector at the LHC," *Phys Lett B* , vol. 688, no. 1, pp. 21-42, 2010.
- [11] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Search for New Particles in Two-Jet Final States in 7 TeV Proton-Proton Collisions with the ATLAS Detector at the LHC," *Phys. Rev. Lett.* , vol. 105, p. 161801, 2010.
- [12] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Performance of the ATLAS Detector using First Collision Data," *JHEP* , vol. 1009, p. 056, 2010.
- [13] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Elucidating Jet Energy Loss Using Jets: Prospects from ATLAS," *Nuclear Physics A* , vol. 830, pp. 797c-800c, 2009.
- [14] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Status of ATLAS and Preparation for the Pb-Pb Run," *Nuclear Physics A* , vol. 830, pp. 89c-96c, 2009.
- [15] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "The ATLAS Simulation Infrastructure," *Eur.Phys.J.C* , vol. 70, p. 823, 2010.
- [16] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration," *Eur.Phys.J.C* , vol. 70, pp. 787-821, 2010.
- [17] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Readiness of the ATLAS Tile Calorimeter for LHC collisions," *Eur.Phys.J.C*, vol. 70, p. 1193, 2010.
- [18] G. Aad,... **D.Chesneanu**... et al., ATLAS Collaboration, "Readiness of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter for LHC Collisions," *Eur.Phys.J.C* , vol. 70, pp. 723-753, 2010.

- [19] G.Aad,...,**D.Chesneau**,... et al., ATLAS Collaboration, "Measurement of the $W \rightarrow l\nu$ and $Z/\gamma^* \rightarrow ll$ production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector," *JHEP*, vol. 1012, p. 060, 2010.
- [20] W. Pauli, "Letter reproduce in translation," *Physics Today*, 1978.
- [21] A. Haungs, H. Rebel, *Rep. Prog. Phys.*, vol. 66, p. 1145, 2003.
- [22] Particle Data Group, *Phys. Lett. B*, vol. 667, p. 1, 2008.
- [23] Super-Kamiokande, Y. Fukuda et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, p. 1562, 1998.
- [24] Super-Kamiokande, S. Fukuda et al., *Phys. Lett. B*, vol. 539, p. 179, 2002.
- [25] SNO, Q. R. Ahmad et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 89, p. 011301, 2002.
- [26] KamLAND, K. Eguchi et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, p. 021802, 2003.
- [27] L. Oberauer, *Mod. Phys. Lett. A*, vol. 19, p. 337, 2004.
- [28] A.Rubbia, "Experiments for CP-violation:A giant liquid Argon scintillation, Cerenkov and charge imaging experiment?," *hep-ph/0402110*.
- [29] A.Rubbia, "Review of massive underground detectors," *hep-ph/0407297*.
- [30] A.Ereditato and A.Rubbia, "Ideas for future liquid argon detectors," *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, vol. 139, pp. 301-310, 2005.
- [31] A.Ereditato and A.Rubbia, "The liquid argon TPC:A powerful detector for future neutrino experiments and proton decay searches,," *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, vol. 154, pp. 163-178, 2006.
- [32] A.Ereditato and A.Rubbia, "Conceptual design of a scalable multi-kton superconducting magnetized liquid argon TPC," *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, vol. 155, pp. 233-236, 2006.
- [33] L.Oberauer, F.von Feilitzsch and W.Potzel, "A large liquid scintillator detector for low-energy neutrino astronomy," *Nucl.Phys.Proc.Suppl.*, vol. 138, pp. 108-111, 2005.
- [34] T.Marrodan Undagoitia et al., "Low energy neutrino astronomy with the large liquid scintillator detector LENA," *Part.Nucl.Phys.*, vol. 57, p. 283, 2006.
- [35] A.de Bellefon et al., "MEMPHYS:A large scale water Cerenkov detector at Frejus," *hep-ex-0607026*.
- [36] Y.Totsuka, *Int.J.Mod.Phys.A* 18S1(2003)273., *Int.J.Mod.Phys.A*, vol. 18S1, p. 273, 2003.
- [37] BOREXINO Collaboration (H.O.Back et al), "A high-density, high-flashpoint organic liquid scintillator for applications in low-energy Particle and Astrophysics experiments," *physics/0408032*.
- [38] KamLand Collaboration, (T.Araki et al.), "Measurements of neutrino oscillation with Kam Land:Evidence of spectral distortion," *Phys.Rev.Lett.*, vol. 94, p. 081801, 2005.
- [39] ICARUS Collaboration, (S.Amaro et al.), "Design, construction and tests of the ICARUS T600 detector," *Nucl.Instrum.Meth. A*, vol. 527, pp. 329-410, 2004.
- [40] ICARUS Collaboration, F.Arneodo et al., "The ICARUS experiment, a second-generation proton decay experiment and neutrino observatory at the Gran Sasso Laboratory," *hep-ex/0103008*.
- [41] Y.Itow et al., "The JHF-Kamioka neutrino project," *arXiv:hep-ex/0106019*.
- [42] C.Andreopoulos, A.Bell, D.Bhattacharya, F.Cavanna, J.Dobson, S.Dytman, H.Gallagher, R.Hatcher, P.Kehayias, A.Meregaglia, D.Naples, G.Pearce, A.Rubbia, M.Whalley, T.Yang., "The GENIE Neutrino Monte Carlo Generator," *Nucl.Instrum.Meth.A*, vol. 614, pp. 87-104, 2010.
- [43] **D.Chesneau**, "A comparative analysis of neutrino interactions in noble gases," *Unibersity of Bucharest, Faculty of Physics 2011 Meeting*, 2011.
- [44] T.Yang, C.Andreopoulos, H.Gallagher, K.Hoffman and P.Kehayias, "A Hadronization Model for the few-GeV Neutrino Interactions," *Eur.Phys.J. C*, vol. 63, pp. 1-10, 2009.

- [45] T. Leitner, L. Alvarez-Ruso and U. Mosel, *Phys. Rev. C*, vol. 73, p. 065502, 2006.
- [46] G. Battistoni et al., *AIP Conf. Proc.*, vol. 896, p. 31, 2007.
- [47] *hep-ph/0508110*, <http://hepforge.cedar.ac.uk/lhapdf/>.
- [48] "Pythia 6.400 manual," *JHEP*, vol. 05, p. 026, 2006.
- [49] K. S. Kuzmin, V. V. Lyubushkin, V. A. Naumov, *hep-ph/0511308*.
- [50] **D. Chesneanu**, *AIP Conf. Proc.*, vol. 1304, pp. 489-493, 2010.
- [51] **D. Chesneanu**, A. Jipa, I. Lazanu, R. Margineanu, B. Mitrica, "Preliminary results of ν interactions study using GENIE event generator," *Romanian Reports in Physics*, vol. 64, no. 3, 2012.
- [52] **D. Chesneanu**, "Preliminary results of neutrino interactions study using GENIE event generator," *University of Bucharest, Faculty of Physics 2011 Meeting*, 2011.
- [53] P. Adamson et al., "A Study of Muon Neutrino Disappearance Using the Fermilab Main Injector Neutrino Beam," *Phys. Rev.*, vol. D 77, p. 072002, 2008.
- [54] C. Andreopoulos et al., "The GENIE Neutrino Monte Carlo Generator. PHYSICS & USER MANUAL," <http://www.genie-mc.org/>.
- [55] C. Andreopoulos, "The GENIE Neutrino Monte Carlo Generator," *45th Karpacz Winter School in Theoretical Physics*, pp. <http://www.genie-mc.org>, 2009.
- [56] D. MacFarlane et al., *Z. Phys.*, vol. C26, p. 1, 1984.
- [57] J. P. Berge et al., *Z. Phys.*, vol. C35, p. 443, 1987.
- [58] S. Ciampollilo et al., *Phys. Lett.*, vol. B84, p. 281, 1979.
- [59] D. C. Colley et al., *Zeit. Phys.*, vol. C2, p. 187, 1979.
- [60] P. Bosetti et al., *Phys. Lett.*, vol. B110, p. 167, 1982.
- [61] A. I. Mukhin et al., *Sov. J. Nucl. Phys.*, vol. 30, p. 528, 1979.
- [62] D. S. Baranov et al., *Phys. Lett.*, vol. B81, p. 2521, 1979.
- [63] S. J. Barish et al., *Phys. Rev.*, vol. D19, p. 2521, 1979.
- [64] N. J. Baker et al., *Phys. Rev.*, vol. D25, p. 617, 1982.
- [65] T. Eichten et al., *Phys. Lett.*, vol. B46, p. 274, 1973.
- [66] G. P. Zeller, *Preprint hep-ex/0312061*.
- [67] **D. Chesneanu**, A. Jipa, I. Lazanu, "The study of neutrino-nucleus interactions using a Monte Carlo event generator," *UPB. Sci. Bull., Series A*, vol. 74, no. 2, 2012.
- [68] P. Przewlocki, "A study of neutrino interactions constituting the background to electron neutrino appearance in T2K experiment," *Ph. D. thesis, Andrzej Sołtan Institute for Nuclear Studies*, 2010.
- [69] **D. Chesneanu**, A. Jipa, "Neutrino Energy Reconstruction in Neutrino-Nucleus Interactions," *Romanian Journal of Physics*, Vols. 57, Number 7-8, 2012.
- [70] **D. Chesneanu**, "Methods for reconstruction of kinematic variables in neutrino-nucleus interactions," *University of Bucharest, Faculty of Physics 2012 Meeting*, 2012.
- [71] D. Orme, "Beam parallax studies for the SciBooNe neutrino experiment," *PhD, Imperial College London*, 2007.
- [72] V. Kudryavtsev et al., *Comp. Phys. Comm.*, Vols. 180-3, pp. 339-346, 2009.