

Raport de faza privind implementarea proiectului 289PED din 03/08/2020

„Detectori de rezolutie inalta avand la baza scintilatori plastici cu senzori optici compacti pentru aplicatii de tomografie miuonica” - TOMAHAWC

Etapa 1 - 15/12/2020

Simularea răspunsului detectorului și testarea echipamentului (scintilatori din plastic, dispozitive SiPM)

Activitatea 1.1 Simularea răspunsului detectorului și a eficienței acestuia (partea 1)

Scopul proiectului TOMAHAWC este dezvoltarea unui prototip de detector care sa foloseasca scintilatori plastici pentru a masura cu o rezolutie inalta fluxul de miuoni atmosferici in vederea punerii in evidenta a structurii interne a unor obiecte.

Prototipul care va fi dezvoltat va fi alcatuit din 2 module de detectie, fiecare capabil sa determine cu o precizie inalta locul prin care a trecut miuonul incident. Acestea vor avea ca si volum activ scintilatori plastici sau fibre scintilatoare (materiale sensibile la trecerea particulelor incarcate), scintilatiile rezultate in urma interactiei cu particulele incidente fiind prelucrate prin intermediul unor dispozitive SiPM, capabile sa transforme fotonii generati in semnale electrice.

Un modul va contine doua straturi de materiale sensibile, fiecare fiind alcatuit din un numar mare de baghete de scintilator plastic, conectate optic la cate un dispozitiv SiPM, Avand directiile baghetelor unui strat pozitionate perpendicular fata de directia baghetelor celuilalt, in momentul in care un miuon trece printr-un modul de detectie, acesta trebuie sa traverseze cel putin o bagheta scintilatoare din fiecare strat. Punctul de intersectie al baghetelor care au interactionat cu particula incidenta constituie pozitia X-Y din planul generat de cele doua suprafete prin care miuonul a trecut. Traectoria miuonului va putea fi reconstruita din datele furnizate de cele doua module de detectie, aceste module fiind plasate unul deasupra celuilalt, la o distanta variabila, distanta ce va fi stabilita ulterior in functie de cerintele tehnice ale fiecărei campanii de masurare.

Pentru alegerea unei configuratii portivite (dimensiunile baghetelor scintilatoare, distanta dintre cele doua module de detectie si alte caracteristici tehnice) a fost scris un program de simulare,

bazat pe infrastructura Geant4, in care au fost implementate caracteristicile principale ale modulelor de detectie. Au fost simulate cele doua module de detectie, fiecare modul fiind alcatuit din doua straturi active de aproximativ $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ (Fig.1). Straturile active au fost concepute ca fiind compuse din cate 166 de baghete scintilatoare, dimensiunea unei baghete fiind de $3 \times 3 \times 500 \text{ mm}^3$.

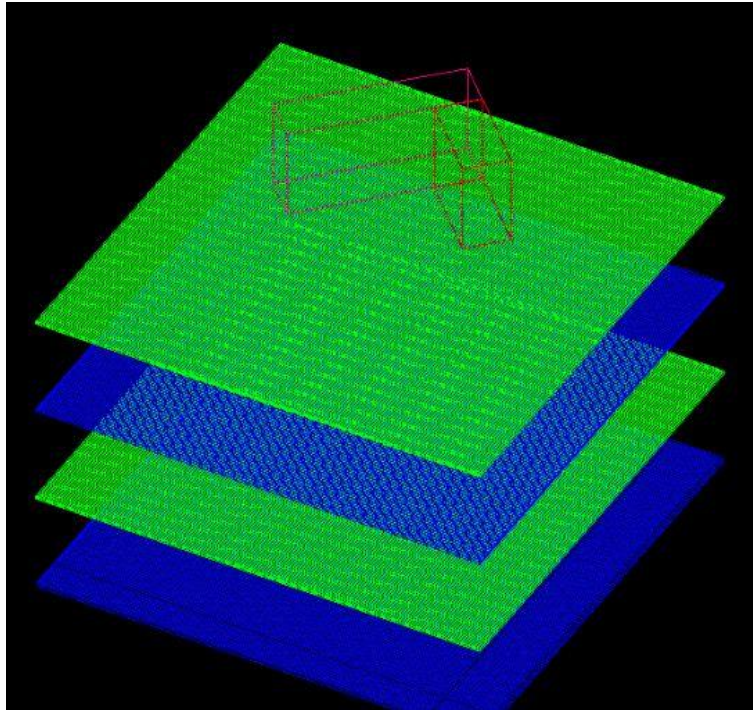


Fig.1 Vedere schematica din Geant4 a baghetelor scintilatoare din componenta prototipului.

Pentru ca simularea sa relice cat mai corect cazul real, fiecare strat activ a fost inchis (in cadrul simularii) intr-o cutie de aluminiu, luandu-se in calcul, asadar, si franarea miuonului in carcasa exterioara a detectorului.

De asemenea, pentru o reprezentare cat mai apropiata de realitate, miuonii care au interactionat cu detectorul au reprezentat o parametrizare a fluxului de miuoni naturali, tinandu-se cont de tipul, energia si unghiul de incidenta al acestuia.

O prima caracteristica determinata in cadrul simularilor a fost spectrul energiei depuse in scintilatori de catre miuonii cosmici. Acesta este reprezentat in Fig. 2, si va fi folosit la calibrarea tensiunii de alimentare a dispozitivelor SiPM.

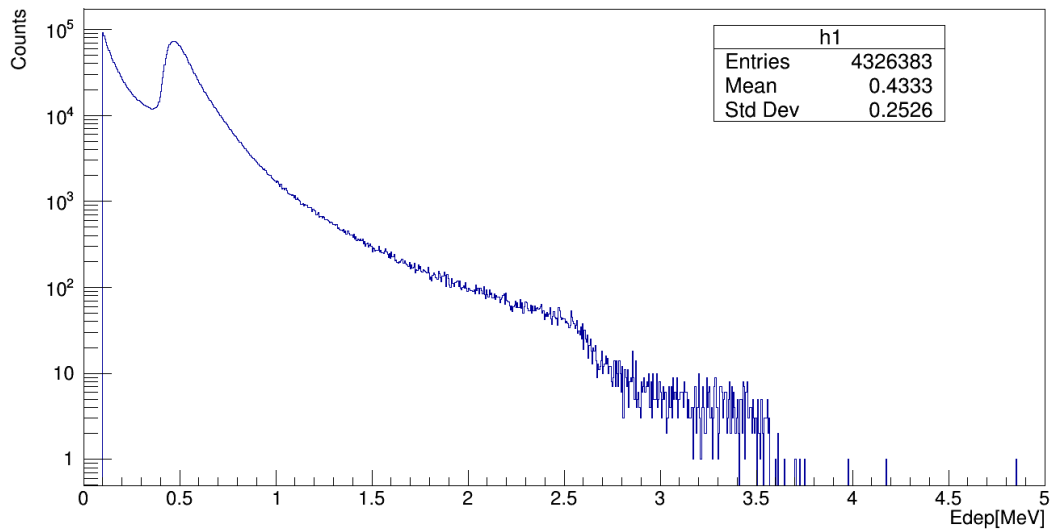


Fig.2 Spectrul energiei depuse de miuoni in volumul sensibil.

In codul de simulare au fost plasate si obiecte din plumb (cu grosimea de 10 cm), de diferite forme, pentru a testa capacitatea teoretica a sistemului de a detecta variatii ale fluxului de miuoni (Fig. 3).

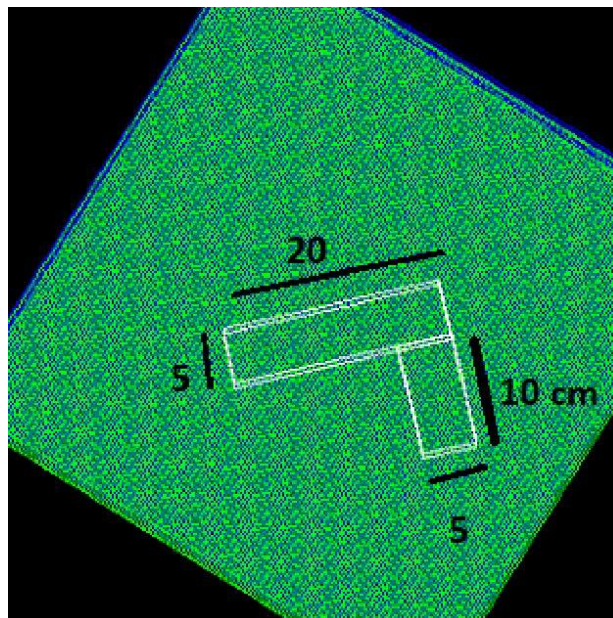


Fig.3 Vedere schematica din Geant4 a unui obiect plasat deasupra prototipului.

Pentru vizualizarea rezultatelor, a fost scris un program de analiza a datelor, bazat pe setul de instrumente de programare ROOT.

Pentru reconstructia obiectului scanat, programul de vizualizare extrage din reprezentarea distributiei miuonilor inregistrati in detector in cazul in care un obiect este prezent deasupra acestuia, distributia fluxului natural al miuonilor fara nici un obiect prezent. In acest fel se pune in evidenta structura interna a obiectului, prin masurarea efectului prezentei acestuia asupra fluxului natural al miuonilor (Fig.4).

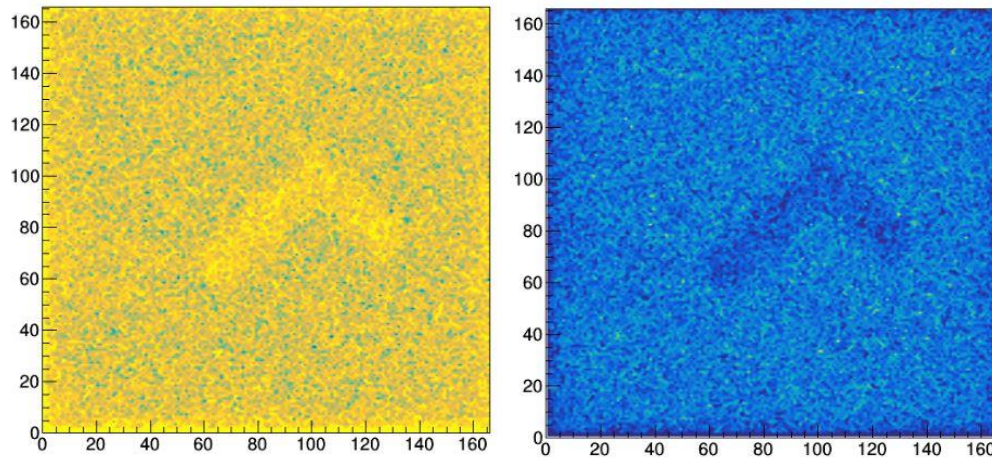


Fig.4. Imagine obtinuta din simularea raspunsului detectorului in prezenta unui obiect din plumb. Materialele sensibile (baghetele de scintilator plastic) au fost modelate in simulare tinand cont de specificatiile tehnice oferite de Saint Gobain Crystals, unul din putinii producatori care poate furniza baghete scintilatoare de dimensiuni atat de mici, necesare atingerii reolutiei unghiulare propuse.

Specific Properties of Standard Formulations					
Fiber	Emission Color	Emission Peak, nm	Decay Time, ns	# of Photons per MeV**	Characteristics / Applications
BCF-10	blue	432	2.7	-8000	General purpose; optimized for diameters >250 μ m
BCF-12	blue	435	3.2	-8000	Improved transmission for use in long lengths
BCF-20	green	492	2.7	-8000	Fast green scintillator
BCF-60	green	530	7	-7100	3HF formulation for increased hardness
BCF-91A	green	494	12	n/a	Shifts blue to green
BCF-92	green	492	2.7	n/a	Fast blue to green shifter
BCF-98	n/a	n/a	n/a	n/a	Clear waveguide

** For Minimum Ionizing Particle (MIP), corrected for PMT sensitivity

Dupa consultarea specificatiilor tehnice, a fost ales tipul de material BCF-20 ca baza pentru modelul de detector simulat. Principalele caracteristici ale acestui material sunt descrise in Fig. 5.

Common Properties of Single-clad Fibers -	
Core material	Polystyrene
Core refractive index	1.60
Density	1.05
Cladding material	Acrylic
Cladding refractive index	1.49
Trapping efficiency, round fibers	3.44% minimum
Trapping efficiency, square fibers	4.4%
No. of H atoms per cc (core)	4.82×10^{22}
No. of C atoms per cc (core)	4.85×10^{22}
No. of electrons per cc (core)	3.4×10^{23}
Operating temperature	-20°C to +50°C
Vacuum compatible	Yes
Common Properties of Multi-clad Fibers -	
Second cladding material	Fluor-acrylic
Refractive index	1.42
Numerical aperture	0.74
Trapping efficiency, round fibers	5.6% minimum
Trapping efficiency, square fibers	7.3%

Fig. 5. Caracteristici ale baghetelor scintilatoare

Codul de simulare construit pentru reproducerea functionalitatii detectorului furnizeaza operatorului numarul baghetelor care au interactionat cu miuoul generat de tunul de miuoni programat in Geant4, cat si energia depusa de miuon in fiecare bagheta. In cazul practic, energia depusa de miuonii incidenti in plastic este transformata, prin scintilatie, in fotoni, acest proces fiind guvernat de anumiti parametri, cum ar fi spectrul de emisie, ori rata de producere a fotonilor (8000 fotoni/MeV in cazul materialului ales pentru acest proiect).

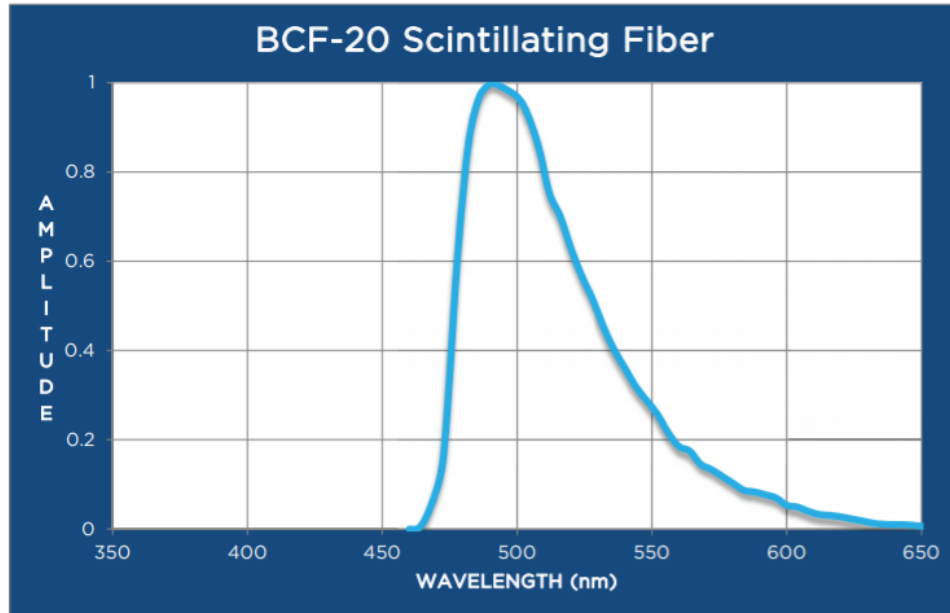


Fig.6 Spectrul fotonilor emisi de scintilator

Codul de simulare poate fi imbunatatit prin includerea efectelor optice (refractia si reflexia fotonilor proveniti din scintilatie). Pentru aceasta se va folosi spectrul energetic al fotonilor emisi de materialul scintilator furnizat de producator (Fig. 6).

Activitatea 1.2 Dezvoltarea și testarea Electronicii de Front End (FEE)

A fost identificat ca si prim candidat pentru dispozitivele de tip SiPM, ce vor fi folosite in cadrul prototipului ce urmeaza a fi dezvoltat, modelul **C-Series SiPM Sensors, ON Semiconductor**.

Pentru testarea si determinarea parametrilor de functionare ai acestor dispozitive, a fost construita o incinta intunecata.

Stiind ca amplitudinea semnalului electric care este produs de dispozitivele SiPM prin conversia fotonilor incidenti este puternic dependenta de temperatura de functionare, un incalzitor termostatat a fost montat in camera intunecata.

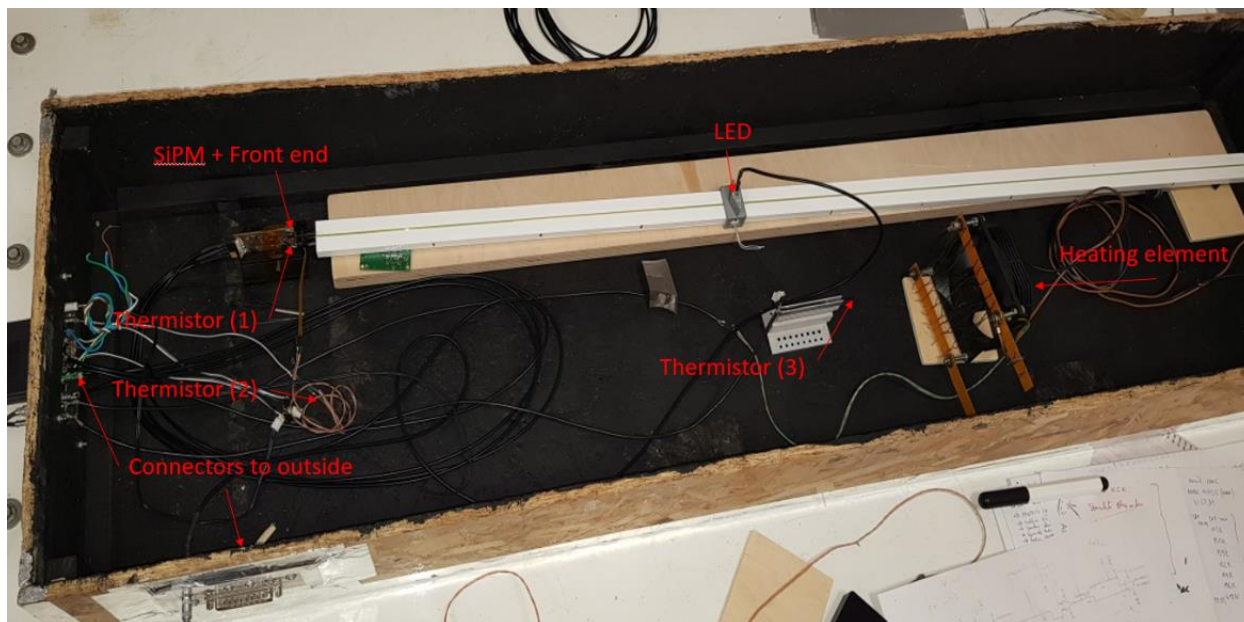


Fig. 7 Camera intunecata folosita la testele preliminare ale dispozitivelor SiPM

Conform specificatiilor producatorului, un circuit de preamplificare a semnalelor ce provin de la dispozitivele SiPM a fost construit si folosit la testarea functionalitatii acestora.

Montajul experimental folosit pentru caracterizarea SiPM-urilor este reprezentat in Fig. 7. Acesta are in componenta o dioda conectata la un modul de electronica de tip Front End care primeste impulsuri luminoase de la un LED prin intermediul unei fibre optice. Intreg montajul este inchis intr-o cutie intunecata. Temperatura din cutie a fost crescuta folosind un element de incalzire. Uniformitatea incalzirii este asigurata de un ventilator. Trei termistori au fost folositi

pentru a masura temperatura diodei, a peretilor cutiei si a aerului care iese din incalzitor. Semnalele valide inregistrate de SiPM si prelucrate de electronica de Front End au fost inregistrate, impreuna cu temperaturile masurate de termistori, prin intermediul unui modul Arduino, si stocate intr-un fisier de date dintr-un PC.

In fig. 8 este reprezentata o captura de la ecranul osciloscopului in care sunt reprezentate semnalele produse de ansamblul SiPM – Preamplificator. Se observa in partea centrala un semnal cu o amplitudine mai mare, datorat detectiei unor fotoni generati de un LED, **comandat de un generator de semnal**. Semnalele mai mici din jurul acestuia sunt semnalele de intuneric caracteristice SiPM-urilor. Caracterizarea precisa a acestora este foarte importanta, din cauza ca semnalele de intuneric au amplitudinea apropiata de cea a semnalului de interes, in cazul nostru, cel produs de un puls LED foarte scurt (2 ns).

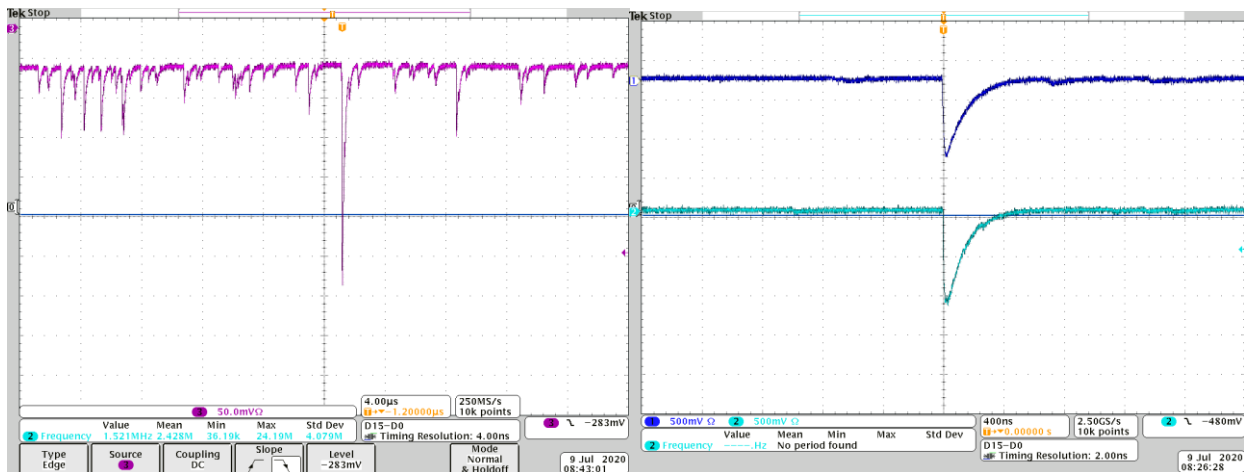


Fig.8 Reprezentare a semnalelor electrice amplificate de electronica *Front end*

Zgomotul de intuneric al SiPM-urilor a fost caracterizat ca functie de tensiunea de alimentare si de temperatura mediului ambiant. Temperatura a fost variata intre 20°C si 50°C, tensiunea de alimentare a senzorilor fiind baleiata in plaja recomandata de producator. In urma unei serii de teste pe mai multe diode, s-a observat ca acestea au comportamente asemanatoare, si nu va fi nevoie de reglaje ale preamplificatoarelor pentru fiecare canal de achizitie in parte.

Variatia zgomotului de intuneric in functie de temperatura a fost reprezentata in Fig.9, Fig. 10 si Fig. 11, pentru diferite conditii de operare.

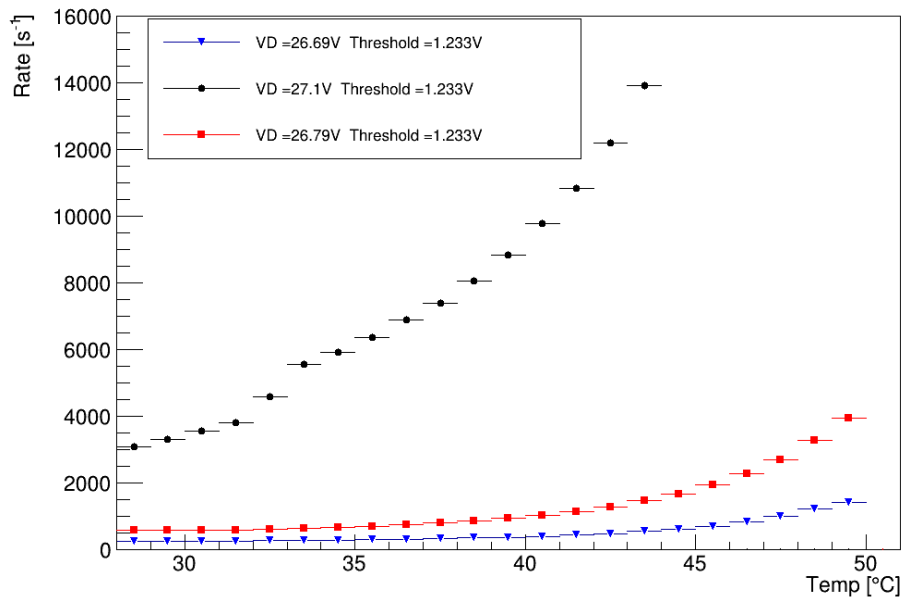


Fig.9 Variatia zgomotului de intuneric in functie de tensiunea de alimentare si temperatura diodei, pentru o tensiune de prag de 1.2 V

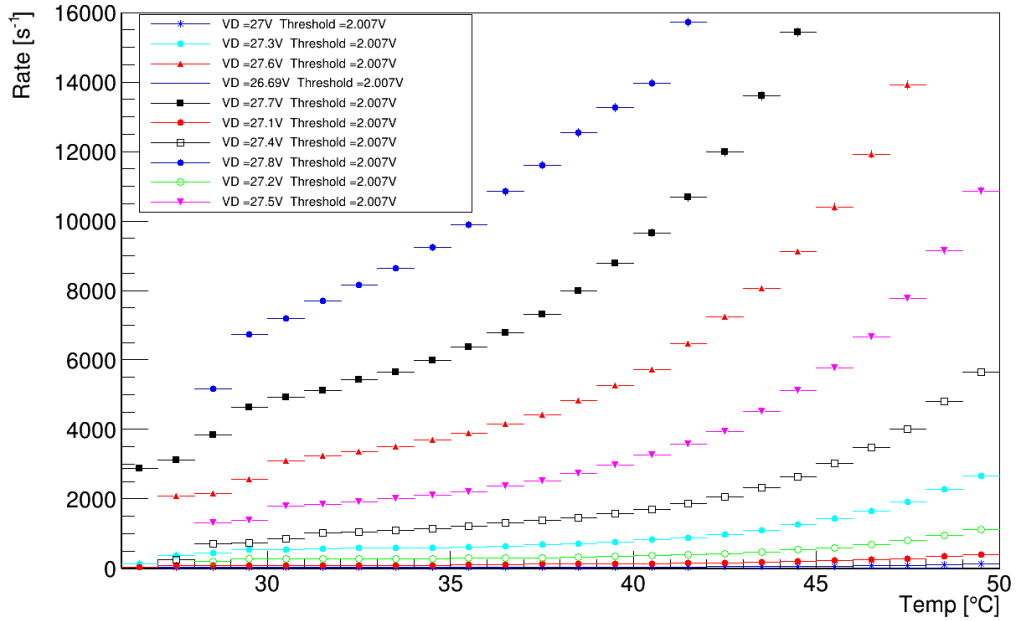


Fig.10 Variatia zgomotului de intuneric in functie de tensiunea de alimentare si temperatura diodei, pentru o tensiune de prag de 2 V

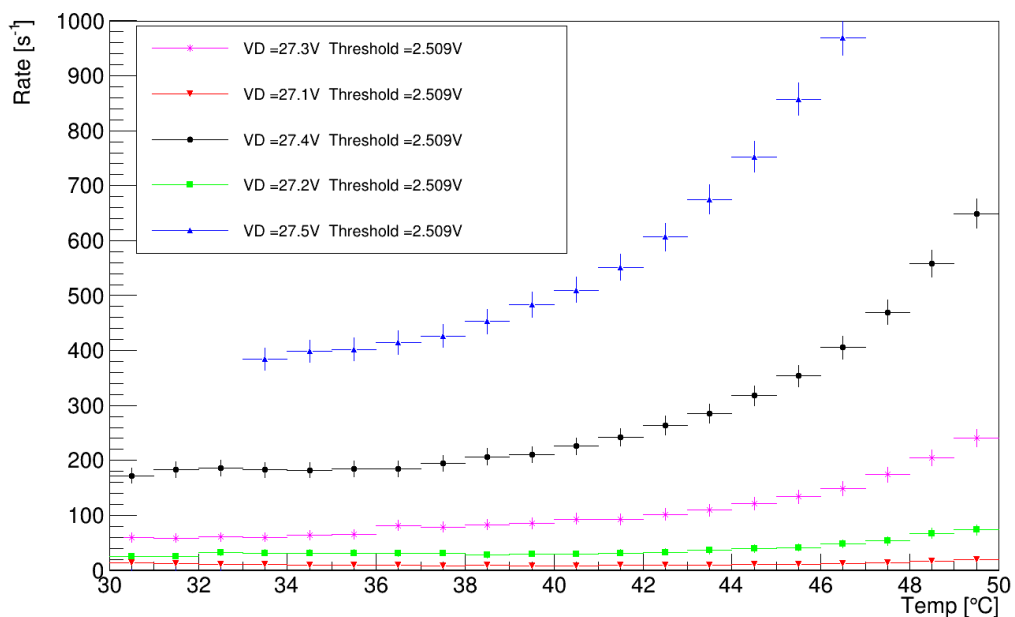


Fig.11 Variatia zgomotului de intineric in functie de tensiunea de alimentare si temperatura diodei, pentru o tensiune de prag de 2.5 V

Dupa testele efectuate s-a observat ca variatia zgomotului de intineric intrinsec al SiPM-urilor este strans legata de tempertura mediului ambiant. Aceste efecte trebuiesc compensate prin variatia tensiunii de alimentare a dispozitivelor SiPM pentru a avea un raspuns uniform pe tot detectorul.

Testarea raspunsului subansamblului SiPM – electronica de Front End la fotoni prin folosirea unui led sunt in curs, urmand a fo raportate in faza urmatoare.

Concluzii si perspective

A fost dezvoltat un cod de simulare in vederea estimarii modului in care miuonii din radiatia cosmica secundara vor interactiona cu prototipul ce va fi dezvoltat in cadrul acestui proiect. Au fost obtinute imagini ale unor obiecte prin scanarea acestora cu miuoni, in acest scop fiind folosita o parametrizare care descrie cu o precizie ridicata fluxul natural al miuonilor cosmici.

Acest cod va fi folosit si pentru calculul rezolutiei unghiulare de care va fi capabil detectorul, in functie de diferiti parametri tehnici (grosimea baghetelor scintilatoare, distanta intre modulele de detectie etc.). In cod va fi adaugata si posibilitatea urmaririi fotonilor generati in procesul de scintilatie, de la locul producerii lor pana la senzorul optic. Prin aceasta, se va determina randamentul optic maxim realizabil si se vor putea face estimari asupra nivelului amplitudinii semnalului produs de SiPM.

A fost identificat un prim candidat pentru dispozitivele SiPM ce vor fi folosite in constructia prototipului. A fost dezvoltata si testata electronica de tip Front End. Mai exact, teste ale modului in care variaza rata semnalelor de intineric generate de ansamblul SiPM – electronica de Front End la variatia tensiunii de prag si a temperaturii de functionare. Pe baza observatiei ca variatia zgomotului de intineric intrinsec al SiPM-urilor este strans legata de temperatura mediului ambiant, s-a decis ca aceste efecte vor trebui compensate prin variatia tensiunii de alimentare a dispozitivelor SiPM pentru a avea un raspuns uniform pe tot detectorul.

Activitatile prevazute in cadrul acestei etape au fost indeplinite cu succes.

Director de Proiect,

Dr. Denis-Iulian Stanca

