

## Зацепинские чтения

02-06-2023

«Темная материя, ускоренная при  
упругом взаимодействии с космическими  
лучами, и чувствительность

эмульсионного детектора NEWSdm»

*Анохина А.М., Галкин В.И.,*

*МГУ имени М.В.Ломоносова,*

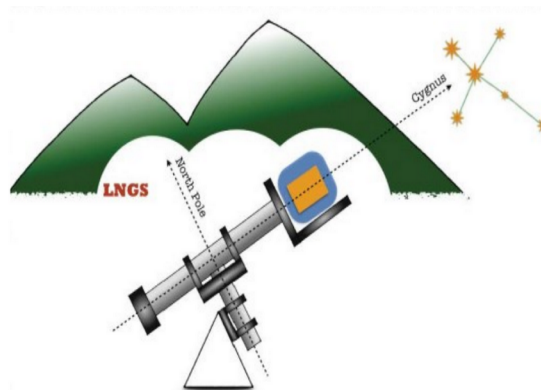
*Физический факультет, НИИЯФ*



Г.Т.Зацепин в ауд.5-08 ФФ

# NEWSdm (Nuclear Emulsion for WIMP Search with a directional measurement), Gran Sasso, Италия. Наноэмульсия (размер зерен до 20 нм).

1) 2020-21 гг. рассмотрены модели WIMP — суперсимметричные расширения СМ, холодная темная материя со скоростями относительно Земли 220-240 км/сек, массы частиц — порядка массы Н (125 ГэВ/с\*\*2). Рассмотрено образование ядер отдачи Н и СНО при упругом взаимодействии с «ветром» WIMP.  
Оценен сигнал в 30 кг ядерной наноэмульсии.



Scheme of the NEWSdm detector installation.  
Natali Polukhina, ...

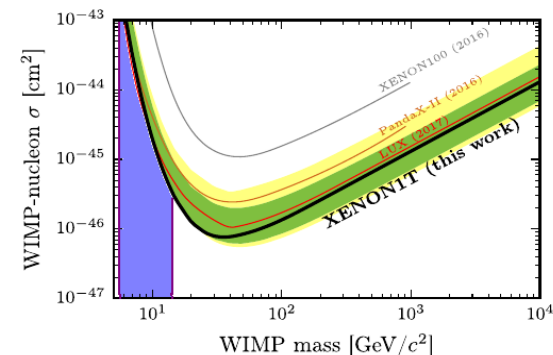
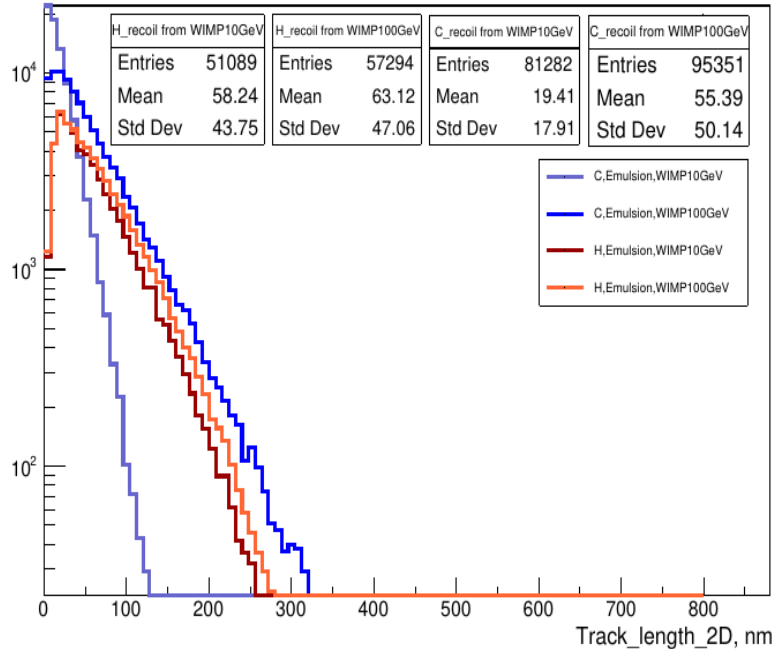


FIG. 4. The spin-independent WIMP-nucleon cross section limits as a function of the WIMP mass at 90% confidence level (black line) for this run of XENON1T. In green and yellow are the  $1\sigma$  and  $2\sigma$  sensitivity bands. Results from LUX [27] (the red line), PandaX-II [28] (the brown line), and XENON100 [23] (the gray line) are shown for reference.

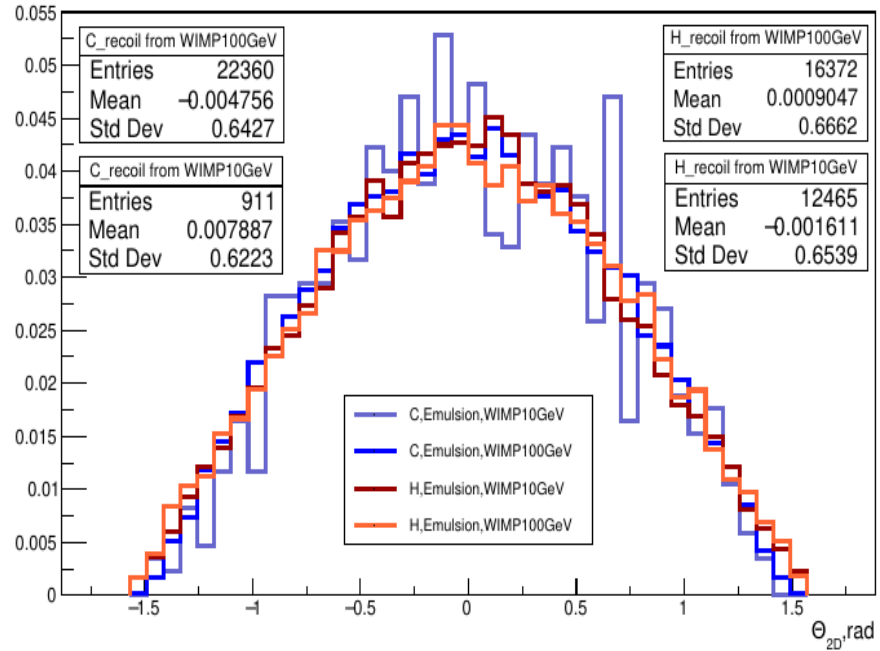
Directional Observation of Cold Dark Matter Particles (WIMP) in Light Target Experiments [Anna Anokhina](#) 1,2,\* , [Vasilisa Gulyaeva](#) 1, [Emil Khalikov](#) 2, [Evgeny Kurochkin](#) 1,2, [Tatiana Roganova](#) 2, [Eduard Ursov](#) 1,2,\*

1) Модель WIMP, распределения по длинам треков  $C$  и  $H$  (слева) и по направлениям (справа) в эмульсии с плотностью  $3.44 \text{ г/см}^2$ .  
 Направление  $0$  градусов соответствует направлению на созвездие Лебедь.

Emulsion, H & C recoil tracks, WIMP-10,100GeV, Track\_length2D>2nm



Emulsion,  $\Theta_{2D}$  for H & C recoil tracks, WIMP-10,100GeV, Track\_length2D>80nm



Модель WIMP (массы 10, 100, 1000 ГэВ/с\*\*2).

Оценки показали, что с учетом порогового ограничения на длину трека 80 нм, ожидается около ОДНОГО события, связанного с упругим рассеянием WIMP в 30 кг эмульсии.

Target matter	Element	$N_{\text{WIMP}}$ per day in 1 kg	Mass fraction, kg	$N_{\text{WIMP}}$ per year	$N_{\nu}$ per year
emulsion	H	$7.15 \cdot 10^{-7}$	1.11	$3 \cdot 10^{-4}$	0.058
emulsion	C	$3.28 \cdot 10^{-4}$	3.69	0.44	0.016
emulsion	N	$4.39 \cdot 10^{-4}$	0.54	0.087	<0.003
emulsion	O	$5.61 \cdot 10^{-4}$	2.76	0.56	<0.015

# Novel direct detection constraints on light dark matter

Torsten Bringmann<sup>1</sup> and Maxim Pospelov<sup>2,3</sup>

## Reverse direct detection: Cosmic ray scattering with light dark matter

Christopher V. Cappiello, Kenny C. Y. Ng, and John F. Beacom  
Phys. Rev. D **99**, 063004 – Published 8 March 2019

## Production and attenuation of cosmic-ray boosted dark matter

Chen Xia<sup>a</sup>, Yan-Hao Xu<sup>a</sup>, and Yu-Feng Zhou<sup>a,b,c</sup>

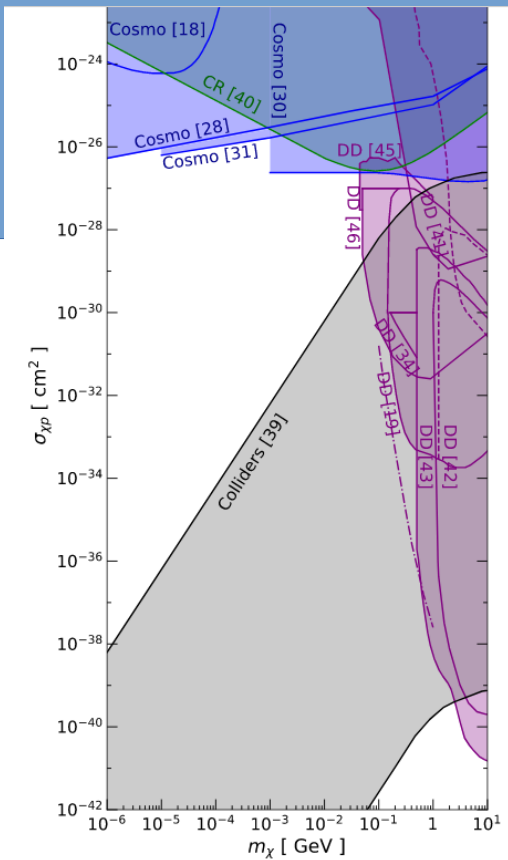
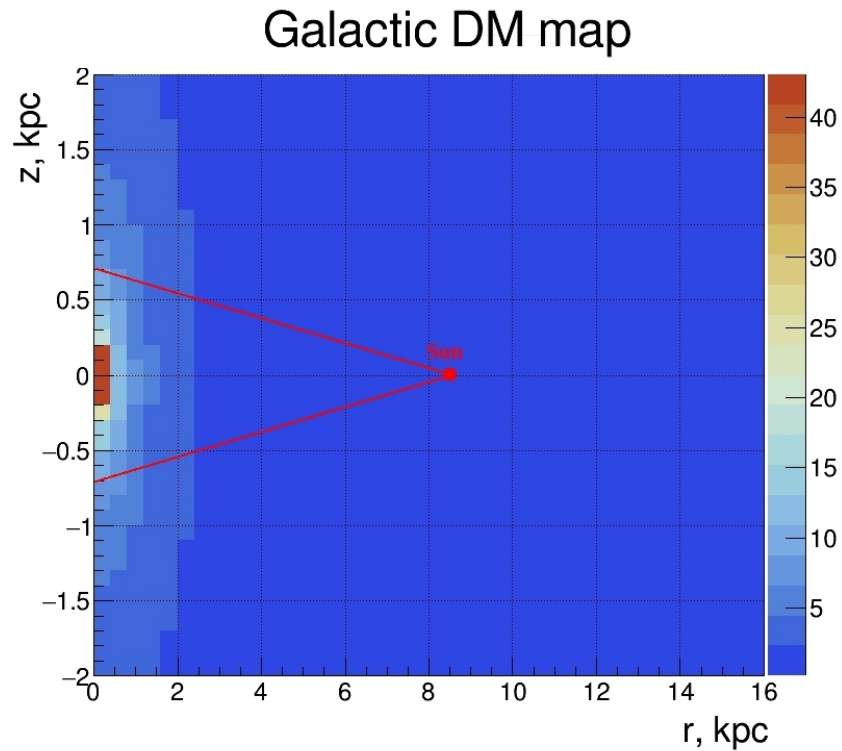
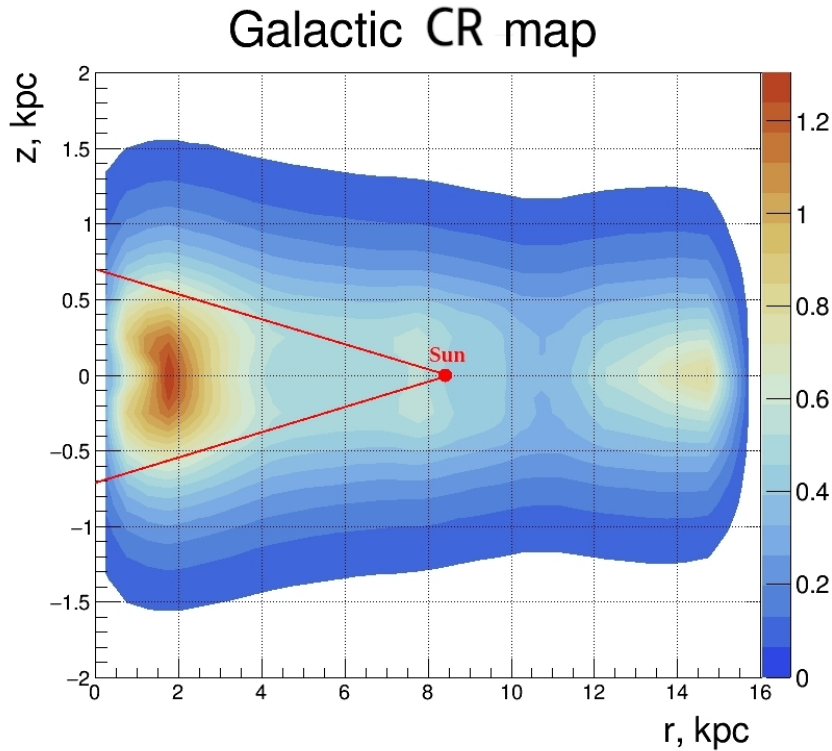


FIG. 1. Exclusion regions for DM-proton scattering from cosmology [18,28,30,31], colliders [39], CRs [40], and direct detection with XQC [41], DAMIC ([42]; ceiling from [35]), CRESST-II ([43]; ceiling from [44]), the CRESST surface run [19], XENON100 [34], EDELWEISS [45], and a near-surface detector at the University of Chicago [46,47]. The dashed curves are reanalyses of XQC and the CRESST surface run from Ref. [35]. The dash-dotted curve is a reanalysis of XENON1T from Ref. [48].

# Directional Sensitivity of the NEWSdm Experiment to Cosmic Ray Boosted Dark Matter

N.Y. Agafonova,<sup>c</sup> A. Alexandrov,<sup>a,b</sup> A.M. Anokhina,<sup>g,1</sup> T. Asada,<sup>a,b</sup> V.V. Ashikhmin,<sup>c</sup> V. Boccia,<sup>a,b</sup> D. Centanni,<sup>a,i</sup> M.M. Chernyavskii,<sup>e</sup> N. Chin,<sup>q</sup> N. D'Ambrosio,<sup>h</sup> G. De Lellis,<sup>a,b</sup> A. Di Crescenzo,<sup>a,b</sup> Y.C. Dowdy,<sup>d</sup> S. Dmitrievski,<sup>k</sup> R.I. Enikeev,<sup>c</sup> G. Galati,<sup>m,n</sup> V.I. Galkin,<sup>g</sup> A. Golovatiuk,<sup>a</sup> S.A. Gorbunov,<sup>e</sup> Y. Gornushkin,<sup>k</sup> A.M. Guler,<sup>l</sup> V.V. Gulyaeva,<sup>g</sup> A. Iuliano,<sup>a,b</sup> E.V. Khalikov,<sup>g</sup> S.H. Kim,<sup>o</sup> N.S. Konovalova,<sup>e</sup> Y.O. Krasilnikova,<sup>f</sup> A. Lauria,<sup>a,b</sup> K.Y. Lee,<sup>o</sup> V.P. Loschiavo,<sup>a,s</sup> A.K. Managadze,<sup>g</sup> A. Miloi,<sup>k</sup> M.C. Montesi,<sup>a,b</sup> T. Naka,<sup>d,p</sup> N.M. Okateva,<sup>e</sup> B.D. Park,<sup>o</sup> D.A. Podgrudkov,<sup>g</sup> N.G. Polukhina,<sup>e</sup> T.M. Roganova,<sup>g</sup> G. Rosa,<sup>r</sup> M.A. Samoilov,<sup>g</sup> Z.T. Sadykov,<sup>f</sup> A. Sadovsky,<sup>k</sup> K. Saeki,<sup>d</sup> O. Sato,<sup>p</sup> I.R. Shakiryanova,<sup>c</sup> T.V. Shchedrina,<sup>e</sup> T. Shiraishi,<sup>q</sup> J.Y. Sohn,<sup>o</sup> A. Sotnikov,<sup>k</sup> N.I. Starkov,<sup>e</sup> E.N. Starkova,<sup>e</sup> D.M. Strelalina,<sup>f</sup> V. Tioukov,<sup>a</sup> E.D. Ursov,<sup>g</sup> A. Ustuzhanin,<sup>f,s</sup> S. Vasina,<sup>k</sup> R.A. Voronkov,<sup>e</sup> C.S. Yoon<sup>o</sup>

2) Модель УСКОРЕННЫХ при взаимодействии с космическими лучами частиц темной материи. Массы частиц DM существенно меньше. Рассмотрен сценарий упругого взаимодействия DM и CR. Cosmic Ray Boosted Dark Matter. Поиск направленного сигнала от Центра Галактики.



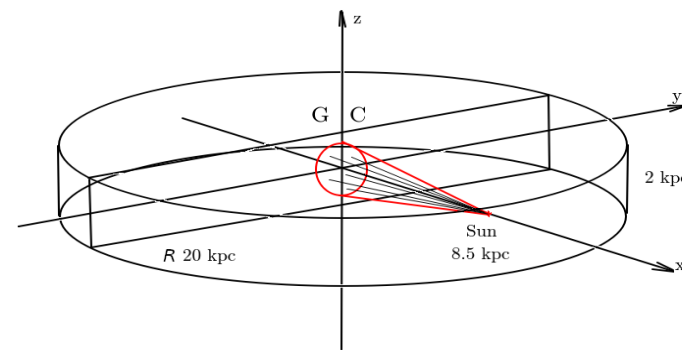
# Космические лучи — по данным GALPROP, темная материя - профиль Navarro-Frenk-White

$H^1, He^4, C^{12}, O^{16}, Ne^{20}, Mg^{24}, Si^{28}, S^{32}, Fe^{56}$  -95% of the flux from all CR nucleus

Cosmic Ray distributions:

GALPROP v.57,

CR Galactic disk is 40 kpc in diameter  
and 2 kpc thick, Nuclei: H1 to Ni64



DM profile: Navarro-Frenk-White (NFW)

$$\rho_{\chi}^{\text{nfw}}(r) = \rho_s / [(r/r_s)(1 + r/r_s)^2]$$

with  $r_s = 20 \text{ kpc}$  and

$$\rho_s = 0.35 \text{ GeV cm}^{-3}$$

Only elastic collisions,

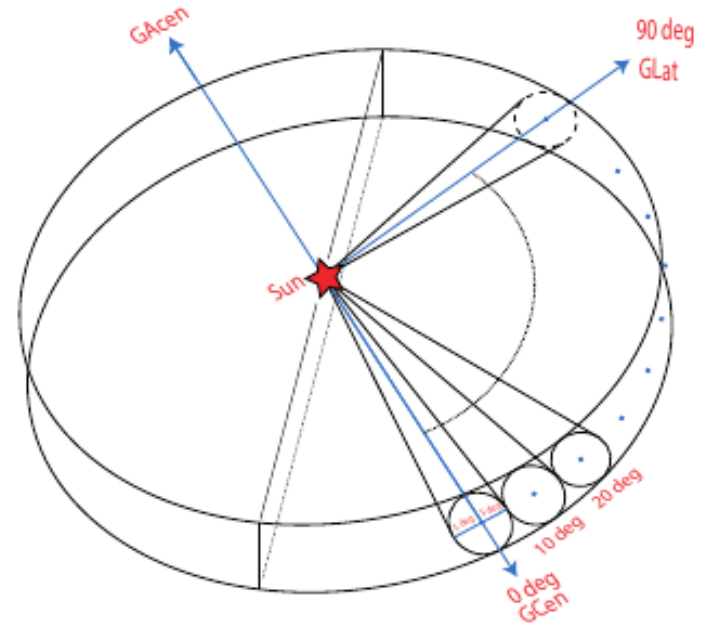
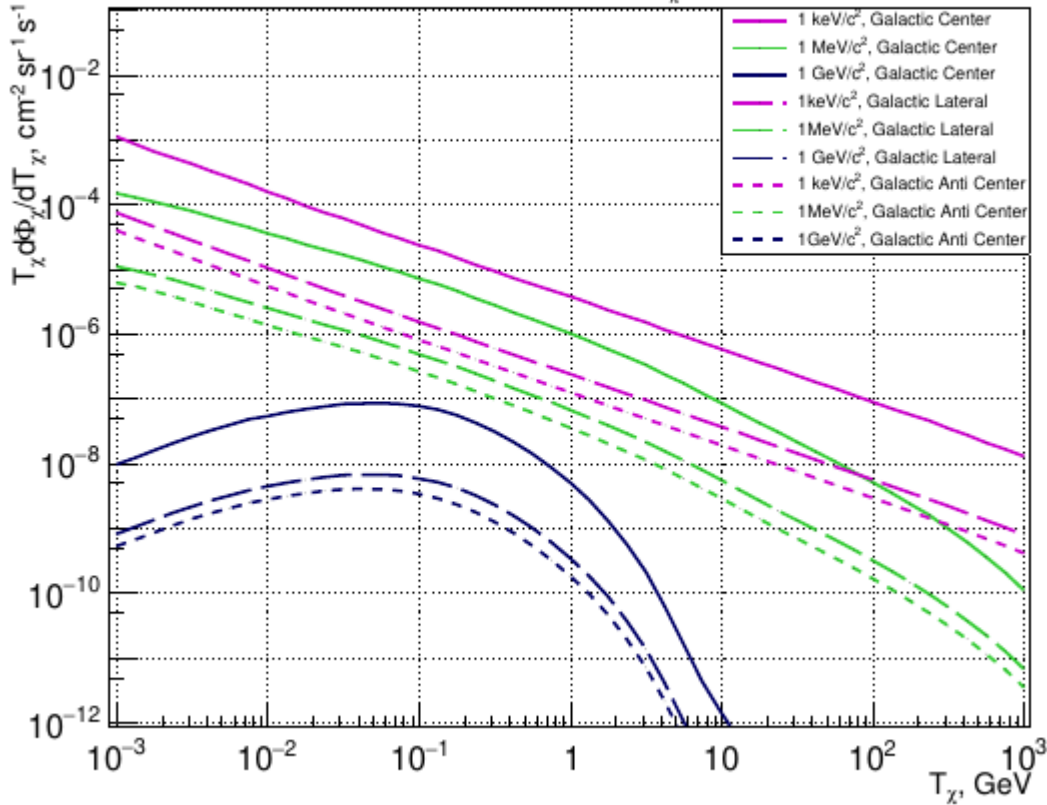
form factor accounted for

$$\frac{d\Phi_{\chi}}{dT_{\chi}} = \int_{\text{l.o.s}} dl \frac{\rho_{\chi}(\mathbf{r})}{m_{\chi}} \int_{T_i^{\text{min}}} dT_i \frac{d\sigma_{\chi i}}{dT_{\chi}} \frac{d\Phi_i(\mathbf{r})}{dT_i}$$



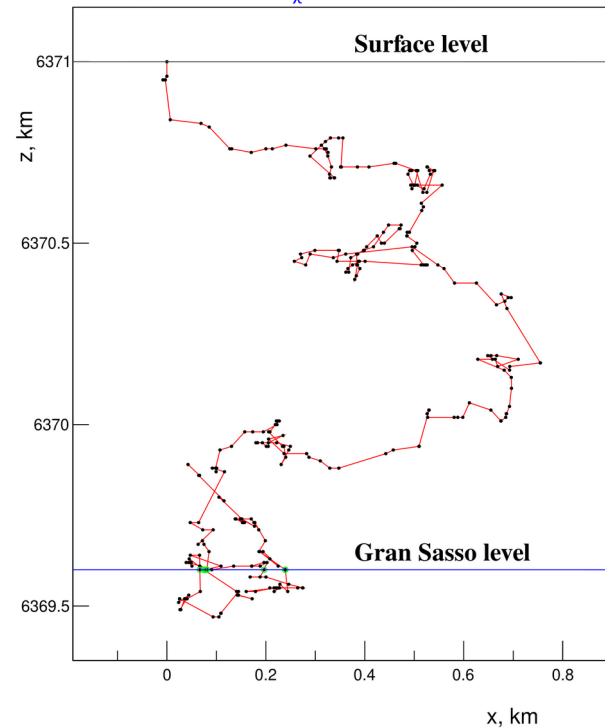
# Спектры CRDM в направлении GC, Glat, GAC

CRDM spectra,  $\sigma_{\chi p} = 10^{-30} \text{ cm}^2$ , GC, GLat, GAC,  $m_{\chi} = 1 \text{ keV}/c^2, 1 \text{ MeV}/c^2, 1 \text{ GeV}/c^2$

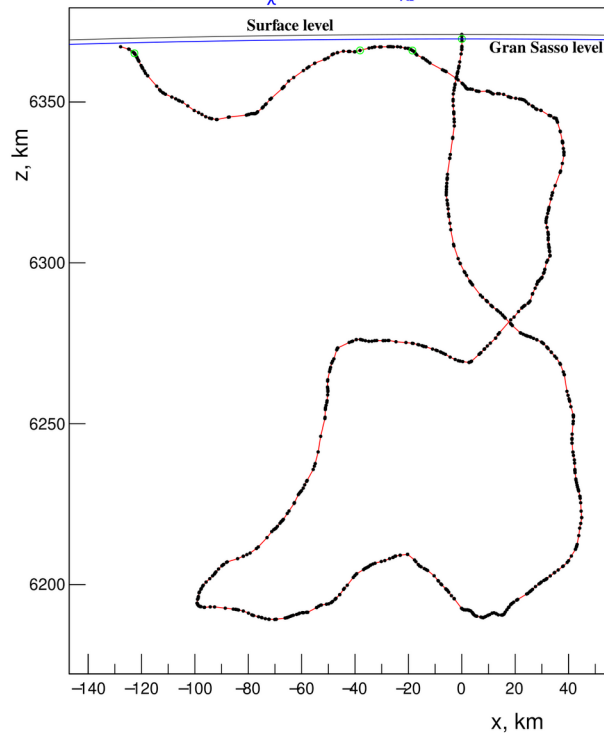


# Траектории частиц ТМ

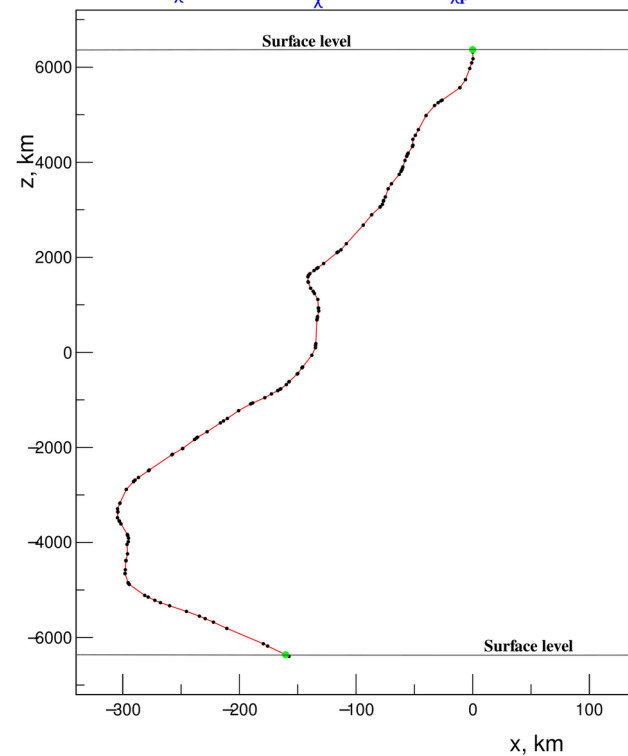
CRDM particle track inside the Earth  
 $T_\chi=100\text{MeV}$ ,  $m_\chi=100\text{MeV}$ ,  $\sigma_{\chi p}=10^{-28}\text{cm}^2$



CRDM particle track inside the Earth  
 $T_\chi=1\text{GeV}$ ,  $m_\chi=10\text{MeV}$ ,  $\sigma_{\chi p}=10^{-28}\text{cm}^2$



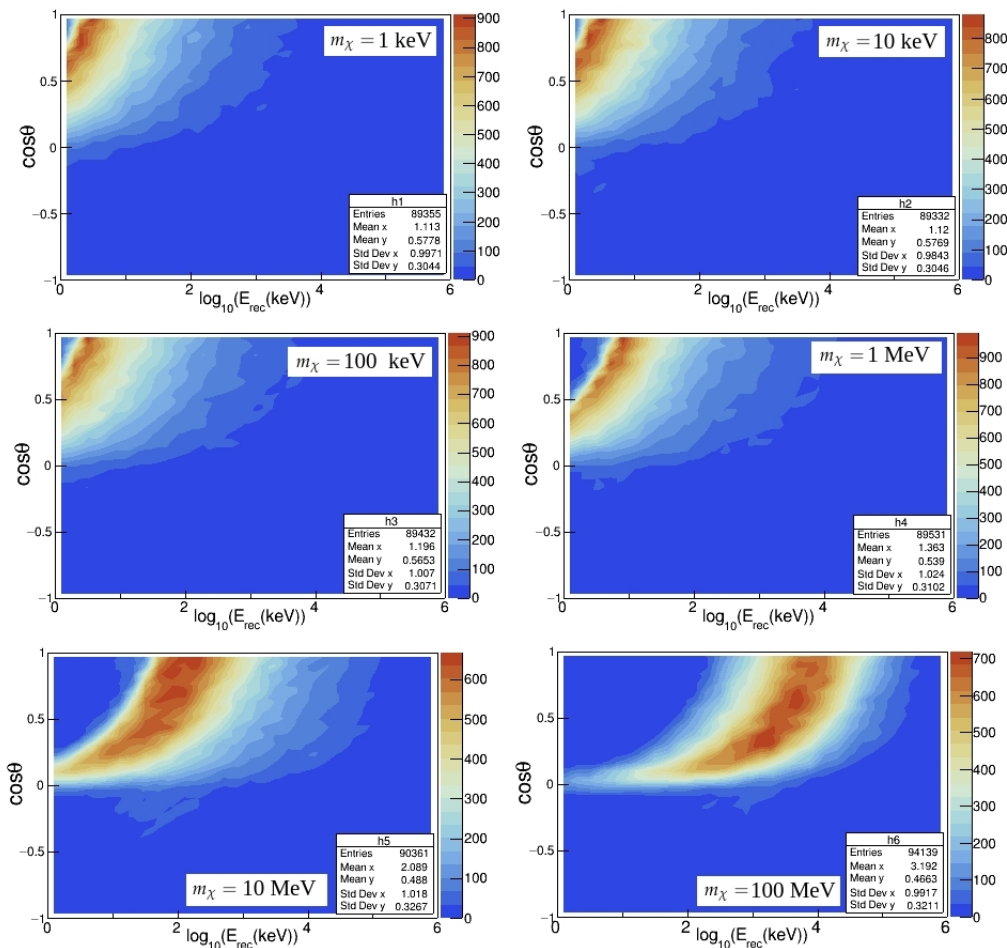
CRDM particle track inside the Earth  
 $T_\chi=10\text{GeV}$ ,  $m_\chi=10\text{MeV}$ ,  $\sigma_{\chi p}=10^{-28}\text{cm}^2$



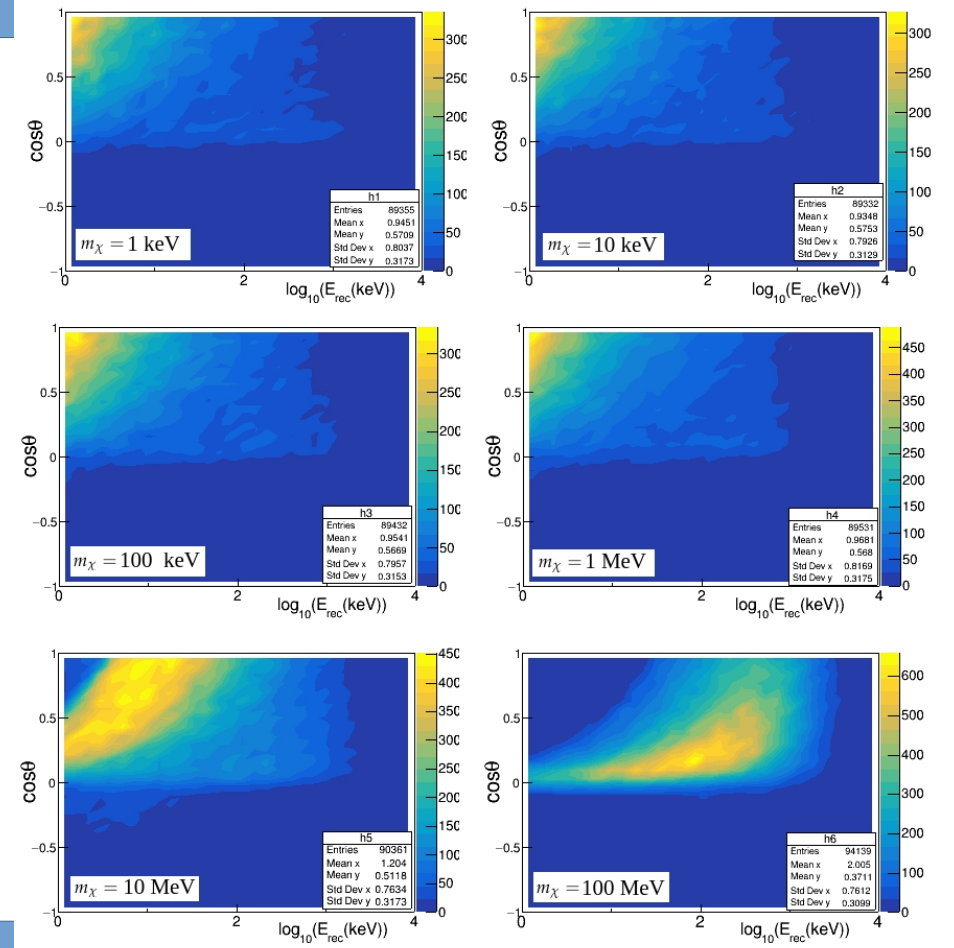
# Распределения ядер отдачи (H и C) по энергиям и направлениям.

Массы частиц темной материи: 1, 10, 100 keV, 1, 10, 100 MeV, 1GeV, на поверхности Земли, Assergi.

E -  $\cos\theta$  , H recoils, Assergi Level  $\sigma_{\chi p} = 10^{-28} \text{ cm}^2$

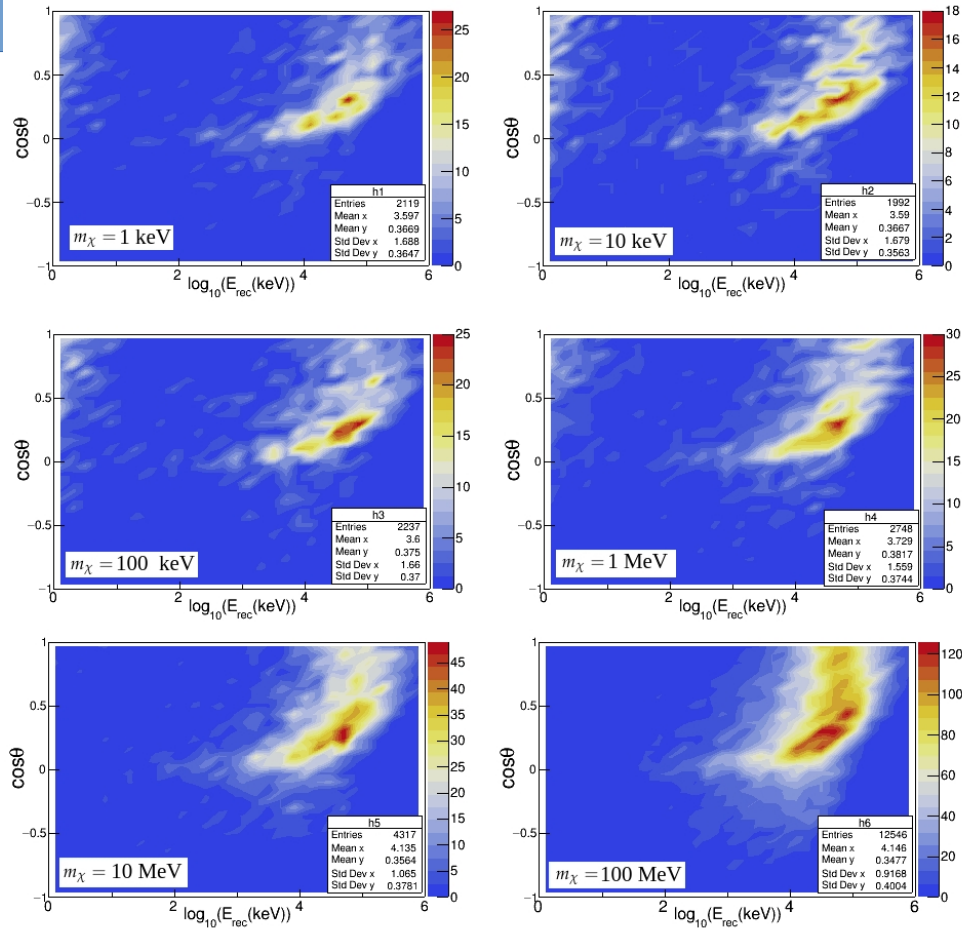


E -  $\cos\theta$  , C recoils, Assergi Level  $\sigma_{\chi p} = 10^{-28} \text{ cm}^2$

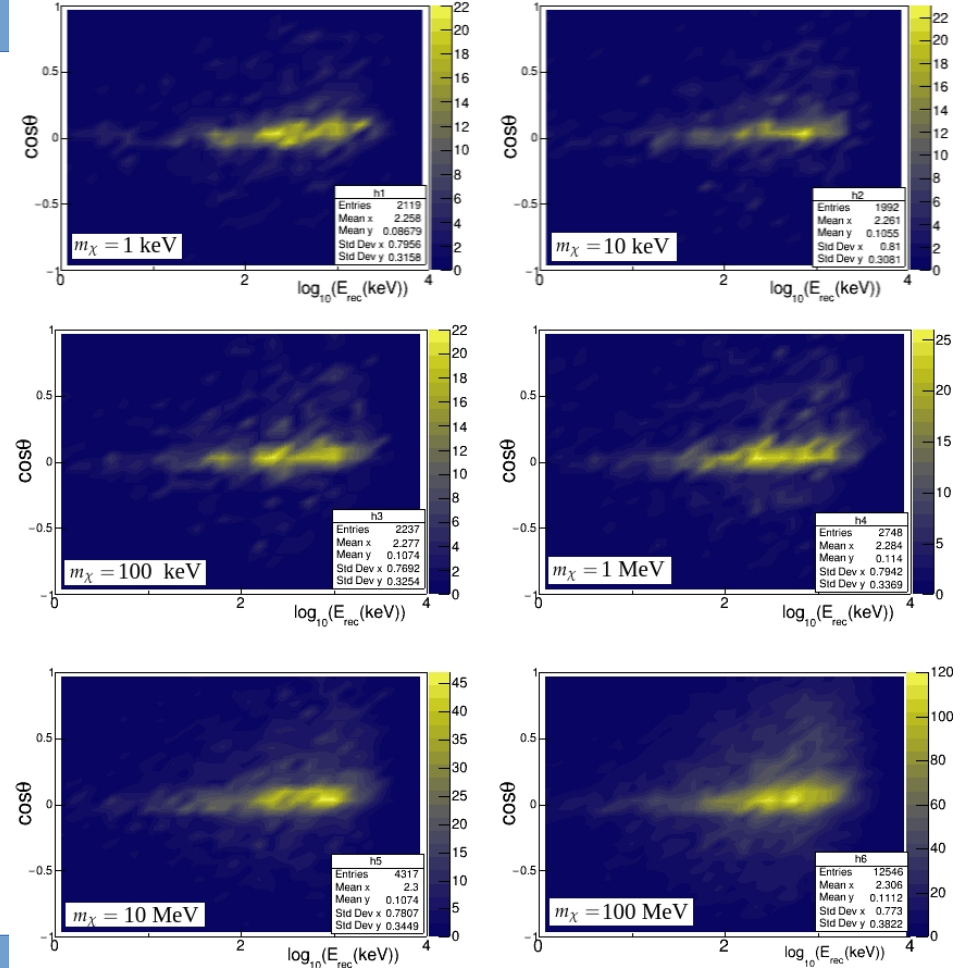


# Распределения ядер отдачи по энергиям и направлениям. Массы частиц темной материи: 1, 10, 100 keV, 1, 10, 100 MeV, 1GeV, на уровне подземной лаборатории Gran Sasso.

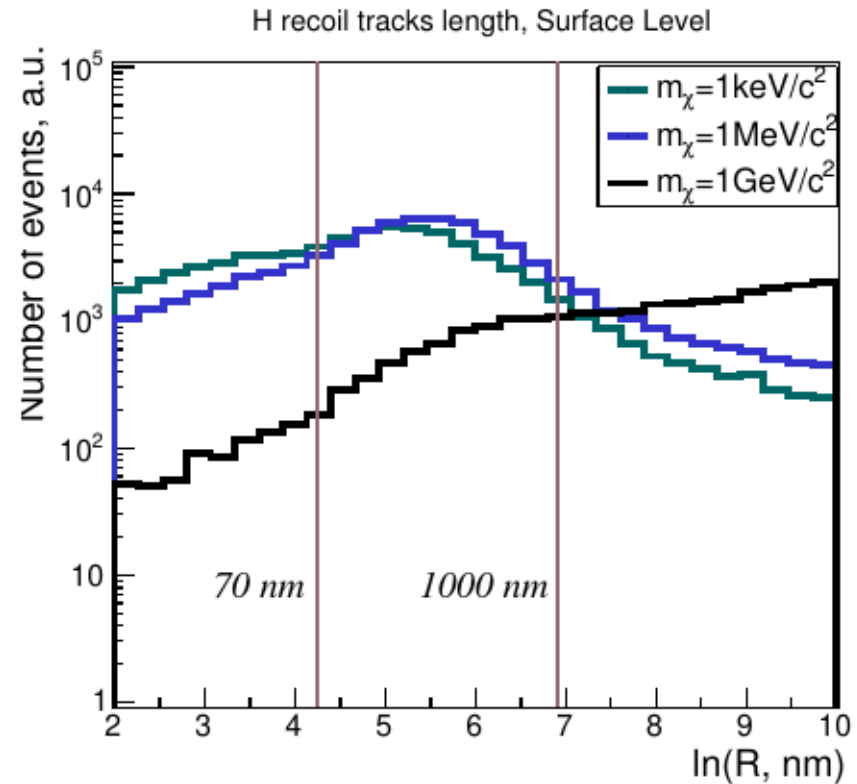
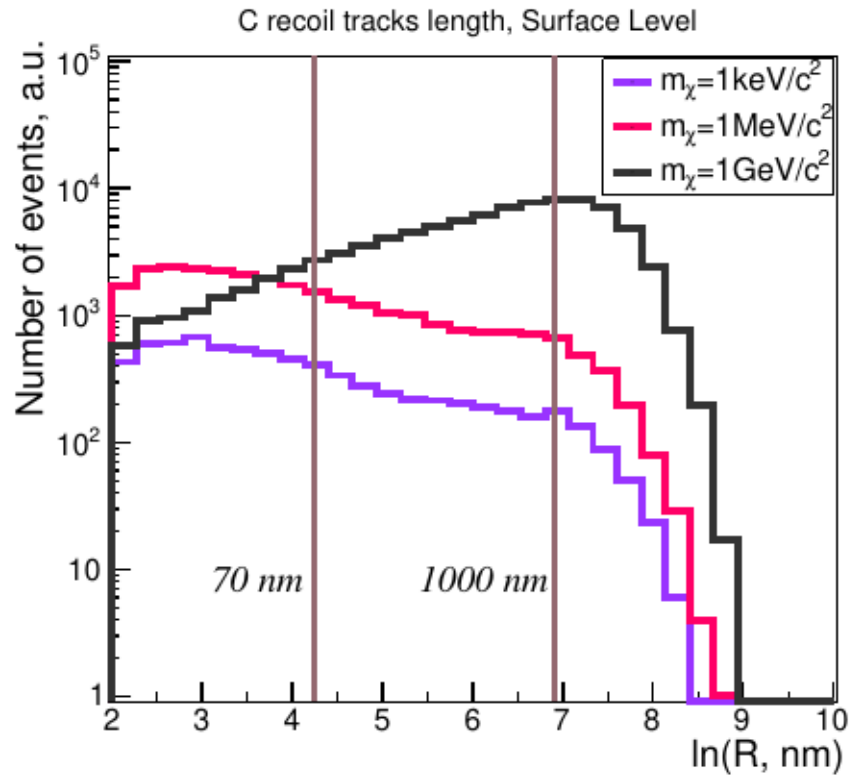
E -  $\cos\theta$  , H recoils, Underground Lab Level  $\sigma_{\chi p} = 10^{-28} \text{ cm}^2$



E -  $\cos\theta$  , C recoils, Underground Lab Level  $\sigma_{\chi p} = 10^{-28} \text{ cm}^2$



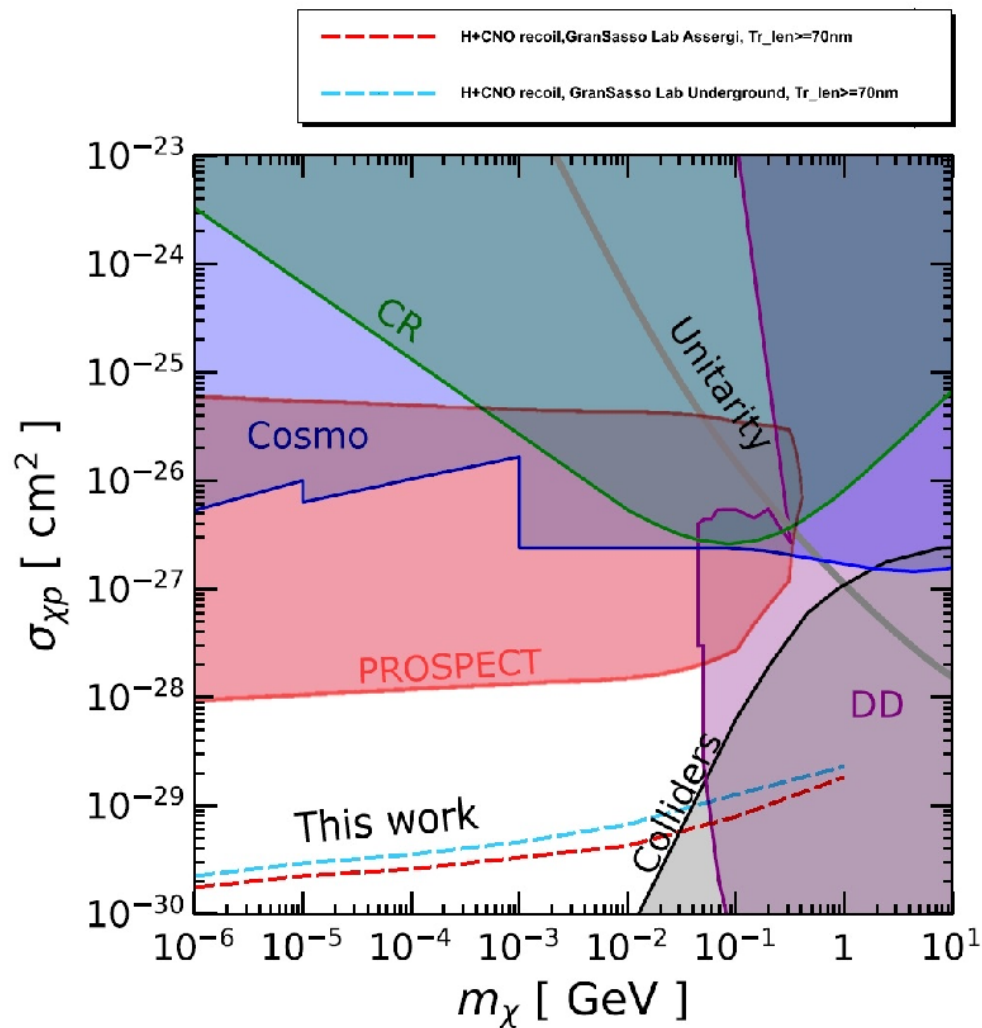
Распределения по длинам треков ядер отдачи С и Н ( для  $10^{*}5$  частиц DM на границе атмосферы). Уровень наблюдения — на поверхности Земли, Assergi.



Чувствительность 10 кг  
наноэмульсии для регистрации  
CRDM.

Пороговое значение длины трека  
70 нм. Ядра отдачи H и CNO.

Красный штрих —  
на Земле, Assergi,  
бирюзовый штрих —  
подземная лаб.



▶ Была рассмотрена модель ТЕМНОЙ МАТЕРИИ, взаимодействующей с частицами СМ посредством массивного темного фотона(медиатора), кинетически смешивающегося с  $\gamma/Z_0$ , удовлетворяющая диапазону сечений взаимодействия частицы темной материи с баритонным веществом

▶ Диапазон сечений:  $\sigma_{\chi p} = 10^{-30}$  до  $\sigma_{\chi p} = 10^{-28}$

▶ Параметры для подбора следующие:

▶  $\sigma_{N \rightarrow \chi N}^V(\epsilon, \alpha', m_V, m_\chi)$ , где эpsilon - константа кинетического смешивания

▶ Альфа - константа взаимодействия с ТМ

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_\chi - \frac{1}{4} V_{\mu\nu} V^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_V^2 V_\mu V^\mu - \frac{\epsilon}{2} V^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + q_B g' V_\mu J_B^\mu + \dots$$

$$\mathcal{L}_\chi = \begin{cases} i\bar{\chi} \not{D}\chi - m_\chi \bar{\chi}\chi, & \text{(Dirac fermion DM)} \\ |D_\mu \chi|^2 - m_\chi^2 |\chi|^2, & \text{(Complex scalar DM)} \end{cases}$$

## Light dark matter in neutrino beams: production modelling and scattering signatures at MiniBooNE, T2K and SHiP

Patrick deNiverville,<sup>1</sup> Chien-Yi Chen,<sup>1,2</sup> Maxim Pospelov,<sup>1,2</sup> and Adam Ritz<sup>1</sup>

$$\frac{d\sigma_{N \rightarrow \chi N}^V}{dE_\chi} = \frac{\alpha' \kappa^2}{\alpha} \times \frac{4\pi\alpha^2 [F_{1,N}^2(Q^2)A(E, E_\chi) - \frac{1}{4}F_{2,N}^2(Q^2)B(E, E_\chi)]}{(m_V^2 + 2m_N(E - E_\chi))^2(E^2 - m_\chi^2)},$$

где  $E$  и  $E_\chi$  - энергии ТМ до и после взаимодействия

$$Q^2 = 2m_N(E - E_\chi) \quad F_{1,N} = q_N / (1 + Q^2/m_N^2)^2$$

$$F_{2,N} = \kappa_N / (1 + Q^2/m_N^2)^2$$

$$q_p = 1, q_n = 0, \kappa_p = 1,79, \kappa_n = -1,9.$$

$$A(E, E_\chi) = 2m_N E E_\chi - m_\chi^2 (E - E_\chi),$$

$$B(E, E_\chi) = (E_\chi - E)[(E_\chi + E)^2 + 2m_N(E_\chi - E) - 4m_N^2]$$

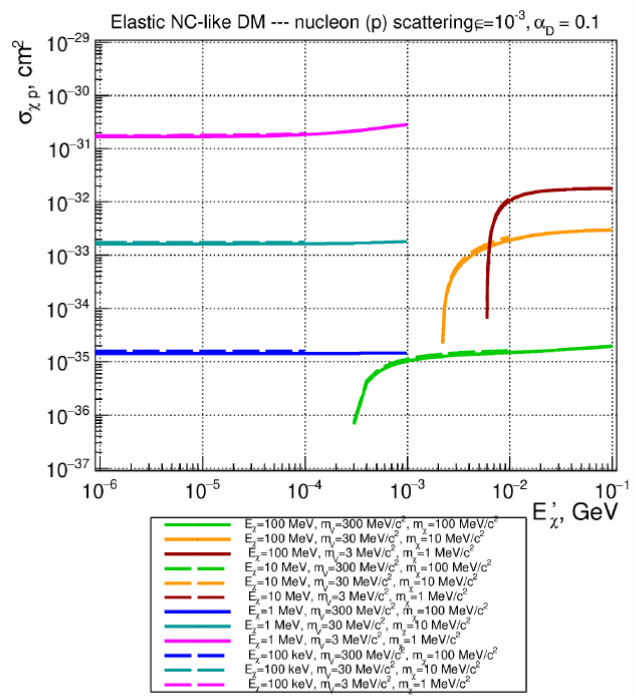
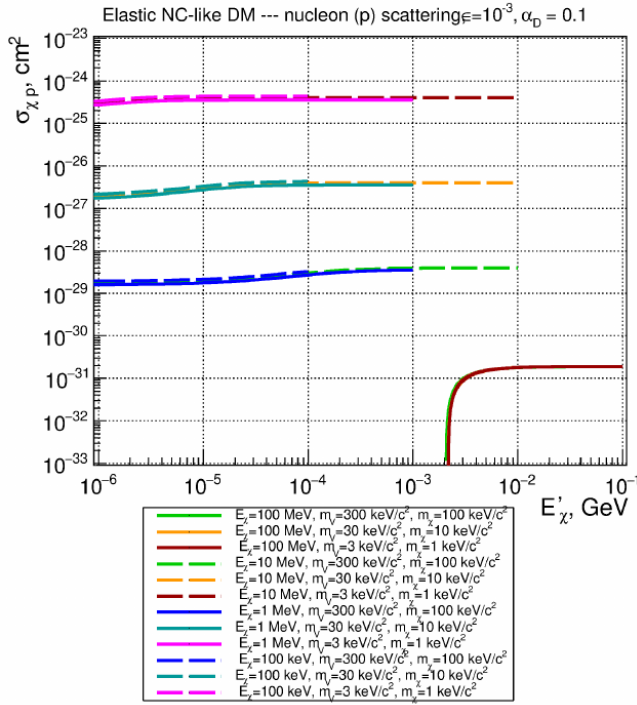
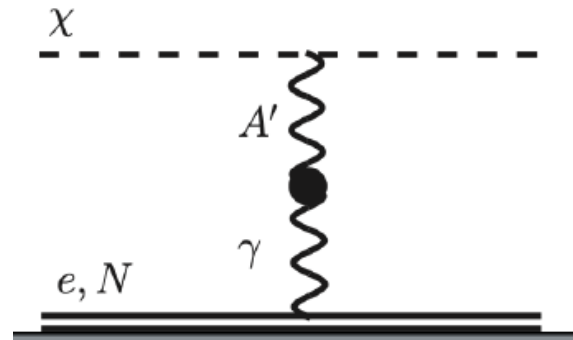


Рис. 6.3: Полное сечение упругого взаимодействия  $\sigma_{\chi p}$  в зависимости от кинетической энергии рассеянной частицы темной материи  $E'_\chi$ . Для масс  $m_\chi = 1, 10, 100 \text{ кэВ}/c^2$  и энергий до рассеяния  $E_\chi = 0.1, 1, 10$  и  $100 \text{ МэВ}$ .

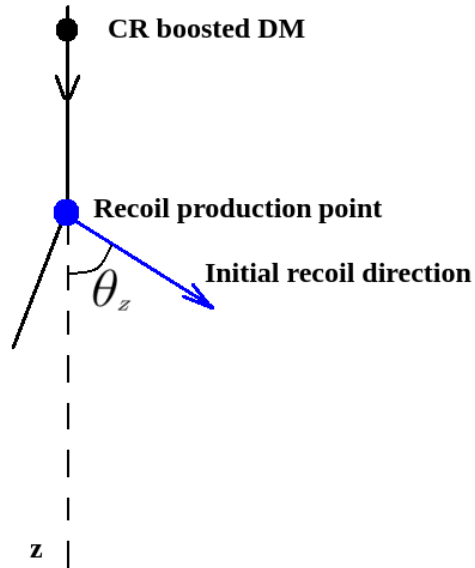
Рис. 6.4: Полное сечение упругого взаимодействия  $\sigma_{\chi p}$  в зависимости от кинетической энергии рассеянной частицы темной материи  $E'_\chi$ . Для масс  $m_\chi = 1, 10, 100 \text{ МэВ}/c^2$  и энергий до рассеяния  $E_\chi = 0.1, 1, 10$  и  $100 \text{ МэВ}$ .



# Возможны ли направленные наблюдения ?

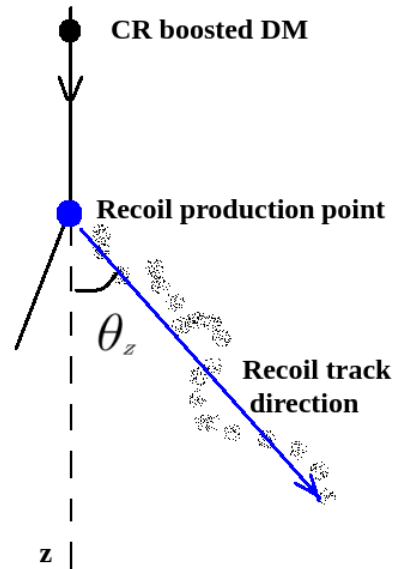
Cross section  $\sigma_{\chi p} = 10^{-28} \text{ cm}^2$  is considered as an example, the final result is made for  $\sigma = 10^{-28}, 10^{-29}, 10^{-30} \text{ cm}^2$

Galactic Center



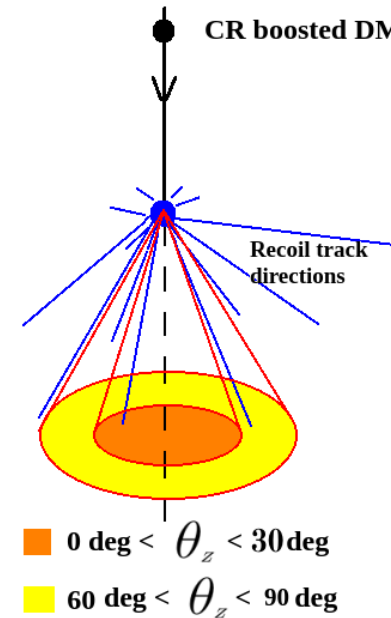
1. H and C recoil production in the elastic Interaction with boosted DM

Galactic Center



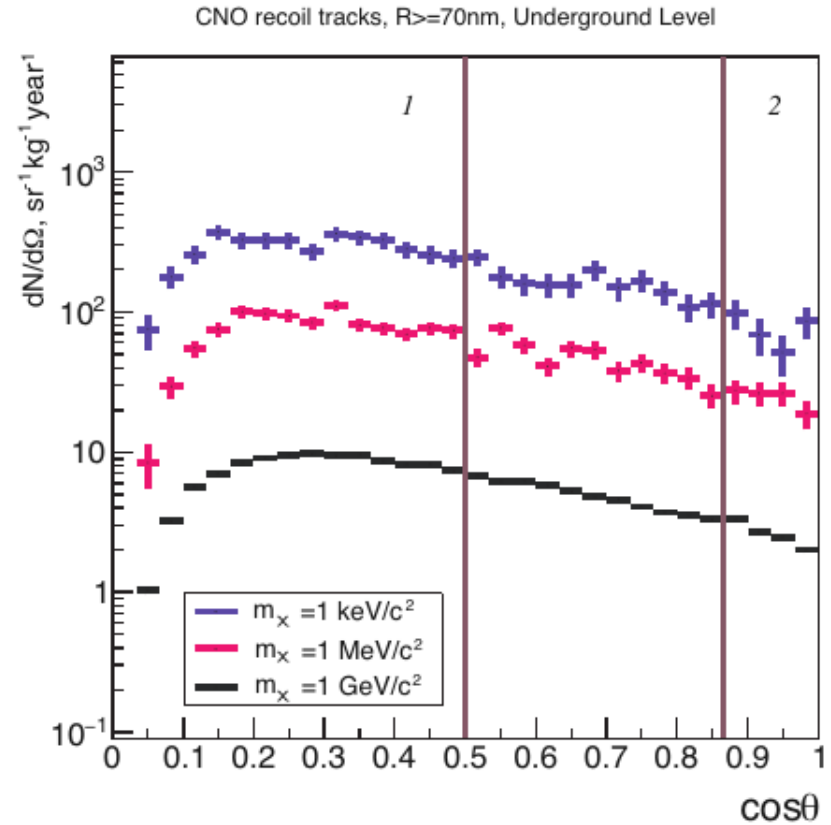
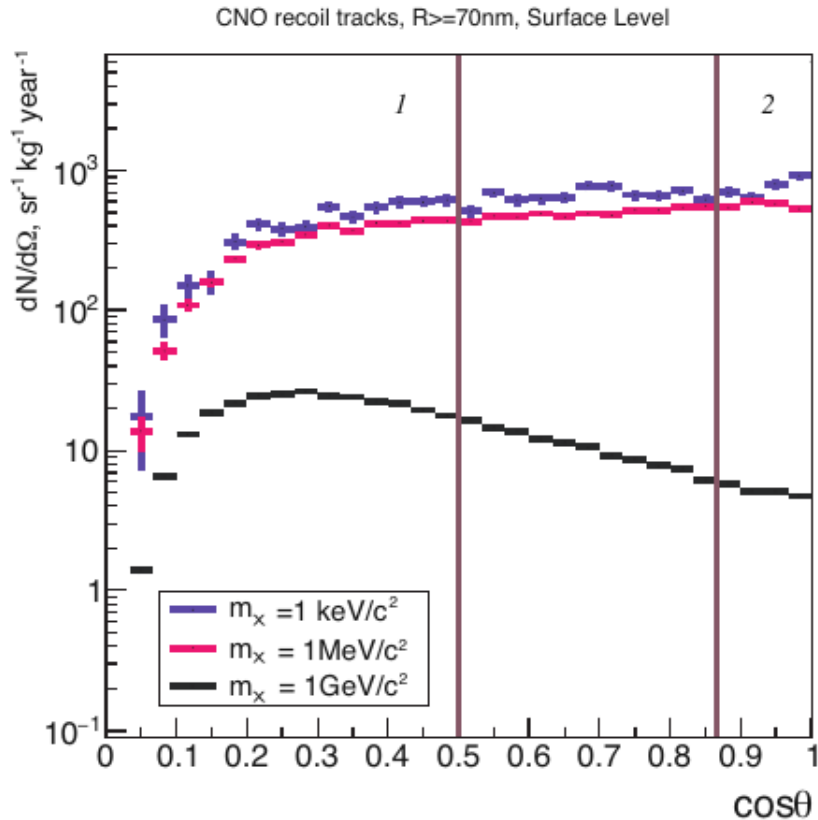
2. H and C recoil tracking with GEANT4 in the emulsion

Galactic Center



3. As an example, the number of events in two angle ranges was compared.

# Угловые распределения ядер отдачи (CNO) на поверхности Земли и на уровне подземной лаборатории GranSasso

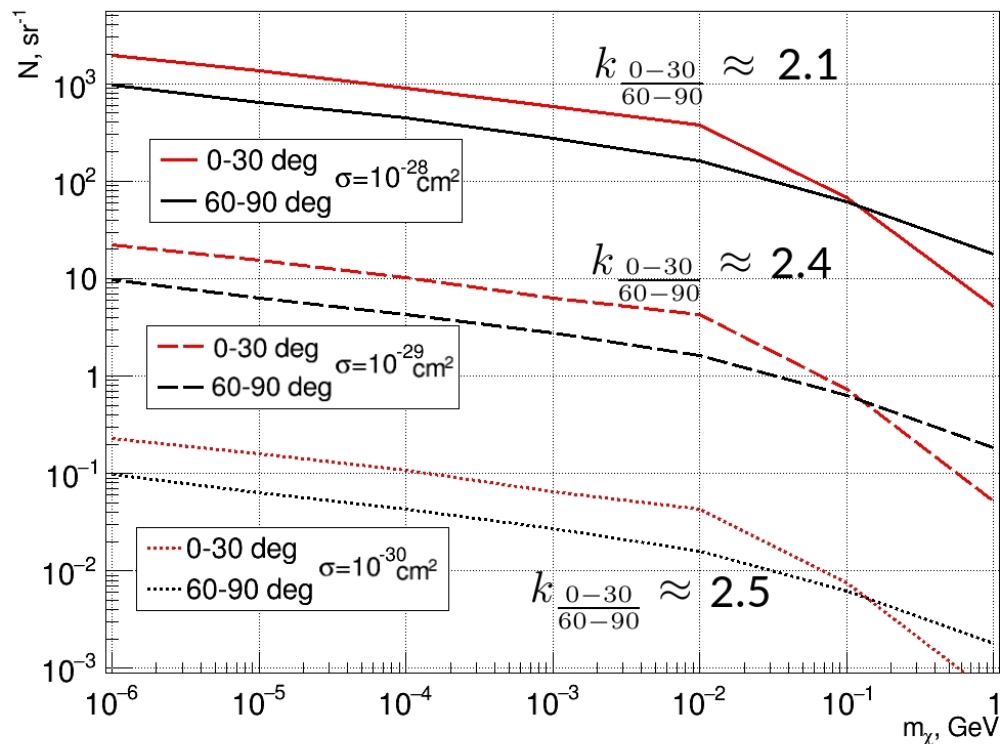


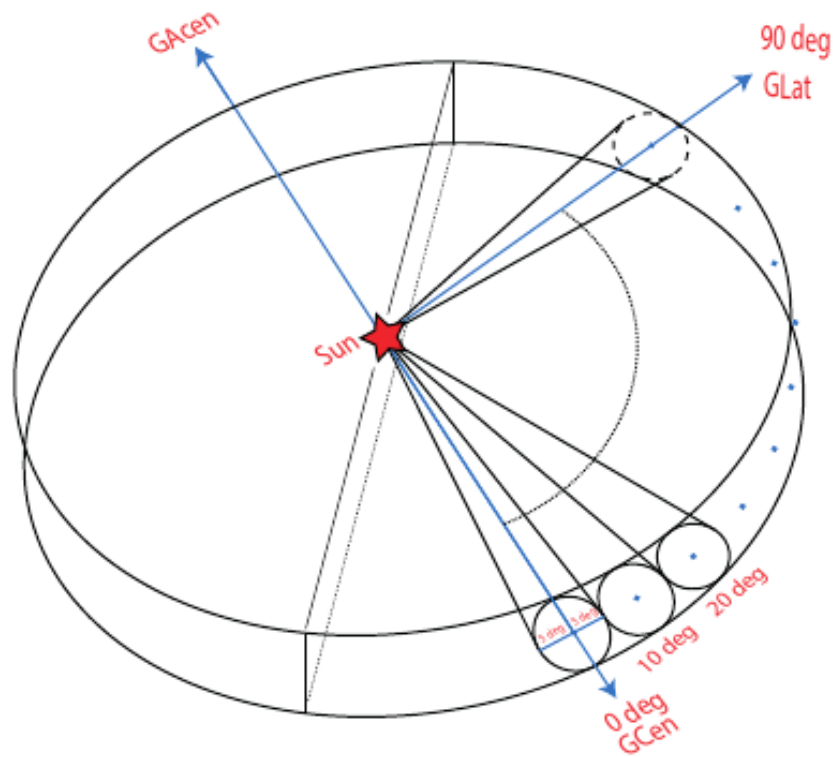
Направленность треков ядер отдачи для трех вариантов сечения (DM-p), для масс частиц DM (1,10,100keV, 1,10,100MeV,1GeV).

Уровень Земли (Assergi).

Вывод: направленные треки имеет смысл рассматривать для диапазона масс DM 1 keV — 10 MeV.

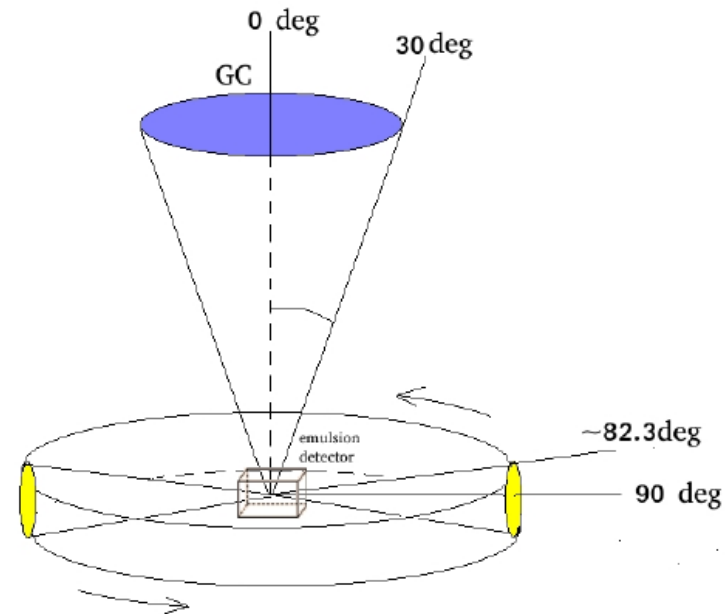
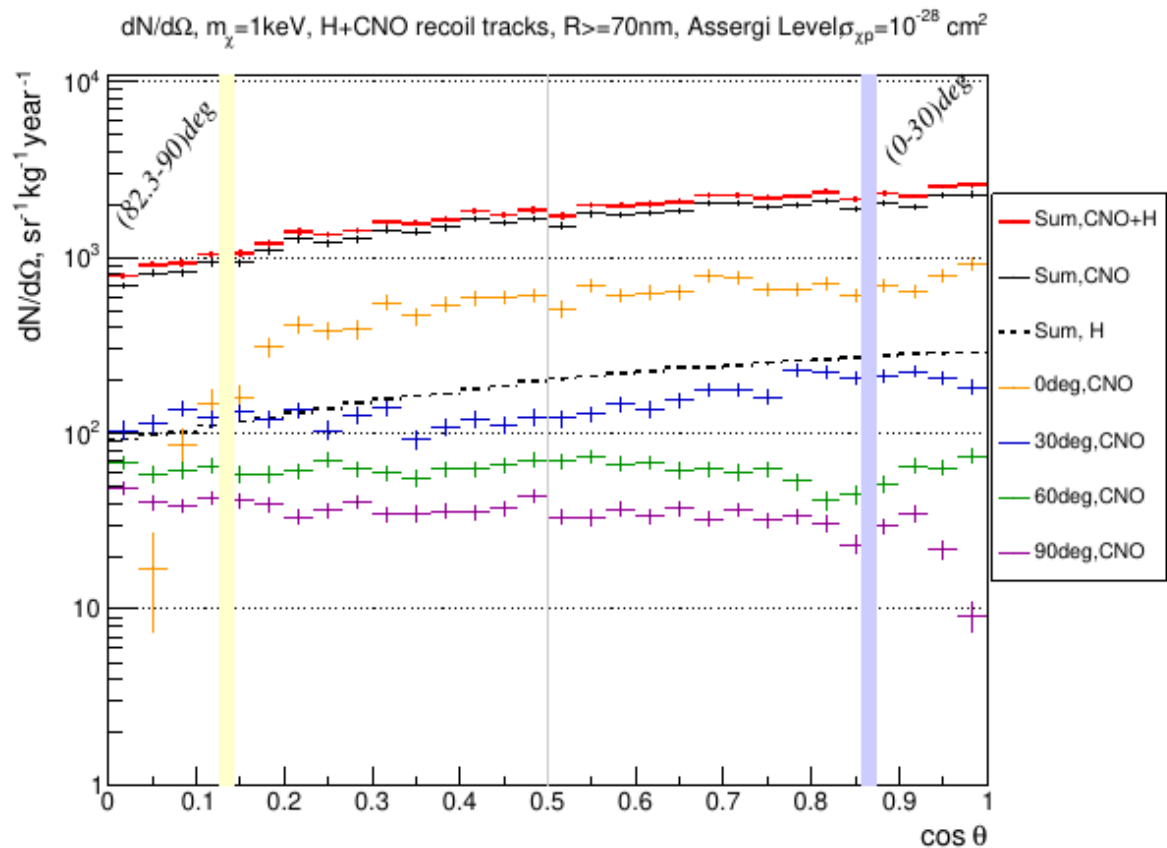
CRDM H+CNO recoils directional events (10 kg emulsion, 1 year), Assergi Level, (0 - 30) & (60 - 90)deg





. CRDM flux calculation scheme from GC to GLat direction.

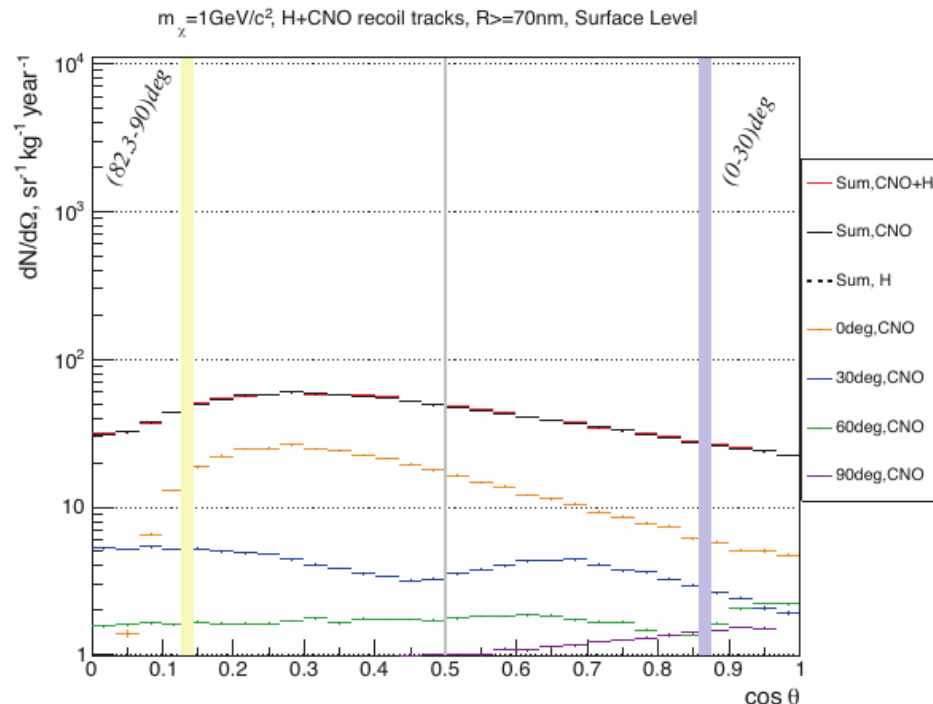
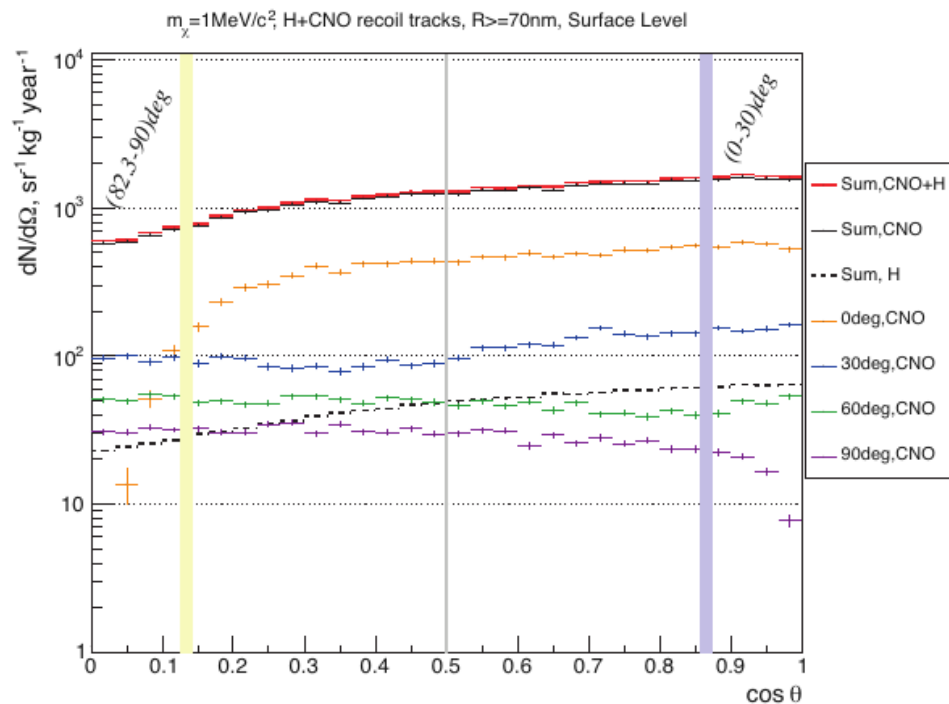
# Сравнение количества треков ядер отдачи по направлению на Центр Галактики и в перпендикулярном направлении (в плоскости Галактики).



# Сравнение количества треков ядер отдачи по направлению на Центр Галактики и в перпендикулярном направлении (в плоскости Галактики).

Table 1.

DM mass	$N_{0-3}$	$N_{26-29}$	$\frac{N_{26-29}}{N_{0-3}}$
$1 \text{ keV}/c^2$	2319.8	8158.5	3.5
$1 \text{ MeV}/c^2$	1820.2	6531.2	3.6
$1 \text{ GeV}/c^2$	100.9	102.4	1.0



Спасибо за  
внимание !