

Лаборатория Теоретических и Экспериментальных  
Исследований Взаимодействий и Переноса Излучений в  
Различных Средах

*Роганова Т.М., зав.лаб.,  
Анохина А.М., Джатдоев Т.А., Манагадзе А.К., Подгрудков Д.А.,  
Халиков Э.В.,  
Курочкин Е.В.(2 курс маг.), Урсов Э.Д.(1 курс маг.),  
Видулин И.Д.(3 курс бак.),  
Гуляева В.В. (2 курс бак.), Самойлов М.А.(2 курс бак.)*

Поиск темной материи с помощью ядерных эмульсий  
в экспериментах NEWSdm и SHiP  
17.02.2021 75 лет НИИЯФ

## Эмульсионные эксперименты с участием НИИЯФ:

### 1968 г. Г.Т.Зацепин, И.В.Ракобольская, эксперимент «Мюон»

Изучение зенитно-углового и энергетического распределения мюонов с энергиями  $10^{12} - 10^{14}$  эВ в максимально широком диапазоне зенитных углов. Использовались РЭК большой площади.

Эксперимент был развернут в комнатах бомбоубежища на станциях метро «Парк культуры» и «Кропоткинская», в которых можно было работать только по ночам. По постановлению Правительства были выделены фондируемые материалы – 250 тонн свинца и рентгеновская пленка в количестве 4000 м<sup>2</sup> в год. В подвале главного здания МГУ был создан проявочный центр, найдены измерительные приборы (микроскопы и фотометры). В работу включились преподаватели кафедры космических лучей, дипломники, лаборанты.

### Зацепин В.И., Варковицкая А.Я., Лазарева Т.В., Сажина Г.П., Сокольская Н.В., эксперимент MUBEE ( проводился в 1975–1987 гг.) -

серия из 8-ми полетов аэростатов на высотах 32 км с эмульсионными камерами, содержащими наряду с рентгеновскими пленками для измерения энергии, дополнительные слои ядерных эмульсий для измерения заряда первичных ядер. В течение 860-часовой экспозиции удалось зарегистрировать более 800 каскадов, образованных первичными частицами с энергией больше 10 ТэВ, что позволило измерить их энергетические спектры в диапазоне энергий 10 ТэВ – 100 ТэВ.

# Эмульсионные эксперименты с участием НИИЯФ:

RUNJOB (1995-1999); ФИАН, 7 университетов Японии

Т.М.Роганова, А.К.Манагадзе, В.И.Галкин, В.И.Оседло, И.В.Яшин, Г.Т.Зацепин,  
И.В.Ракобольская, П.А.Публиченко и др.

Целью эксперимента было изучение зарядового состава и энергетических спектров первичных космических лучей в области энергий от 10 ТэВ до нескольких сотен ТэВ. Было выполнено 10 полётов РЭК сложной конструкции на баллонах от Камчатки до бассейна Волги в среднем на высоте 32 км. Камеры имели структуру с десятками слоев светочувствительных детекторов (рентгеновской пленки и ядерной эмульсии), слоями углерода или стали в мишени, а также слоями свинца (толщиной до 2 мм) в тонком калориметре. Полная продолжительность экспозиции составила 1440 час.

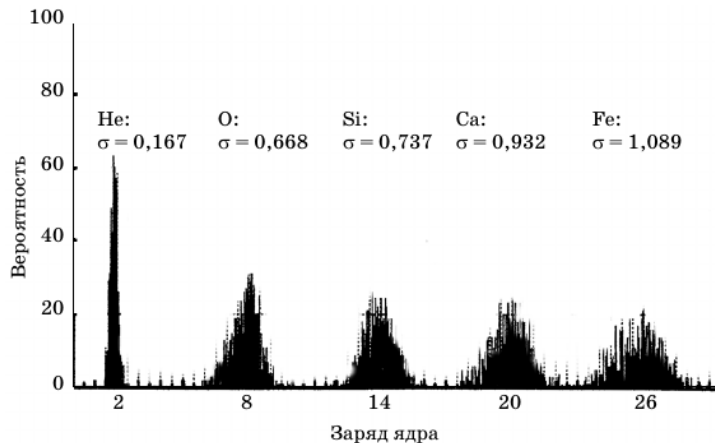


Рис. 11.14. Разрешающая способность измерения зарядов ядер эмульсионным детектором

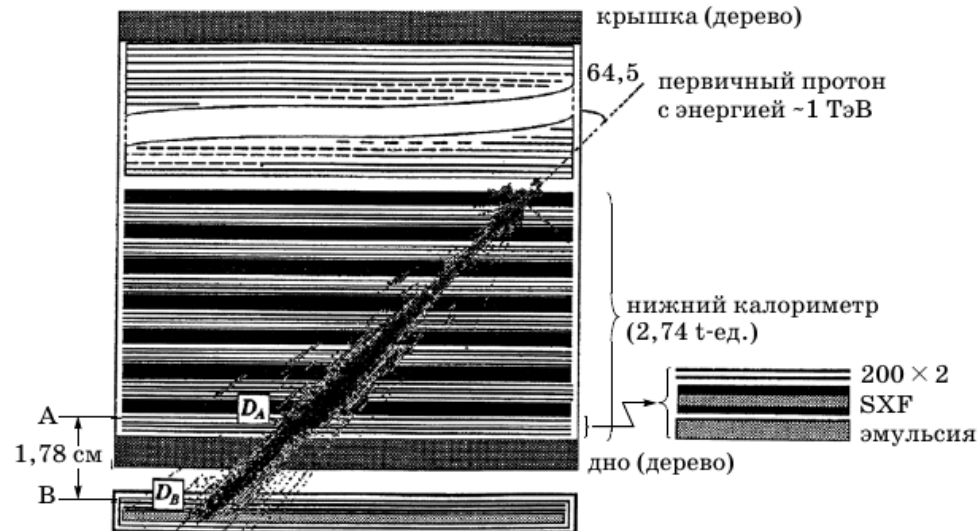


Рис. 11.13. Протонный каскад с энергией 1 ТэВ в установке **RANJOB**

**Сотрудничество ПАМИР.** Руководители работ от физического факультета - И.В. Ракобольская, от НИИЯФ — И.П.Иваненко, Л.Г.Свешникова, А.К. Манагадзе и др.

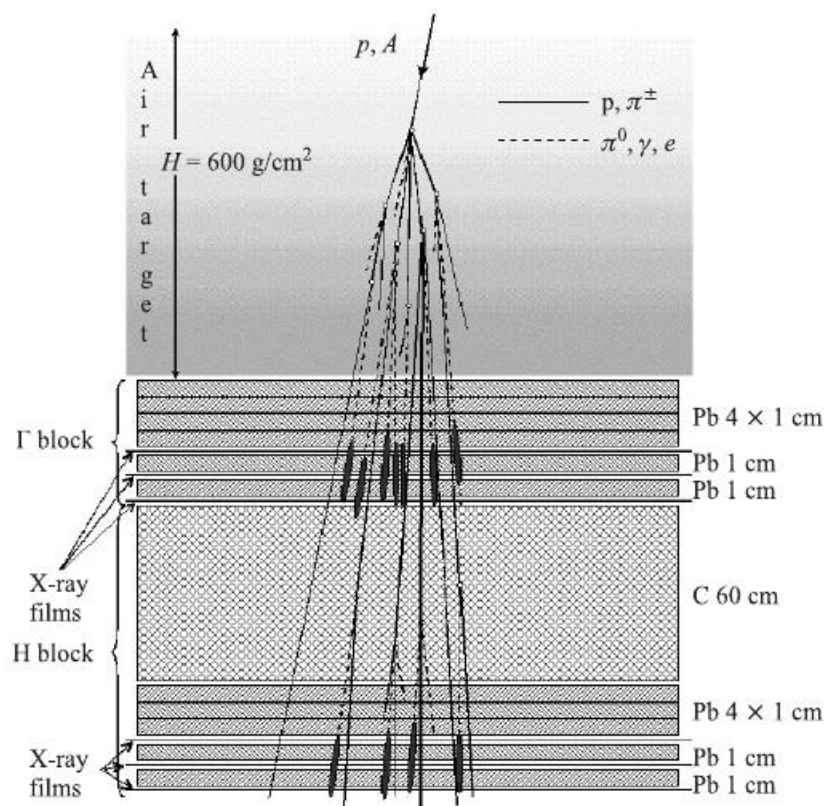


Fig. 1. A lay-out of the *Pamir* experiment setup

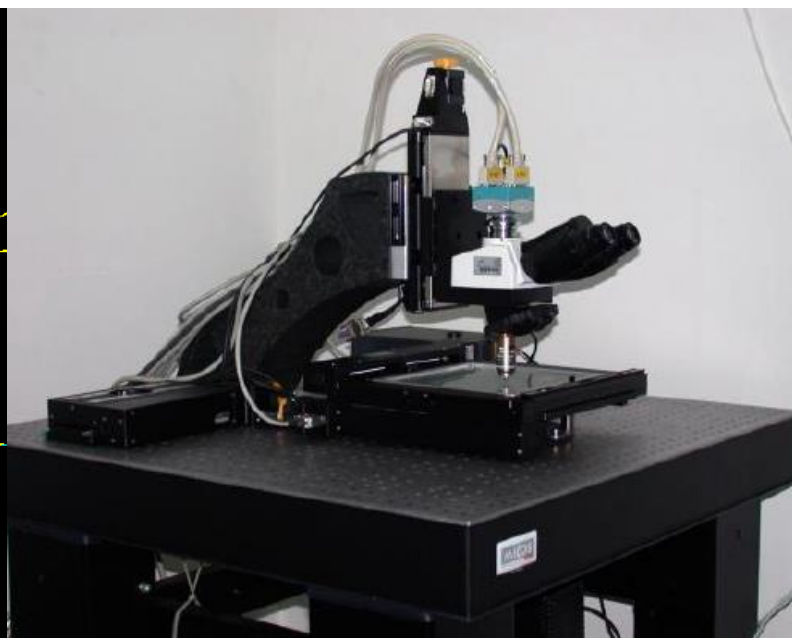
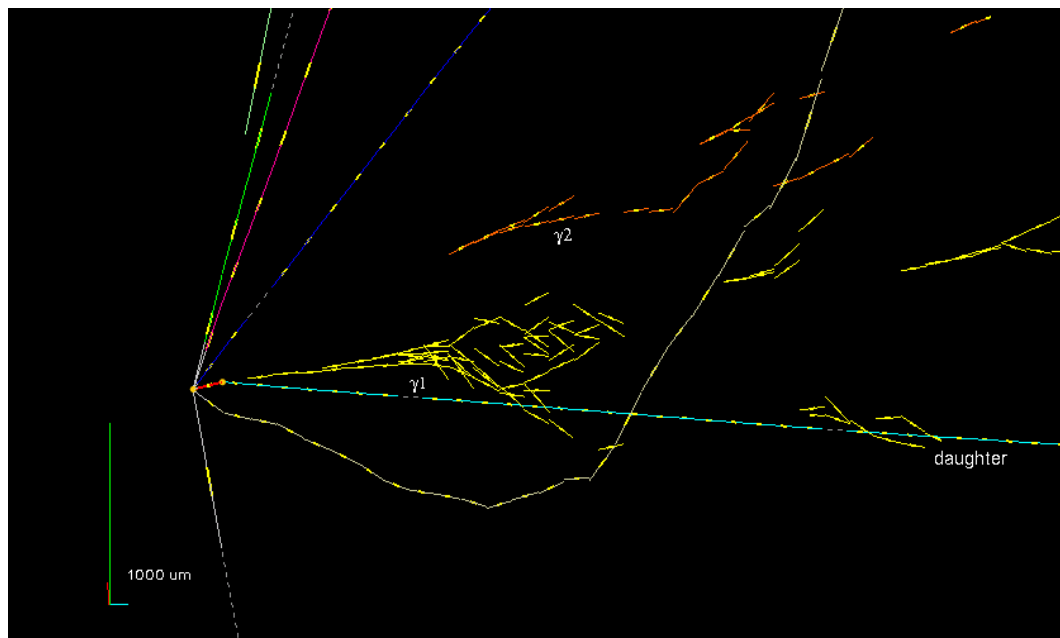
В начале 70-х годов по инициативе С.Н. Вернова, Е.Л. Фейнберга и Н.А. Добротина начался грандиозный эксперимент на Памире, в урочище Ак-Архар на высоте 4400 м. Основным элементом детектора были рентгеноэмульсионные камеры, использовалось 2000 тонн свинца. Площадь РЭК достигала  $1000 \text{ м}^2$ , экспозиция каждой закладки рентгеновских пленок длилась около года. Целью эксперимента, который продолжался до 1991 года, было исследование взаимодействий частиц космических лучей с ядрами атомов воздуха при энергиях  $10^{14} - 10^{17}$  эВ.



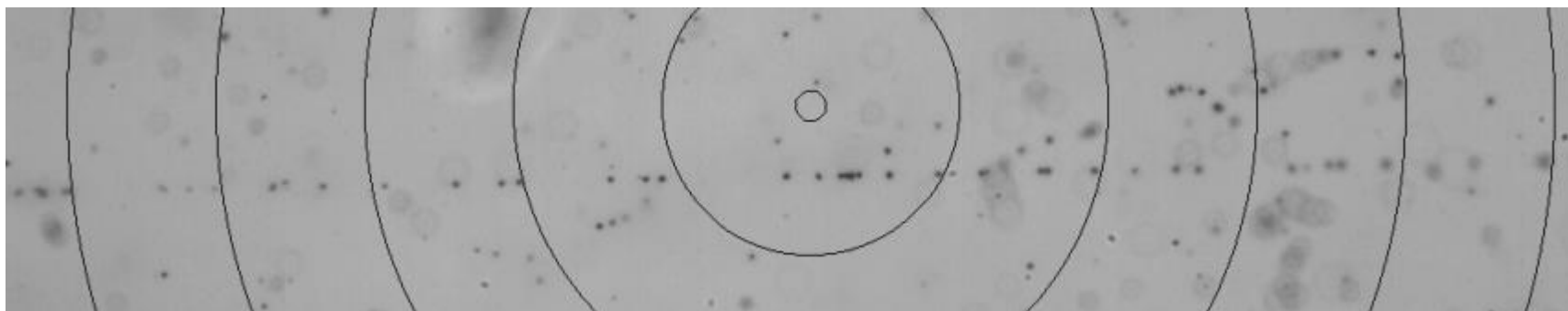
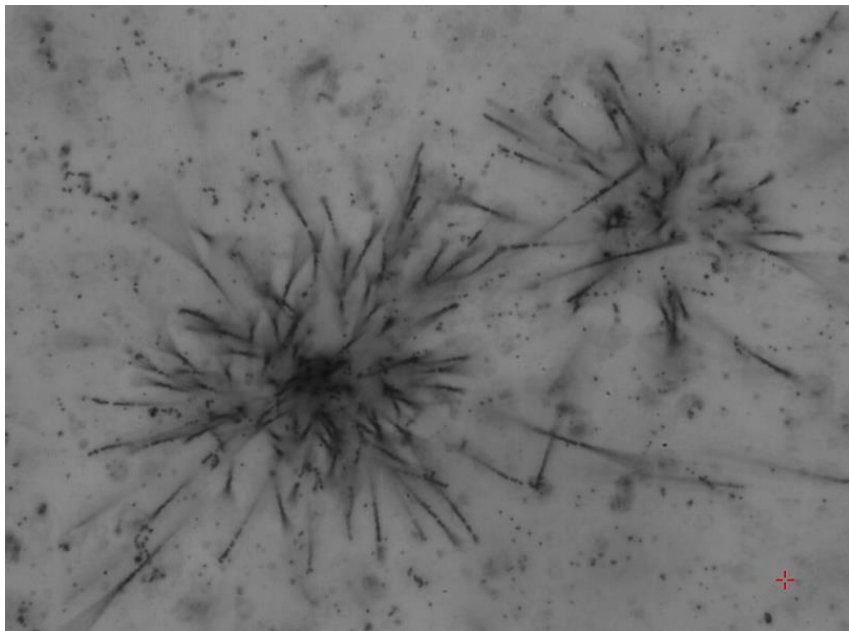
# Эксперименты OPERA, NEWSdm, SHiP(SND@LHC)

Исследование частиц и взаимодействий за пределами Стандартной Модели с использованием эмульсионных технологий .

С 2010 г. в НИИЯФ МГУ имеется оборудование, позволяющее проводить обработку экспериментального эмульсионного материала в автоматическом режиме — сканирующие комплексы. На рис. Слева — событие эксперимента OPERA с рождением таона.



Примеры изображений треков частиц в эмульсиях экспериментов OPERA и MUBEE (хранитель Г.П.Сажина)(для задачи практикума ОЯФ)



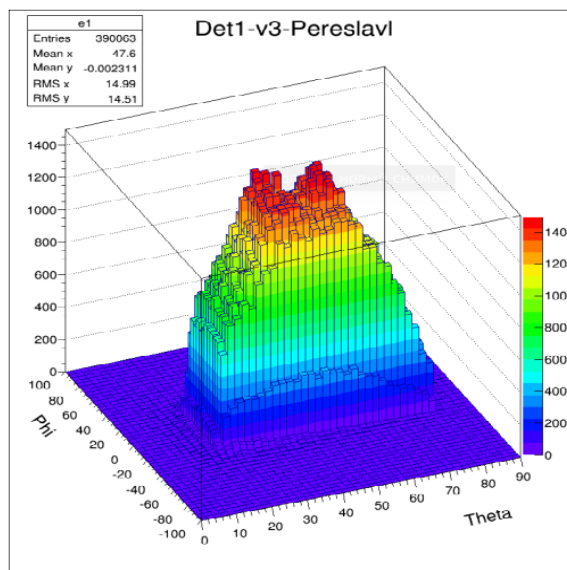
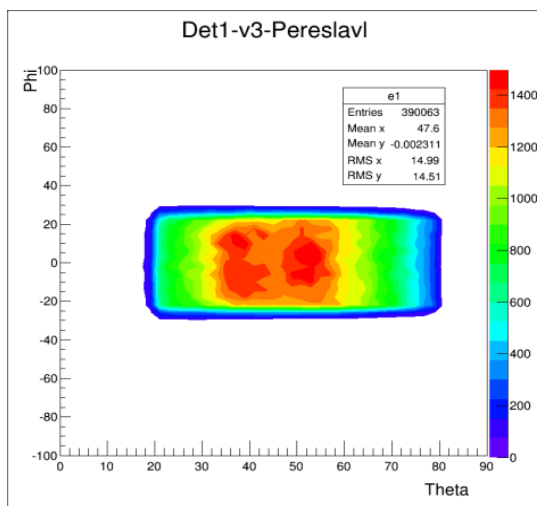


# Метод исследования объектов — «мюонная радиография».

## Сотрудничество с ФИАН и МИСИС. Расчеты В.И.Галкин, А.К.Манагадзе.

Ядерные эмульсии используются для регистрации атмосферных мюонов, проходящих через исследуемые объекты. По угловому распределению треков мюонов можно судить о наличии пустот или о повышенной плотности. Используются эмульсии производства «Славич», Переславль-Залесский.

Из этих графиков видно, что максимумы распределения, представляющие в данном случае увеличение потоков мюонов в направлениях проходящих через пустоты в грунте, соответствуют зенитным углам приблизительно  $\theta=38^\circ$  и  $\theta=52^\circ$ .

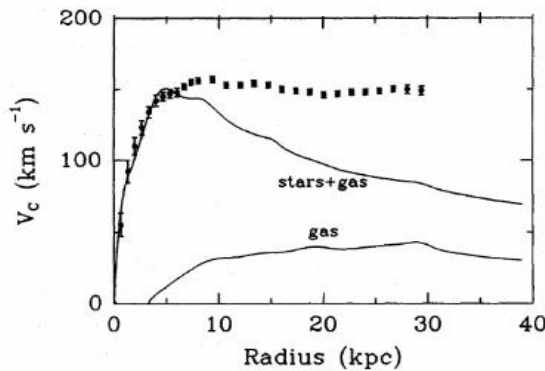
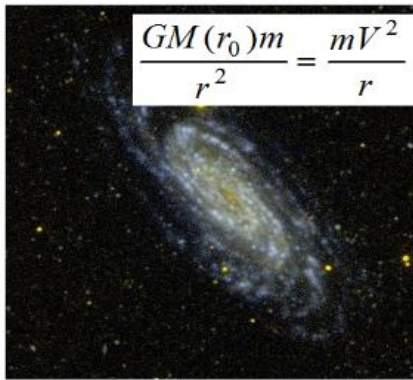


**Физика вне Стандартной Модели и  
ядерно-эмульсионные методы в  
экспериментах NEWSdm и  
SHiP (SND@LHC)**



# Существуют доказательства присутствия скрытой массы во Вселенной, проявляющей себя гравитационно.

## Кривые вращения галактик на примере галактики NGC 3198

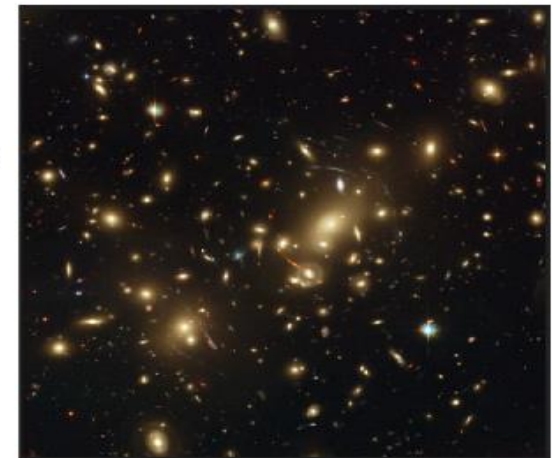
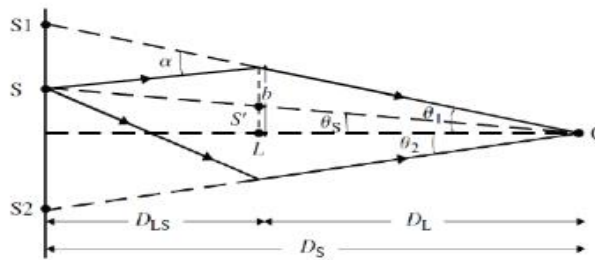


Кандидаты на роль частиц темной материи - WIMP (Weakly Interacting Massive Particles). WIMP в MSSM - легчайшее нейтрино. Модельный расчет с помощью комплекса microMEGAs, спасибо А.Е.Пухову

Dark matter candidate is ' $\tilde{\nu}_1$ ' with spin=1/2 mass=7.70E+01  
 $\tilde{\nu}_1 = 0.985 \cdot \text{bino} - 0.063 \cdot \text{wino} + 0.152 \cdot \text{higgsino}_1 - 0.049 \cdot \text{higgsino}_2$

WIMP в NMSSM .  
 Модельный расчет с помощью комплекса microMEGAs.

## Гравитационное линзирование

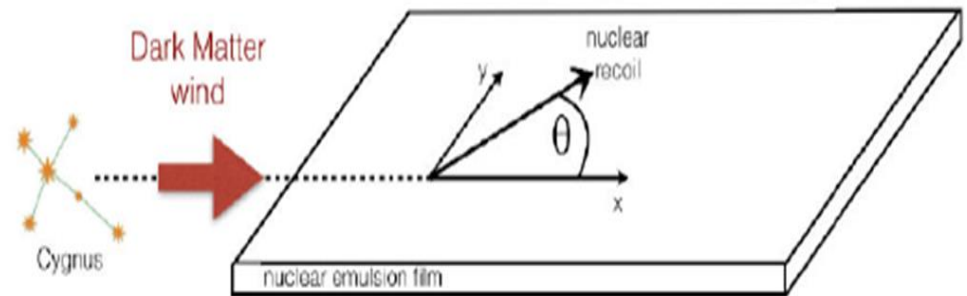
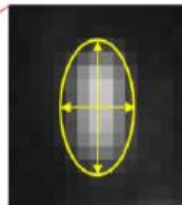
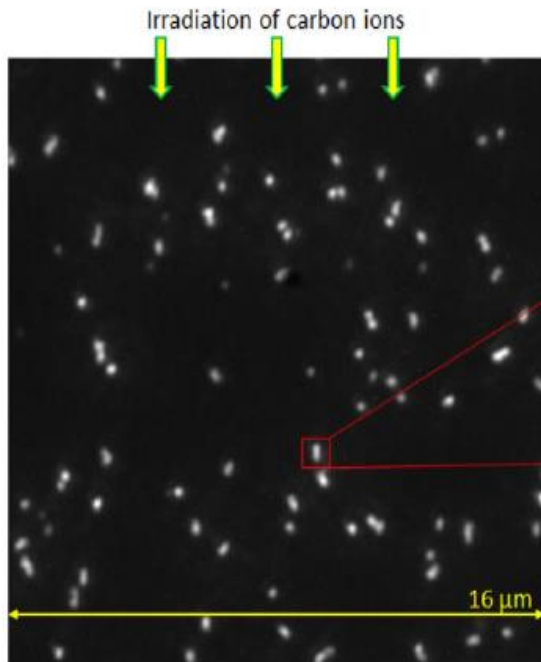
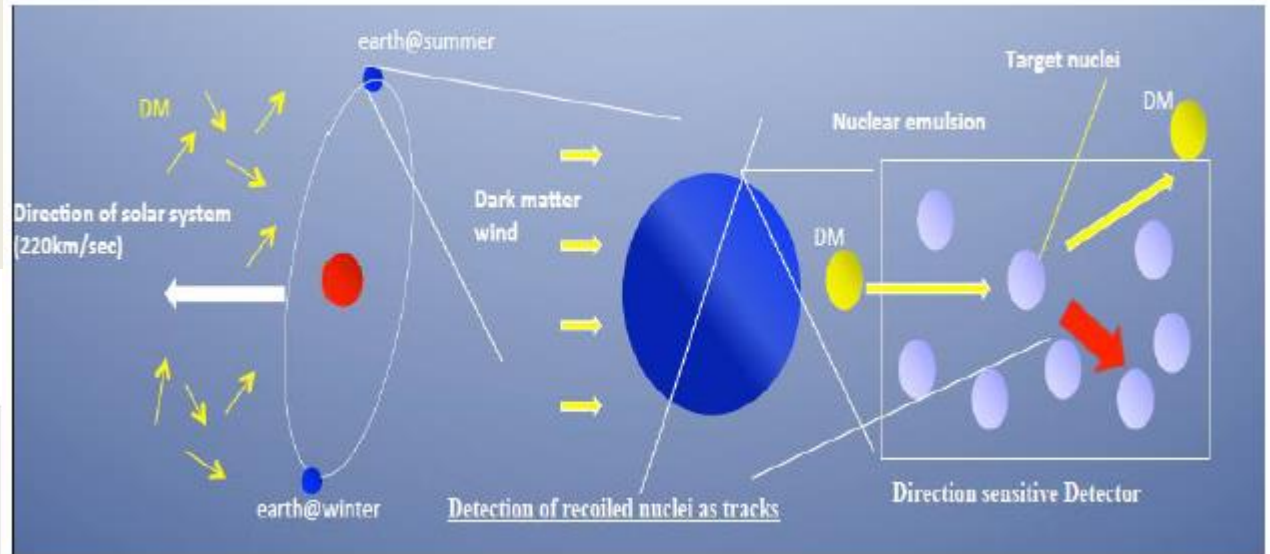


Dark matter candidate is ' $\tilde{\nu}_1$ ' with spin=1/2

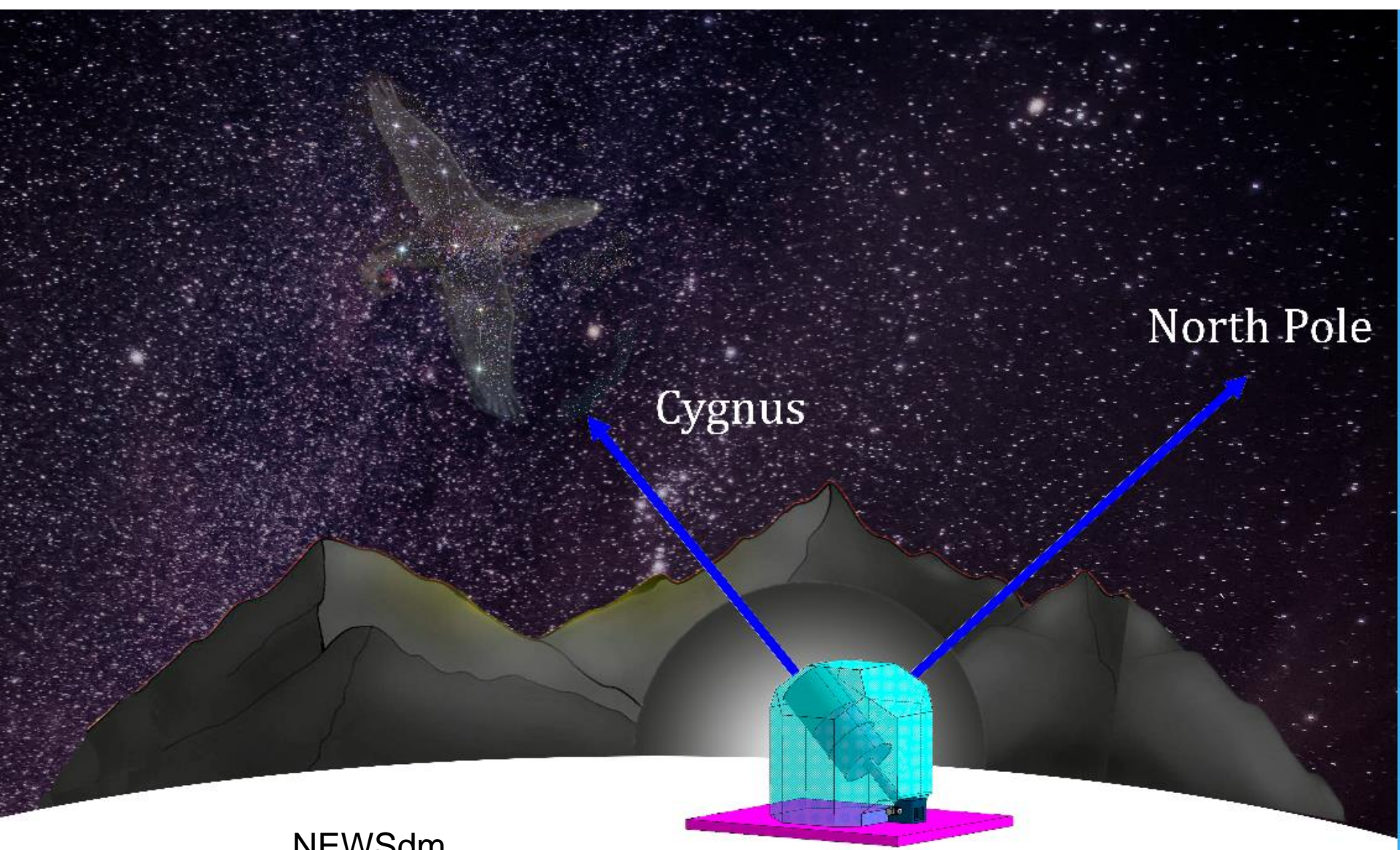
$\tilde{\nu}_1 = -0.850 \cdot \text{bino} + 0.164 \cdot \text{wino} - 0.405 \cdot \text{higgsino}_1 + 0.293 \cdot \text{higgsino}_2 - 0.020 \cdot \text{singlino}$

Прямой метод поиска WIMP (**Weakly Interacting Massive Particles**)- NEWSdm.  
 Поиск треков ядер отдачи от упругого взаимодействия WIMP с ядрами вещества  
 НАНО эмульсии (H,C,N,O,Ar,Br). Размер зерен 60, 40 и 20 нм.

INFN, Италия,  
 Университет Нагоя,  
 Япония. Руководитель  
 эксперимента - профессор  
 Джовани де Леллис





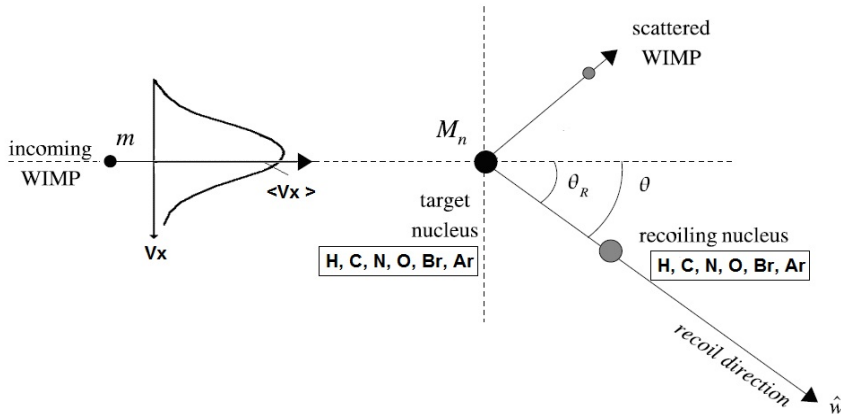


NEWSdm

Nuclear Emulsion for WIMP Search  
directional measurement

Рисунок: Павел Попов  
Иван Видулин

# Рассеяние WIMP на ядрах вещества эмульсии



$$\frac{dR}{dE d\Omega} = \sum_n \frac{\rho}{4\pi \mu_n^2 m} C_n \hat{f}(w_n, \hat{w}) \sigma_n(E) \mathcal{E}(E)$$

$$\sigma_n(E) = \sigma_n^{SI}(E) + \sigma_n^{SD}(E)$$

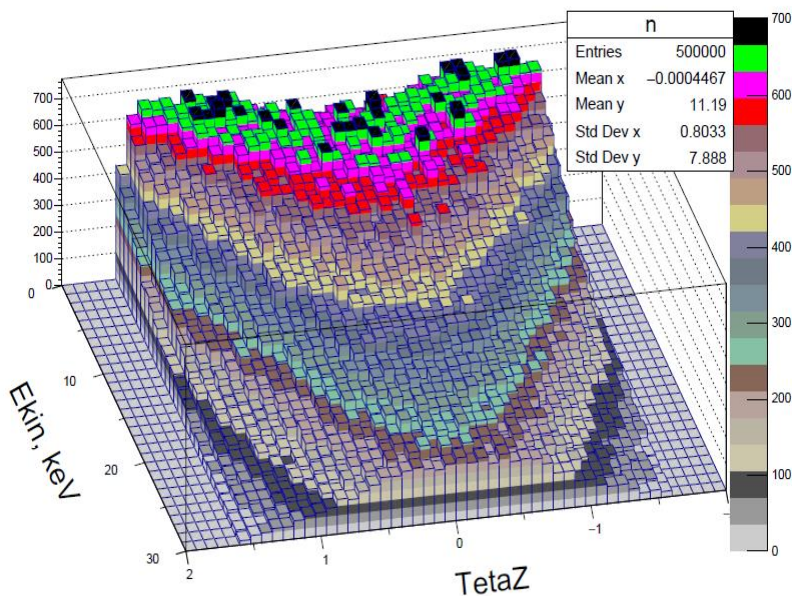
$$\hat{f}_n(w, \hat{w}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_v^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{[w_n - \hat{w} \cdot \mathbf{V}]^2}{2\sigma_v^2}\right)$$

$$f(\mathbf{v}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_v^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{|\mathbf{v} - \mathbf{V}|^2}{2\sigma_v^2}\right)$$

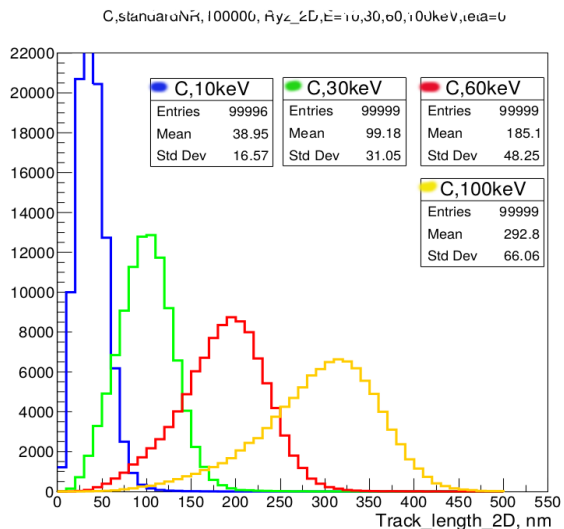
$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(W, G) - \mathbf{V}(S, G) - \mathbf{V}(E, S) - \mathbf{V}(\text{lab}, E)$$

$$0 \text{ (SHM)} \quad 200 \text{ km/s} \quad 30 \text{ km/s} \quad 0.3^{22} \text{ km/s}$$

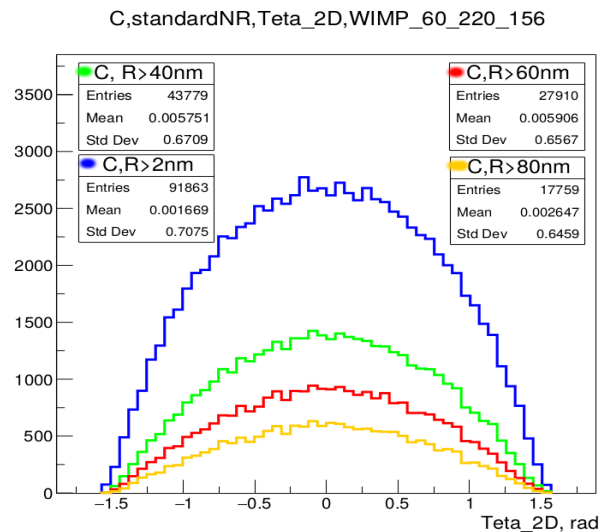
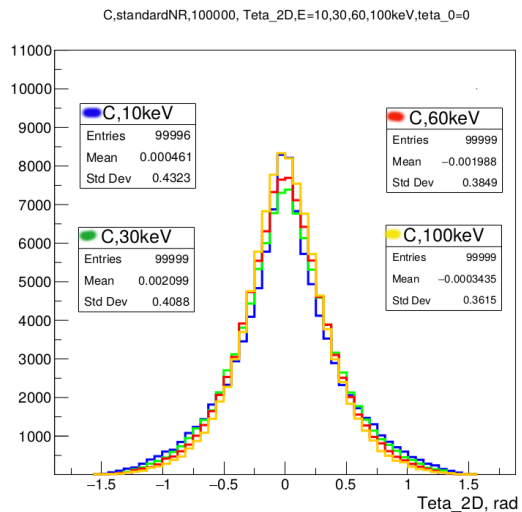
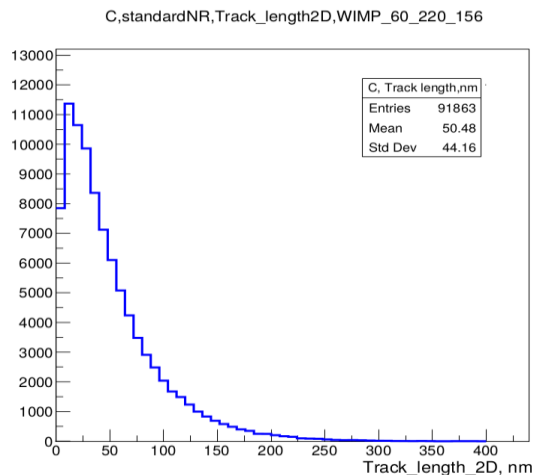
C, v=220(156), thr=0, tg\_Tet\_Z - E\_R, FF=Helm, Spin Dependence



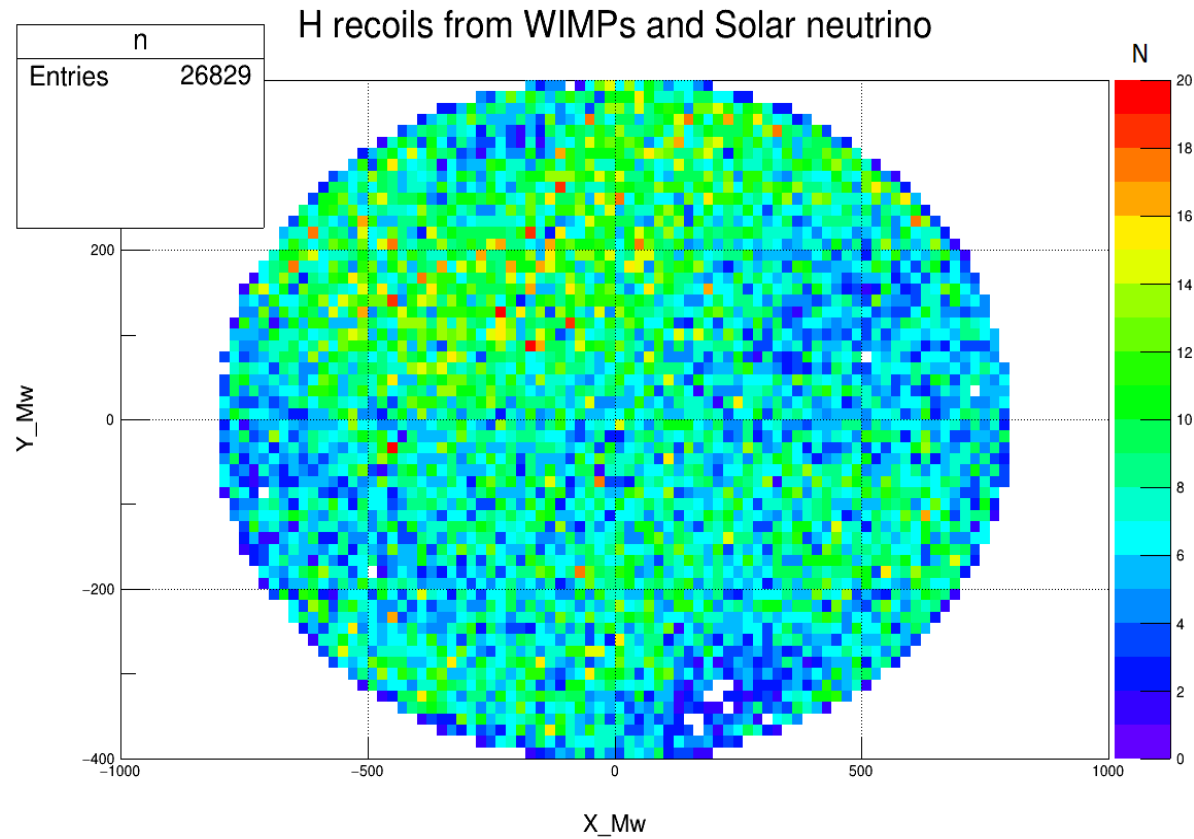
# Распределения длин и направлений смоделированных треков ядер углерода в наноэмульсии, GEANT4, standardNR



# Длины треков и угловое распределение ядер отдачи углерода для и 100000 взаимодействий WIMP ( $\langle v \rangle = 220$ km/s, $\sigma_w = 156$ km/s, $m_w = 60$ GeV).



Распределения ядер отдачи H от WIMP и Солнечных нейтрино,  $E_\nu > 1$  MeV.  
Предварительные оценки количества событий за 1 год в 10 кг. эмульсии.





Сканирование НИТ эмульсий в Неаполе. Сканаторы OPERA модернизированы для использования эффекта поверхностного плазмонного резонанса.

### Localized surface plasmon resonances

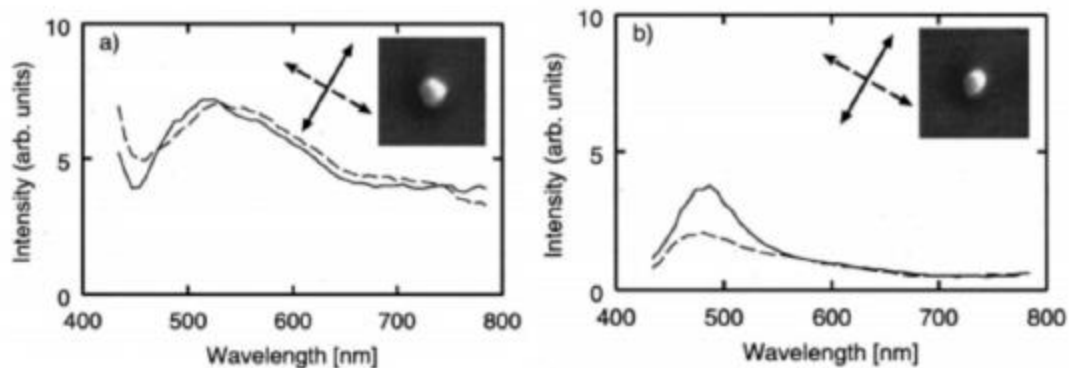
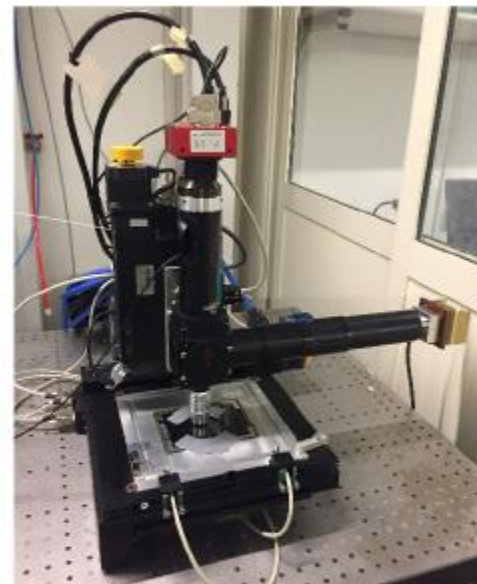


FIGURE 3.17: Scattered-light spectra from Ag particles with spherical (left) and elliptical (right) shape. The inset shows the particle image taken from the Scanning Electron Microscope (SEM) [159].



Optical microscope for dark matter search assembled in Napoli University.

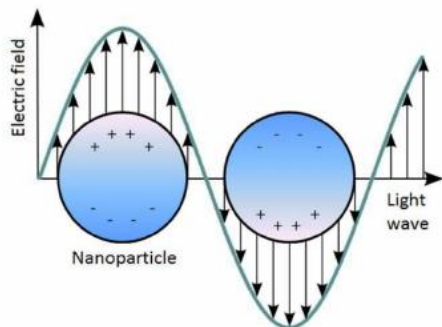


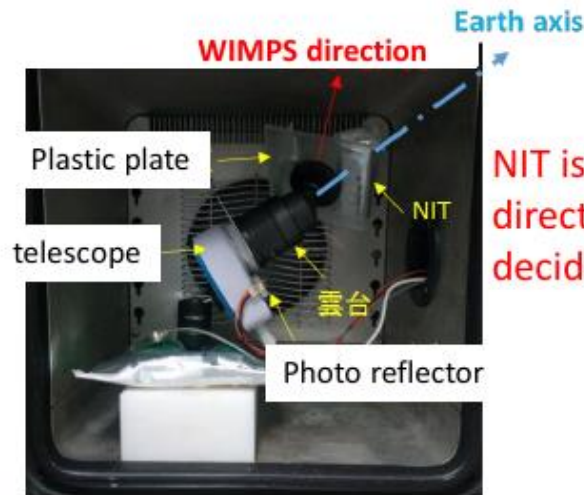
FIGURE 3.16: Schematic representation of LSPRs effect



# Surface Run1

- Directional WIMP search at surface of Nagoya University
- Portable equatorial telescope was used to trace CYGNUS direction

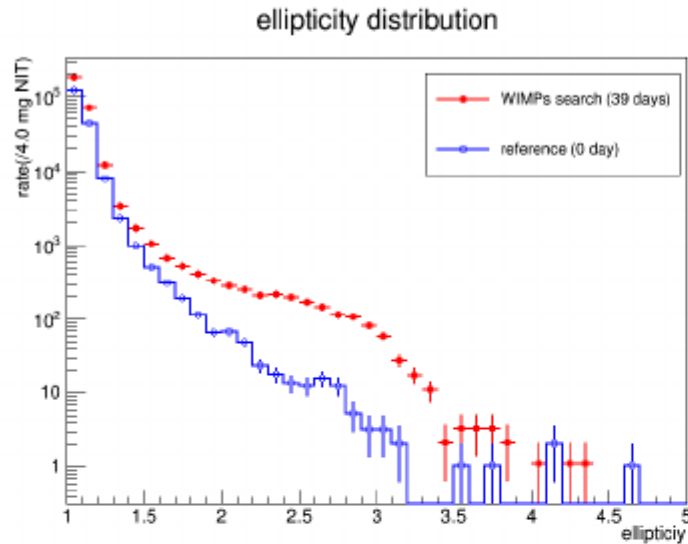
Chamber in Nagoya



NIT is set horizontal in WIMP direction.  
decide WIMPs direction  $< 10^\circ$

	period	NIT mass	Setup
Surface Run1	2019/8/13 2019/9/21 39 days	15.1 mg	-26°C telescope

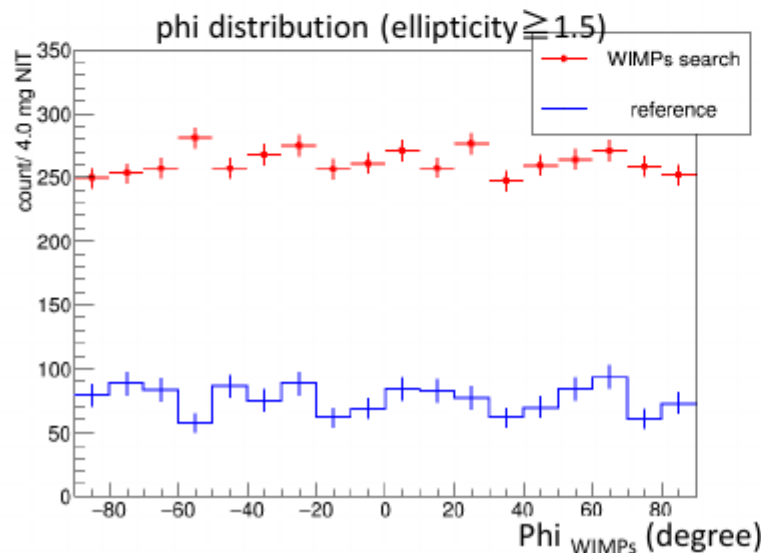
# Surface Run1 scan result



Event rate with ellipticity  $\geq 1.5$  (count/mg)

Reference (0 day)	WIMPs search (39 days)
$372 \pm 19$	$1187 \pm 25$

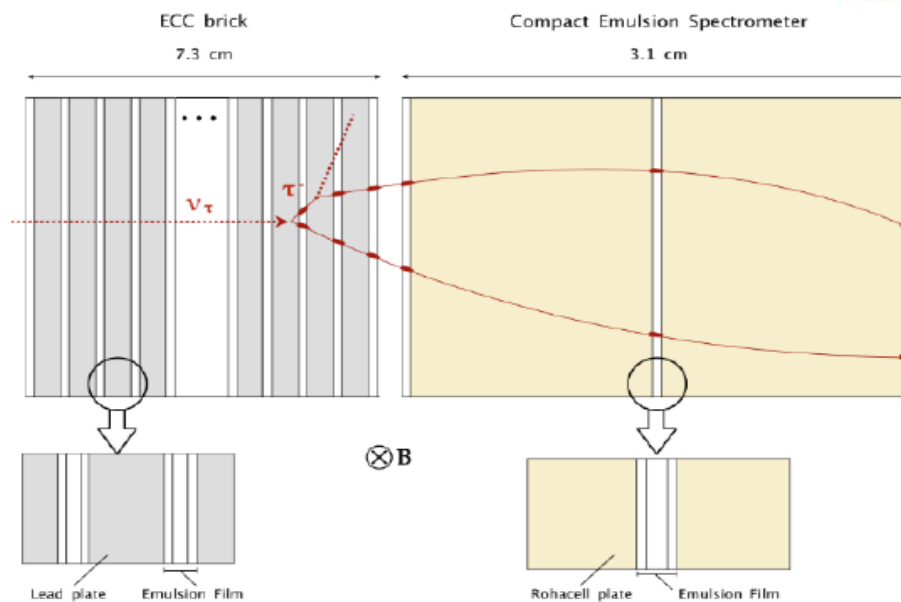
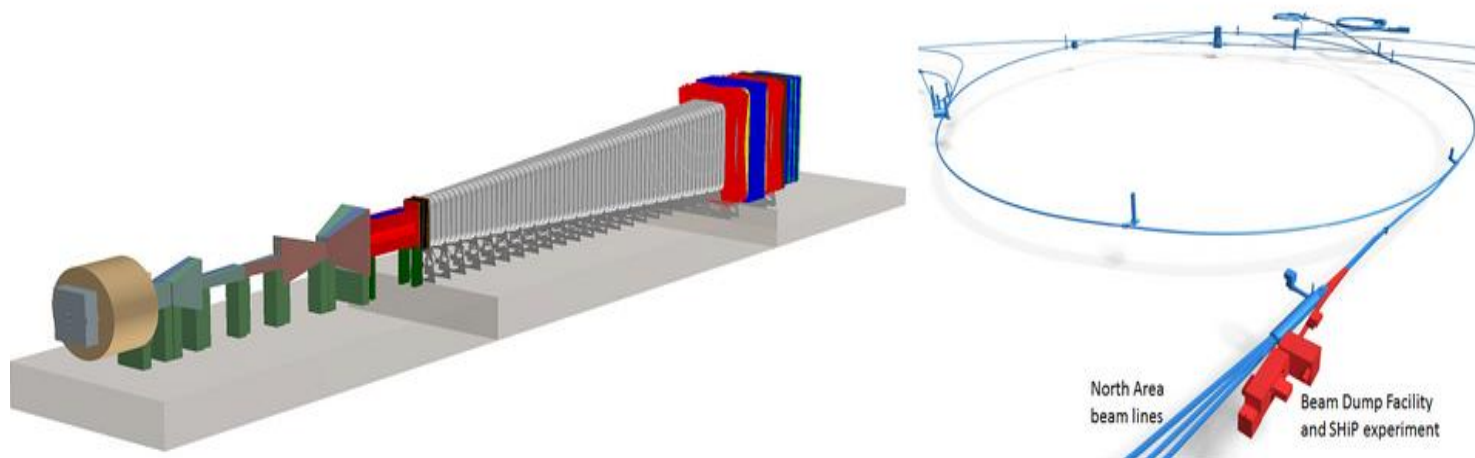
**+ 815 event / mg**



A parameter of  $\text{phi}_{\text{WIMPs}}$  is introduced.  
 It is related with Cygnus direction ( $= \text{phi}_{\text{WIMPs}} = 0^\circ$ )  
 $\text{phi}_{\text{WIMPs}} = \text{phi} - 90^\circ$

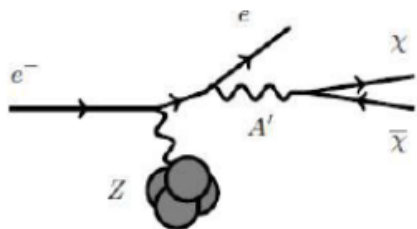
**There is no peak in  $\text{phi}_{\text{WIMPs}}$  distribution .**

# Эксперимент SHiP, CERN, кольцо SPS, протоны, 400 ГэВ, POT - $2 \cdot 10^{20}$ за 5 лет наблюдений.

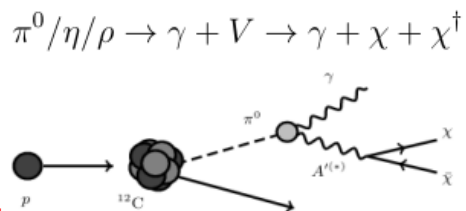


Группой в НИИЯФ исследовался один из каналов рождения и регистрации Легкой Темной Материи (LDM), масса  $\sim$  ГэВ.

- тормозное излучение электронов

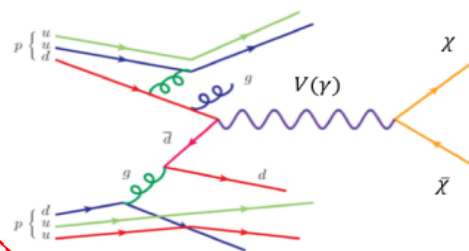


- распад мезонов  $\pi^0/\eta/\rho$



- процесс Дрелл—Яна

$$p + p \rightarrow X + V \rightarrow X + \chi + \chi^\dagger.$$



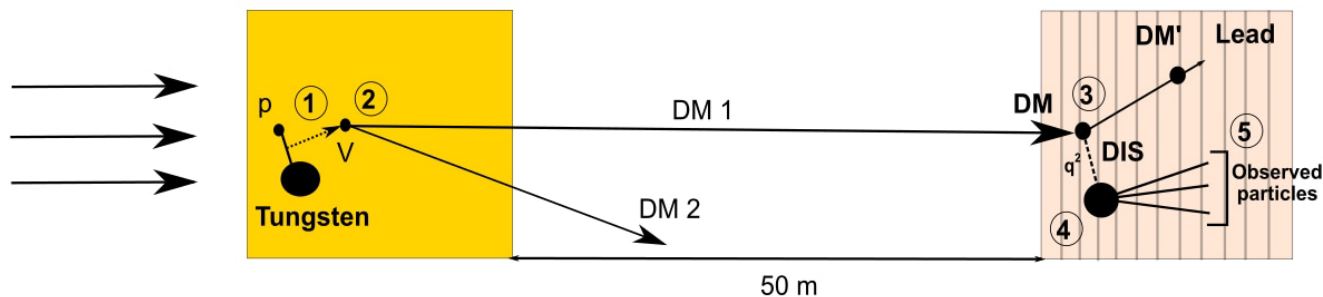
- тормозное излучение протонов

$$p + N \rightarrow p + N + V \rightarrow p + N + \chi + \chi^\dagger$$

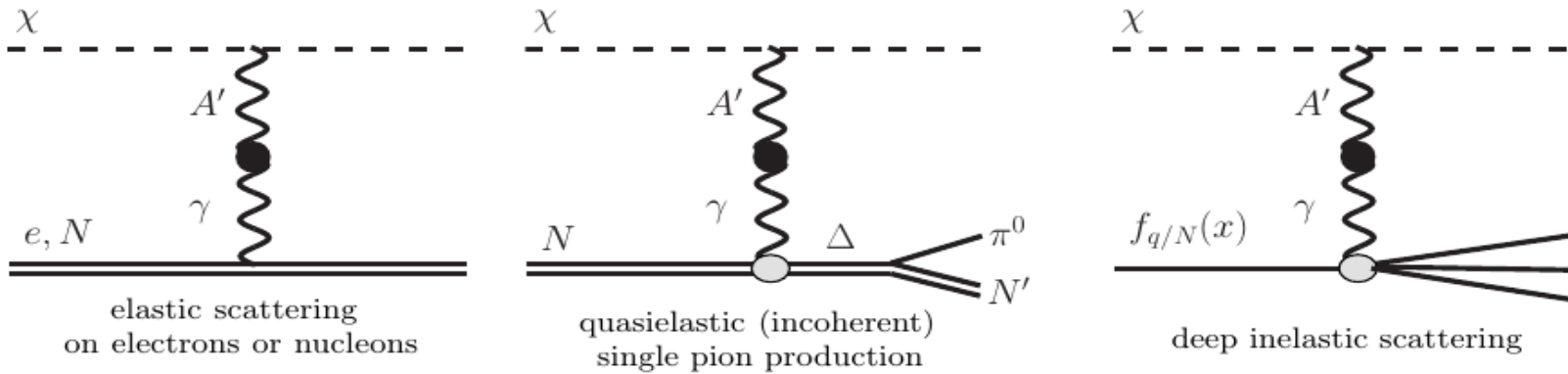
400 GeV protons

Target

Detector



# Детектирование LDM



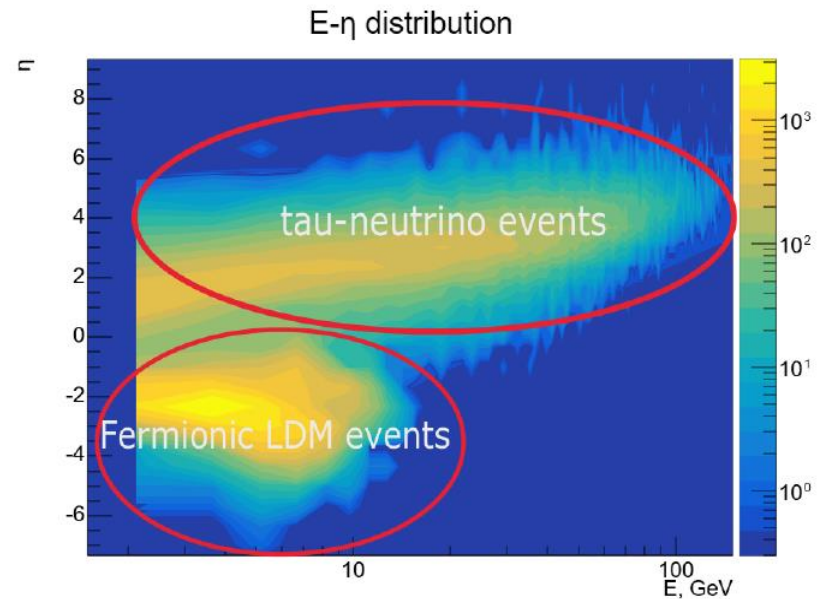
Основная задача: выявить признаки, по которым можно распознать сигнал от LDM в детекторе.



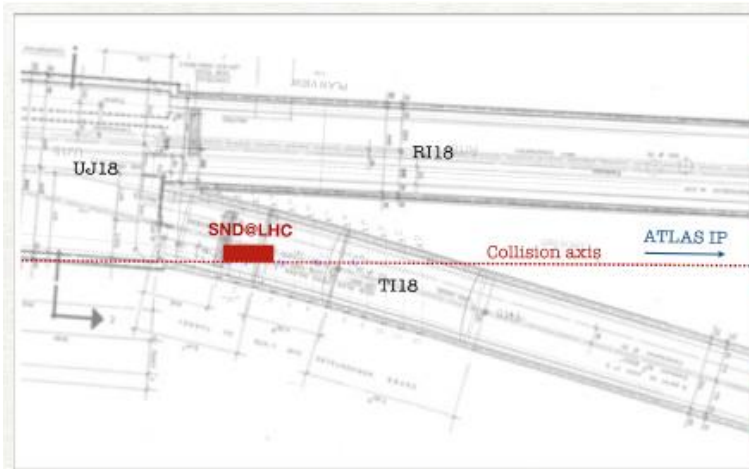
Article

## Possibilities of Detecting Light Dark Matter Produced via Drell-Yan Channel in a Fixed Target Experiment

Eduard Ursov <sup>1,2,\*</sup>, Anna Anokhina <sup>1,2</sup>, Emil Khalikov <sup>2</sup>, Ivan Vidulin <sup>1</sup> and Tatiana Roganova <sup>2</sup>



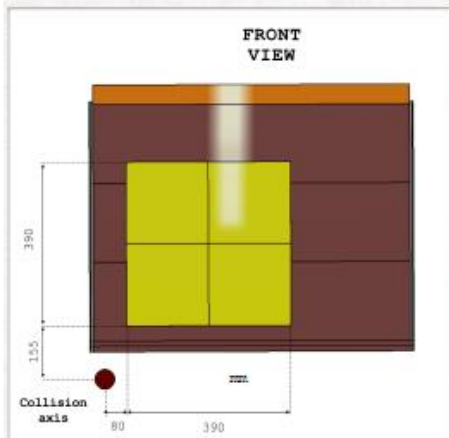
# Эксперимент SND@LHC, G. DeLellis



- › About 480 m away from the ATLAS IP
- › Tunnel TI18: former service tunnel connecting SPS to LEP
- › Symmetric to TI12 tunnel where FASER is located
- › Charged particles deflected by LHC magnets
- › Shielding from the IP provided by 100 m rock
- › Angular acceptance:  $7.2 < \eta < 8.6$
- › First phase: operation in Run 3 to collect  $150 \text{ fb}^{-1}$

- › Angular acceptance:  $7.2 < \eta < 8.6$
- › Target material: Tungsten
- › Target mass: 830 kg
- › Surface:  $390 \times 390 \text{ mm}^2$

Off axis location



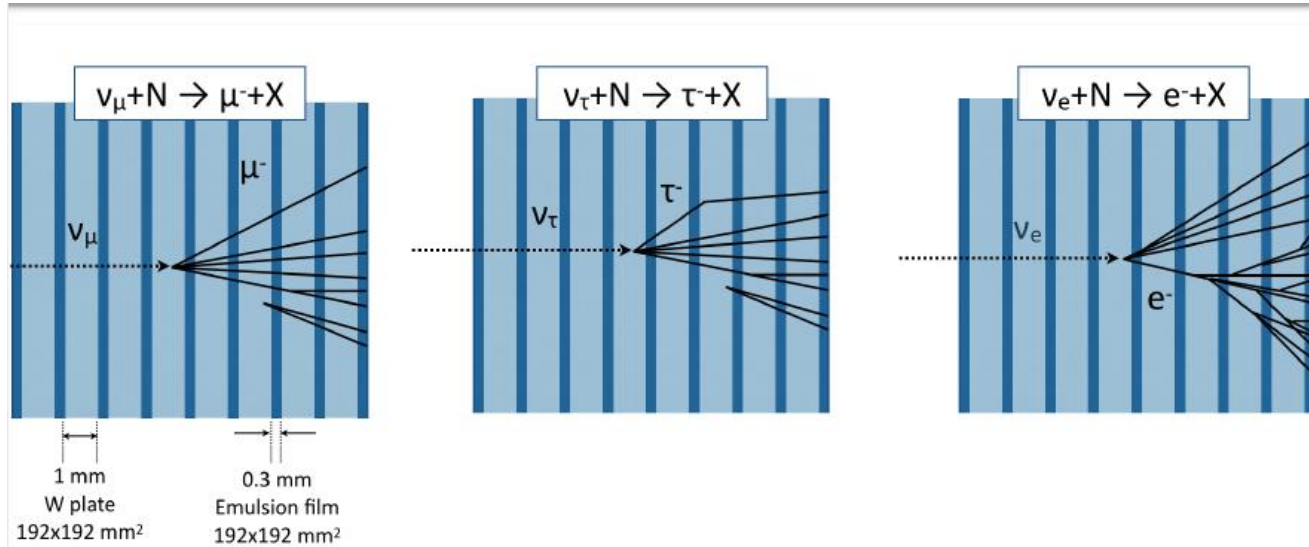
Electromagnetic calorimeter  
 $\sim 40 X_0$

Hadronic calorimeter  
 $\sim 9.5 \lambda$





# Нейтринные взаимодействия в детекторе SND.



**OPEN ACCESS**

**IOP Publishing**

Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **46** (2019) 115008 (19pp)

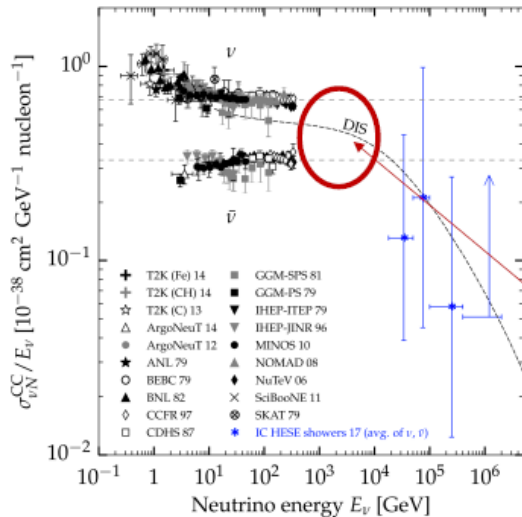
<https://doi.org/10.1088/1361-6471/ab3f7c>

PRL 122 (2019) 041101

## Physics potential of an experiment using LHC neutrinos

N Beni<sup>1</sup>, M Brucoli<sup>2</sup>, S Buontempo<sup>5</sup>, V Cafaro<sup>4</sup>,  
 G M Dallavalle<sup>4,8</sup>, S Danzeca<sup>2</sup>, G De Lellis<sup>2,3,5</sup>,  
 A Di Crescenzo<sup>3,5</sup>, V Giordano<sup>4</sup>, C Guandalini<sup>4</sup>, D Lazić<sup>6</sup>,  
 S Lo Meo<sup>7</sup>, F L Navarra<sup>4</sup> and Z Szillasi<sup>1,2</sup>

CERN is unique in providing energetic  $\nu$  (from LHC)  
 $\rightarrow$  measure  $pp \rightarrow \nu X$  in an unexplored domain





# Поиск сигнатур легкой темной материи LDM на нейтринном фоне.

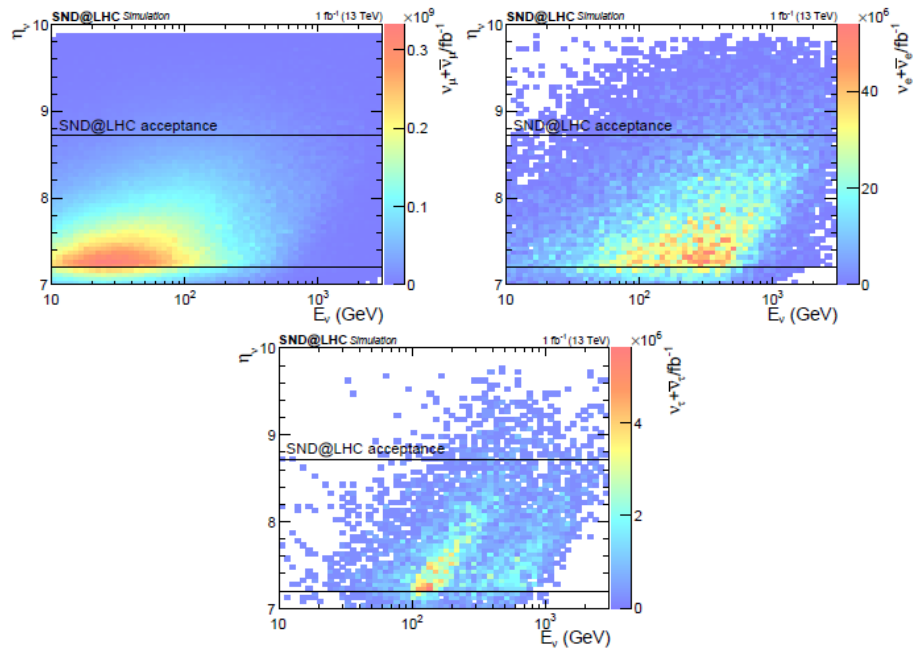
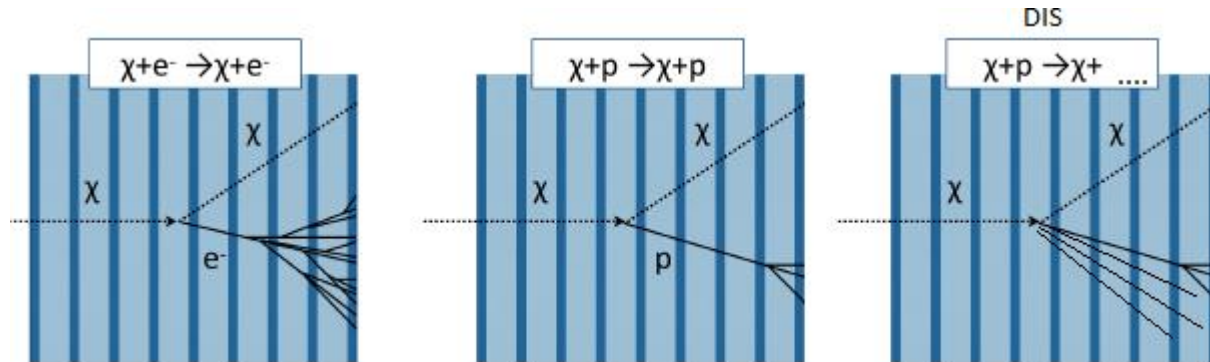


Figure 2: Neutrino flux as a function of  $\nu$  energy and pseudorapidity for muon (left), electron (right) and tau (bottom) neutrinos.



**Спасибо за внимание!**