



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ Si-ФЭУ В ДЕТЕКТОРЕ НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, УСТАНОВЛЕННОМ В ОБСЕРВАТОРИИ СФИНКС*

*М.Иори, Ф.Фераротто, Sapienza University of Rome, Италия и INFN;
Х.Денизли, А.Яльмаз, Abant Izzet Baysal University, Турция;
О.Атакиши, М.Кайя, University of Kafkas, Турция;
Д.Русс, Carnegie-Mellon University, США;
maurizio.iori@roma1.infn.it*

Новое поколение детекторов Si-ФЭУ позволяет получить высококачественный аналоговый сигнал. Импульсы, вызванные космическими лучами, элементарно выделяются на фоне шума Si-ФЭУ. Поэтому Si-ФЭУ нашли применение в регистрации сверхэнергетических космических лучей.

В работе представлены предварительные результаты испытаний прототипа детектора, установленного в высокогорной (~3800 метров над уровнем моря) обсерватории Сфинкс в Швейцарии. Прототип сконструирован для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), генерируемых в результате взаимодействия нейтрино сверхвысоких энергий с земной корой. Станция позволяет протестировать детектор в суровых климатических условиях (при температуре окружающей среды от -25 до -5°C). Считывающая часть прототипа детектора состоит из кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ) производства компании SensL (Ирландия) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) Domino Ring Sampler (DRS4) разработки института Пола Шерпера PSI (Швейцария). Для определения траектории движения частиц с помощью времяпролетного метода измерения проводили при различных температурах, но при фиксированном напряжении смещения (29,5 В).

* Доклад на 33-й Международной конференции по космическим лучам (ICRC-2013), Рио-де-Жанейро, 2013

SIPM APPLICATION FOR A DETECTOR FOR UHE NEUTRINOS TESTED AT SPHINX OBSERVATORY*

*M.Iori, F. Ferrarotto, Sapienza University of Rome, Italy and INFN;
H.Denizli, A. Ilmaz, Abant Izzet Baysal University, Turkey;
O. Atakisi, M. Kaya, University of Kafkas, Turkey;
J. Russ, Carnegie-Mellon University, USA;
maurizio.iori@roma1.infn.it*

Si PM new generation permits to achieve a high quality analog signal. Cosmic rays induced pulses can be simply distinguished by a Si PM. That's why Si PM are used for ultrahigh energy cosmic rays registration.

We present the preliminary test results of the prototype detector, working at Sphinx Observatory Center, Jungfrauoch (~3800 m a.s.l.) HFSJG - Switzerland. This prototype detector is designed to measure large zenith angle showers produced by high energy neutrino interactions in the Earth crust. This station provides us an opportunity to understand if the prototype detector works safely (or not) under hard environmental conditions (the air temperature changes between -25 and -5°C). The detector prototype is using silicon photomultiplier (SiPM) produced by SensL and DRS4 chip as read-out part. Measurements at different temperature at fixed bias voltage (29.5 V) were performed to reconstruct tracks by Time Of Flight.

INTRODUCTION

One of the interesting subject in experimental astroparticle physics is to detect the Ultra High Energetic Cosmic Rays by using different well-known detection techniques (Cherenkov [1, 2], air fluorescence [3] and radio waves [4]). Most of the on-going experiments are focused on the vertical or possible sideways flux of cosmic ray showers going down from atmosphere. None of the present experimental techniques are

* Report from 33rd International Cosmic Ray Conference, Rio De Janeiro, 2013. The Astroparticle Physics Conference

ВВЕДЕНИЕ

Одна из актуальных задач современной экспериментальной астрофизики – регистрация сверхэнергетических космических лучей с помощью хорошо известных методов (метод на эффекте Черенкова-Вавилова [1, 2], метод наблюдения флюоресценции атмосферы [3] и метод регистрации радиоволн [4]). Большинство проведенных ранее экспериментов были направлены на детектировании потоков космических лучей, нисходящих из атмосферы, – вертикально или под углом. Ни одна из существующих экспериментальных методик не использует временную информацию для различения частиц, движущихся в восходящем и нисходящем направлении, используя времяпролетный (Time Of Flight (TOF)) метод. Вакуумные фотоумножители (ФЭУ) являются традиционными детекторами фотонов [5]. Не так давно изобретенные кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ) стали альтернативой традиционным ФЭУ. Si-ФЭУ представляют собой массив лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме. Si-ФЭУ обладают рядом преимуществ: очень компактный размер, высокая квантовая эффективность, хорошее энергетическое разрешение, быстрое время отклика (<100 пс), высокие коэффициенты усиления ($\sim 10^6$), а также очень низкие потребляемые мощности и рабочие напряжения смещения [6]. В настоящей работе представлены результаты исследования прототипа детектора, установленного в высокогорной (~ 3800 метров над уровнем моря) обсерватории Сфинкс в Швейцарии в ноябре 2012 года.

ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ Si-ФЭУ

Прототип детектора, установленного в обсерватории Сфинкс, состоит из двух идентичных сцинтилляционных блоков, получивших название "башни", размещенных на расстоянии 160 см друг от друга, как показано на рис.1. Каждая башня включает в себя панель из органического сцинтиллятора (с размерами 20×20 см² и толщиной 1,4 см) компании Kuraray (Япония). Телесный угол каждой башни составляет $\sim 4 \cdot 10^{-2}$ ср, при этом зенитный угол составляет $\pm 7,5^\circ$. Геометрический фактор каждой из башен равен 255 см²·ср.

Используемый сцинтиллятор обладает превосходными свойствами с точки зрения получения прецизионной синхронизации. Пик на спектре эмиссии сцинтиллятора располагается на длине волны 430 нм. Каждая сцинтилляционная панель обернута нетканым материалом Tyvek



Рис.1. Прототип детектора, установленного в обсерватории Сфинкс для тестирования методики определения траектории движения частиц (восходящие/нисходящие) и для исследования работы детектора в суровых климатических условиях
Fig. 1. Prototype detector installed at Sphinx (HFSJG) to test upward/downward particles separation and environmental effects

using the timing information to discriminate the upward or downward moving particles by using Time Of Flight (TOF) method. They are using the timing information to get the shower angular distribution information. Traditional Photomultipliers (PMT) are wellengineered photon detectors and stable in operation [5]. The recent developments made on solid state detectors Silicon PhotoMultipliers (SiPMs) are an alternative of the conventional photomultipliers (PMTs). The SiPM are multipixel avalanche photodetectors working at Geiger mode. This device has remarkable properties such as very compact size, high quantum efficiency, good charge resolution, fast response time (<100 ps), large gain ($\sim 10^6$) and very low power consumption with low bias voltages [6]. In this paper we show test results of a prototype installed at Sphinx Observatory at 3800 m a.s.l on November 2012.

DESCRIPTION OF THE DETECTOR PROTOTYPE AND SiPM CHARACTERISTICS

The hardware of the detector prototype installed at Sphinx consists of two identical scintillator counters, named tower, separated by 160 cm apart as seen in Fig. 1. Each counter has a Kuraray organic scintillator panel (20×20 cm², 1.4 cm thick). The solid angle



компании DuPont (США) для рассеяния отраженного света. Для считывания сигнала со сцинтиллятора использовались кремниевые фотомножители компании SensL с размером активной области 3×3 мм². Эти фотомножители чувствительны к УФ-области спектра, а также обладают малой шириной импульса (полная ширина на половине высоты (ПШПВ) < 2 нс). Рабочее напряжение смещения использованных Si-ФЭУ составляло 29,5 В с динамическим диапазоном после напряжения пробоя -1 В, в температурном диапазоне от -20 до 20°C. Коэффициент усиления составлял $2,3 \cdot 10^6$. Сигнал с Si-ФЭУ был оцифрован с помощью АЦП Domino Ring Sampler Board (DRS4) [7]. Обработка данных основана на дискретизации формы сигнала с частотой дискретизации 2 Гвыб./с в течение временного окна 2,5 мкс. Предназначение данного детектора - отбирать частицы, движущиеся горизонтально времяпролетным методом для детектирования тау-ливней, образованных в результате взаимодействия нейтрино с земной корой. Разрешение используемого в работе времяпролетного метода ~0,5 нс. Стоит отметить, что детектор находился в жестких климатических условиях. Для надежной и бесперебойной работы комплектующие детектора должны быть защищены от жестких климатических условий. Si-ФЭУ компании SensL были установлены на одну плату со считывающей электроникой, соединенной с усилителем S454+ компании Mini-Circuits (США), работающим в диапазоне частот 0,05-4 ГГц, обладающим ультранизким шумом и рабочими температурами от -40 до 85°C и генерирующим 390 мВт тепловой энергии. Компоненты детектора, в частности усилитель, генерируют тепло внутри корпуса, поэтому для предотвращения замерзания компонентов детектора теплота может быть задержана с помощью теплоизолятора. В работе использовался экструдированный пенополистирол (XPS) компании Jakodur (Германия) с теплопроводностью 0,034 Вт/(м·К).

Утеплитель состоит из трех слоев: первый слой - Jakodur толщиной 10 см, второй слой - двусторонний ПВХ толщиной 3 мм с теплопроводностью 0,19 Вт/(м·К), третий слой - Jakodur толщиной 5 см. Термическое сопротивление первого слоя $R_{t1} = (0,1 \text{ м}) / (0,034 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})) = 2,94 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; второго слоя $R_{t2} = (2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}) / (0,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})) = 0,032 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; термическое сопротивление третьего слоя R_{t3} равно половине значения термического сопротивления $R_{t3} = 1,47 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Суммарное термическое сопротивление теплоизолятора $R_s = 4,44 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$,

of a single tower is about 4.0×10^{-2} sr and its zenith angle covers $\pm 7.5^\circ$ around the axis. The geometrical acceptance is $255.0 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$. The scintillator has excellent features, in the view of obtaining the precise timing information, such as producing the light in blue region of the spectrum. The emission peak is around 430 nm. Each scintillator panel is wrapped by Tyvek paper for diffusing the reflection, and one SensL silicon photomultiplier ($3 \times 3 \text{ mm}^2$) reads the produced signal. This SiPM has short output pulse of < 2 ns at FWHM and UV sensitive. The bias voltage of this device is about 29.5 V, the dynamic range over the breakdown voltage is -1 V in a temperature range of -20 to 20°C. The gain is 2.3×10^6 . The produced signal from SiPM is digitized by Domino Ring Sampler Board (DRS4), developed by Stefan Ritt [7]. The DAQ is based on waveform sampling at 2 GS/s, covering a 2.5 μs window. The aim of this detector is select horizontal tracks by TOF to detect tau shower produced by the neutrino interacting in Earth crust. The TOF resolution achieved is about 0.5 ns.

The detector station is at the harsh environmental conditions. The detector components, like photomultiplier, inside the box, must be protected by its environment to operate continuously as well as reliably. The SiPM SensL device is installed on a board with a readout circuit and an ultra low noise 0.05 to 4 GHz Amplifier (Mini Circuits S454+) operating between -40 to 85°C and 390 mW dissipation power. These components, in particular the amplifier, generate heat inside the box so that heat can be restrained by using insulator material and avoid to reach quite low temperature. Jakodur extruded polystyrene foam (XPS) insulator is promising product due to its thermal conductivity, 0.034 W/(m·K).

The structure consists of the three layers, one 10 cm Jackodur layer, one 2 sided 3 mm PVC box which has 0.19 W/m·K thermal conductivity, and one 5 cm Jackodur layer. For the first section of the structure the thermal resistance is $(0.1 \text{ m}) / (0.034 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}) = 2.94 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, for the second section it is evaluated that $(2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}) / (0.19 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}) = 0.032 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ and for the last section it is half of the first section, $1.47 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. The total resistance is $4.44 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ and the total thermal transmittance of the structure is $0.23 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.



а суммарный коэффициент теплопроводности теплоизолятора $K=1/4,44=0,23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Полная площадь поверхности корпуса составляет $0,15 \text{ м}^2$. Принимая генерируемую тепловую мощность внутри детектора около 390 мВт , поток тепла в ваттах из каждого детектора составляет $\Phi = AU[T_{\text{in}} - T_{\text{out}}]$, где A – площадь в м^2 , U – скорость переноса тепла – в $\text{Вт}/\text{м}^2$, T_{in} , T_{out} – температуры внутри и снаружи корпуса соответственно. Разница температур определена из соотношения:

$$T_{\text{in}} - T_{\text{out}} = 390 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / 0,15 \text{ м}^2 \cdot 0,23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}) = 11,3 \text{ К}.$$

За время проведения эксперимента внешняя температура менялась от -25 до -5°C , что отвечает колебаниям температуры внутри корпуса от -13 до 6°C .

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАБОТУ Si-ФЭУ

В работе использовались Si-ФЭУ серии 30035 компании SensL с активной площадью $3 \times 3 \text{ мм}^2$ и размером микроячейки 35 мкм [6]. Кросстолк (вероятность дублирования заряда микроячейки) составлял 20%, время восстановления микроячейки равняется 130 нс, квантовая эффективность составляет 14%. Использовались Si-ФЭУ как

The total surface area of the box is 0.15 м^2 , assuming the generated power inside is about 390 мВт the heat transfer in Watts from each detector box is $\Phi = AU[T_{\text{in}} - T_{\text{out}}]$, where A is the its area in square meters, U is the rate of the transfer of heat (in Watts) trough one square meter, T_{in} and T_{out} are the temperature inside and outside the box, respectively. The supported temperature differences is given by

$$T_{\text{in}} - T_{\text{out}} = 390 \cdot 10^{-3} \text{ W} / 0,15 \text{ м}^2 \cdot 0,23 \text{ W}/(\text{м}^2\cdot\text{К}) = 11,3 \text{ К}.$$

In the period of the data taking the external temperature varied from -25 to -5°C that corresponds to an internal temperature between -13 to 6°C .

SIPM TEMPERATURE DEPENDENCE

The SiPMs used in this test are SensL 30035 series, $3 \times 3 \text{ мм}^2$, $35 \text{ }\mu\text{м}$ microcell type [6]. It has 20% of cross talk, 130 ns of recovery time per microcell, 14% PDE. The model we have used provides a fast output and a conventional output with longer rising time. In laboratory we have tested the gain versus the temperature as shown in Figs.2 and 3 respectively. The breakdown

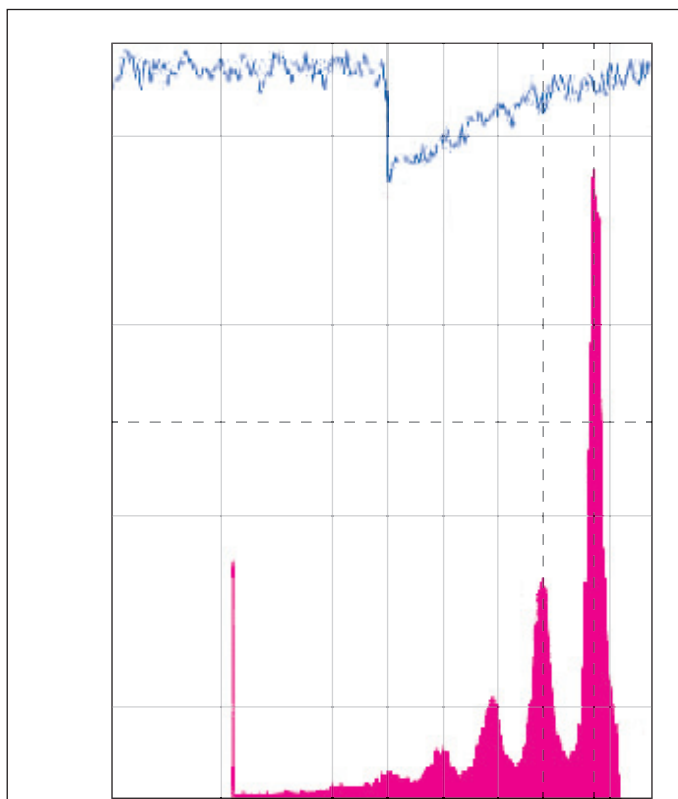


Рис.2. Одноэлектронный спектр Si-ФЭУ SensL 30035 ($T = -5^{\circ}\text{C}$): точечными линиями выделены первый и второй фотоэлектроны, причем расстояние между пиками, измеренное в милливольтгах, пропорционально коэффициенту усиления Si-ФЭУ; максимальное значение на оси ОУ соответствует 2 мВ (выше представлена соответствующая осциллограмма)

Fig. 2. Single photoelectron spectrum from SensL 30035 at -5°C . The dotted lines show the 1th and 2nd photoelectron: the distance between the peaks measured in mV is proportional to the gain of SiPM. The box wide is 2 mV. On top is the scope trace of a SiPM

с быстрым выводом (серия F), так и со стандартным выводом (серия S). Была исследована зависимость коэффициента усиления от температуры. Результаты исследований представлены на рис.2 и 3. Зависимость напряжения пробоя от температуры была оценена с помощью изменения температуры, исходя из расстояния между двумя первыми пиками на одноэлектронном спектре, показанном на рис.2, снятом при 0°C путем изменения напряжения. Результаты показаны на рис.4. Полученная зависимость является линейной с наклоном ~ 30 мВ/°С (зависимость включает изменение параметров усилителя с температурой). В проведенных тестах мы не использовали датчик температуры для подстройки напряжения при изменении температуры. Прототип платы с контролируемым

voltage versus the temperature function was evaluated changing the temperature and requiring the distance of first two peaks in the single photoelectron spectrum, shown in Fig. 2, referring to the measurement made at 0°C by adjusting the voltage. It results, as shown in Fig. 4, the data have a linear dependence with a slope of about 30 мВ/°С including the amplifier gain. In the test performed at Sphinx we have not yet installed an internal temperature sensor to adjust the breakdown voltage with the temperature. A prototype board with a voltage controlled by Arduino via SPI has been developed in the Physics Department of Rome 'La Sapienza'.

DAQ AND EVENT MEASUREMENT

The signals from both SiPMs are processed by DRS4 digitizer. The digitizer is used to trigger on the leading edge of the SiPM pulses. When any SiPM pulses, over the desired pulse height, causes a trigger. The waveforms from all DRS4 chips are written to disk on a PC for further offline analysis. Cosmic ray pulses are distinguished easily from 'sipm noise/baseline' because of having much larger amplitudes like a negative voltage "spikes". When the cosmic ray passes through both counters will generate these SiPM pulses at a given time window. These "coincidences" are then

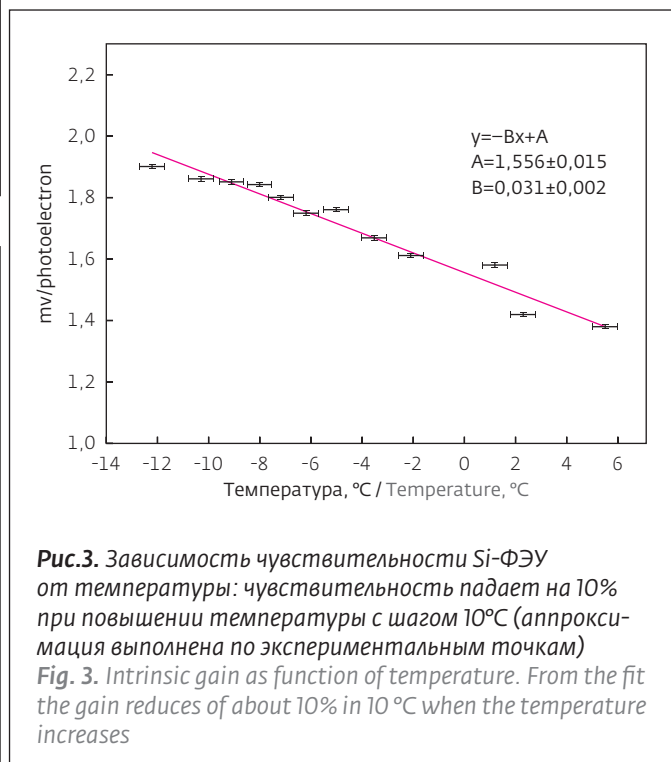


Рис.3. Зависимость чувствительности Si-ФЭУ от температуры: чувствительность падает на 10% при повышении температуры с шагом 10°C (аппроксимация выполнена по экспериментальным точкам)

Fig. 3. Intrinsic gain as function of temperature. From the fit the gain reduces of about 10% in 10°C when the temperature increases

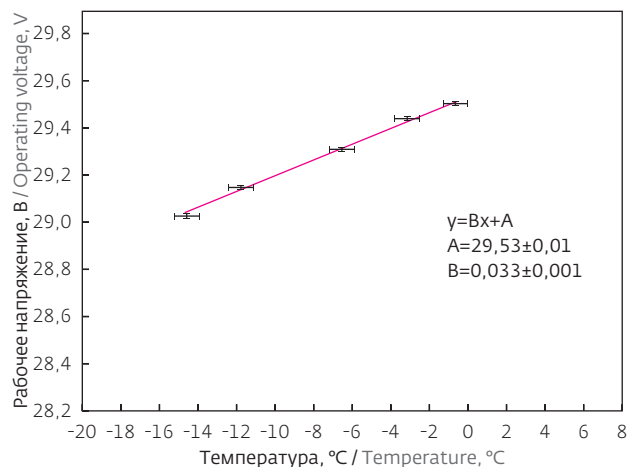


Рис.4. Зависимость рабочего напряжения от температуры: наклон соответствует 50мВ/С (аппроксимация выполнена по экспериментальным точкам)
Fig. 4. Operating voltage as function of temperature. From fit result to be 50 mV/OC

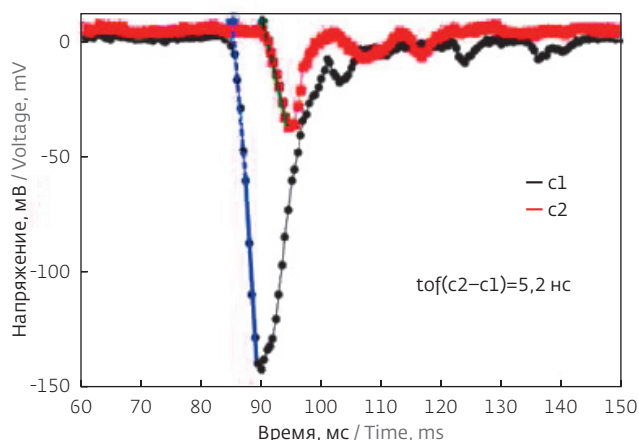


Рис.5. Времяпролетная методика определения траектории движения частиц (интервал времени регистрации детекторами С1 и С2 частиц 5,2±0,25 нс)
Fig. 5. TOF algorithm applied to the sipm signals C1, C2 in coincidences. The TOF evaluated for this signal is 5.20±0.25 ns

напряжением с помощью аппаратной вычислительной платформы Arduino и последовательного периферийного интерфейса (SPI) был разработан на физическом факультете Римского университета Ла Сапиенца.

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ (DAQ) И ИЗМЕРЕНИЕ СОБЫТИЙ

Сигналы с Si-ФЭУ обрабатывались с помощью АЦП DRS4. АЦП запускается передним фронтом импульса Si-ФЭУ. При этом любой импульс Si-ФЭУ, превышающий установленную амплитуду импульса, вызывает срабатывание триггера. Данные экспериментов сохранялись на диск компьютера для дальнейшего анализа. Импульсы, вызванные космическими лучами, элементарно отличались от шума Si-ФЭУ, так как имели амплитуду, намного превосходящую уровень шумов, представлявших собой отрицательные пики напряжения. Когда космические лучи попадают в оба детектора, сигналы с Si-ФЭУ детекторов будут регистрироваться в определенном временном окне. Такие "совпадения" принимаются за детектирование космических лучей. Алгоритм отбора – важный вопрос, ведь существует возможность регистрации "случайно совпадающих событий". В этой работе использовались следующие критерии для поиска ожидаемых событий регистрации космических лучей: 1) амплитуды сигналов на обоих детекторах должны быть больше предустановленного порогового напряжения;

counted as cosmic ray events. Event selection from all triggered events is important issue when you deal with the random coincident events. Here we applied some criteria to find out expected events; first both pulseheight of the coincident events must be greater than the triggering threshold voltage, then they must be in a given time window, 516 ns. This will give us the possible coincident triggers in our detector acceptance. Optimum threshold voltage to remove the noise has been studied. Thirtyone runs, covered about 474 h live time, were taken with the detector pointing at a zenith angle $\theta:93.3^\circ$.

TOF ALGORITHM AND TRACK SELECTION

The stored coincident waveform data, in 516 ns time window, are analyzed and assigned a timestamp for each signal. The used algorithm is described as follows, first it searches the maximum point of the pulse, then stores the six point informations (time, voltage) on the leading edge starting from the maximum point to the backward direction. After that fit a straight line to these points by using least square method and assign the timestamp as the intersection of the tangent to points at the leading edge side with the time axis. When you assign the timestamp to the pulse, one can easily find the time of flight between two counters. Figure 5 shows

2) оба события должны регистрироваться в течение временного окна 516 нс. В работе было найдено оптимальное предустановленное напряжение, при котором триггер не срабатывал на события, связанные с шумом. За 474 ч непрерывной съемки триггер сработал 31 раз, передачи были зарегистрированы (зенитный угол составлял $\theta = 93,3^\circ$).

ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ АЛГОРИТМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Сохраненная информация совпадающих форм импульсов в 516-нс временном окне была проанализирована, и каждой из них была присвоена своя метка. Используемый алгоритм можно описать следующим образом: в начале ищем максимальное значение импульса, затем сохраняем шесть точек на спектре (с координатами времени и напряжения) на переднем фронте импульса, – начиная с точки, имеющей максимальное значение, и далее в обратном направлении. После этого полученные точки аппроксимируем прямой линией, используя метод наименьших квадратов. Под меткой времени понимается точка пересечения касательной экспериментальных точек с временной шкалой. Как только время детектирования импульса установлено, можно будет определить время полета между двумя счетчиками. На рис.5 проиллюстрирована эта методика на примере детекторов, созданных на основе органических сцинтилляторов Kuraray и Si-ФЭУ SensL.

Цель данной работы – детектирование движущихся в нисходящем направлении космических лучей с зенитным углом 86° . На рис.6 представлены зарегистрированные различия во времени детектирования сигнала каждым детектором. Так как каждый детектор обладает хорошим разрешением, прототип детектора способен различать направления траекторий ливней с помощью времяпролетной методики. На рис.6 представлены три пика, отделенные друг от друга. Пик на 5 нс является общим пиком, отвечающим частицам, движущимся в нисходящем направлении из атмосферы под углом $86,7^\circ$. Небольшие пики на 0 нс и 2 нс относятся к вертикально движущимся и движущимся в нисходящем направлении частицам соответственно.

ТЕСТИРОВАНИЕ ТРИГГЕРА НАПРЯЖЕНИЯ

Так как прототип детектора располагается на непоглощающей террасе, скорость срабатывания триггера на каждом детекторе очень высока, порядка $3 \pm 0,2$ мГц. Следуя изложенной выше методике поиска

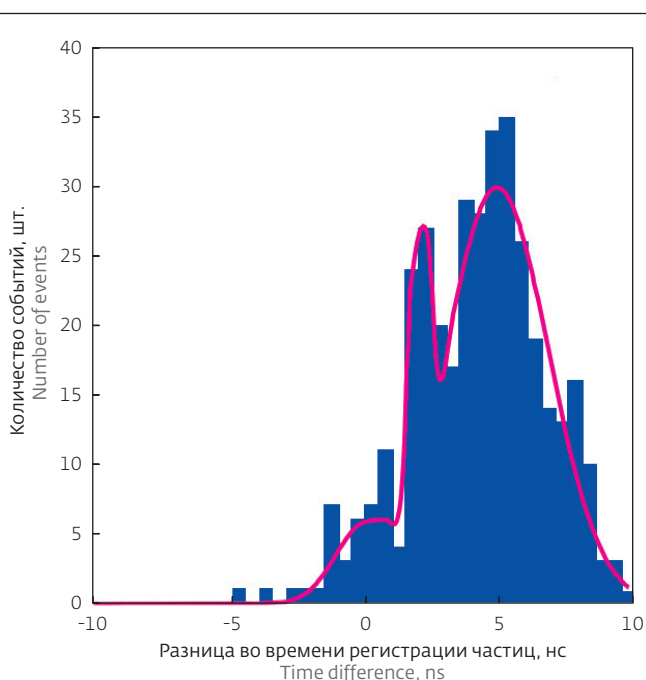


Рис.6. Временной интервал регистрации детекторами C1 и C2 частиц, направленных под зенитными углами $93,3^\circ$ (информация получена в процессе непрерывной съемки в течение 484 ч); небольшие пики на 0 и 2 нс соответственно относятся к частицам, движущимся вертикально вверх и в нисходящем направлении; поток частиц, движущихся вертикально, был ослаблен железной крышей толщиной 1,5 мм
Fig. 6. Time of flight differences between the tiles Δt_{21} in the towers pointing a zenith angle $93,3^\circ$ and the data corresponds to live time of 474 h. The peak around +5 ns correspond to going-down particle tracks, $\theta : 86,70$. The peak at +2 ns is due by parallel tracks, a small peak at 0 ns is related to vertical tracks. The vertical low momentum flux is dumped by the 1.5 mm iron roof

fit to the SiPM read-out signal from Kuraray organic scintillator triggered by cosmic ray.

The purpose of this test, by using SiPM device at the High Altitude Research Station, Sphinx, is to reconstruct downward tracks with zenith angle 86° . Figure 6 depicts that the difference of the signal arrival time to each tiles. Because of having good time resolution the detector prototype is capable to discriminate the direction of the tracks which are going-up or going-down by measuring the time-of-flight. As seen from the Fig. 6 three peaks are separated by each others. The peak around +5 ns is due to the accumulation of the incoming particles from atmosphere at $86,7^\circ$ (downward-going particles). The small excess around 0 ns and +2 ns are due to the vertical and downward going parallel tracks, respectively crossing the tiles.

совпадающих событий, скорость счета совпадающих событий при указанном одиночном срабатывании счетчиков, равна $\sim 0,2$ мГц. Цель этой операции – исследовать зависимость предустановленного напряжения срабатывания на среднюю скорость срабатывания триггера. В работе было обнаружено, что, если выставить напряжение срабатывания между 50 и 30 мВ, скорость срабатывания можно определять константой в пределах ошибки.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В последние 10 лет кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ) были значительно усовершенствованы. Новое поколение детекторов позволяет получать высококачественный аналоговый сигнал на выходе и достигать высокого временного разрешения, благодаря очень быстрому отклику. Тесты, проведенные на высоте порядка 3800 м над уровнем моря в обсерватории Сфинкс (рис.7) показали, что Si-ФЭУ являются хорошей альтернативой традиционных ФЭУ для использования их в детекторах космических частиц. Прототип детектора показал возможность различения частиц, движущихся



Рис.7. Обсерватория Сфинкс (источник: bigpicture.ru)
Fig. 7.Sphinx Station (photo source: bigpicture.ru)

TESTING THE TRIGGERING VOLTAGE

Hence the detector prototype is at the station terrace without any absorber, the rate of the single triggering are remarkable high $\sim 3.0 \pm 0.2$ mHz. All coincident tracks must be selected by an off-line program and this coincidence rate is around 0.2 mHz for this



в восходящем и нисходящем направлениях, используя времяпролетный (Time Of Flight (TOF)) метод. Результаты тестов показали, что прототип детектора может надежно и бесперебойно работать в жестких климатических условиях. В дальнейшем планируется разработать систему для подстройки рабочего напряжения при изменении температуры с помощью системы Maxim 1932, электронно управляемой с помощью Arduino Mega board. Эта система уже была протестирована в лаборатории.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Antokhonov B.V.** et al. – Nucl. Instr. and Meth., 2011, A 639 p.1.
2. **Aharonian F.** et al. – Astronomy and Astrophysics, 2002, v. 390, p. 39.
3. **Abbasi R.U.** et al. – The Astrop. J. Lett., 2010, v. 713, L64.
4. **Ape W.D.** et al. – Astrop. Phys., 2010, v. 32, p. 294.
5. **Iori M., Sergi A.** – Nucl. Inst. Meth., 2008, A 588, p. 151.
6. sensl.com
7. **Ritt S.** Design and performance of a 5GHz Waveform.
8. Digitizing chip DRS4, <http://drs.web.psi.ch/docs/nss08.pdf>.

acceptance. The aim of this test has been to carry out the effect of the selected triggering voltage on the average rate and flux. It results that setting of the triggering voltage from DRS4 between 50 and 30 mV the rate is constant within the error.

SUMMARY AND OUTLOOK

In the last decades Silicon photomultiplier (SiPM) has been improved remarkably. This new generation photodetector gives high-quality analog read-out for measurements of time resolution because of having very fast time response.

The test performed at about 3800 m High Altitude Research Station a.s.l. (Fig. 7) shows that SiPM is a good alternative to use in astroparticle detector system for getting the high resolution time stamp information (in TOF system). The detector prototype shown is capable to discriminate up going and down-going particles. The results show also that the prototype detector has been working stably without any problem at these harsh weather conditions. Furthermore we are planning to install a control of the operating voltage by Maxim 1932 digitally controlled by Arduino Mega board already tested in Laboratory.