

Современная астрофизика элементарных частиц

И. Ткачев

ИЯИ

27 Октября 2009

Что это такое,

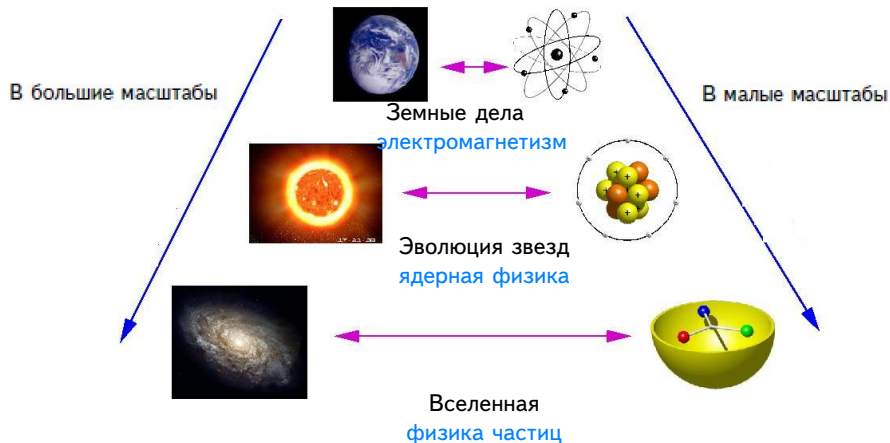
Физика частиц и космология



Astroparticle physics ?

- Новая самостоятельная ветвь науки
- Здесь мы хотим
 - Найти проявления новой физики изучая космологию и астрофизику
 - Понять как новые знания в физике частиц могут изменить наши представления о Вселенной

Большое и малое



В малые масштабы



10^{21}
(ZeV, zetta)

10^{18}
(EeV, exa)

10^{15}
(PeV, peta)

10^{12}
(TeV, tera)

10^9
(GeV, giga)

10^6
(MeV, mega)

10^3
(keV, kilo)

1 (eV)

???

Активные галактики

Пульсары

Сверхновые

← LHC

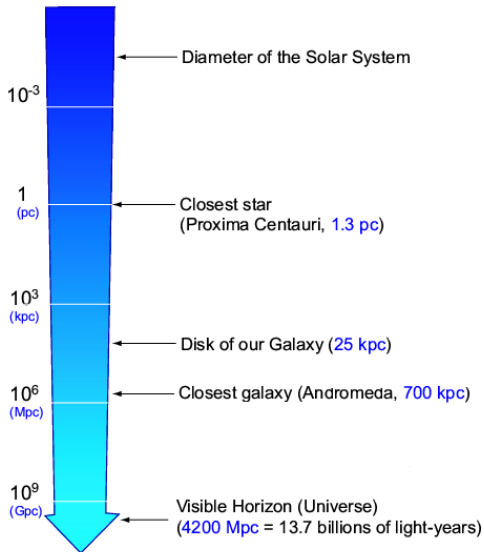
Синхротрон

Синхроциклотрон

Циклотрон

Батарейка

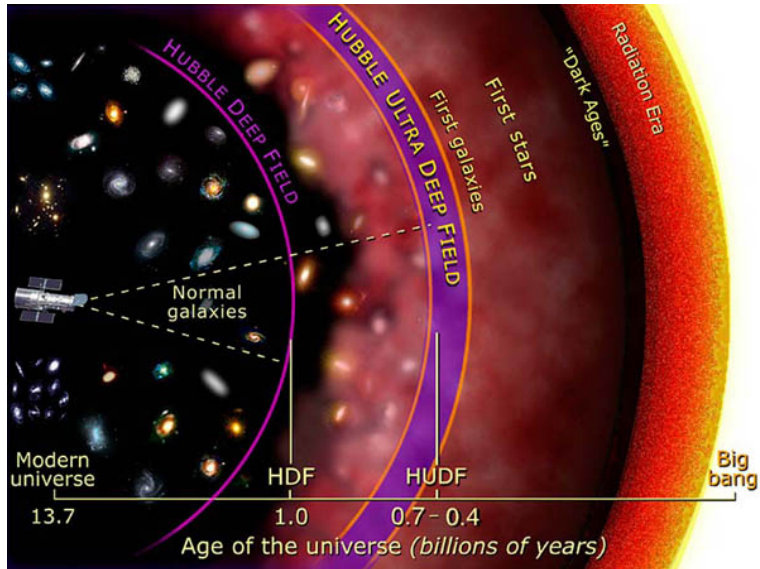
В большие (астрономические) масштабы



Parsecs (pc)

1 parsec = 3.26 light-years $\sim 3 \times 10^{13}$ km

Машина времени

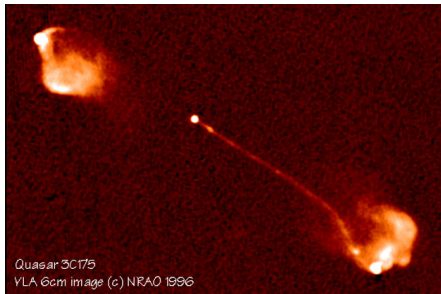


- Самые большие масштабы и ранняя Вселенная
 - Космология (Рубаков, следующая лекция)
- Галактические масштабы и современная Вселенная
 - Астрофизика (лекция сегодня)

- Эксперименты в контролируемых лабораторных условиях
 - Ускорители
 - Основа
 - Подземные и подводные лаборатории
 - Поиск темной материи
 - Поиск Великого Объединения
 - Нейтринные обсерватории
- Астрофизические наблюдения
 - Фотон
 - Основа астрономии
 - Нейтрино
 - Новая физика связанная с массой нейтрино
 - Космические лучи
 - Поиск новой физики
 - Зарождение новой ветви астрономии заряженных частиц



Радиотелескоп VLA

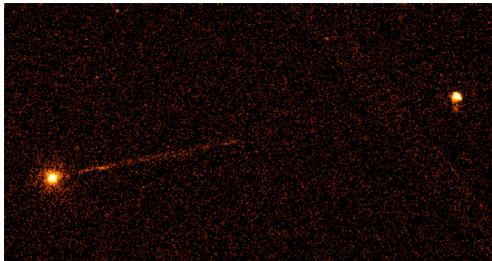


и изображение квазара 3C175

Рентгеновская астрономия



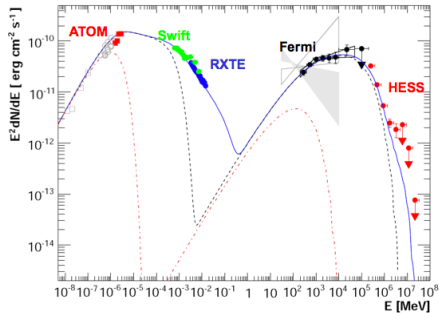
Телескоп Chandra



и изображение квазара Pictor A

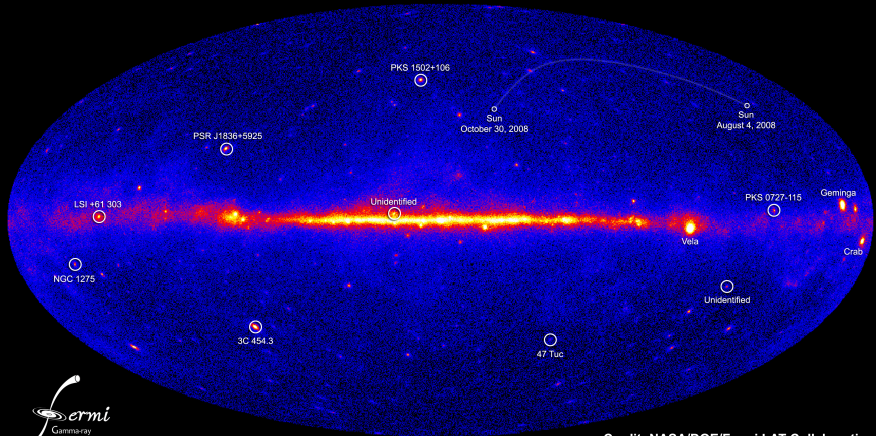


Черенковский телескоп HESS



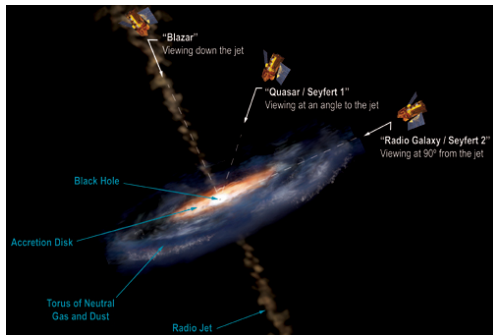
и спектр блазара PKS 2155-304

NASA's Fermi telescope reveals best-ever view of the gamma-ray sky



Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

Сердце квазара черная дыра



Схематическое изображение
активного ядра галактики

Типичная масса черной дыры
в квазаре $M_{BH} \sim 10^9 M_{\odot}$

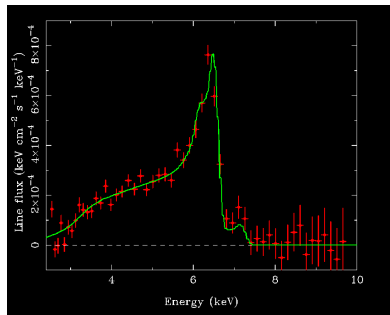
Соответствующий размер
горизонта $\sim 20 AU$

В центре нашей галактики
 $M_{BH} \sim 3 \cdot 10^6 M_{\odot}$

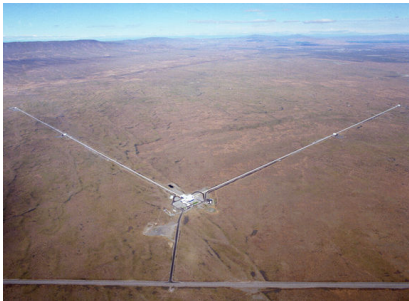
Рентгеновская астрономия



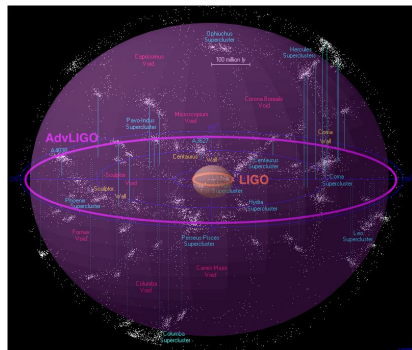
Орбитальный телескоп
XMM-Newton



и эмиссионная линия железа в
спектре АЯГ 1ES 1333-340

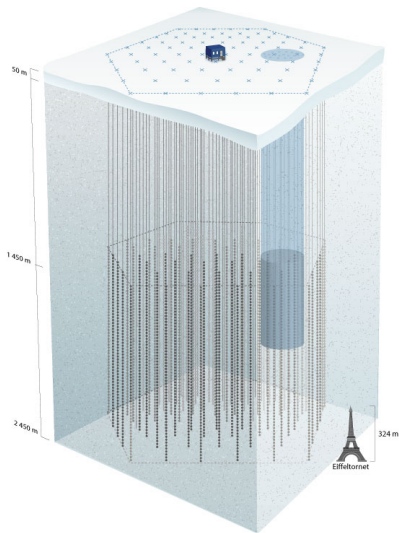


Гравитационный телескоп LIGO

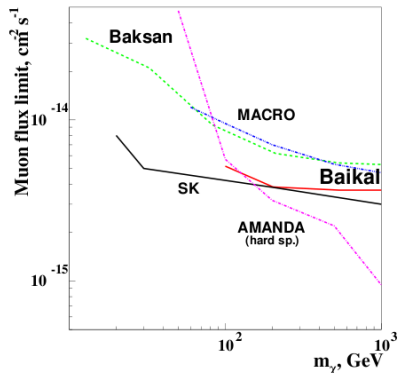


После 2014 г. гравитационные
сигналы возможно будут наблюдаться
ежедневно

Нейтринная астрономия

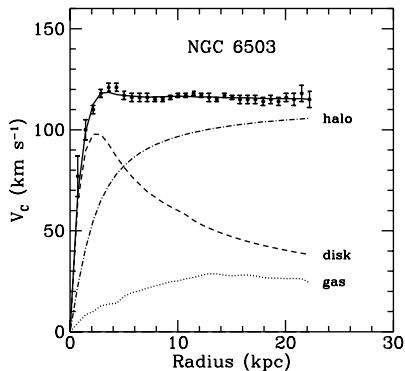
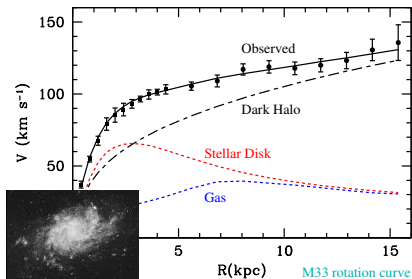


Нейтринный телескоп IceCube



Баксанский и Байкальский
нейтринные телескопы являются
подразделениями ИЯИ РАН

Темная материя в галактиках



Ньютоновская динамика:

$$\frac{v_{\text{rot}}^2}{r} = \frac{G M(r)}{r^2} \rightarrow v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}}$$

Скрытое вещество в моделях физики частиц

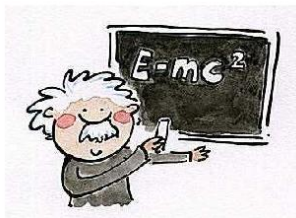
	кандидат	масса
▶	Гравитон	10^{-21} eV
▶	Аксион	10^{-5} eV
▶	Стерильное нейтрино	10 keV
▶	Зеркальное вещество	1 GeV
▶	WIMP	100 GeV
▶	WIMPZILLA	10^{13} GeV

Скрытое вещество в моделях физики частиц

	кандидат	масса
▶	Гравитон	10^{-21} eV
▶	Аксион	10^{-5} eV
▶	Стерильное нейтрино	10 keV
▶	Зеркальное вещество	1 GeV
▶	WIMP	100 GeV
▶	WIMPZILLA	10^{13} GeV

Какая модель лучше или на худой конец менее спекулятивна ?
Вопрос в такой постановке не имеет смысла.
Слово здесь за экспериментом.

Стратегия поисков

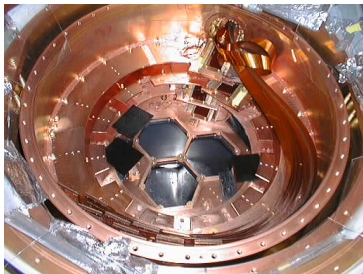


DM

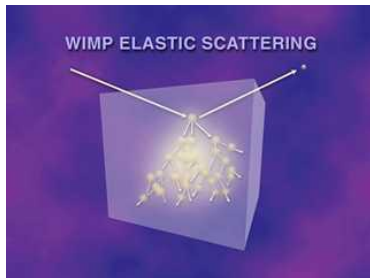


В ряде случаев темная материя может быть надежно идентифицирована только в комплексной программе поисков

Поиски темной материи в подземных лабораториях



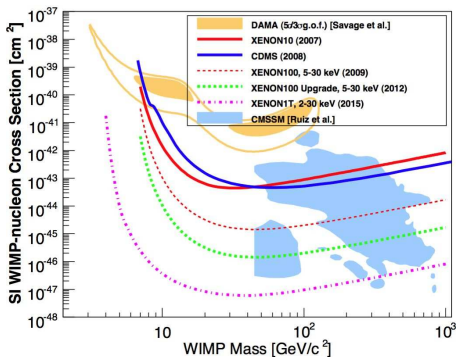
Ожидается 1 событие в день на
10 кг вещества детектора



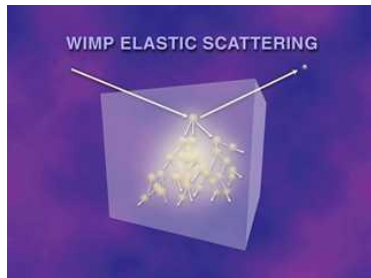
Все на глубине 1 км



Поиски темной материи в подземных лабораториях



Ожидается 1 событие в день на
10 кг вещества детектора

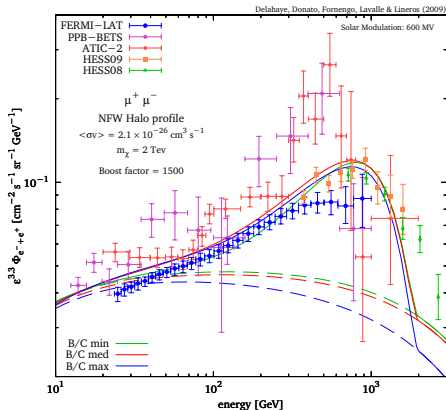


Все на глубине 1 км

Косвенные поиски темной материи

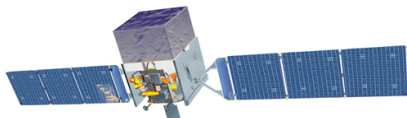


Орбитальный телескоп FERMI - LAT



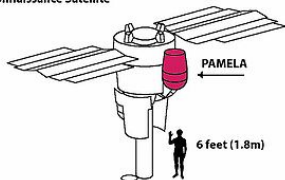
Избыток позитронов: сигнал от темной материи???

Косвенные поиски темной материи

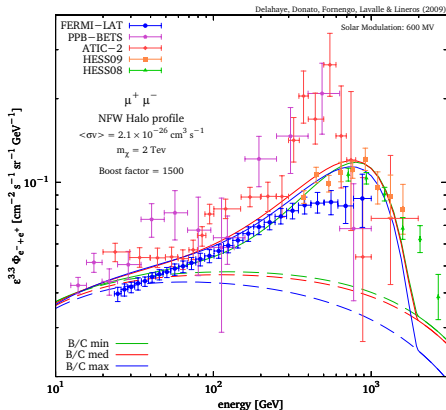


Орбитальный телескоп FERMI - LAT

Resurs-DK
Reconnaissance Satellite



Pamela

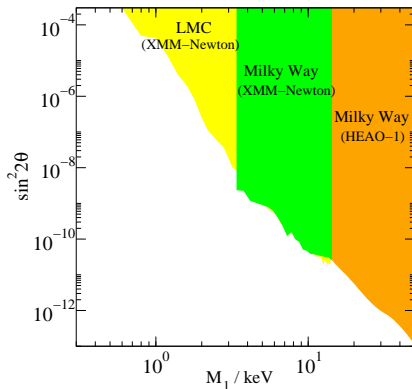


Избыток позитронов: сигнал от
темной материи???

Косвенные поиски темной материи

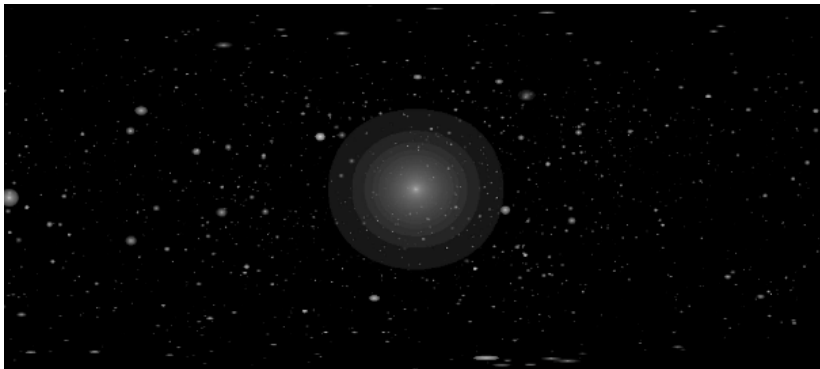


Орбитальный телескоп XMM-Newton



Ограничения на параметры
стерильных нейтрино

Аннигиляция в γ



Численное моделирование свечения темной материи в Галактике

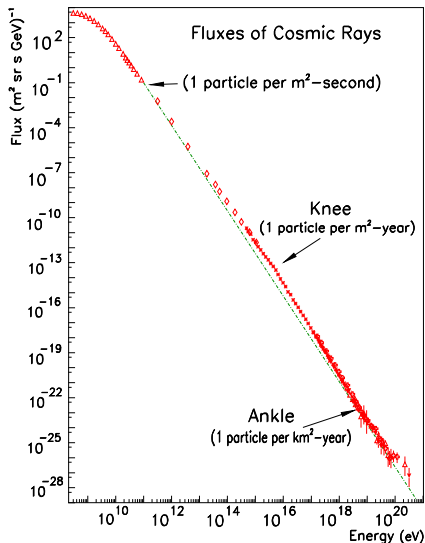
$$\frac{dN_\gamma}{d\Omega dt} = D\mathcal{P}$$

where

$$D = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{LOS}} \rho^2(r) dl$$

and

$$\mathcal{P} = \int_{E_{th}}^{M_\chi} \sum_i \frac{\langle \sigma v \rangle_i}{M_\chi^2} \frac{dN_{\gamma,i}}{dE} dE$$



- Спектр $\propto E^{-3}$
- Измерен вплоть до $\sim 10^{20}$ eV
- Поток на самых высоких энергиях:
одна частица на km^2 за сто лет

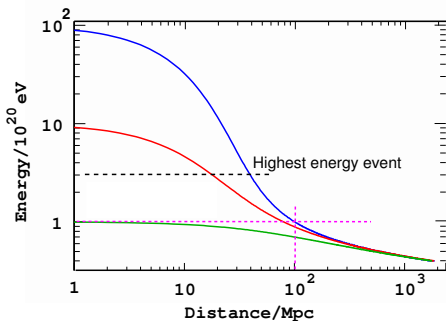
Новая физика открытая в космические лучах:

- ▶ 1927 Д.В. Скобельцын сфотографировал следы КЛ в пузырьковой камере помещенной в магнитное поле
- ▶ 1932 Используя эти методы К. Андерсон открыл антиматерию - позитрон
- ▶ 1935 К. Андерсон и С. Недермейер: открытие мюона
- ▶ 1947 Открытие пиона, странности (К-мезон)
- ▶ Процесс продолжался до появления ускорителей в 1950х

Возможно это не конец истории открытий

Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина

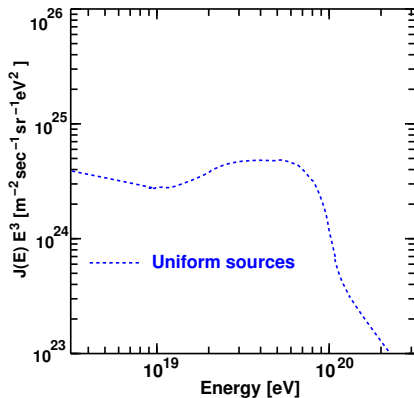
Космические лучи теряют энергию во взаимодействиях с космологическим излучением $p + \gamma_{\text{cmb}} \rightarrow N + \pi$



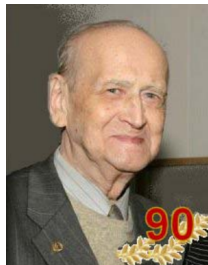
Источник протонов зарегистрированных с $E > 10^{20}$ eV должен находиться в области $R < 100$ Mpc

- В спектре космических лучей должно быть обрезание при $E > 10^{20}$ eV
- Направления прихода космических лучей самых высоких энергий должны указывать на их источники находящиеся в сфере $R < 100$ Мpc

Теоретическое ожидание ...



Предсказание ГЗК

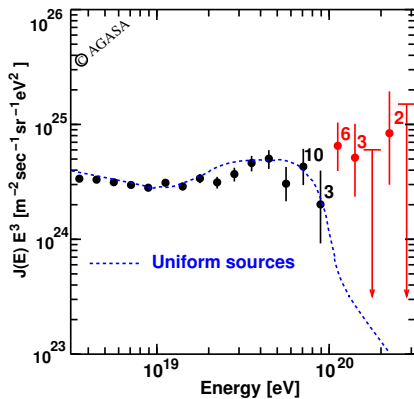


Г.Т. Зацепин

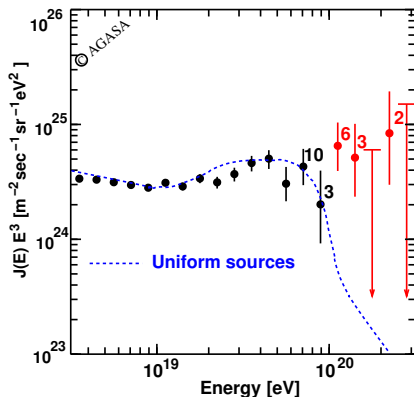


В.А. Кузьмин

Измерение ...



Спектр измеренный установкой
AGASA



Спектр измеренный установкой
AGASA

Вопросы:

- Где возникают частицы таких высоких энергий?
- Как объяснить отсутствие обрезания?
- Почему направления прихода не указывают на возможные источники?

Новая физика:

- ▶ Топологические дефекты
- ▶ Сверхтяжелая темная материя
- ▶ Сильные взаимодействия нейтрино
- ▶ Экзотические первичные частицы
- ▶ Нарушение Лоренц-инвариантности

Экзотическая астрофизика:

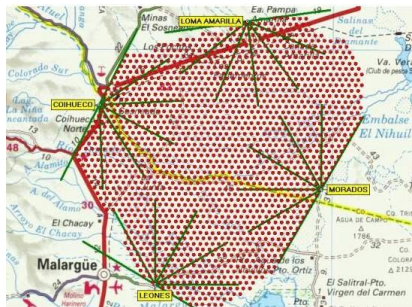
- ▶ Экстремально высокие потоки нейтрино
- ▶ Мертвые квазары

Новое поколение экспериментов

Обсерватория им. Пьера Оже



Южное полушарие



Новое поколение экспериментов

Telescope Array

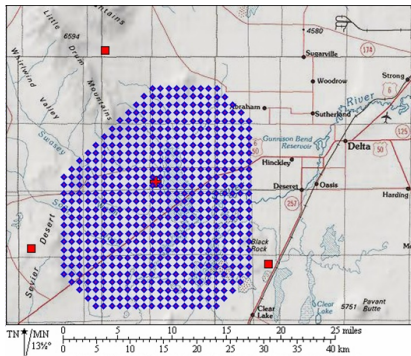


Северное полушарие



Новое поколение экспериментов

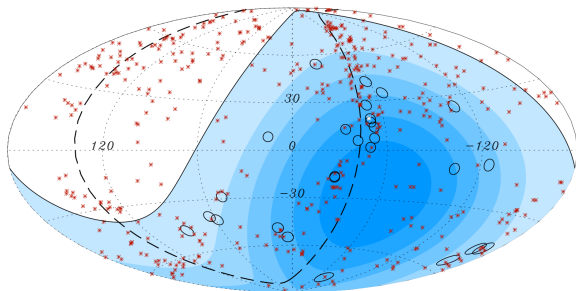
Telescope Array



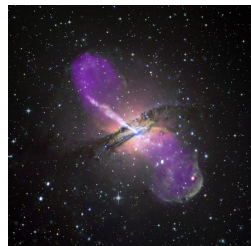
Северное полушарие



Начало астрономии заряженных частиц?



Pierre Auger collaboration (2007)



Cen A