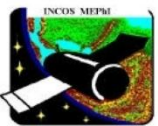


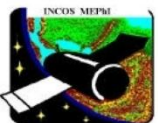
Поиск гипотетических частиц темной материи (эксперимент)

А.М. Гальпер
(ИЯЯУ МИФИ)



Проявление темной материи в различных астрофизических объектах

- **измерение орбитальных скоростей периферийных объектов галактик и галактических кластеров;**
- **гравитационное линзирование;**
- **рентгеновское свечение галактик, скоплений галактик;**
- **пространственная анизотропия реликтового радиоизлучения.**



Космологические параметры



$$\Omega_{\text{total}} = \frac{\rho_{\text{total}}}{\rho_{\text{crit.}}} = 1$$

(Universe is flat)

$$\rho_{\text{crit.}} = \frac{3H^2(t)}{8\pi G}$$

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\Lambda} + \Omega_{\text{M}}$$

$\sim 72\% \quad \sim 23\%$

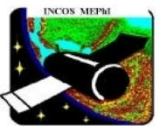
$$\Omega_{\text{M}} = \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\text{B}}$$

$\sim 5\%$

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{b}} + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\text{DE}}$$

stars, galaxies ?? candidates ??? quintessence

Измерение постоянной Хаббла	$H = 71 \pm 4 \text{ км/с 1/Мпк}$
Измерение температуры реликтового излучения	$T_r = 2,725 \text{ K}$
Определение возраста Вселенной	$t_u = (13,7 \pm 0,2) * 10^9 \text{ лет}$
Переход в радиационную фазу	$t_r \sim 4 * 10^5 \text{ лет}$



Уравнение Больцмана для изменения плотности n_x ВИМПов во времени в Галактике



$$\frac{dn_x}{dt} = -3Hn_x - (n_x^2 - n_x^{eq,2}) \langle \sigma_{ann} v \rangle$$

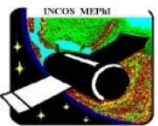
$$n_{eq} \propto (mT)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-m_x c^2}{kT}}$$

$$\Omega_x = \frac{n_x(t_0)m_x}{\rho_c(t_0)} = \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}}{\langle \sigma_{ann} v \rangle h^2}$$

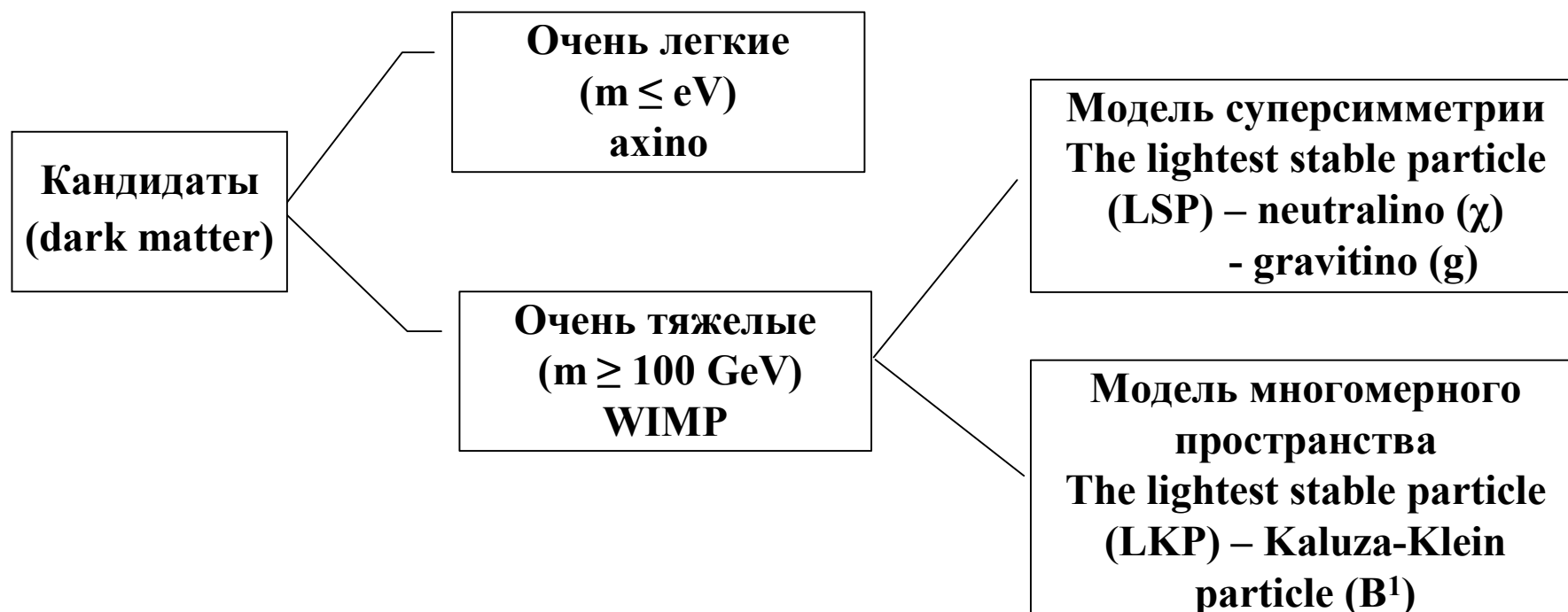
$$\Omega_\chi = \Omega_{\text{DM}} \simeq 0.23$$

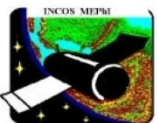
$$\langle \sigma v \rangle \simeq 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\langle \sigma v \rangle \simeq \frac{\alpha_{EW}^2}{M^2} \quad \text{for } M \leq 120 \text{ TeV}$$



Кандидаты на роль частиц темной материи





Прямые методы

Регистрация взаимодействия слабовзаимодействующих массивных частиц с обычным веществом.

Рождение частиц темной материи на ускорителях

Косвенные методы

Регистрация продуктов аннигиляции WIMP

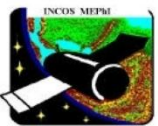
$$B_{kk} + B_{kk} \rightarrow \underline{\gamma} + \gamma, \nu + \nu, e^+ + e^- \dots$$

$$\chi + \chi \rightarrow b\bar{b}, t\bar{t}, \tau^+ \tau^-, Z^0 Z^0, Z^0 \gamma, W^+ W^-, HH \rightarrow \\ \rightarrow \gamma + \dots, \nu + \dots, e^\pm + \dots, p\bar{p} + \dots, d\bar{d} + \dots$$

Регистрация продуктов распада WIMP

$$B_{kk} \rightarrow l^+ l^-; Z^0 Z^0; W^+ W^-$$

$$\chi \rightarrow l^+ l^- \nu; Z^0 \nu; W^\pm l^\pm$$



Принцип регистрации частиц темной материи при упругих столкновениях с веществом детекторов в подземных установках

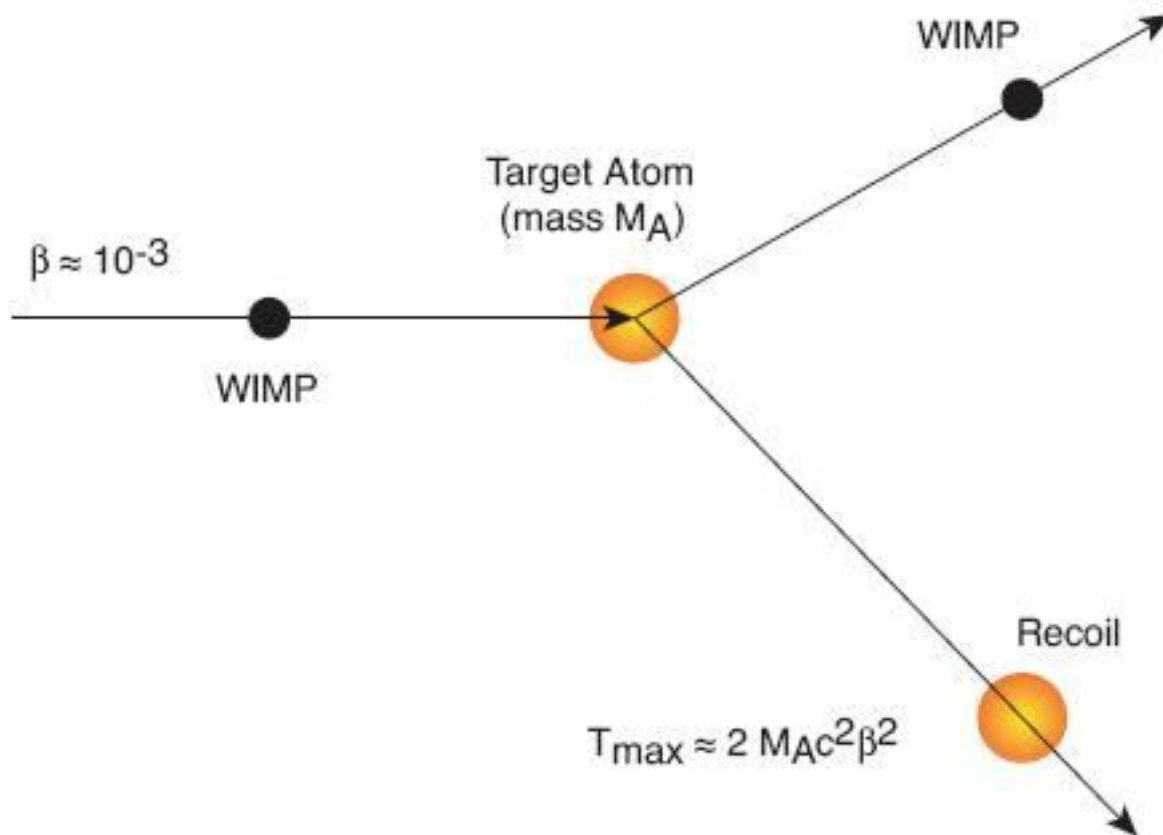


Иллюстрация появления годовых модуляций темпов счета подземных установок

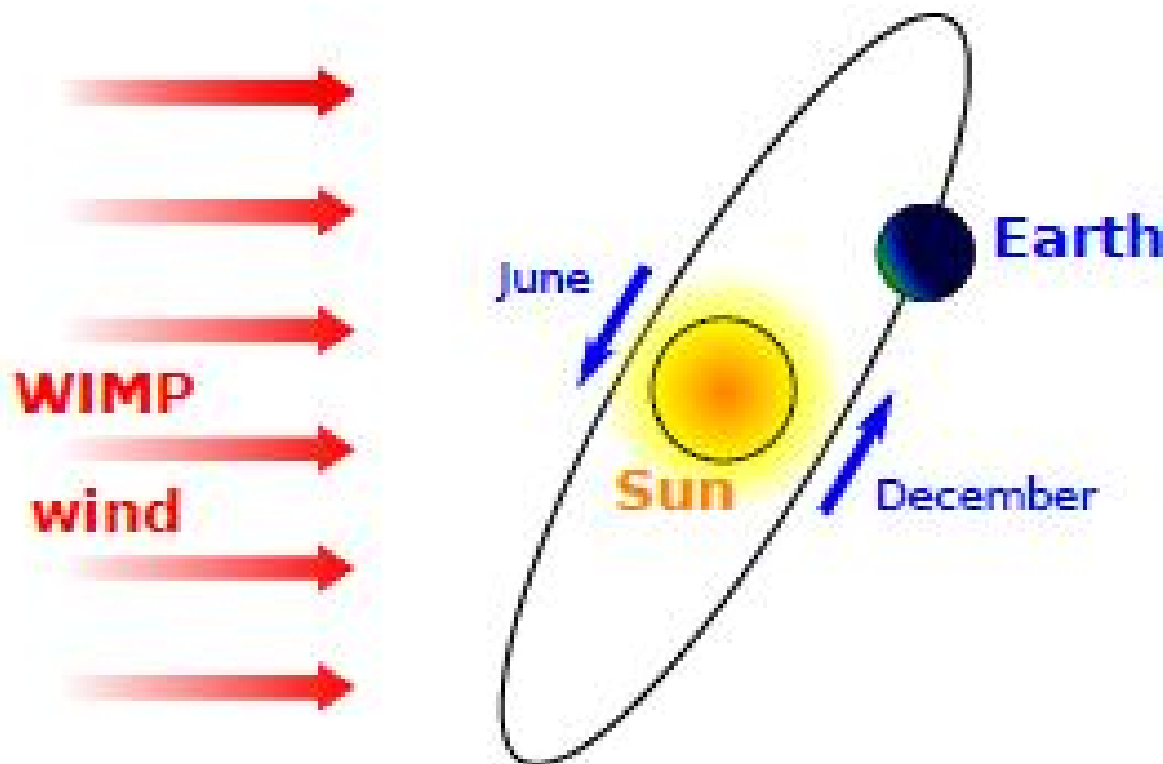
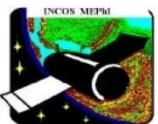
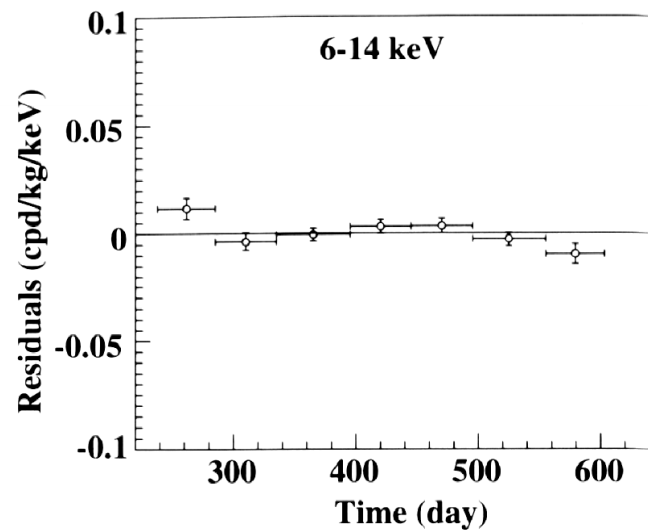
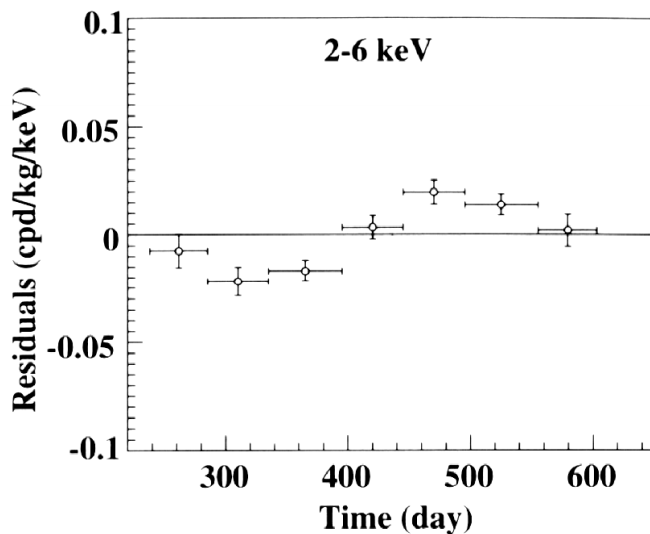


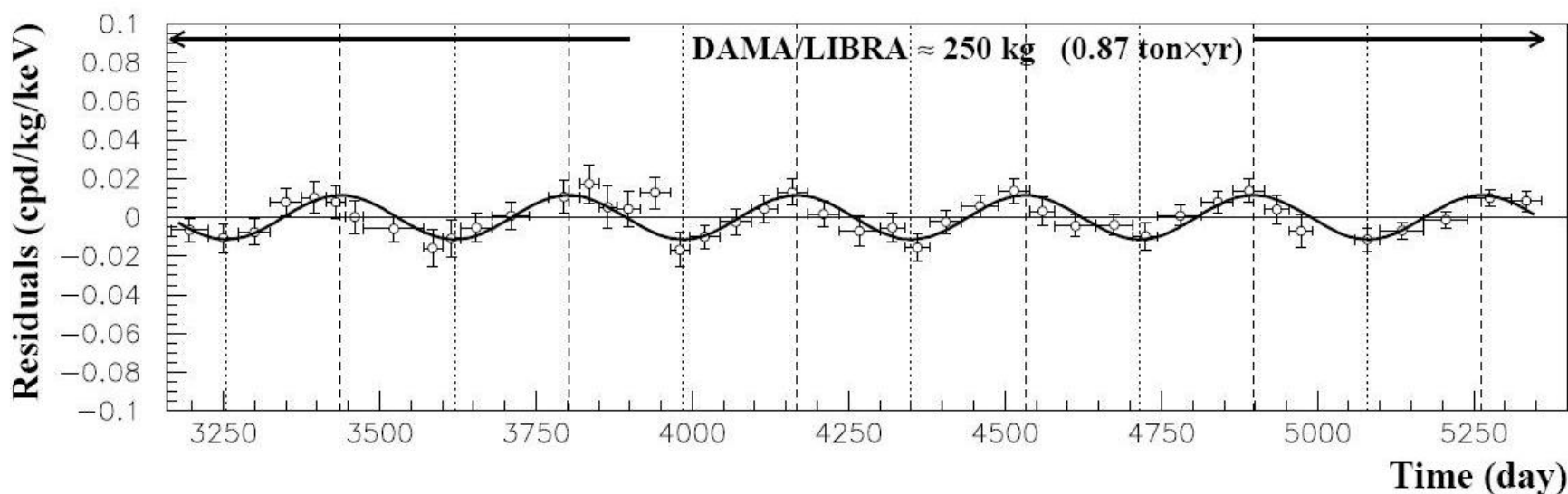
FIG. 1: A simplified view of the WIMP velocities as seen from the Sun and Earth. Due to the rotation of the Galactic Disk (containing the Sun) through the essentially non-rotating dark matter halo, the solar system experiences an effective "WIMP wind." From the perspective of the Earth, the wind changes throughout the year due to the Earth's orbital motion: the wind is at maximum speed around the beginning of June, when the Earth is moving fastest in the direction of the disk rotation, and at a minimum speed around the beginning of December, when the Earth is moving fastest in the direction opposite to the disk rotation. The Earth's orbit is inclined at $\sim 60^\circ$ relative to the plane of the Disk.

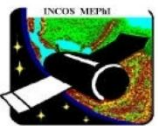


Годовые модуляции темпа счета установки DAMA/Libra



2-6 keV





Ограничение сечения взаимодействия – массы по данным подземных экспериментов

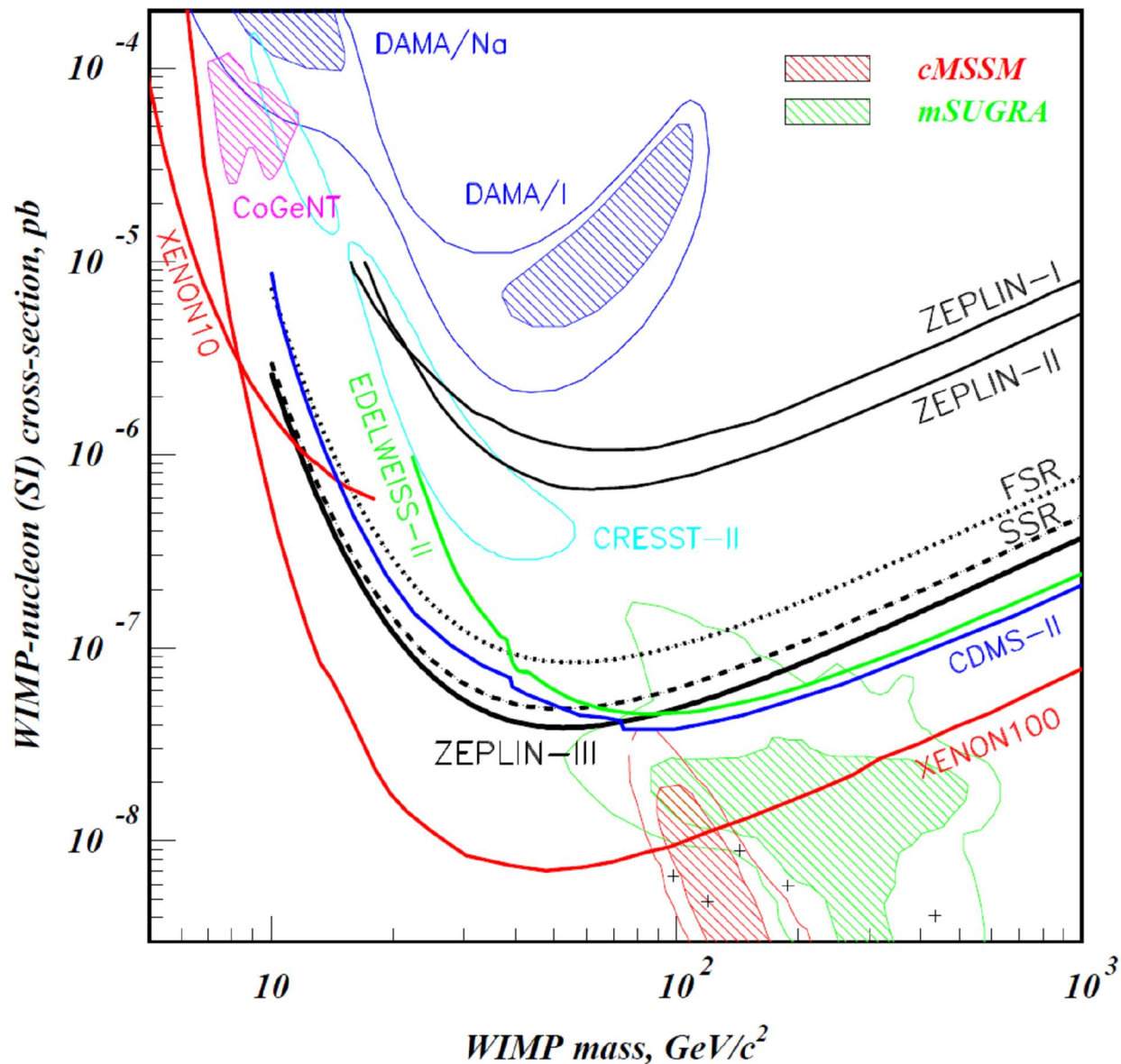
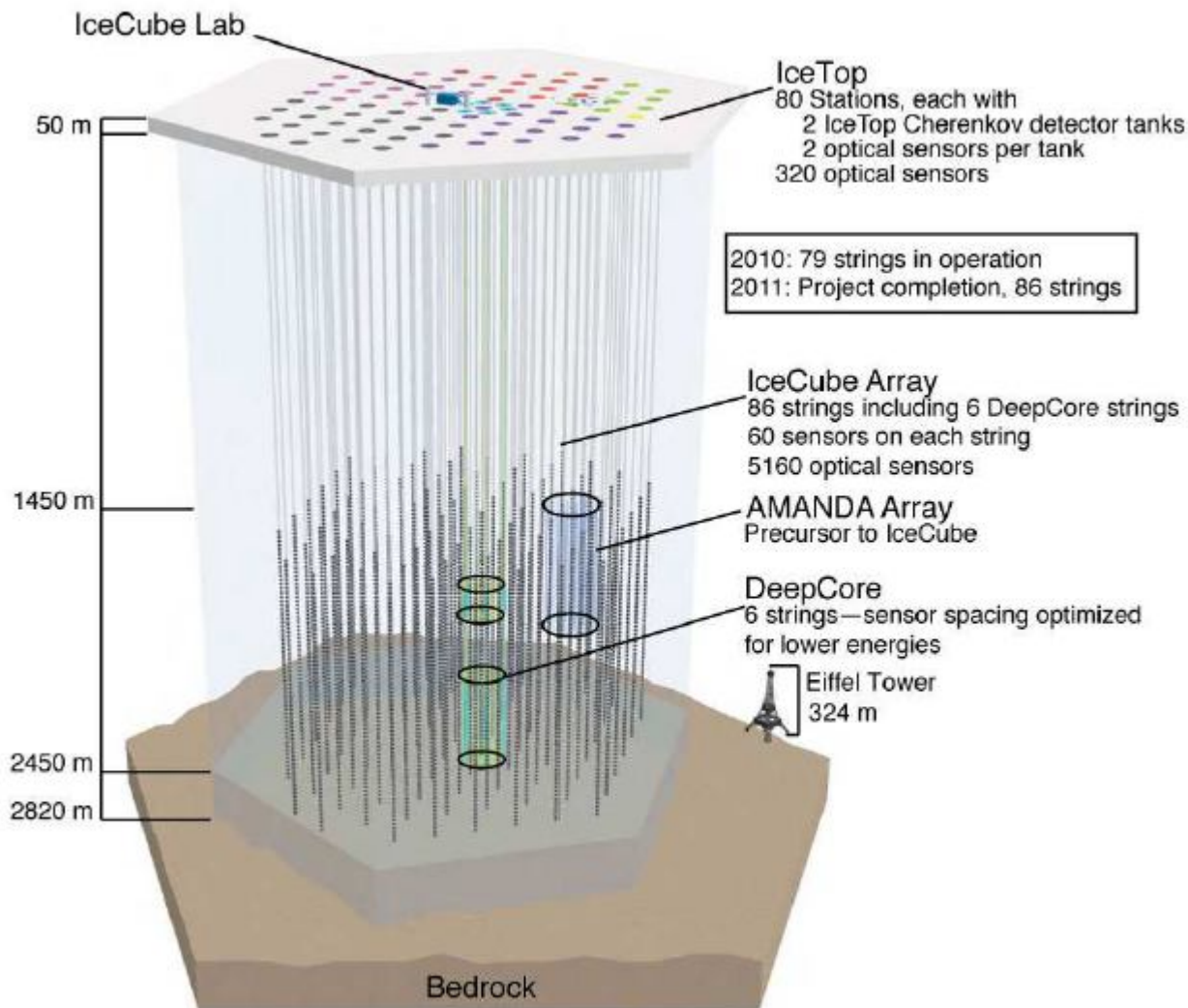
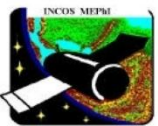


Схема нейтринного эксперимента IceCube





Общий вид спектрометра «ПАМЕЛА»



Диапазон энергий:

протоны, антипротоны 0.08-150 ГэВ

электроны, позитроны 0.05-200 ГэВ (до 10^{13} эВ)

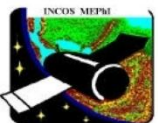
ядра, антиядра 0.1-200
ГэВ/нуклон

Масса 450 кг

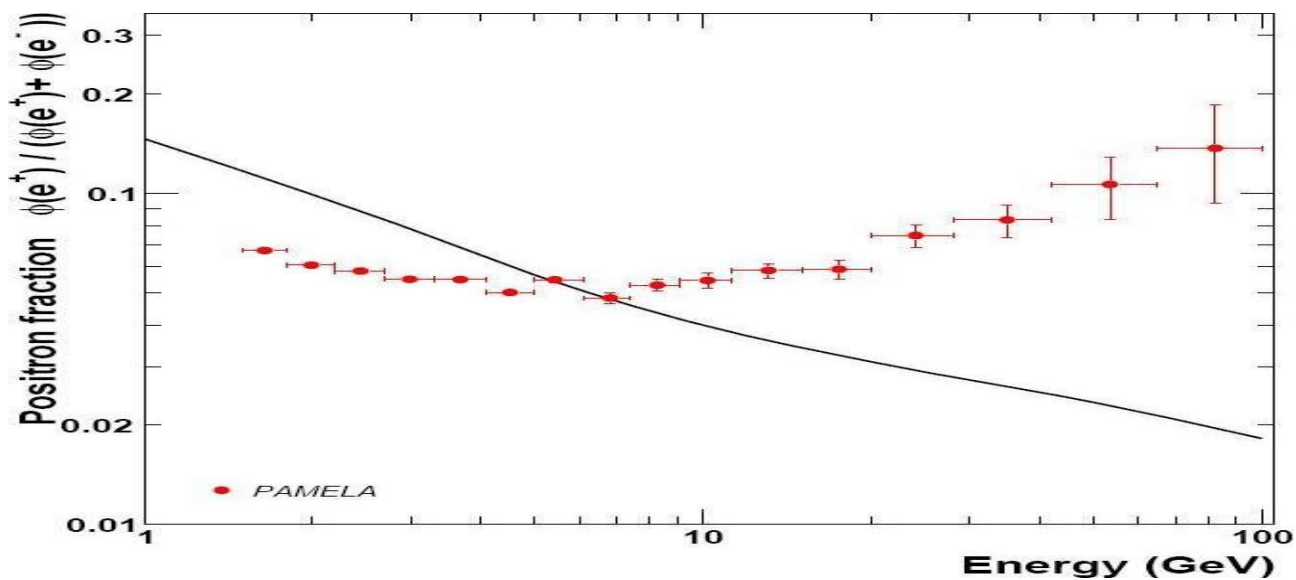
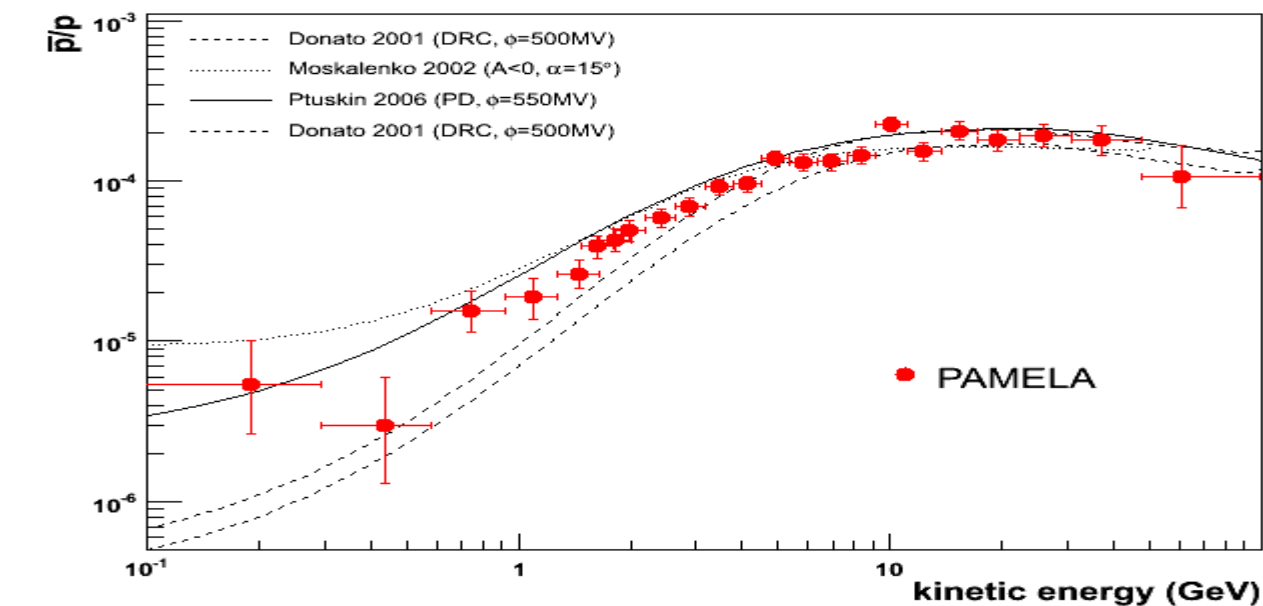
Габаритные размеры 1 м × 1 м × 1.25 м

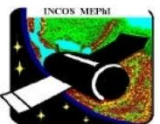
Индукция магнитного поля 0.48 Тл

Электрическая мощность 350 Вт

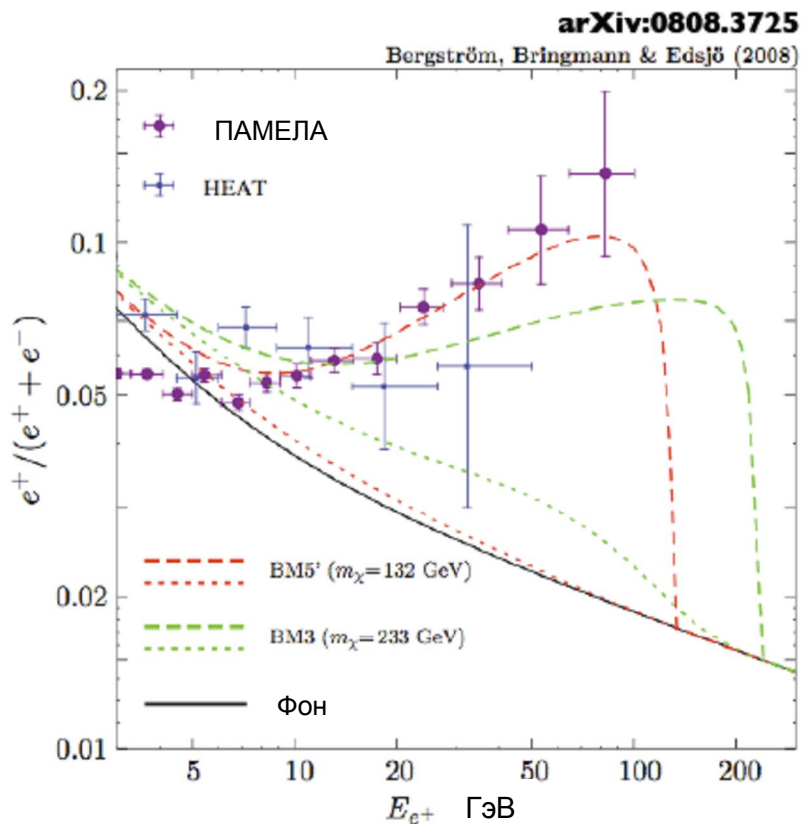


Основные результаты эксперимента «ПАМЕЛА»

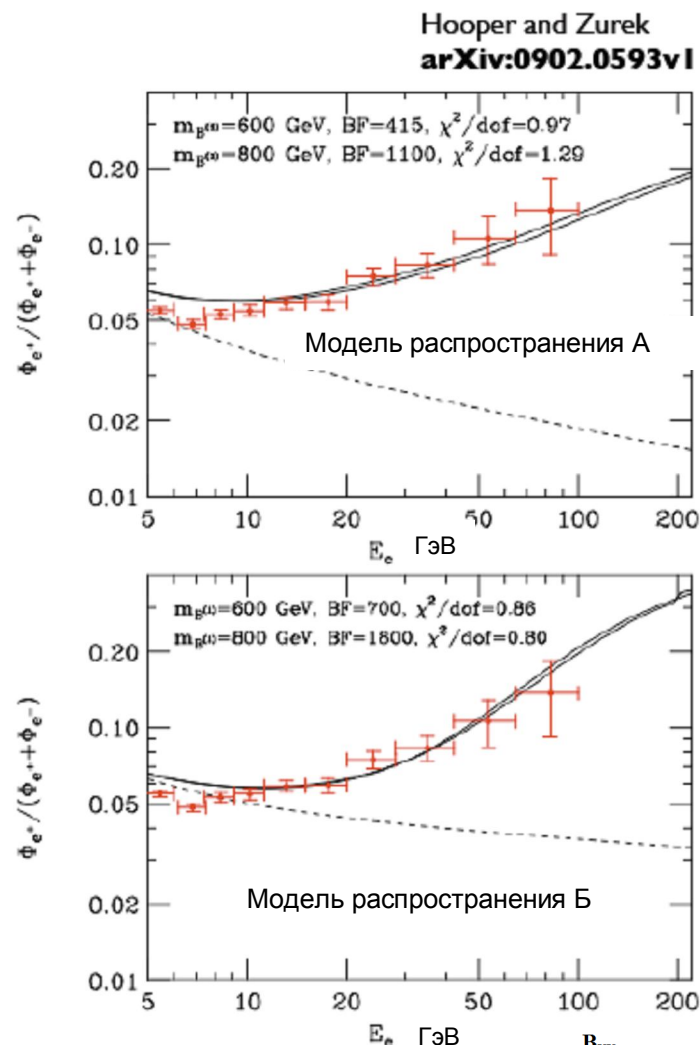




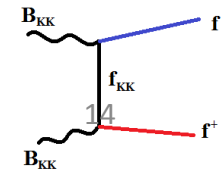
Изучение природы частиц тёмной материи

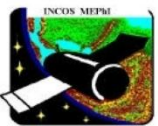


Аннигиляция нейтралино с различными массами.



Темная материя Калуцца-Кляйна





Top ten physics stories of the year 2008



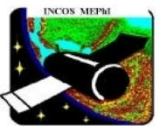
INSIDE SCIENCE RESEARCH --- **PHYSICS NEWS UPDATE** The American Institute of Physics
Bulleting of Research News Number 879 #1, December 22, 2008 www.aip.org/pnu by Phil
Schewe

- *SUPERCONDUCTORS*
- *LARGE HADRON COLLIDER*
- *PLANETS*
- *QUARKS*
- *FARTHEST SEEABLE THING*
- *ULTRACOLD MOLECULES*
- *DIAMOND DETECTORS*

• **COSMIC RAYS**

Another mystery pertains to the findings of two detectors held aloft-one by a balloon and one on a satellite-looking for oddities in the number of antiparticles arriving with regular particles among cosmic rays reaching Earth. They see an excess of such particles which some interpret as evidence for “dark matter,” a class of very-weakly-interacting particles not seen before. Scientists associated with the balloon-borne ATIC detector (Nature, 20 Nov) and the satellite **PAMELA** (<http://arxiv.org/abs/0810.4995>)

- *LIGHT PASSES THROUGH OPAQUE MATTER*
- *MACROSCOPIC FEEDBACK COOLING*



The ATIC electron results exhibits a feature

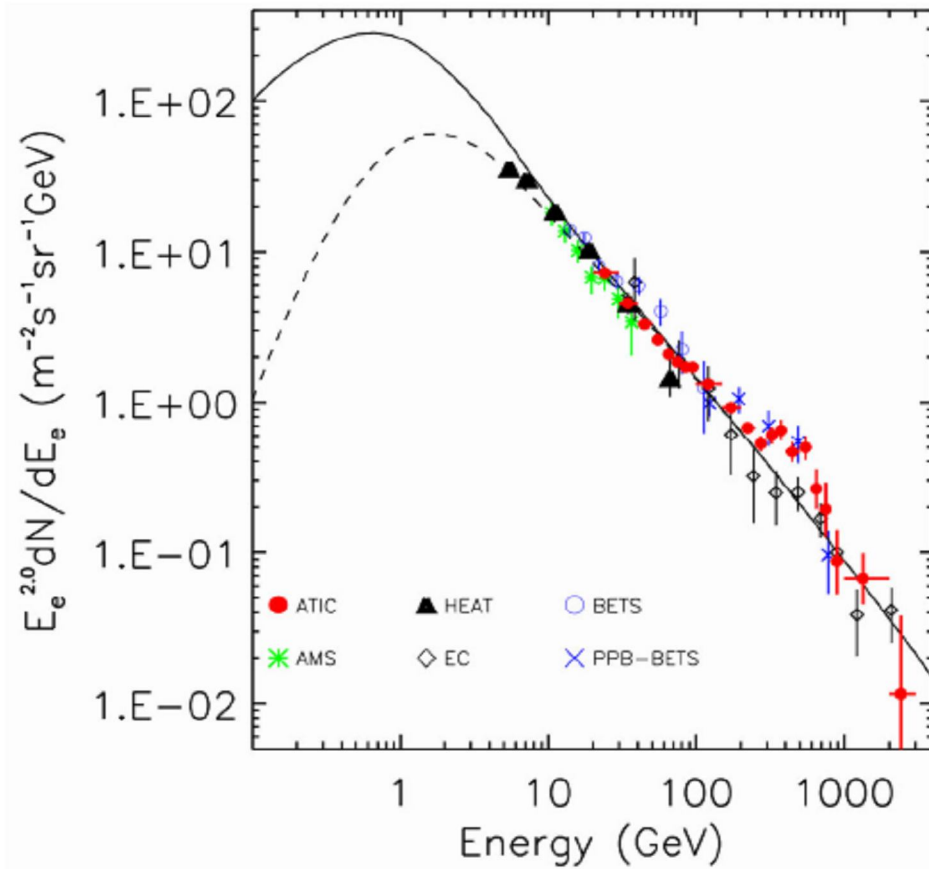


Curves are from GALPROP
diffusion propagation
simulation code

- Solid curve is local
interstellar space
- Dashed curve is with solar
modulation (500 MV)

“Excess” at about 300 – 600
GeV

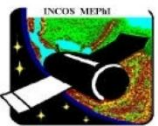
Also seen by recent PPB-
BETS



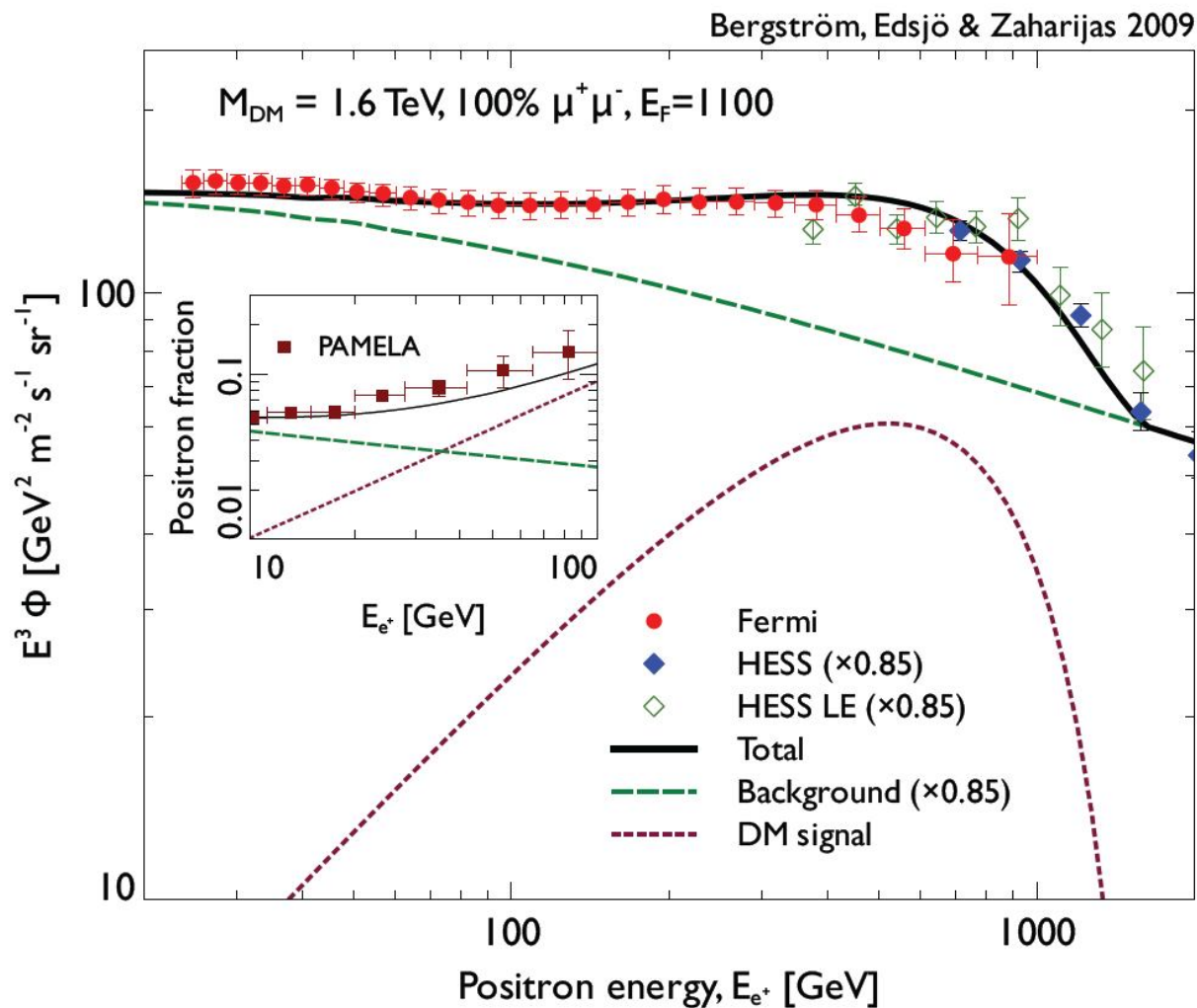
03/18/08

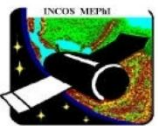
"Advances in Cosmic Ray Science"
Waseda University

35

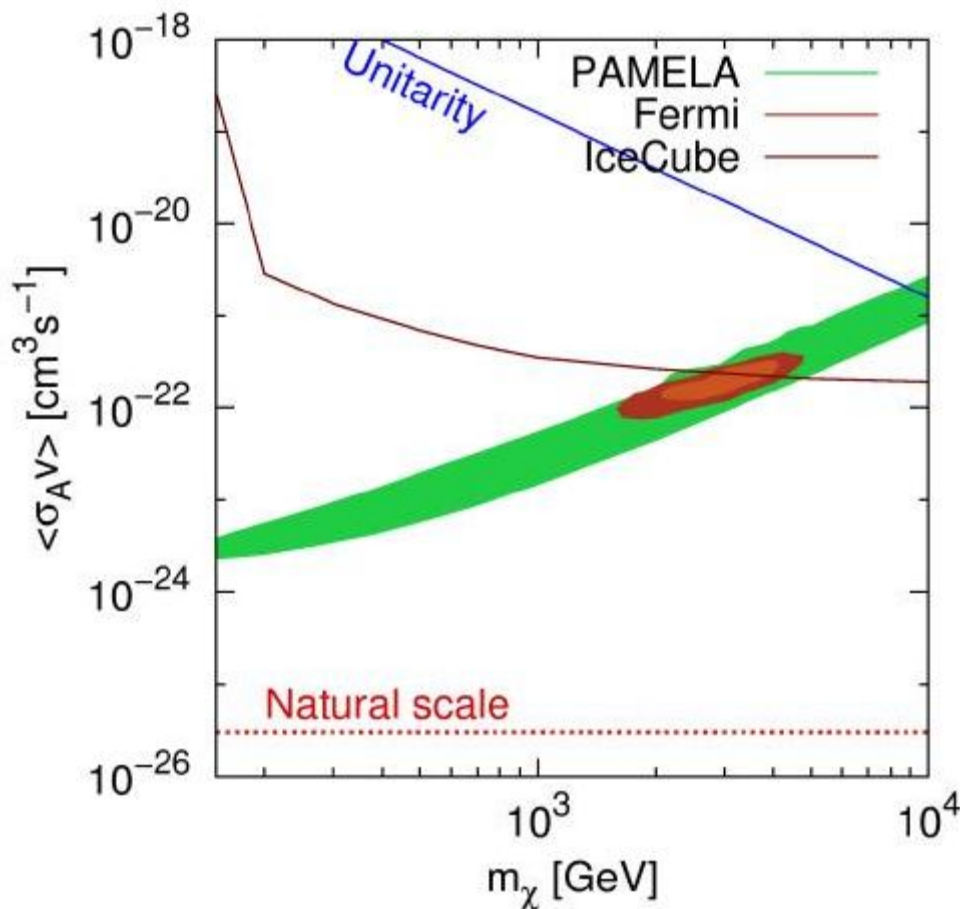


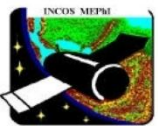
Суммарный поток электронов и позитронов в галактическом космическом излучении



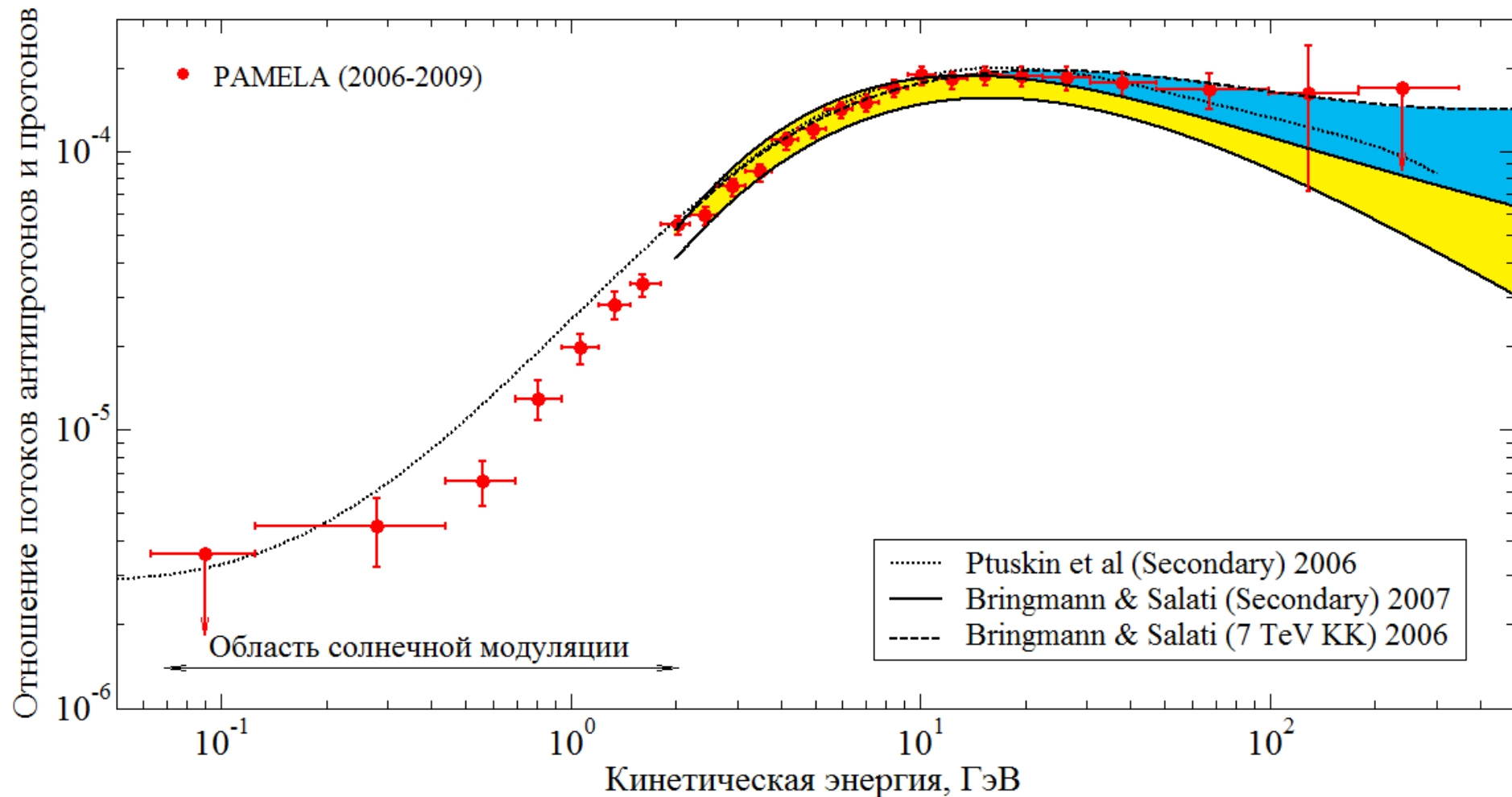


Сравнение результатов PAMELA, Fermi и IceCube





Отношение потока антипротонов к потоку протонов в галактическом космическом излучении



130 GeV gamma-ray excess

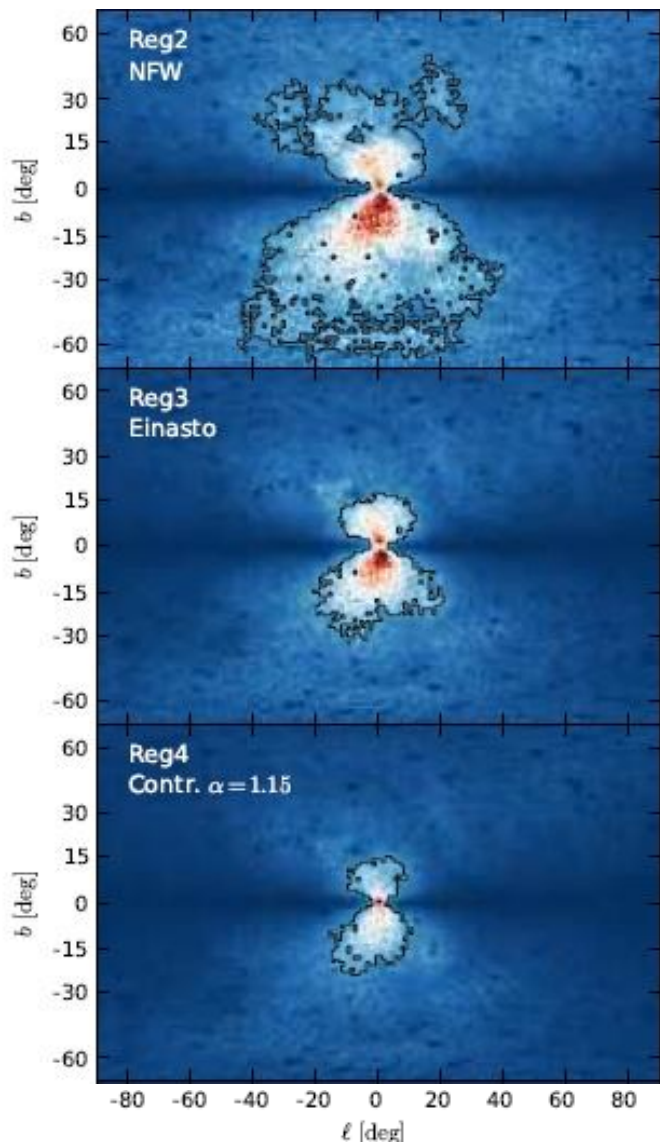


Fig. 1 Target regions

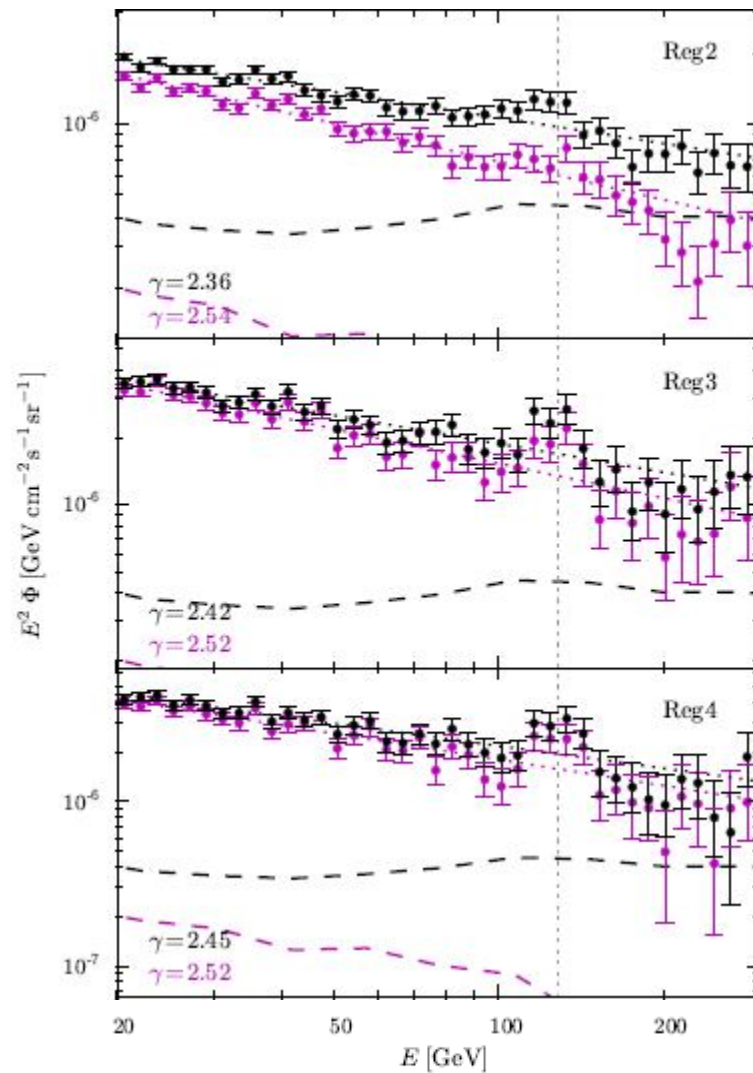
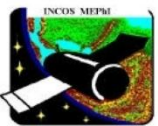


Fig. 2 Energy spectra - SOURCE (black) and ULTRACLEAN (magenta). Dashed lines show the EGBG + residual CR's, dotted lines – power law.



Обнаружение гамма-излучения от центра галактики (Fermi-LAT)

N_R Dark Matter prediction for γ flux

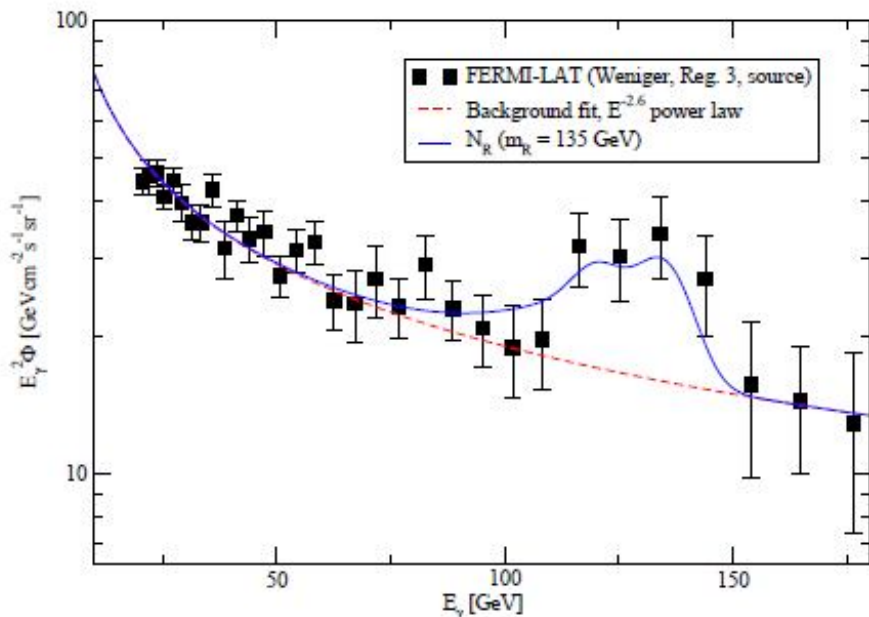


FIG. 2: Comparison of the total γ -ray differential energy results (multiplied by E^2) for a 135 GeV right-handed neutrino dark matter candidate with the Fermi-LAT public data [5], as analyzed by Weniger [7]. A simple power-law fit $\sim E^{-2.6}$ to the continuous background has been made, and is also shown.

Gamma-rays from N_R model

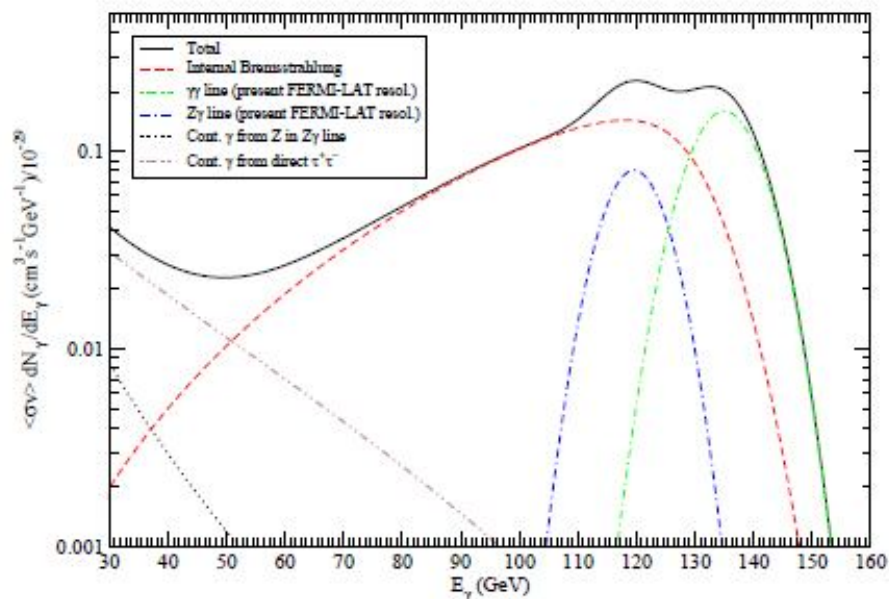


FIG. 1: The differential photon spectrum for the process $NRNR \rightarrow \ell^+ \ell^- \gamma, \gamma\gamma$ and $Z\gamma$, smeared with the present Fermi-LAT energy resolution, $\Delta E/E \sim 0.1$. The total spectrum is given by the black solid line, the internal bremsstrahlung by the dashed red line, the smeared $\gamma\gamma$ line by the green dash-dotted line and the smeared $Z\gamma$ line by the blue double-dash-dotted line. At the lower left corner the small contributions from the $\tau^+ \tau^-$ final state as well as that from Z decays can be seen.

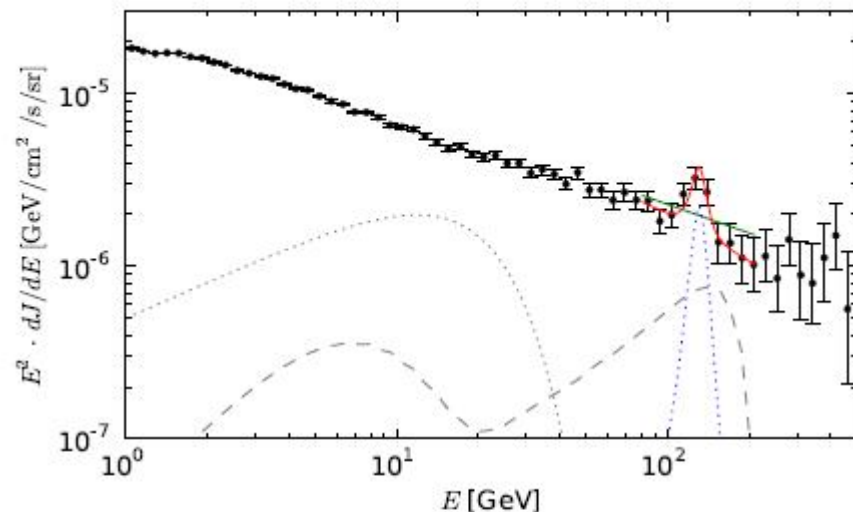
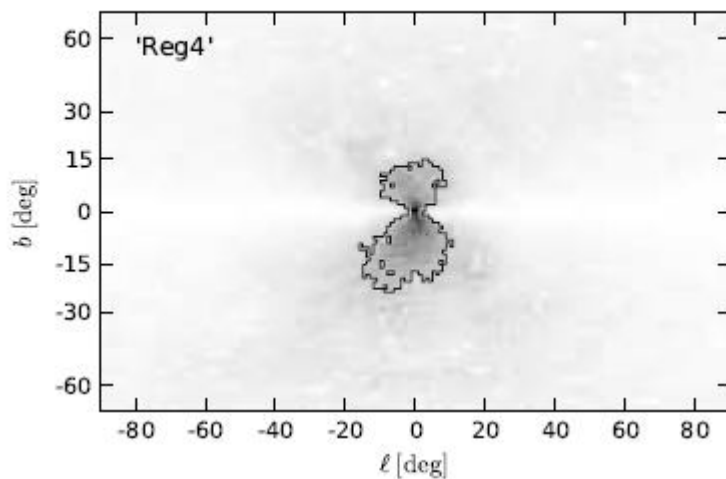
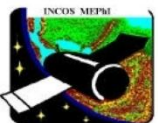


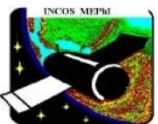
FIGURE 1. *Left panel:* Target region Reg4 from [2], optimized for large S/N in case of slightly contracted profile. *Right panel:* Gamma-ray flux measured within that region by Fermi-LAT. An excess of events around 130 GeV is clearly visible in the data. We show the fits to the data in the energy range 80–210 GeV (see Ref. [2] for details). For direct comparison we show a very hard spectrum with super-exponential cut-off (left dotted line; $\sim E^{-1.3} \exp[-(E/20 \text{ GeV})^2]$) and the ICS emission from monoenergetic 230 GeV electrons at the GC (dashed), both with arbitrary normalization.



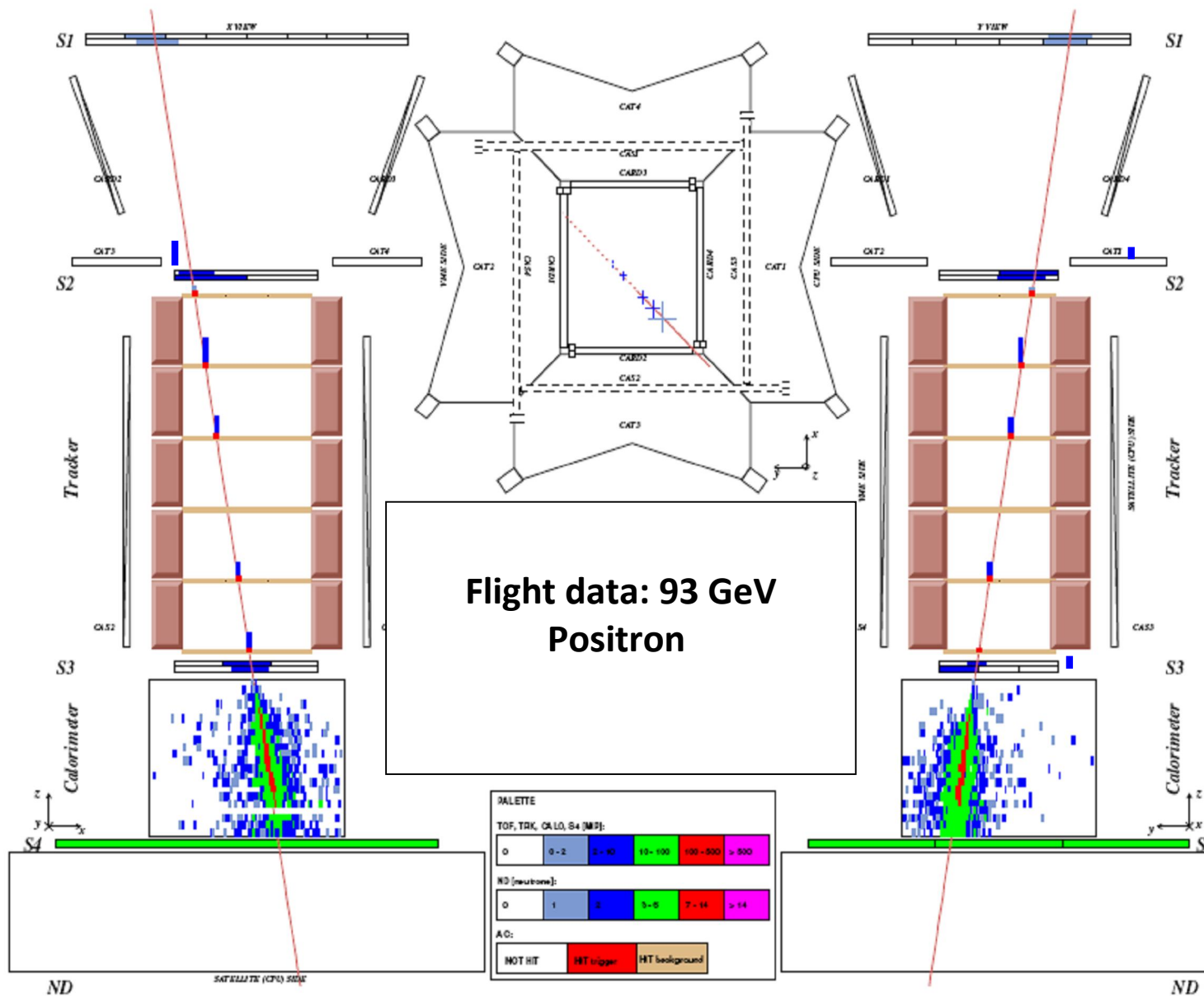
Эксперименты, получившие указания на существование частиц «тёмной» материи

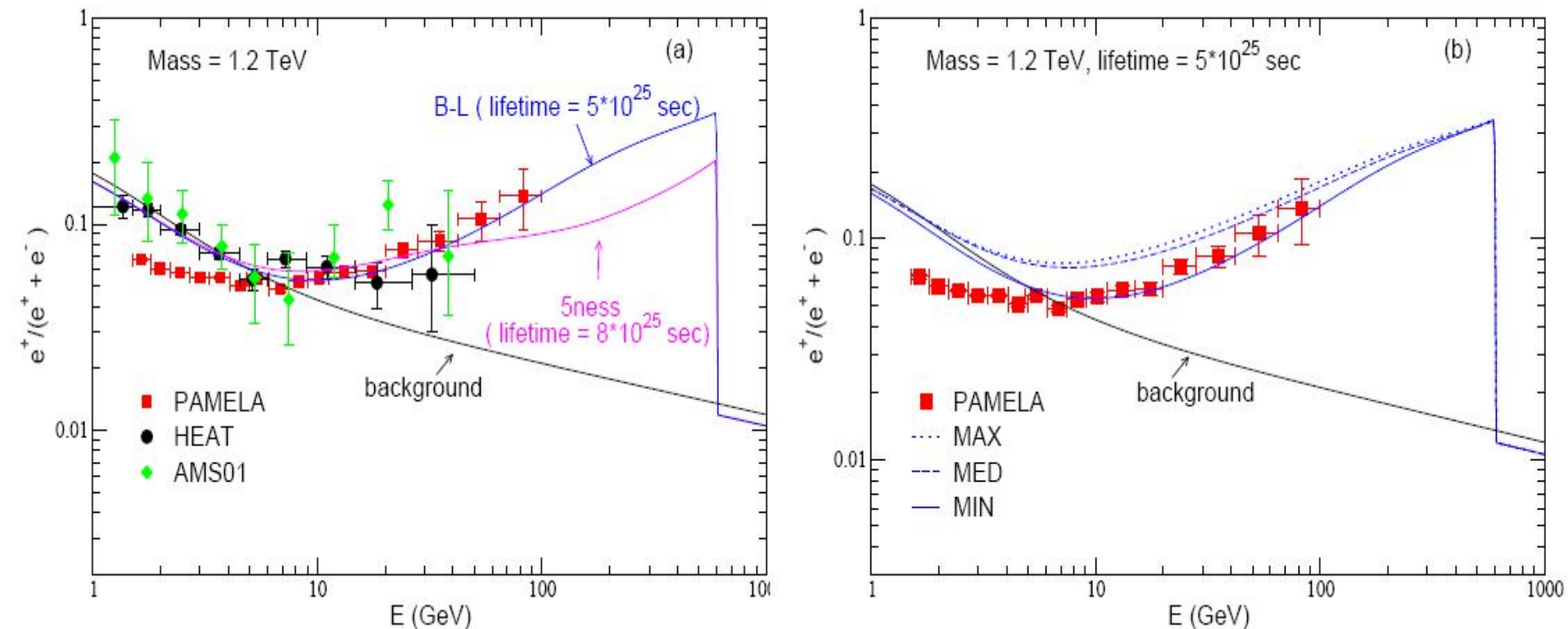


Эксперимент	Комментарий
DAMA/LIBRA годовая модуляция	Нет объяснения; нет подтверждения другими экспериментами
CoGeNT избыток событий и годовая модуляция	Противоречит другим данным
EGRET избыток гамма-квантов с энергией $\sim$ ГэВ	Не подтверждено FERMI
INTEGRAL линия 511 кэВ от области центра Галактики	Не обладает сферической симметрией – асимметрия, характерная для диска (?)
PAMELA: отношение потоков антипротонов и протонов	Эффект может быть связан с аннигиляцией тёмной материи или взаимодействием космических лучей
PAMELA: аномальное отношение космических позитронов/электронов	Эффект может быть вызван темной материей или пульсарами – не указывает однозначно на темную материю
FERMI позитроны+электроны	
FERMI избыток гамма-излучения в направлении центра Галактики	Нет объяснения; возможно это астрофизический эффект. Нет комментария от коллаборации FERMI
WMAP радио “haze”	Соответствует “FERMI bubbles” – возможно вызван потоками, исходящими из центра Галактики

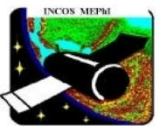


Пример зарегистрированного позитрона





(a) The predicted positron fraction from AH decay via the kinetic mixing with U(1)B-L (blue line) and U(1)5 (magenta line), compared with the experimental data, including the recent PAMELA results; (b) For U(1)B-L case only, using different sets of parameters in solving.



Модели распределения темной материи в Галактике

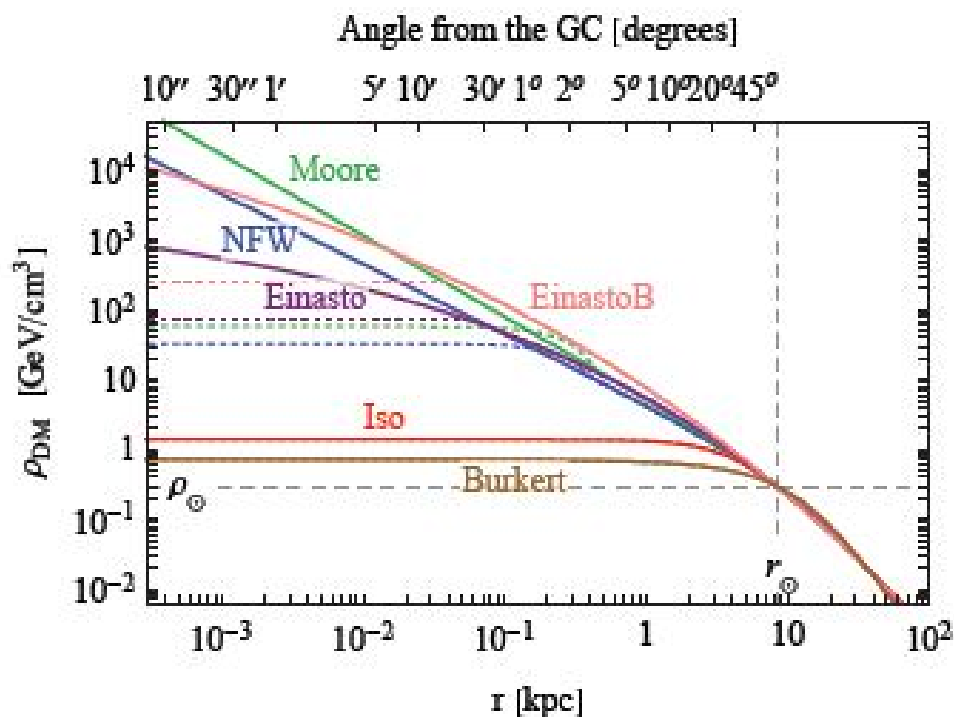
$$\text{NFW : } \rho_{\text{NFW}}(r) = \rho_s \frac{r_s}{r} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^{-2}$$

$$\text{Einasto : } \rho_{\text{Ein}}(r) = \rho_s \exp \left\{ -\frac{2}{\alpha} \left[\left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right] \right\}$$

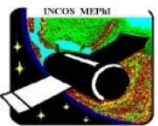
$$\text{Isothermal : } \rho_{\text{Iso}}(r) = \frac{\rho_s}{1 + (r/r_s)^2}$$

$$\text{Burkert : } \rho_{\text{Bur}}(r) = \frac{\rho_s}{(1 + r/r_s)(1 + (r/r_s)^2)}$$

$$\text{Moore : } \rho_{\text{Moo}}(r) = \rho_s \left(\frac{r_s}{r} \right)^{1.16} \left(1 + \frac{r}{r_s} \right)^{-1.84}$$



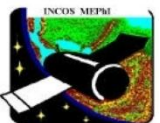
DM halo	α	$r_s [\text{kpc}]$	$\rho_s [\text{GeV}/\text{cm}^3]$
NFW	—	24.42	0.184
Einasto	0.17	28.44	0.033
EinastoB	0.11	35.24	0.021
Isothermal	—	4.38	1.387
Burkert	—	12.67	0.712
Moore	—	30.28	0.105



Физические модели, в которых рассматриваются частицы темной материи



- **WIMP models**
- **Dark Stars**
- **Inelastic Dark Matter**
- **Dynamical Dark Matter**
- **Leptophilic Dark Matter**
- **Supersymmetric Models Beyond the MSSM**
- **Asymmetric Dark Matter**
- **Kaluza-Klein Models**
- **Inert Higgs Doublet**
- **Non-WIMP Models**
- **The Axion**



Кандидаты на роль частиц темной материи



•**Kaluza-Klein Boson**

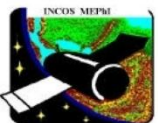
- Axion
- Axino
- Gravitino
- Photino
- SM Neutrino
- Sterile Neutrino
- Sneutrino
- Light DM
- Little Higgs DM
- Wimpzillas
- Q-balls
- Mirror Matter

•Champs (charged DM)

- D-matter
- Cryptons
- Self-interacting
- Superweakly interacting
- Braneworld DM
- Heavy neutrino

•**Neutralino**

- Messenger States in GMSB
- Branons
- Chaplygin Gas
- Split SUSY
- Primordial Black Holes



Подземные эксперименты



Experiment	Target
ANAIS	NaI
DAMA/NaI	NaI
DAMA/LIBRA	NaI
DAMA/1 ton	NaI
NAIAD	NaI
HDMS	Ge
KIMS	CsI
CaF ₂ -Kamioka	CaF ₂
CDMS	Ge
CRESST	CaWO ₄
EDELWEISS	Ge
EURECA	Ge
CoGeNT	Ge
ROSEBUD	Ge, sapphire
COUPP	FSH
PICASSO	FSH
SIMPLE	FSH
NEWAGE	CF ₄
DM-TPC	CF ₄
Drift	CS ₂
MIMAC	³ He gas

Experiment	Target
DAMA/LXe	LXe
WARP	LAr
XENON 10	LXe
XENON 100	LXe
Zeplin I	LXe
Zeplin II	LXe
Zeplin III	LXe
ArDM	LAr
LUX	LXe
LZS/LZD	LXe
MAX	LXe/LAr
CLEAN	LNe
DEAP	LAr
XMASS	LXe
MIMAC	³ He gas