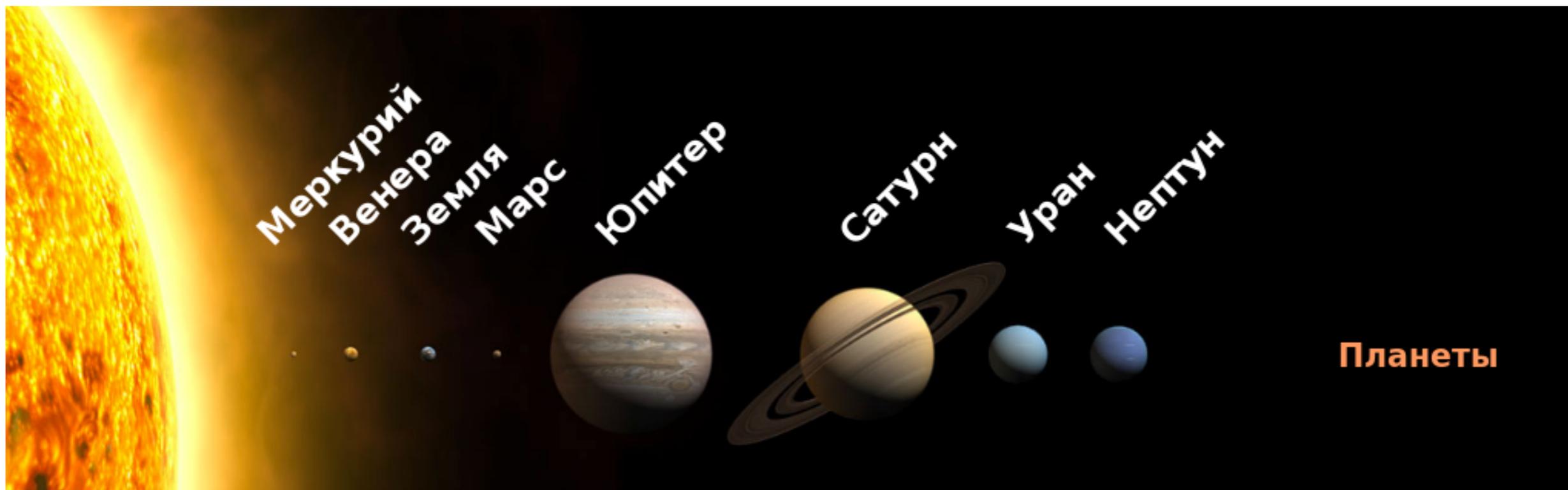
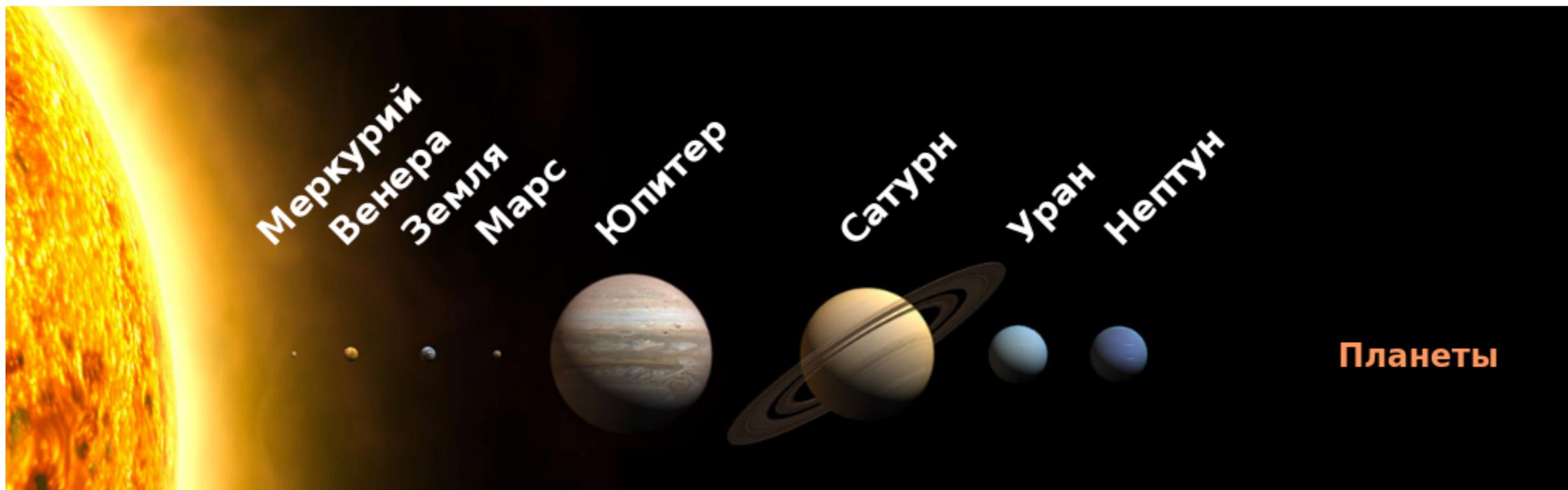


# Тёмная материя

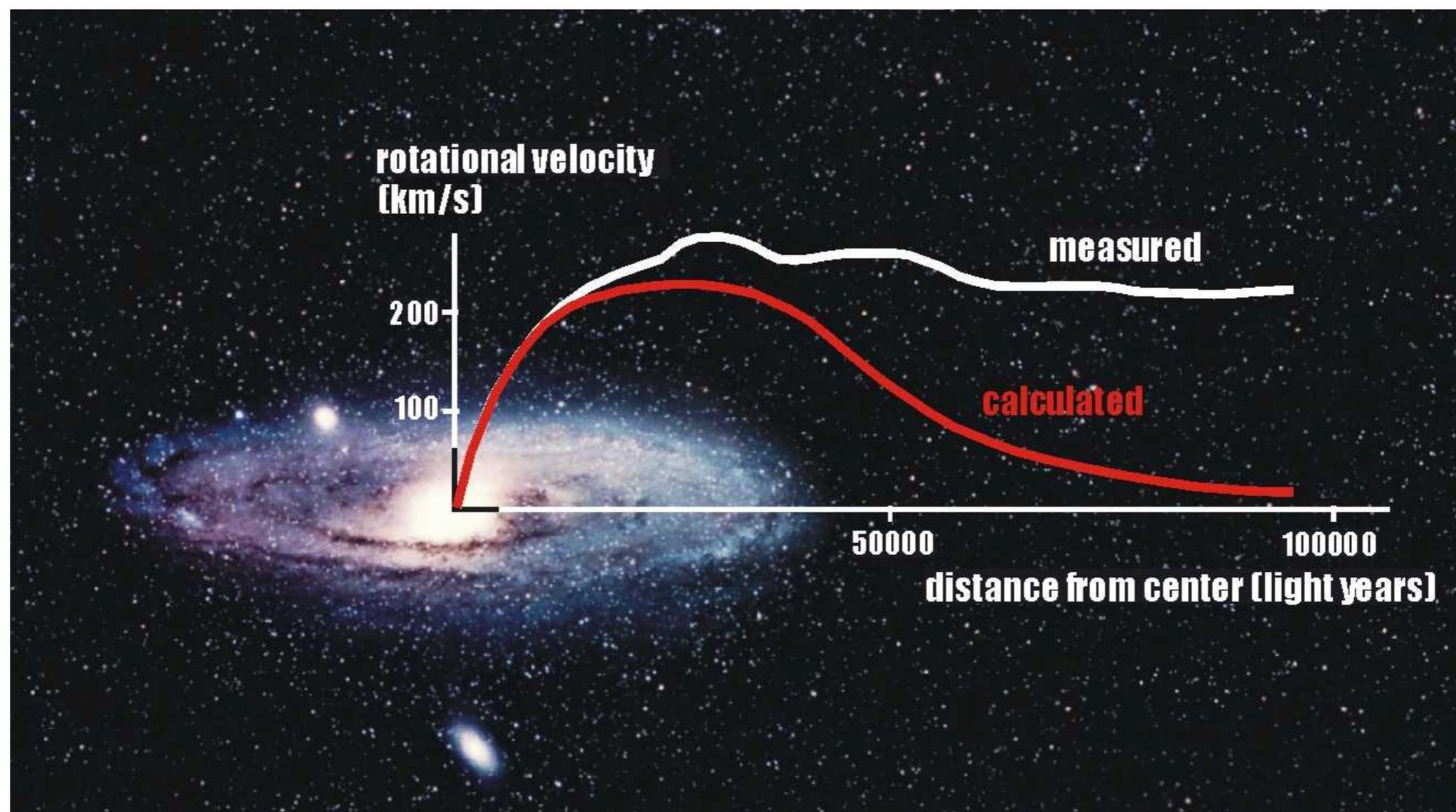
D.Kovalskyi (MIT)



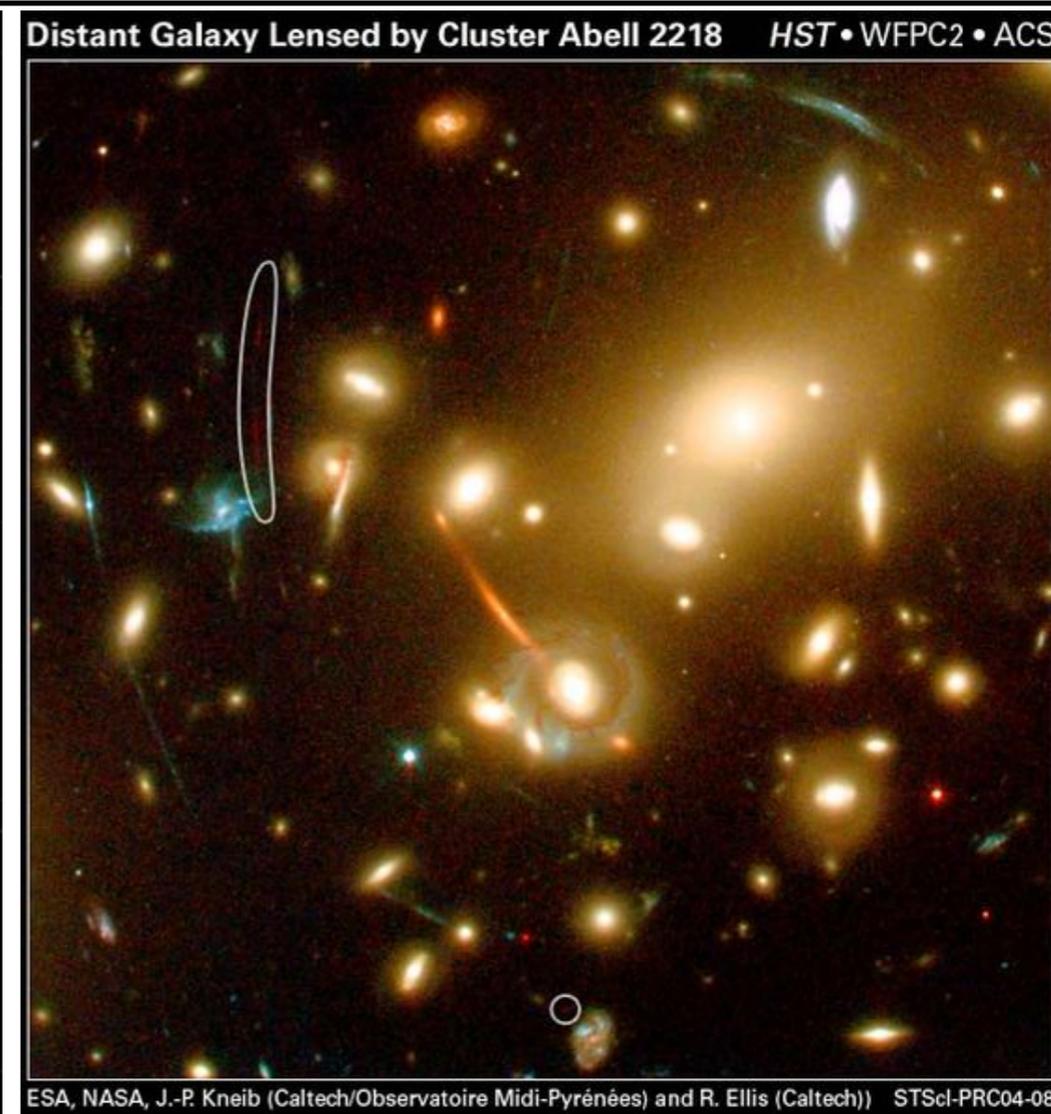
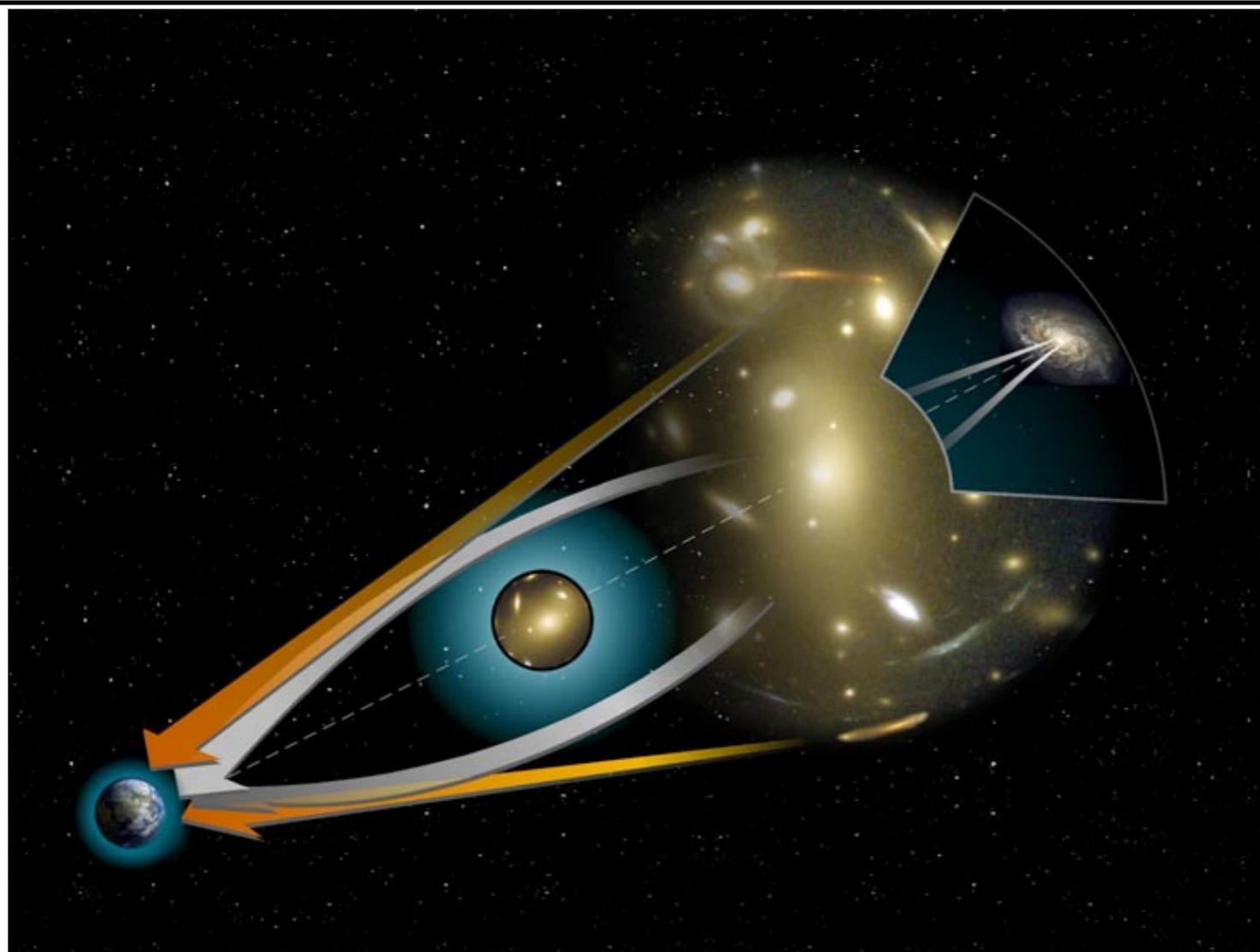
- ▶ Уильям Гершель открыл Уран в 1781 году
  - ▶ Наблюдения выявили аномалии в движении новой планеты
    - ▶ Траектория движения отличалась от расчетной
  - ▶ Гипотезы сформировавшиеся к 1832 году
    - ▶ Взаимодействие с газо-пылевой средой, которая заполняет межпланетное пространство.
    - ▶ Неизвестный спутник Урана, который вызывает наблюдаемые отклонения.
    - ▶ Закон притяжения Ньютона нарушается на больших расстояниях от Солнца
    - ▶ На движение Урана оказывает влияние ещё одна, до сих пор не открытая и не известная планета
- ▶ К 1836 году идея о новой планете стала общепринятой



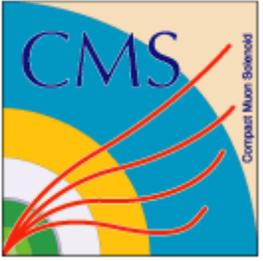
- ▶ Уильям Гершель открыл Уран в 1781 году
  - ▶ Наблюдения выявили аномалии в движении новой планеты
  - ▶ К 1836 году идея о новой планете стала общепринятой
    - ▶ Вычисления выглядели сложными, а наблюдения недостаточными
    - ▶ С 1841 по 1845 Джон Кух Адамс (молодой ученый) рассчитывал траекторию новой планеты, но точность предсказания была недостаточна
    - ▶ Независимо от Адамса в конце 1845г Урбен Леверье провел тщательное вычисление траектории Урана и смог предсказать более точно положение новой планеты
    - ▶ 23 сентября 1846 года Иоганн Галле по предсказаниям У. Леверье смог обнаружить новую планету



- ▶ В 30х года XX столетия появились первые наблюдения скорости вращения звезд в галактиках и галактик в скоплениях, которые не соответствовали предсказаниям
- ▶ Загадка: новая материя или законы Ньютона нарушены?



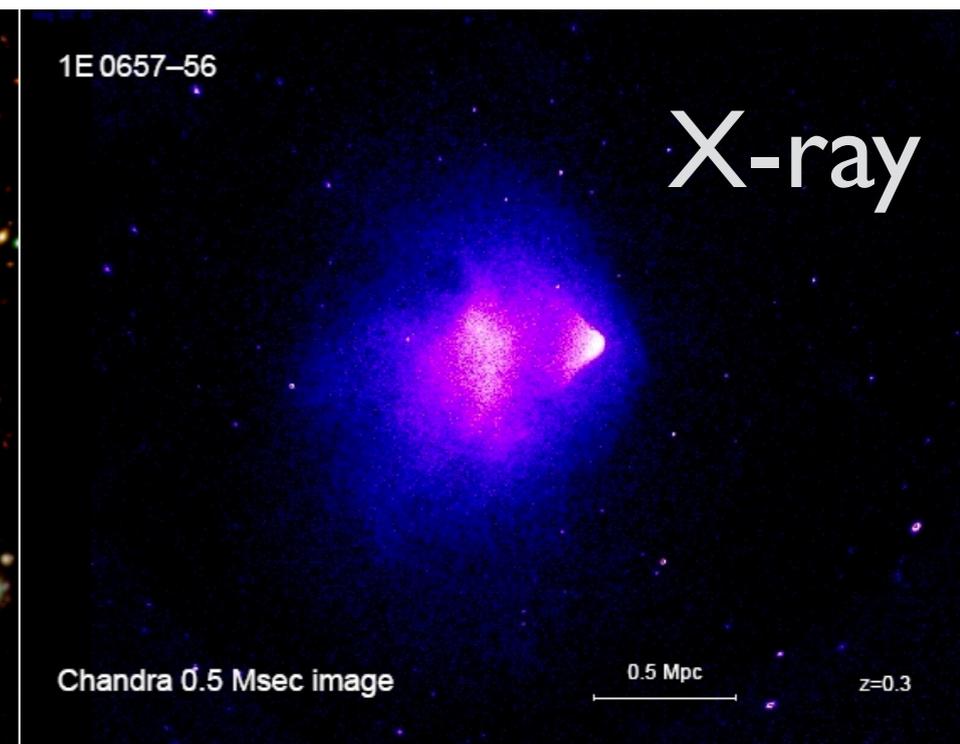
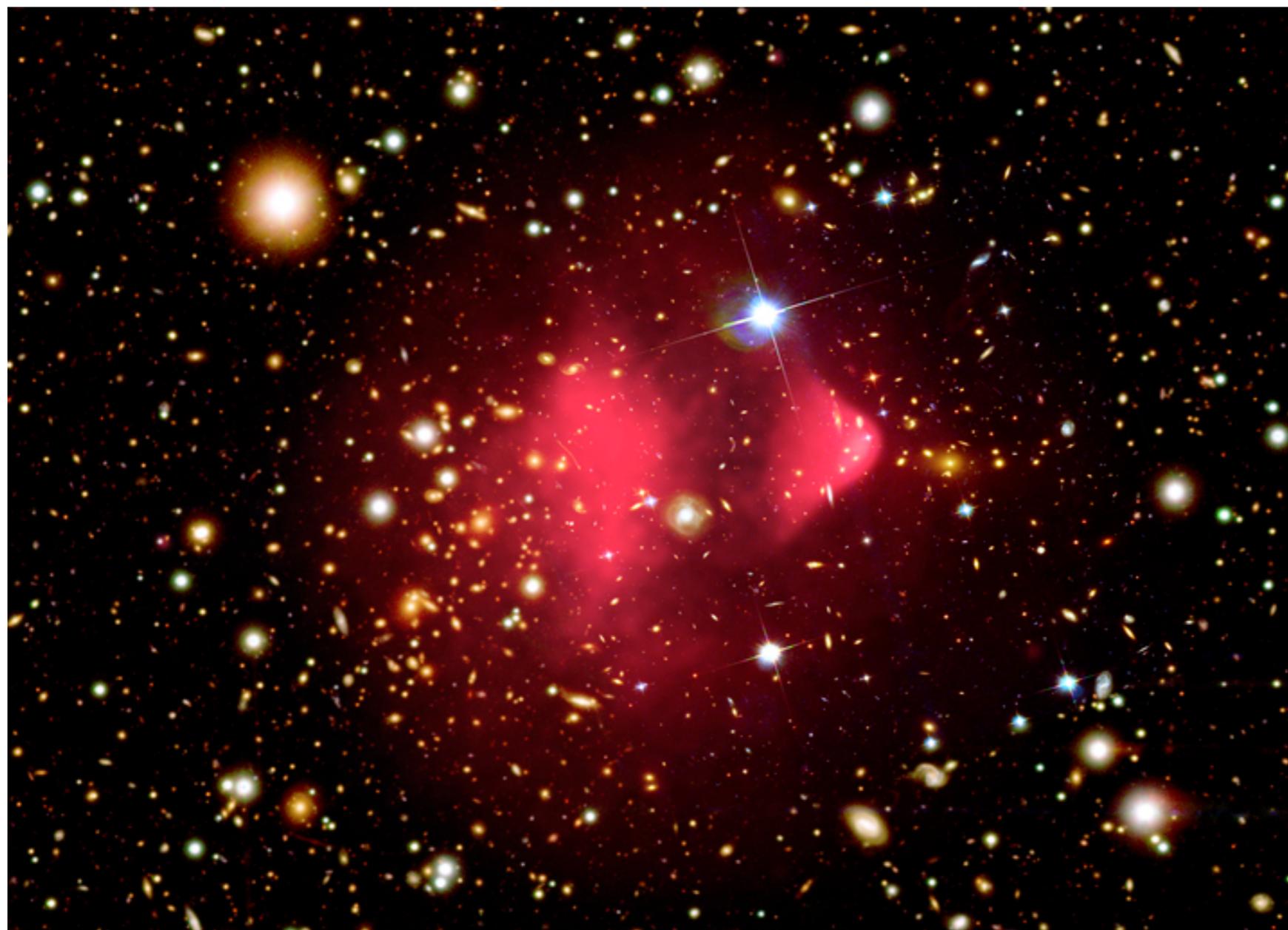
- ▶ Согласно Эйнштейновской общей теории относительности пространство искривляется в области сильного гравитационного поля
- ▶ Темная Материя прозрачна и ее гравитационное поле выполняет роль увеличительного стекла



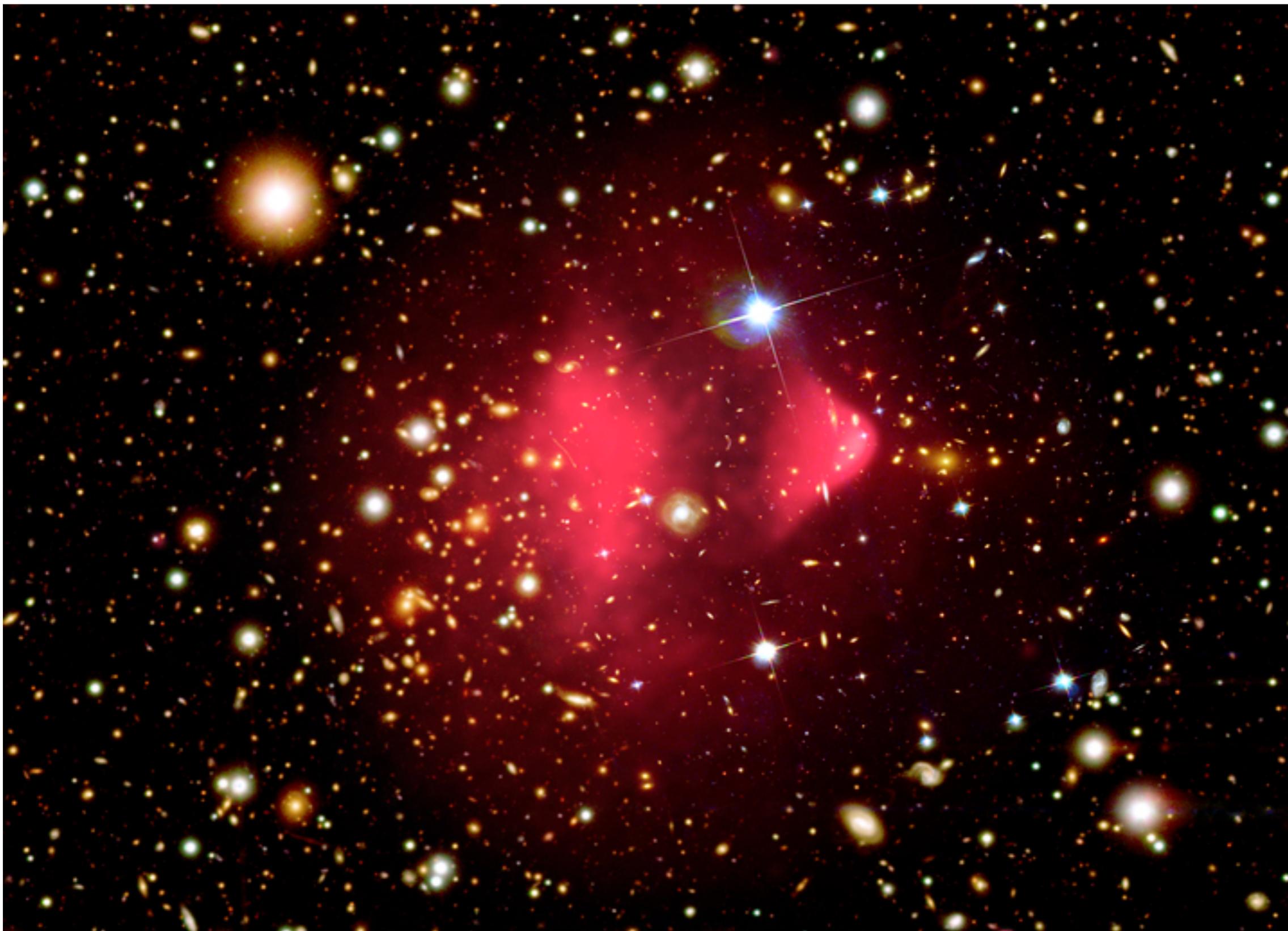
# Столкновение Галактик

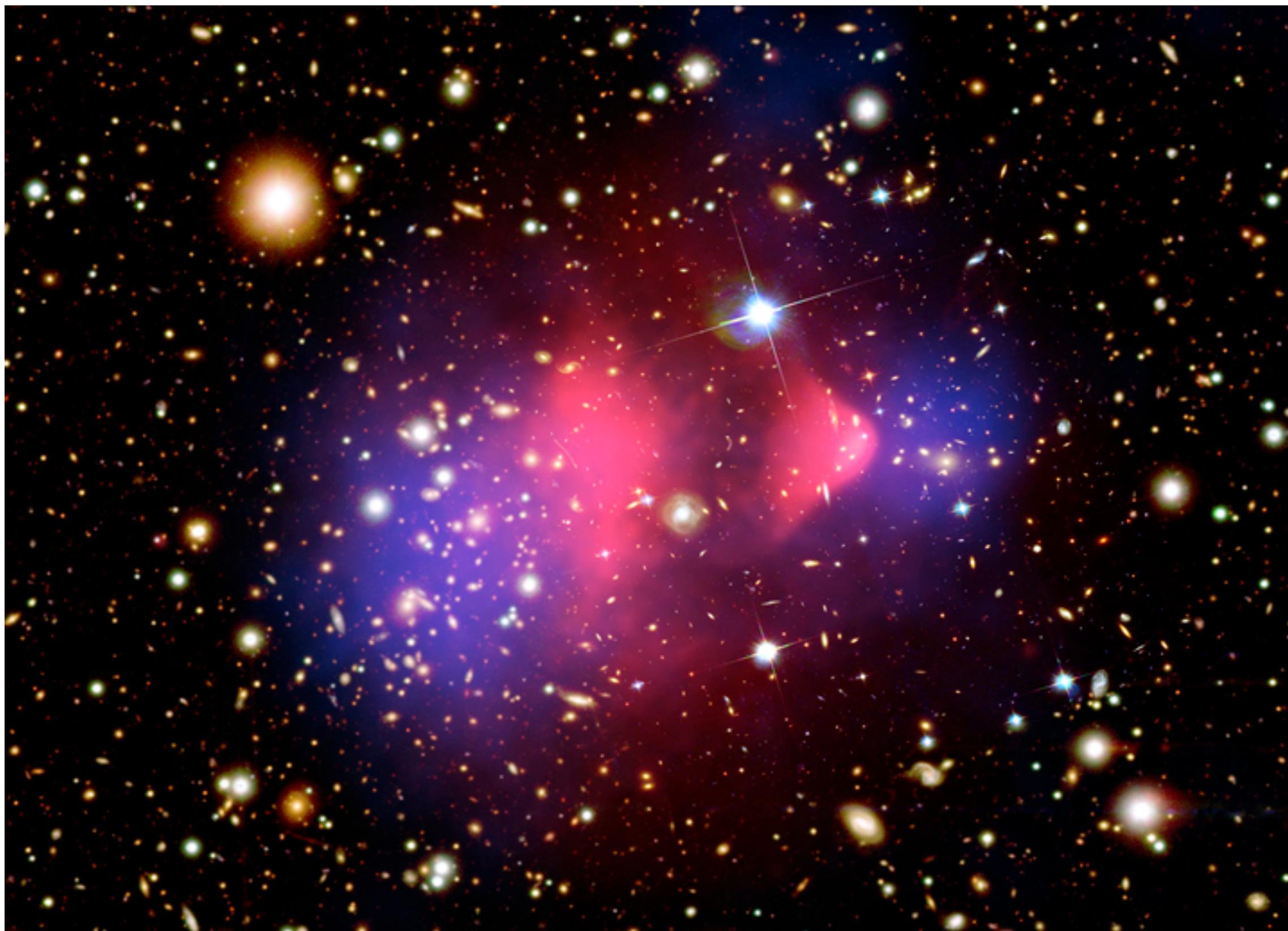


- ▶ Расстояния между звездами - несколько световых лет
- ▶ Плотность Темной Материи в солнечной системе  $\sim 1 \text{ ГэВ в } 3 \text{ см}^3$
- ▶ Межзвездная пыль в нашей галактике  $\sim 10^6$  атомов в  $1 \text{ см}^3$
- ▶ Межзвездная пыль взаимодействует сильнее темной материи



- ▶ “Видимая” часть спектра
- ▶ Видимое и рентгеновское излучение Bullet Cluster (1E 0657-558)

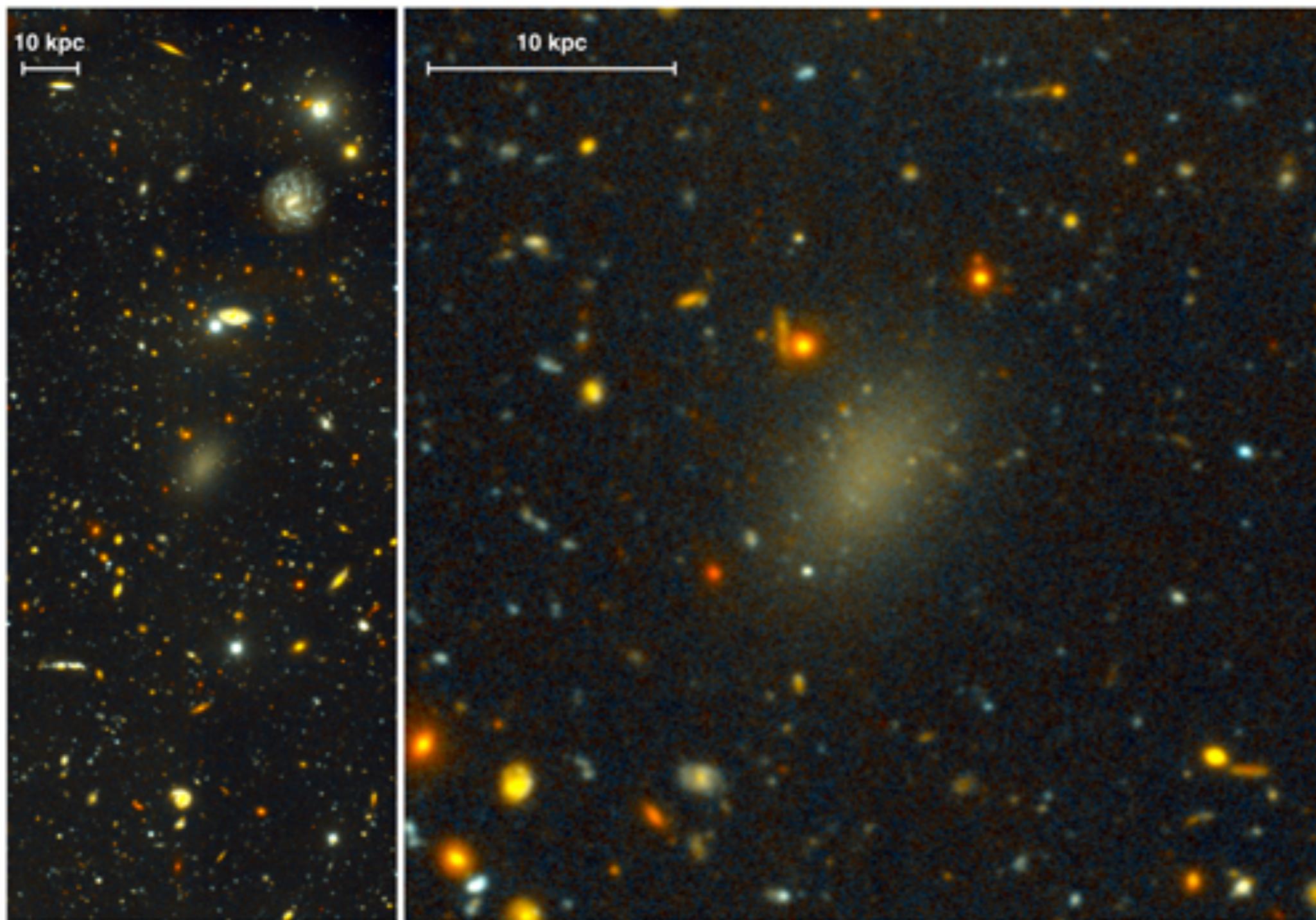






- ▶ Темная Материя в результате столкновения не изменила своей траектории
- ▶ Видимый межгалактический газ замедлился

# Темная Галактика



Gemini Images Galaxy That Is 99.99 Percent Dark Matter

# Альтернативные Модели

- ▶ М. Милгром в 1983 году заметил, что ньютоновская сила гравитации подтверждена только для относительно больших ускорений, и предположил, что для малых ускорений закон всемирного тяготения Ньютона может не работать.
- ▶ MOND устанавливает, что ускорение зависит нелинейно от создающей его массы для малых ускорений.
- ▶ Столкновение галактик в кластере Пули опровергает эту теорию
  - ▶ Но ее модифицированные версии все еще не опровергнуты

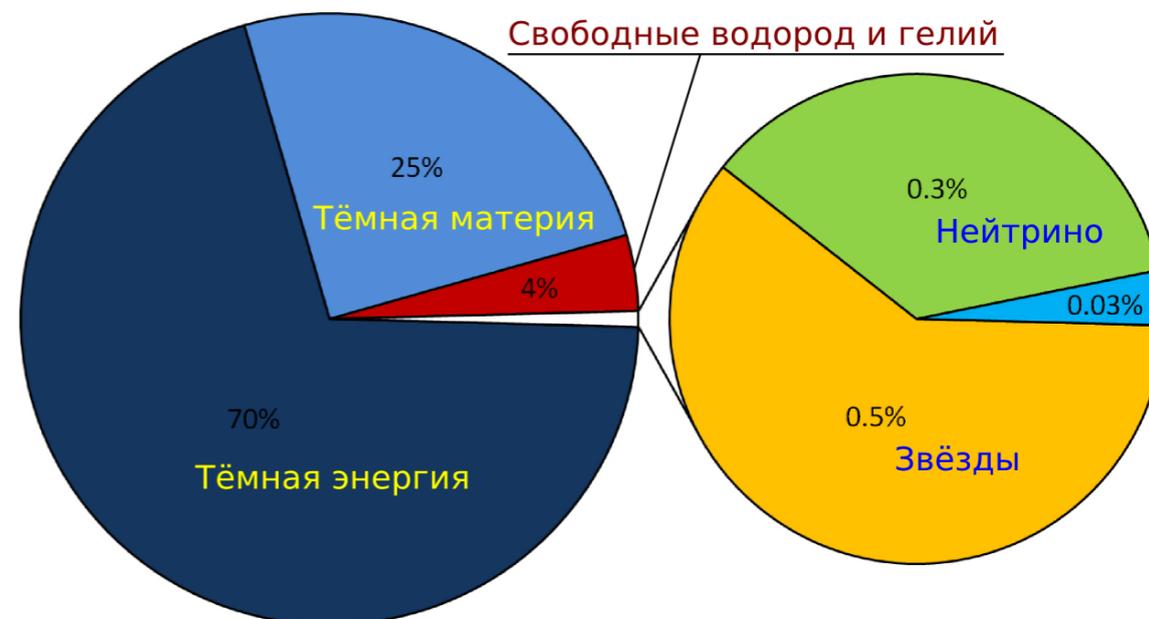
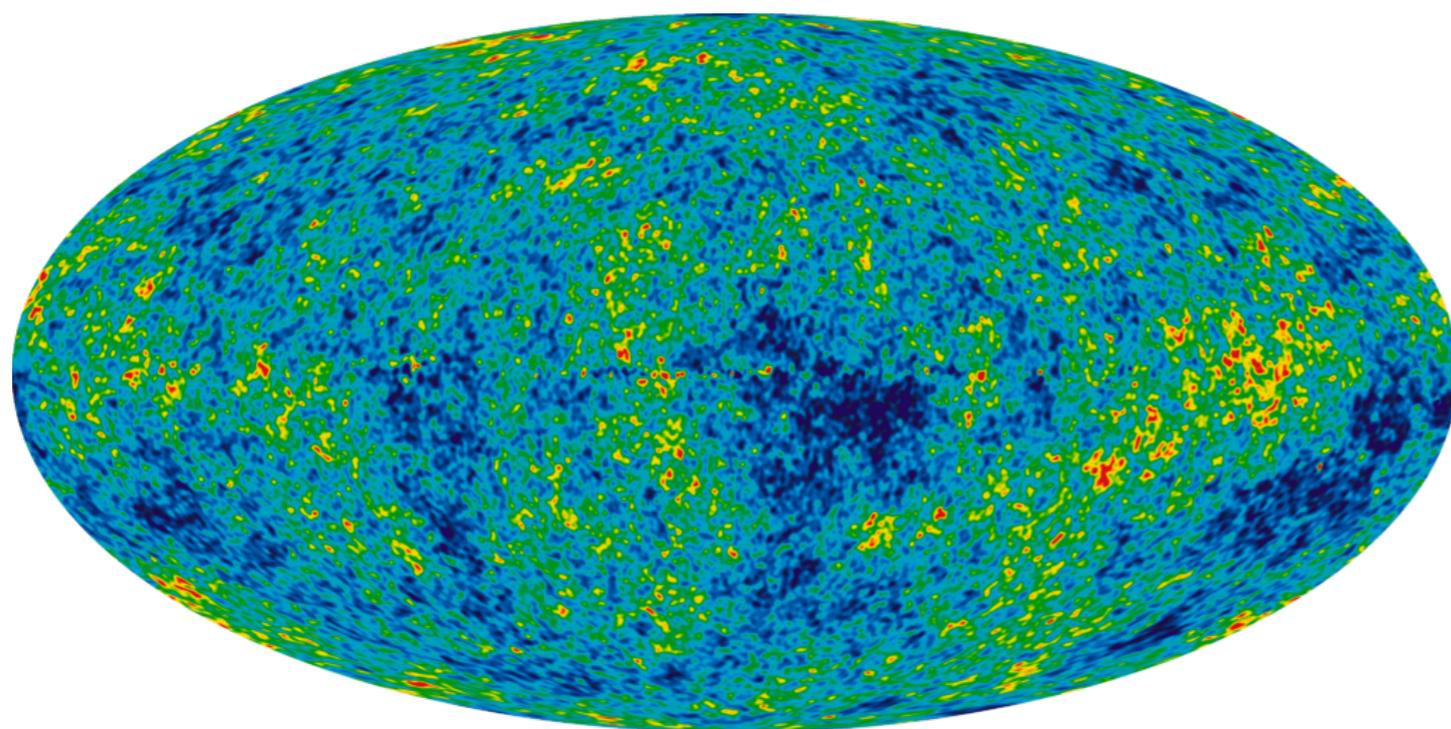
Модель Лямбда-CDM

или

Стандартная

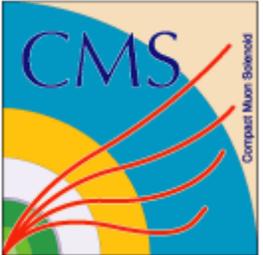
Космологическая

Модель



- ▶ Структура Реликтового излучения (2.7К) → параметры модели
- ▶ Объясняет эффект ускорения расширения Вселенной
- ▶ Темная Материя ключевой элемент
  - ▶ Наиболее точные оценки плотности Темной Материи

**Из чего состоит  
Темная Материя?**

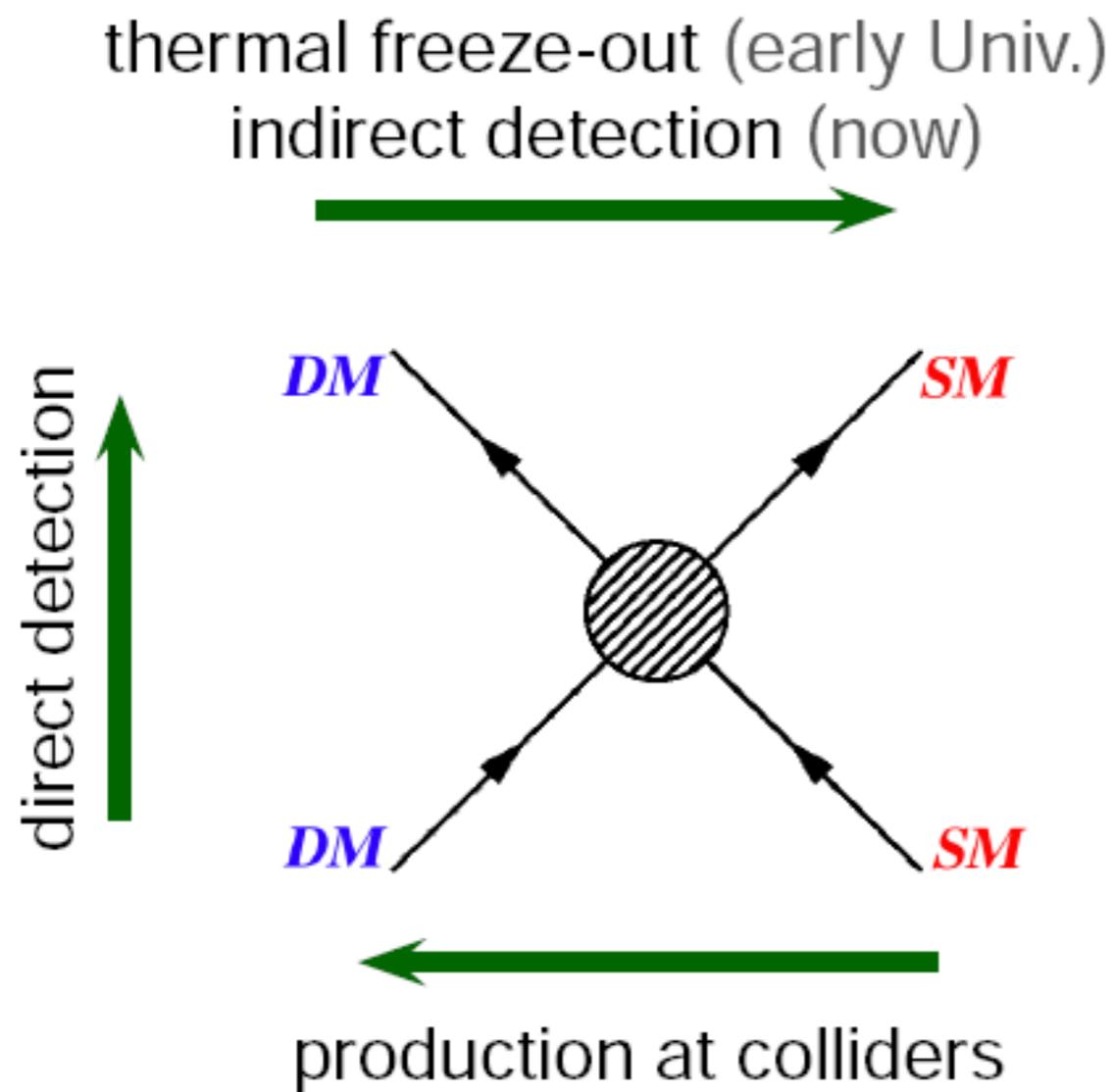


- ▶ Massive Astrophysical Compact Halo Objects, MACHO
  - ▶ Материя состоящая из барионов, которые излучают мало энергии, но обладают большой массой
    - ▶ Черные дыры, нейтронные звезды, карликовые звезды и юпитеро-подобные планеты
- ▶ MACHO противоречит теории Большого взрыва и зависимой от него концентрации лёгких элементов после первичного нуклеосинтеза.
- ▶ Отсутствие сильных гравитационных линз в нашей вселенной также опровергает MACHO.

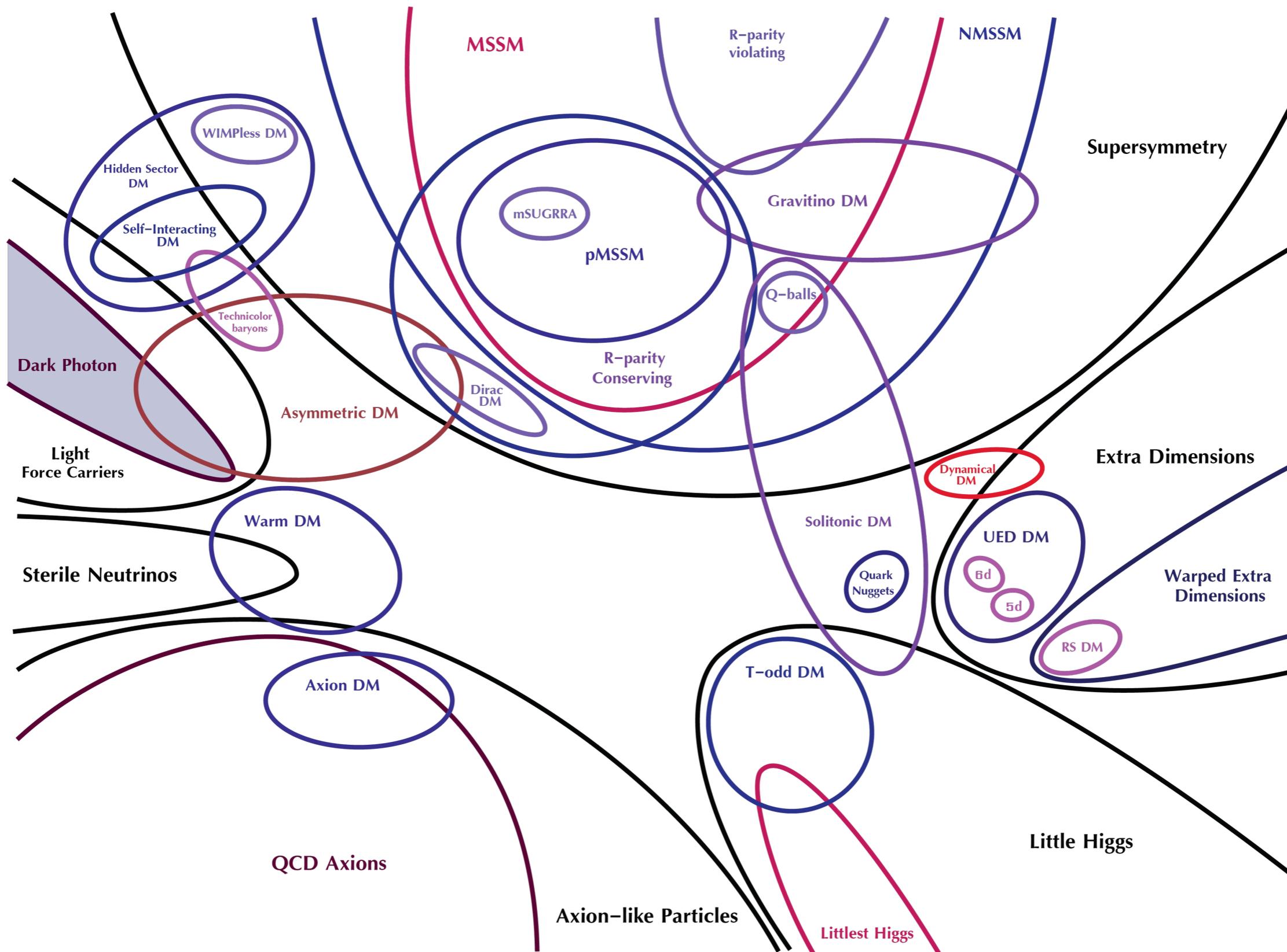


- ▶ **Типы Темной Материи**
  - ▶ **Релятивистская горячая темная материя - Лёгкие нейтрино**
    - ▶ Свободный пробег больше размера порто-галактик
      - ▶ Невозможно формирование галактик и галактических кластеров
    - ▶ Масса известных 3-х поколений нейтрино недостаточна
  - ▶ **Теплая темная материя**
    - ▶ Стерильные нейтрино
  - ▶ **Холодная темная материя**
    - ▶ Неизвестные частицы

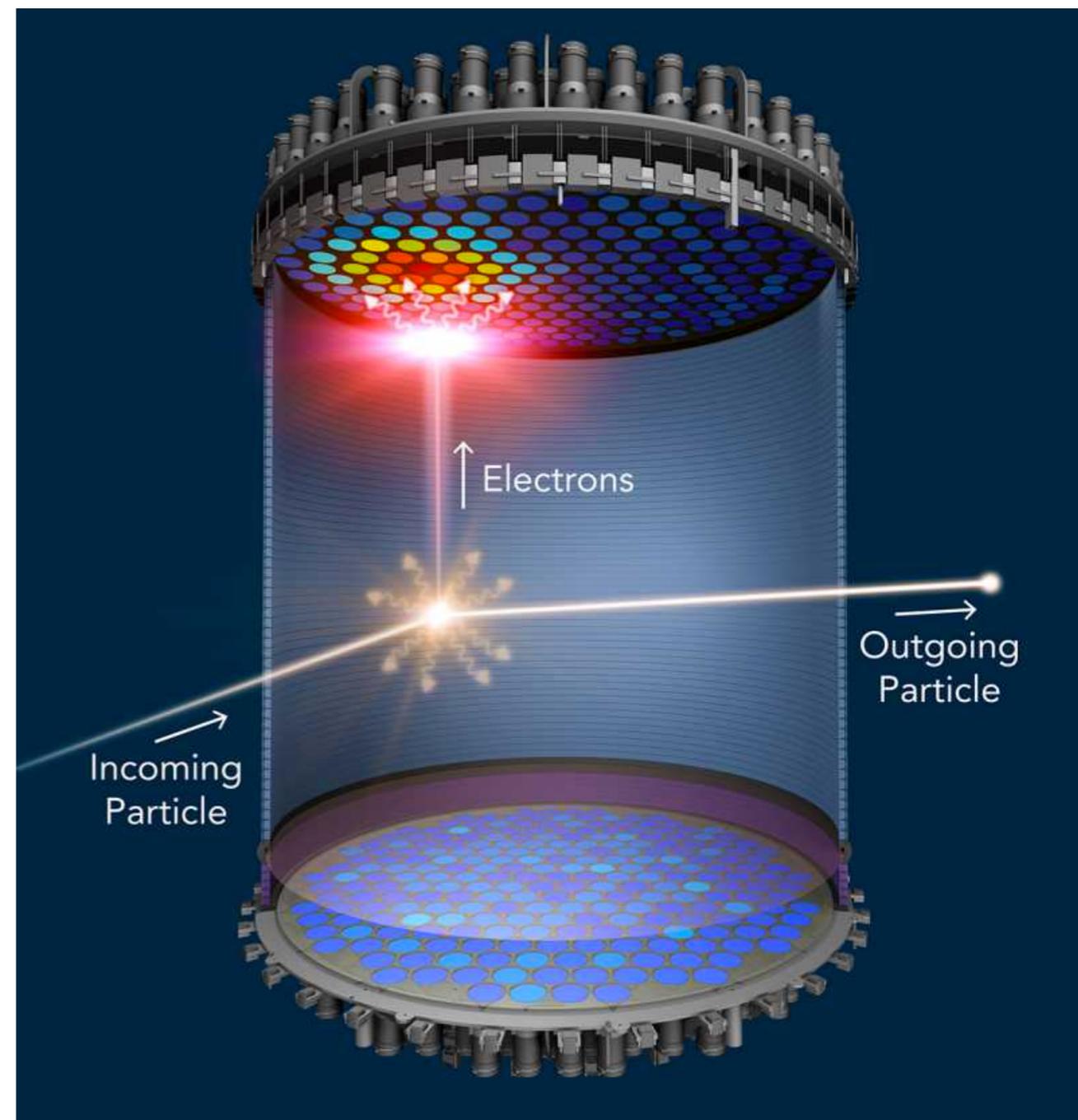
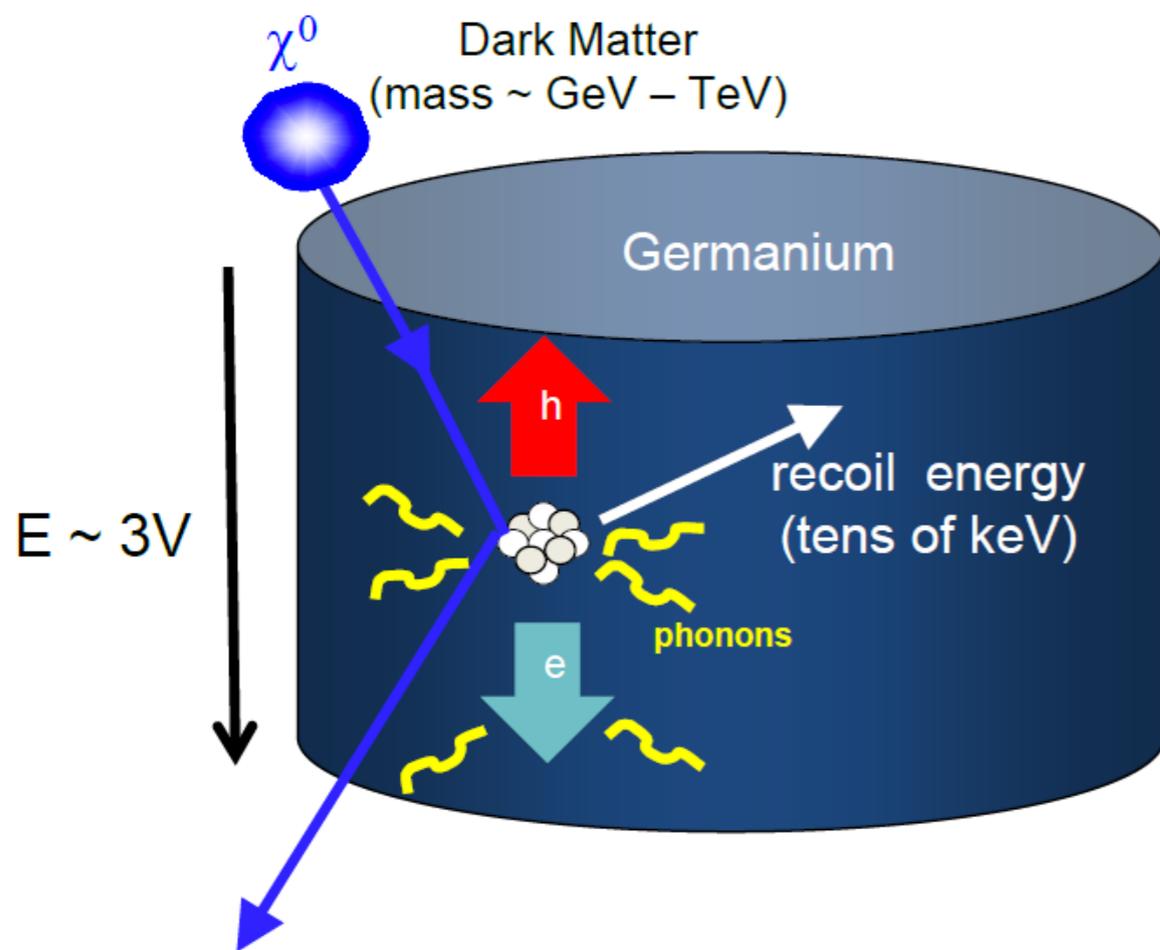
# Поиск Темной Материи



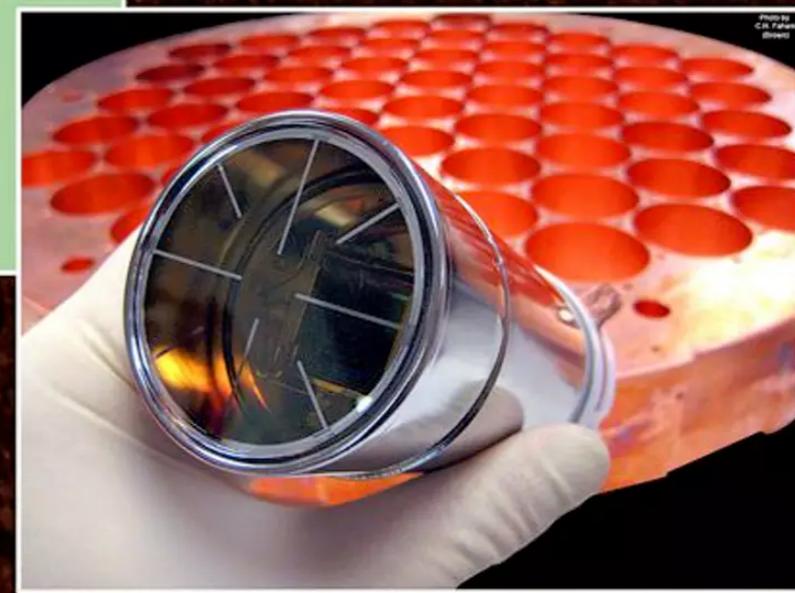
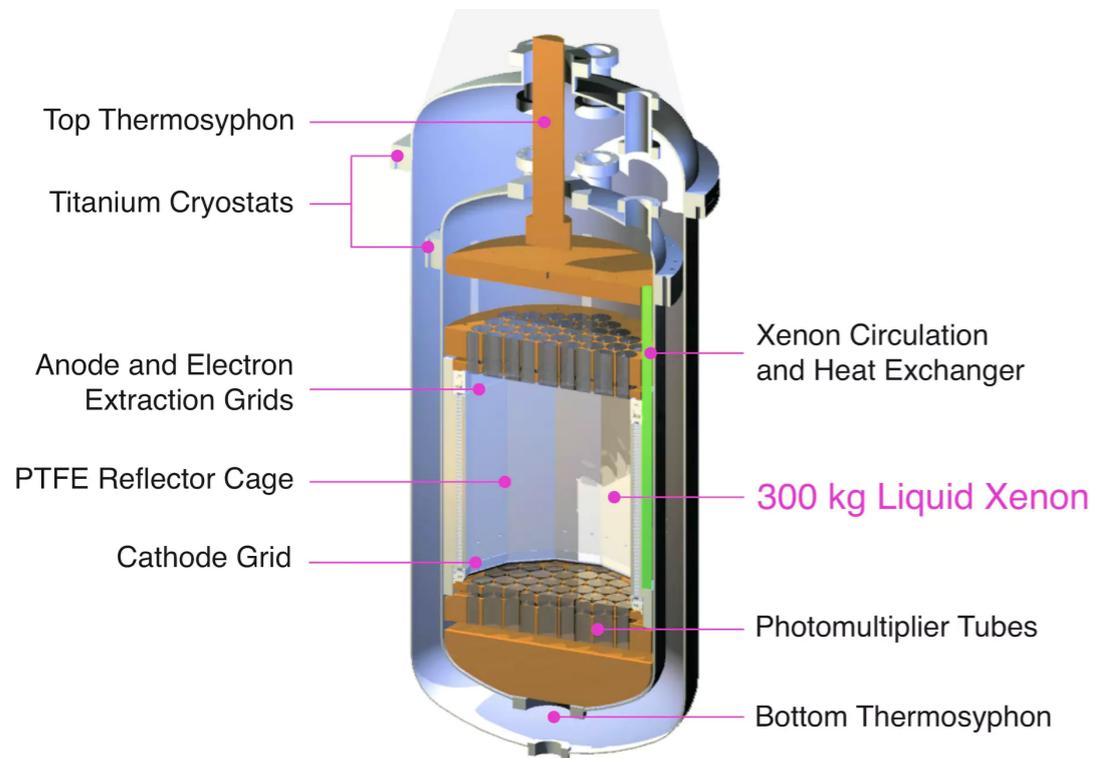
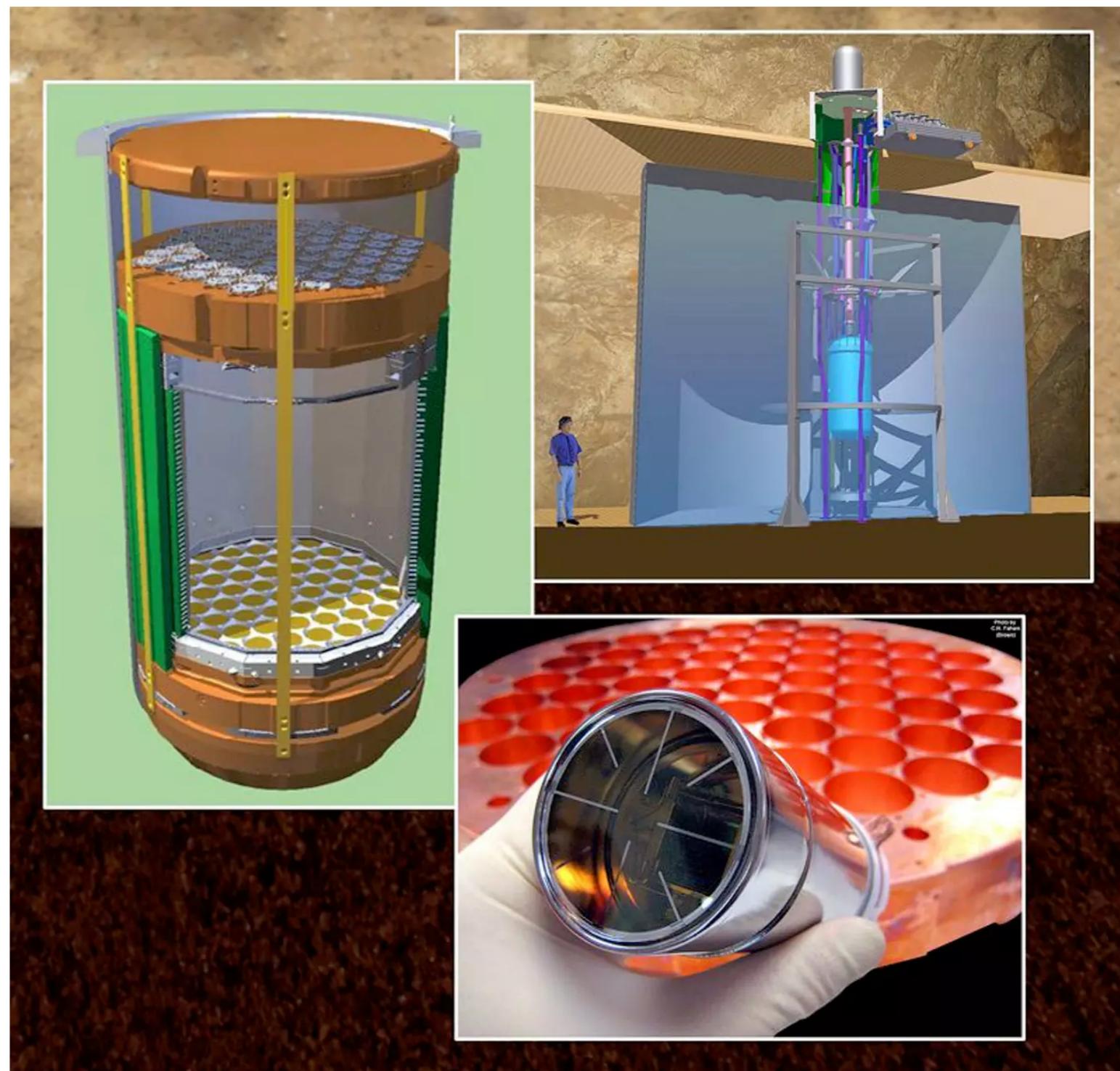
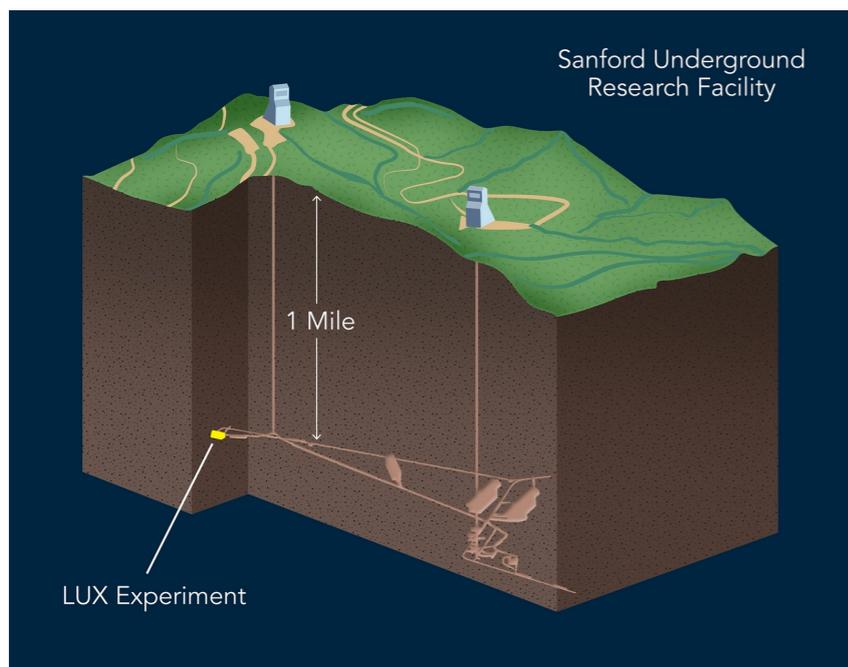
- ▶ **Direct Detection**
  - ▶ Рассеивание на ядрах и нуклонах
- ▶ **Indirect Detection**
  - ▶ Аннигиляция темной материи
- ▶ **Colliders**
  - ▶ Создание темной материи



# Direct Detection



# Experiment LUX



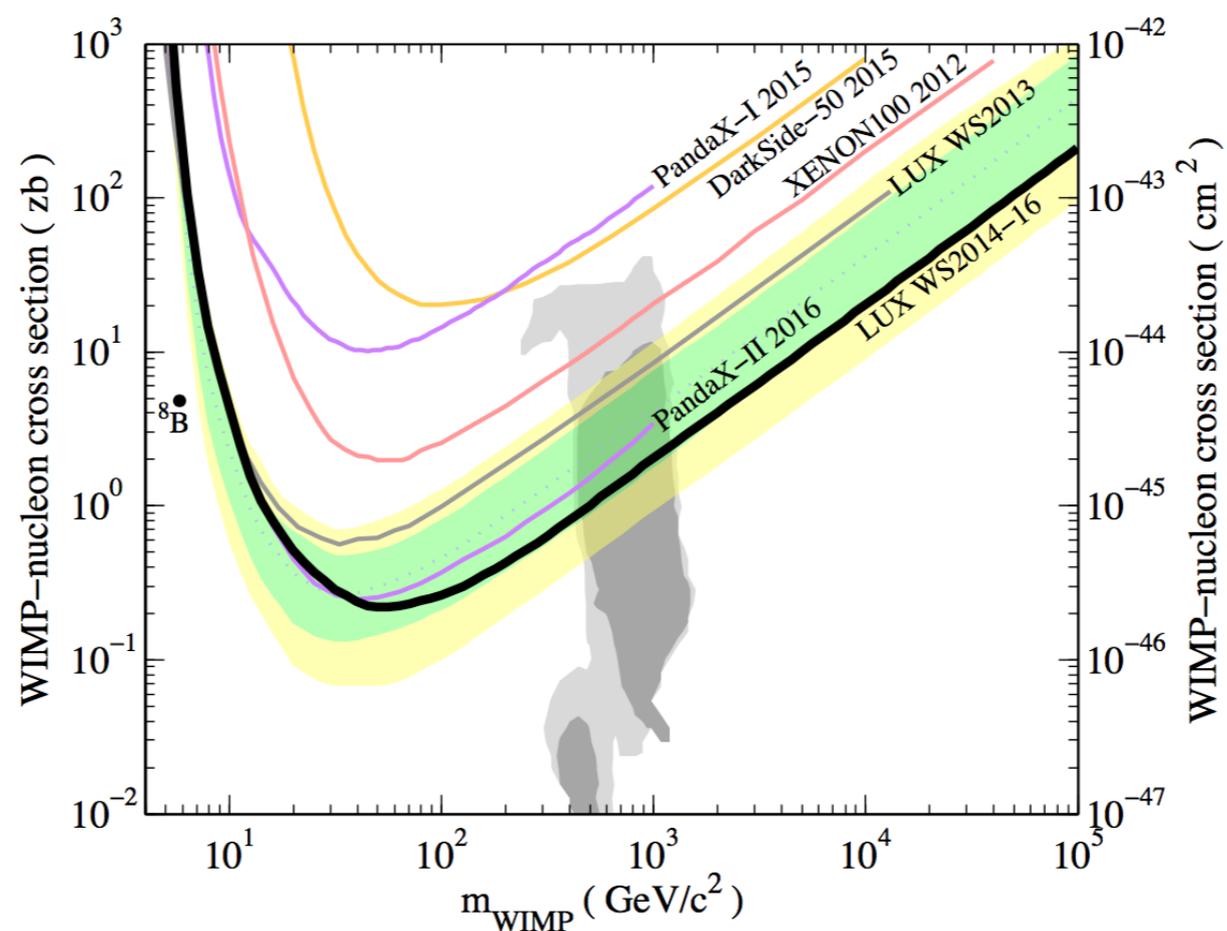


FIG. 3. Upper limits on the spin-independent elastic WIMP-nucleon cross section at 90% CL. Observed limit in solid black, with the mean and 1(2)- $\sigma$  ranges of background-only trials in dotted gray and shaded green(yellow). Also shown are limits from LUX WS2013 [9] (gray), XENON100 [44] (red), DarkSide-50 [45] (orange), PandaX-I [46], and PandaX-II [47] (both purple). The expected spectrum of coherent neutrino-nucleus scattering by  $^8\text{B}$  solar neutrinos can be fit by a WIMP model as in [48], plotted here as a black dot. Parameters favored by SUSY CMSSM [49] before this result are indicated as dark and light gray (1- and 2- $\sigma$ ) filled regions.

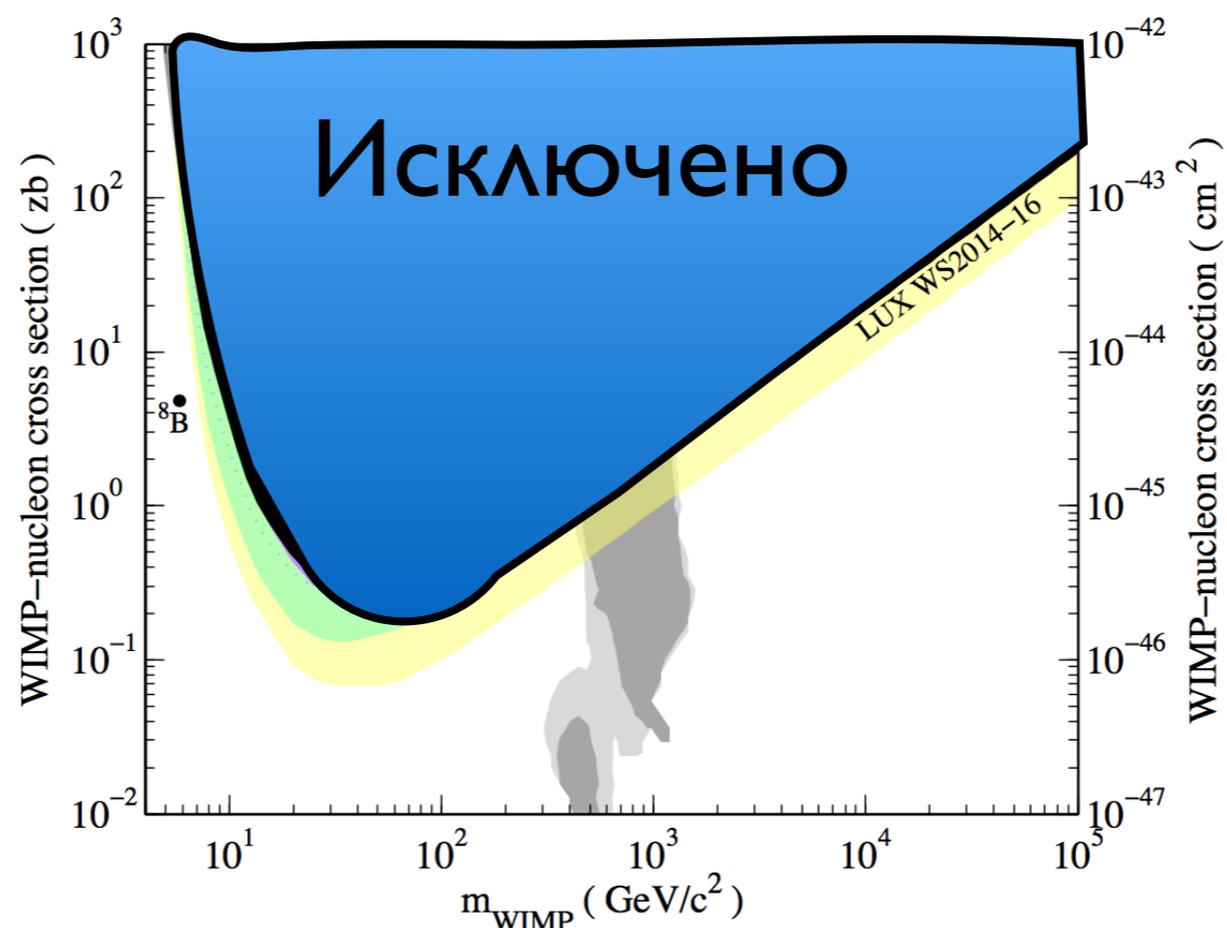
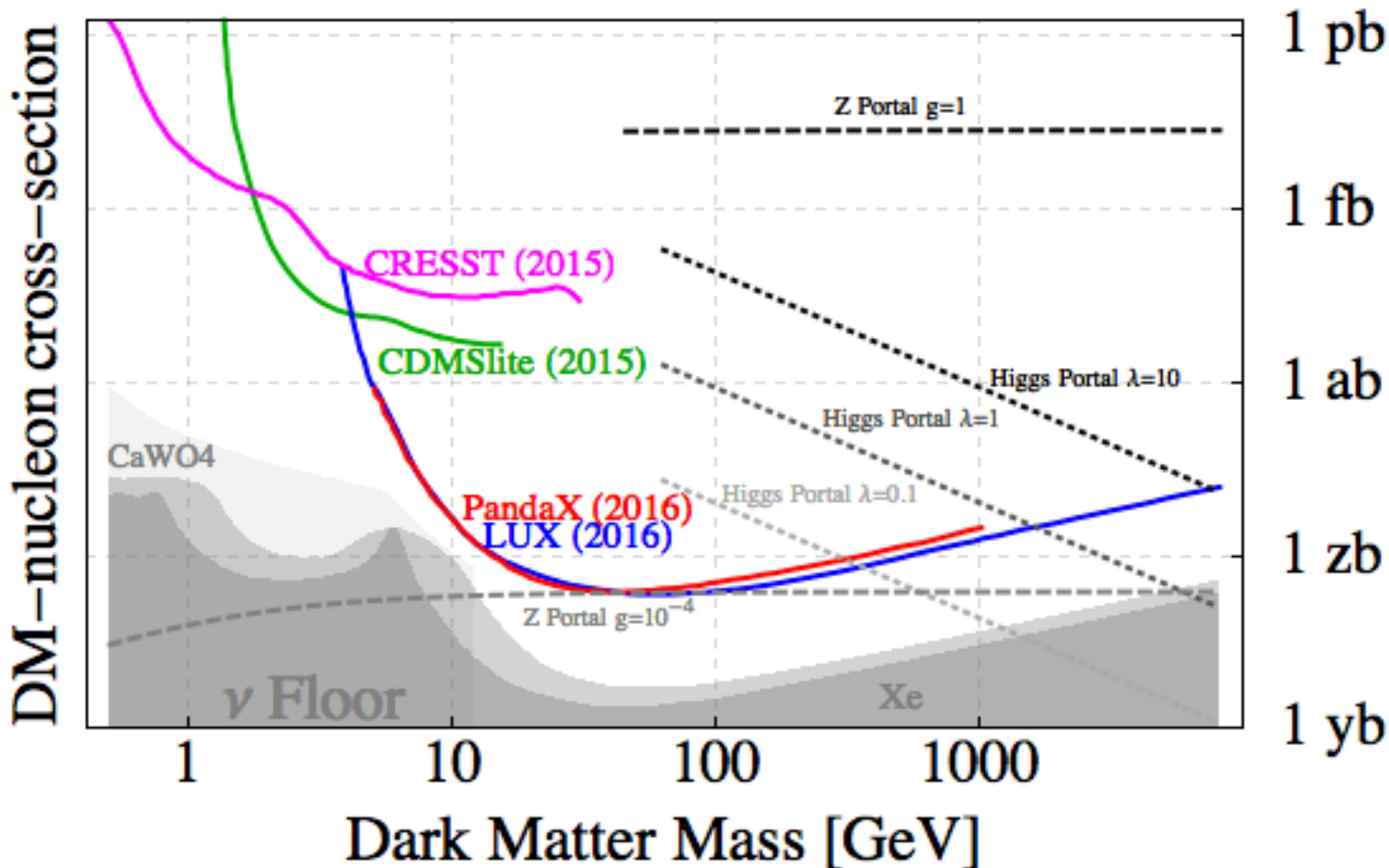
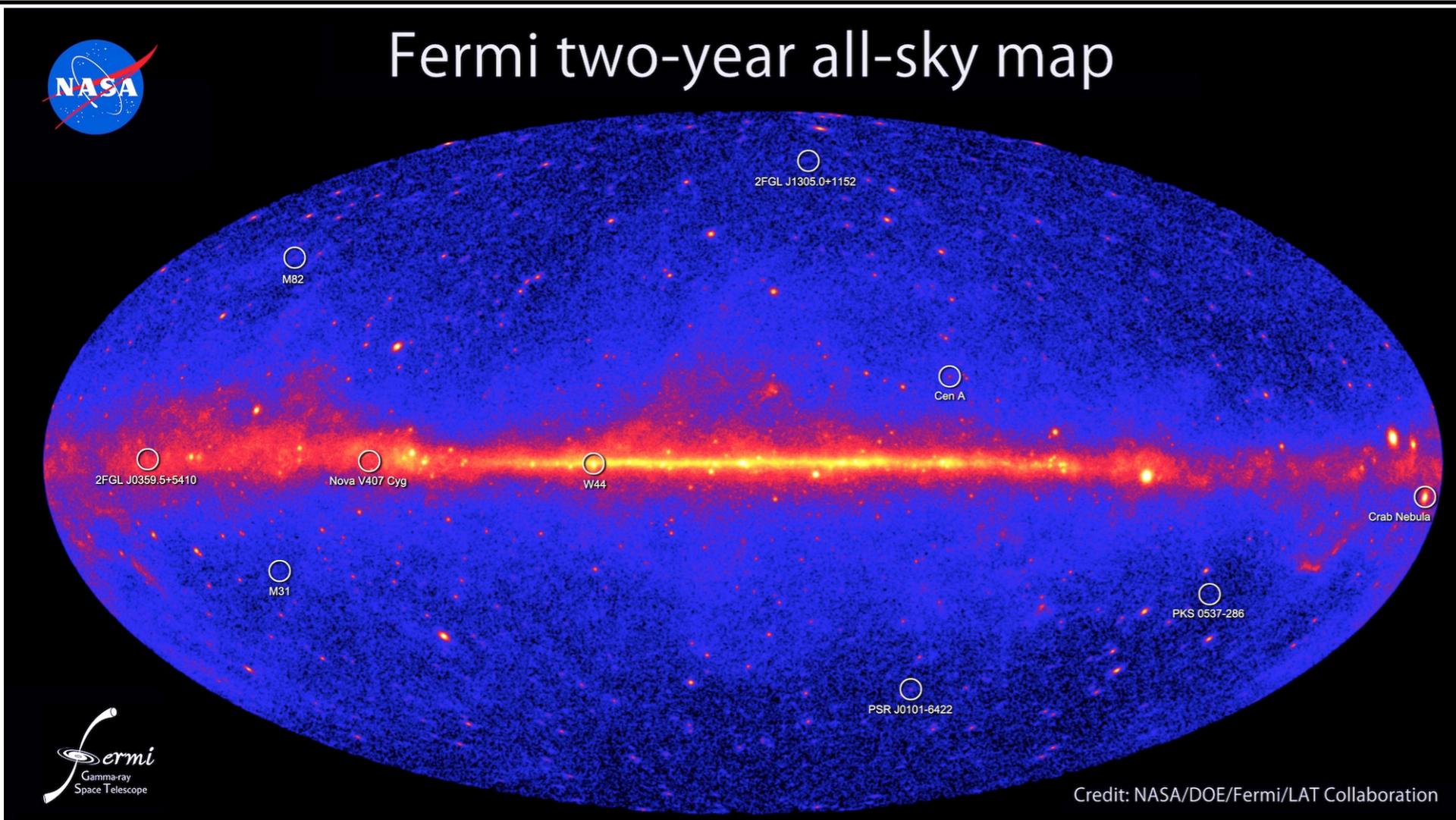


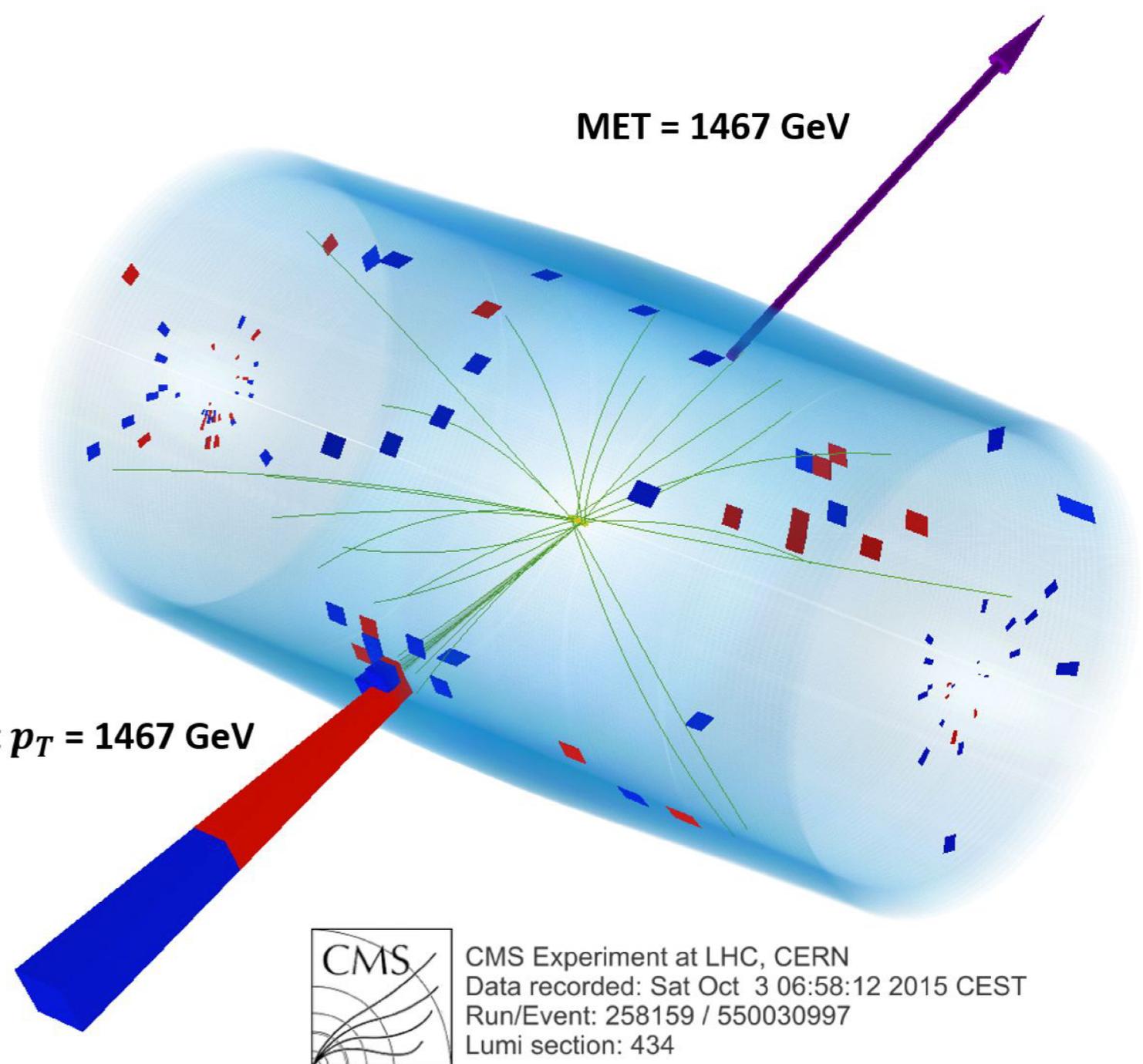
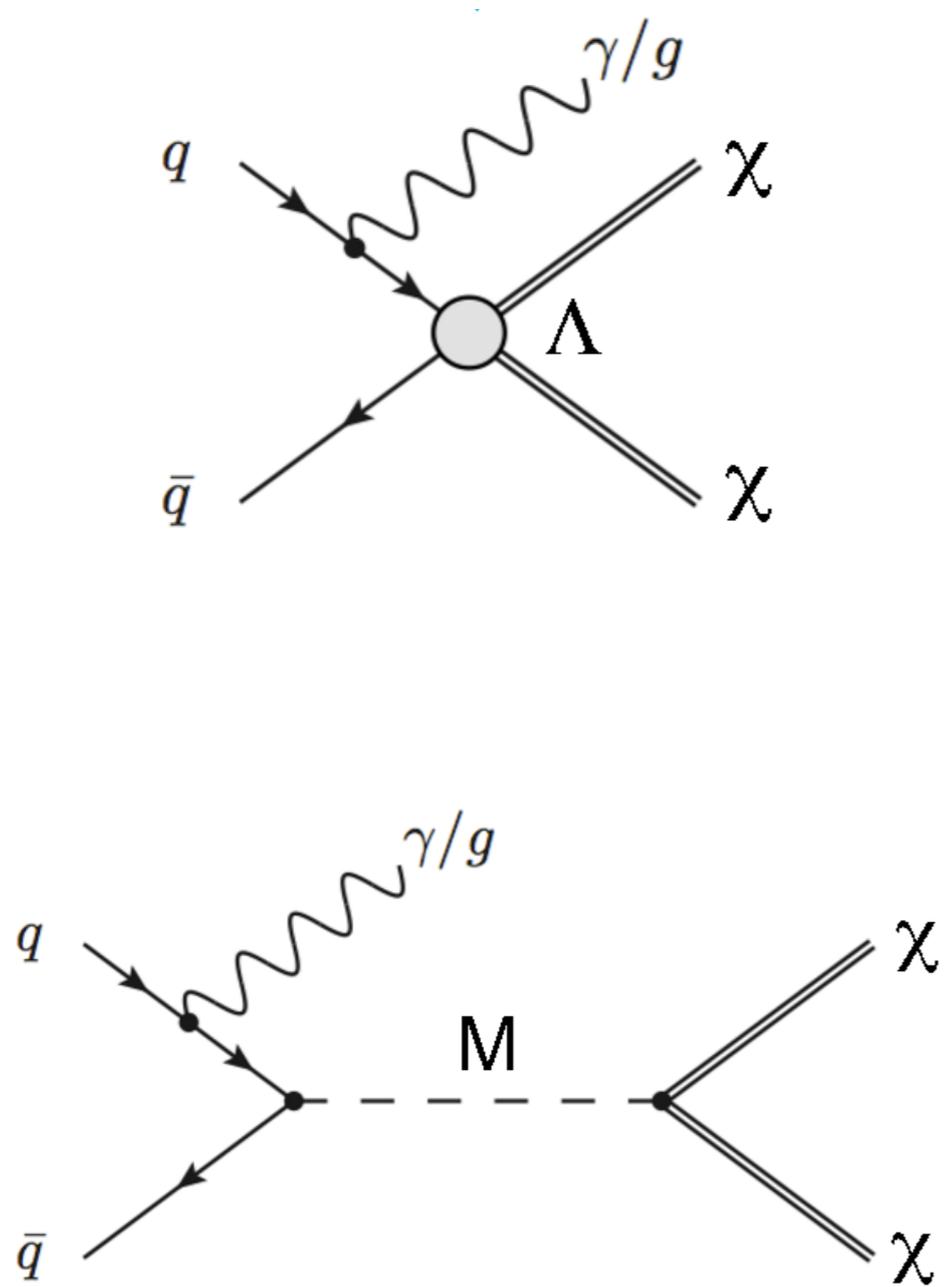
FIG. 3. Upper limits on the spin-independent elastic WIMP-nucleon cross section at 90% CL. Observed limit in solid black, with the mean and 1(2)- $\sigma$  ranges of background-only trials in dotted gray and shaded green(yellow). Also shown are limits from LUX WS2013 [9] (gray), XENON100 [44] (red), DarkSide-50 [45] (orange), PandaX-I [46], and PandaX-II [47] (both purple). The expected spectrum of coherent neutrino-nucleus scattering by  $^8\text{B}$  solar neutrinos can be fit by a WIMP model as in [48], plotted here as a black dot. Parameters favored by SUSY CMSSM [49] before this result are indicated as dark and light gray (1- and 2- $\sigma$ ) filled regions.

Limits on Dark Matter from Direct Detection



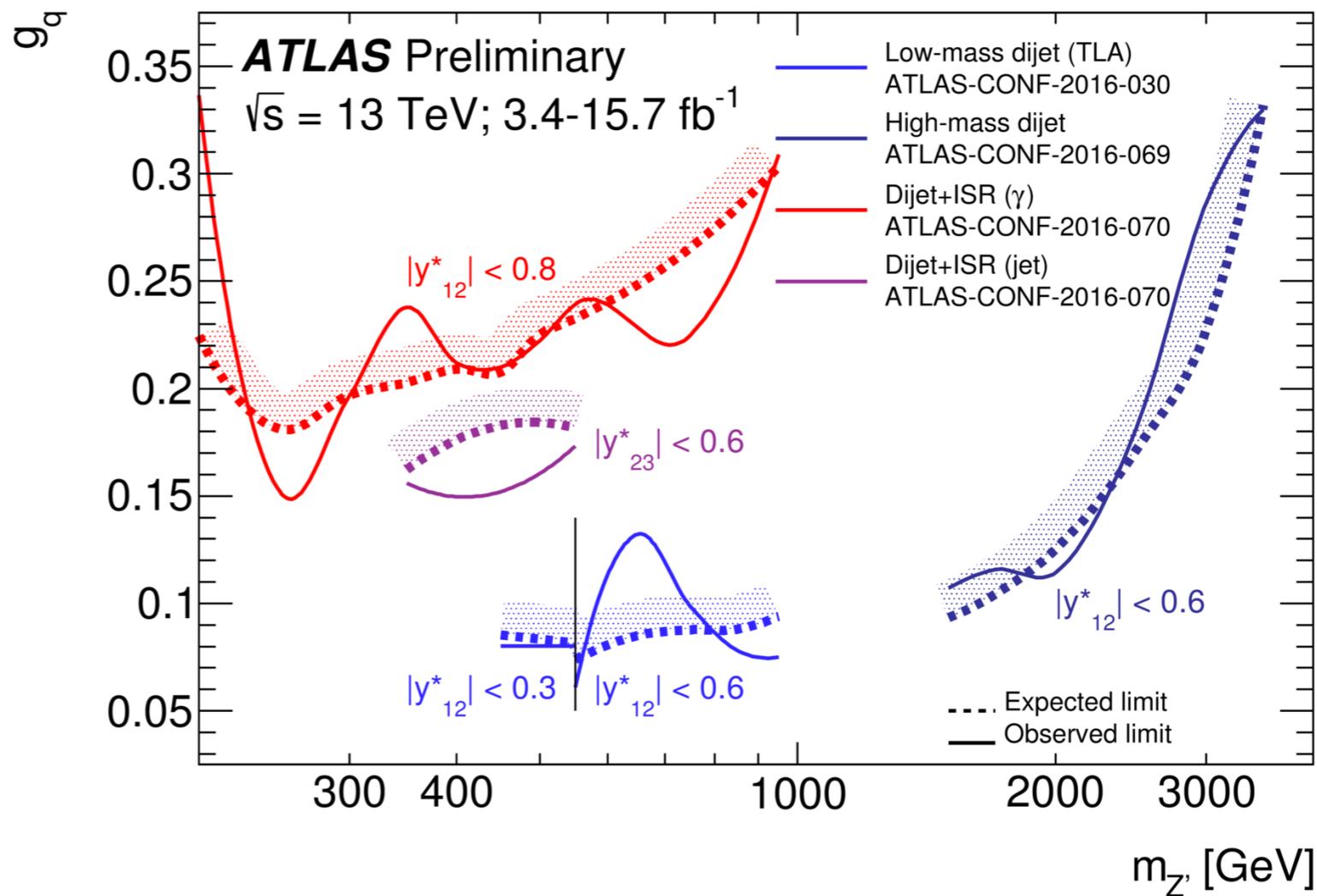
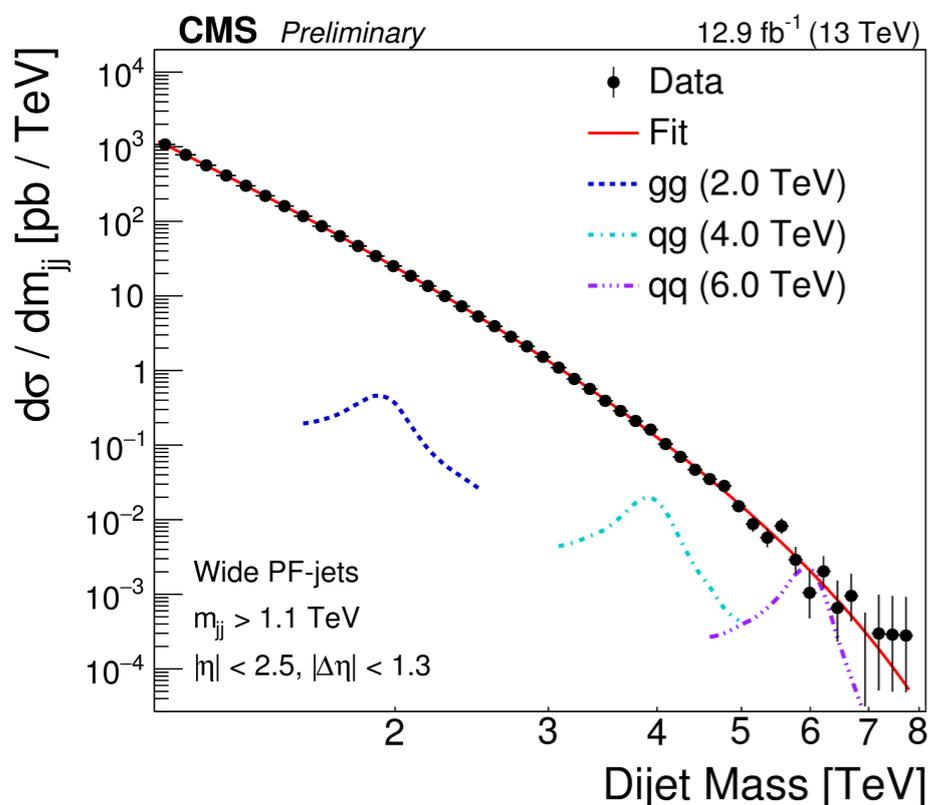
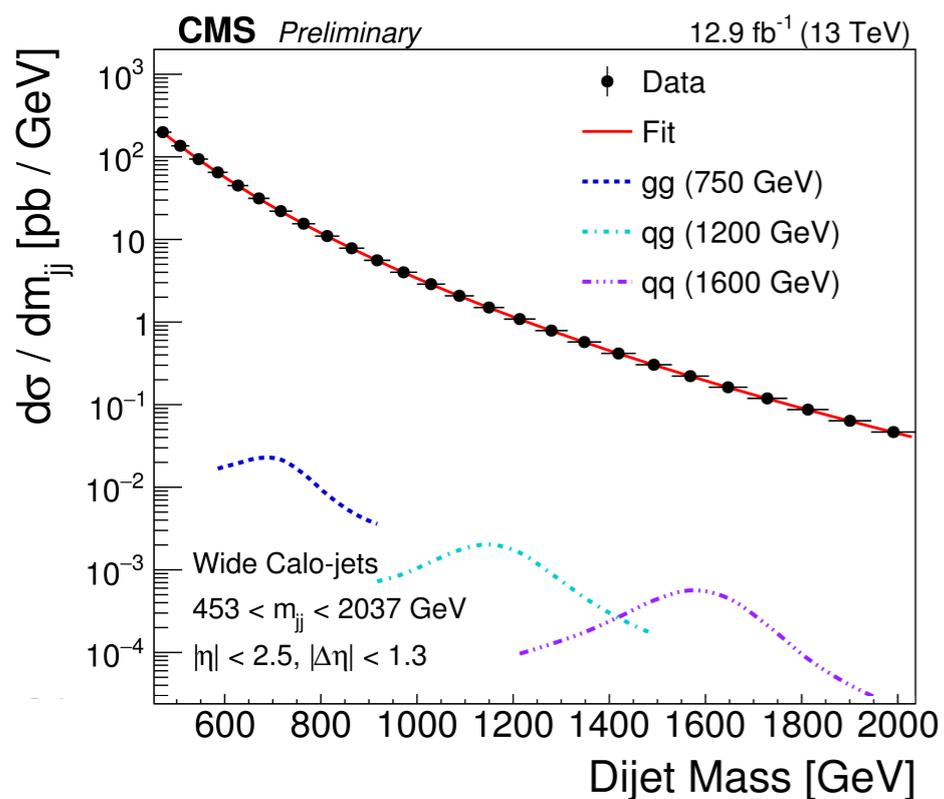


- ▶ **Высоко энергичные частицы из космоса**
  - ▶ **Фотоны**
  - ▶ **Электроны**
  - ▶ **Анти-частицы (позитроны, анти-протоны)**



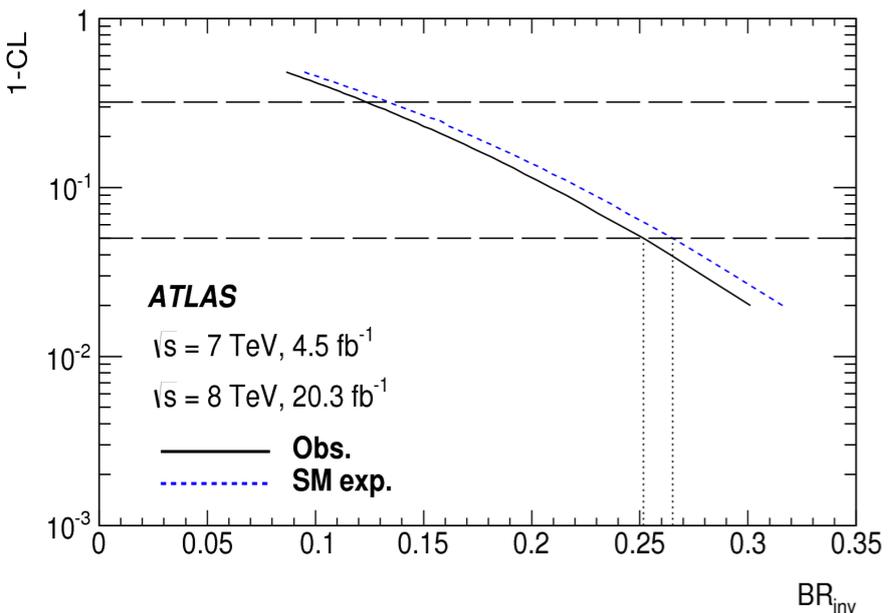
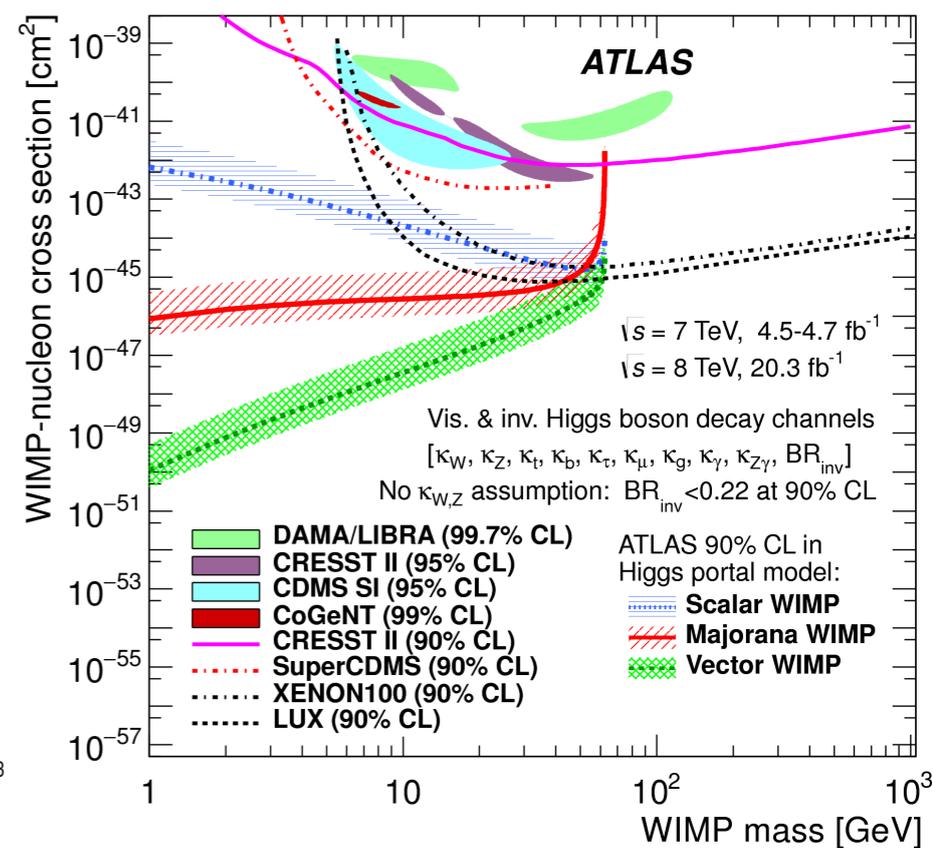
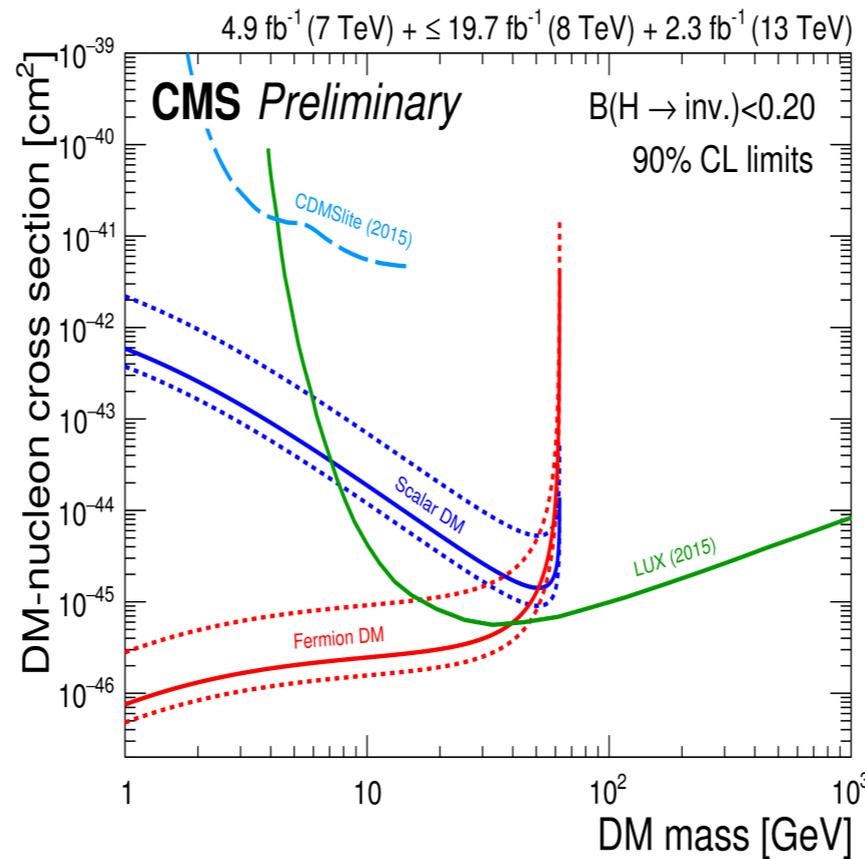
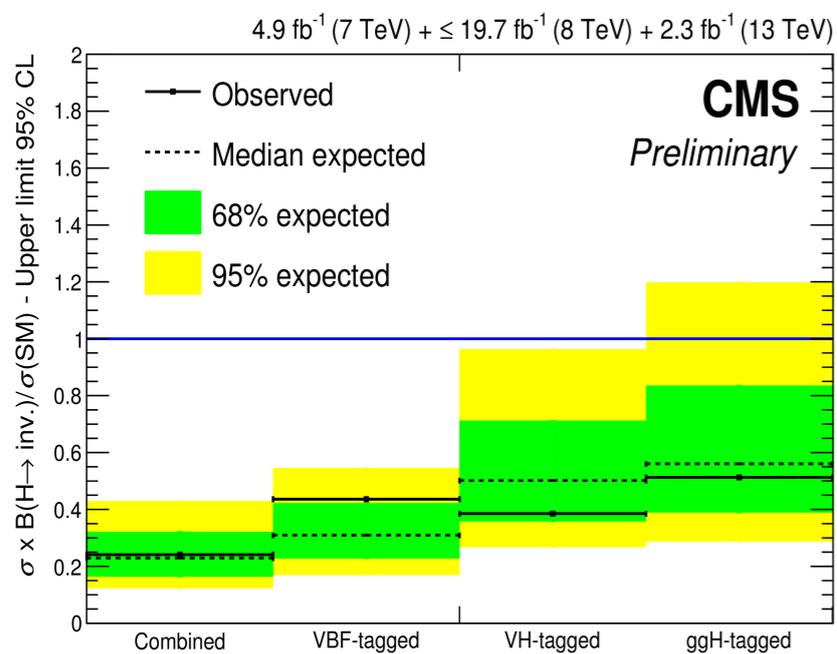
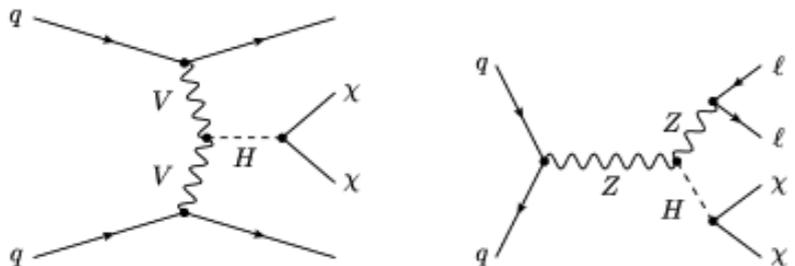

 CMS Experiment at LHC, CERN  
 Data recorded: Sat Oct 3 06:58:12 2015 CEST  
 Run/Event: 258159 / 550030997  
 Lumi section: 434

# Dijet Searches



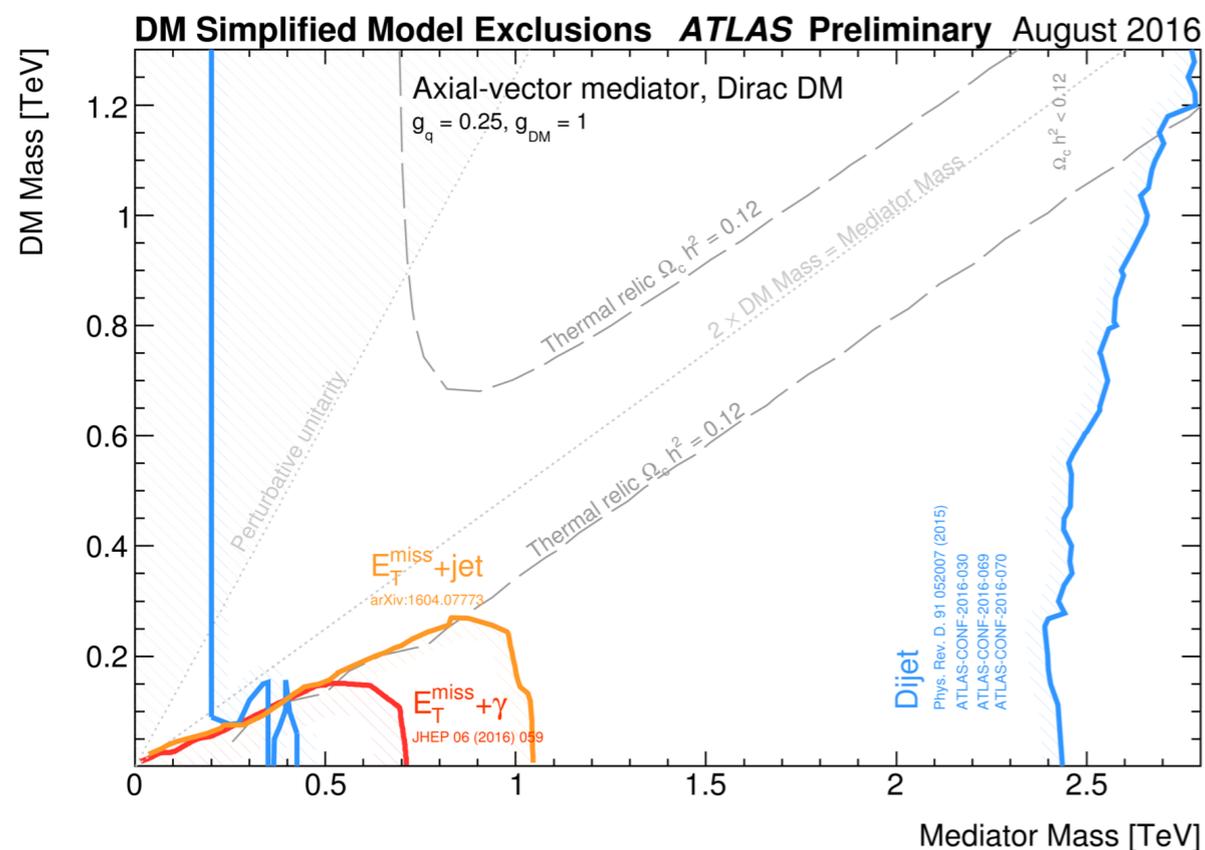
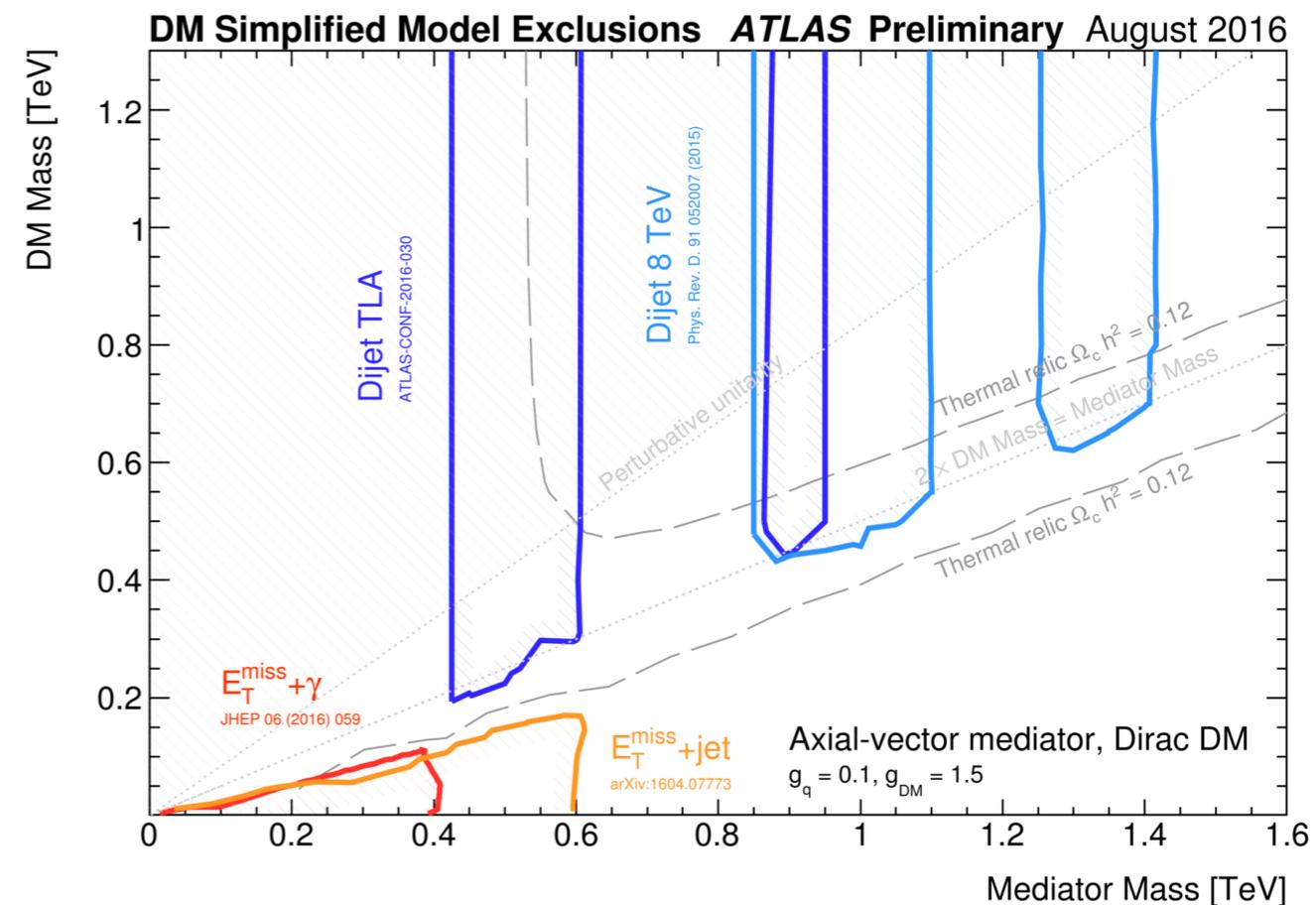
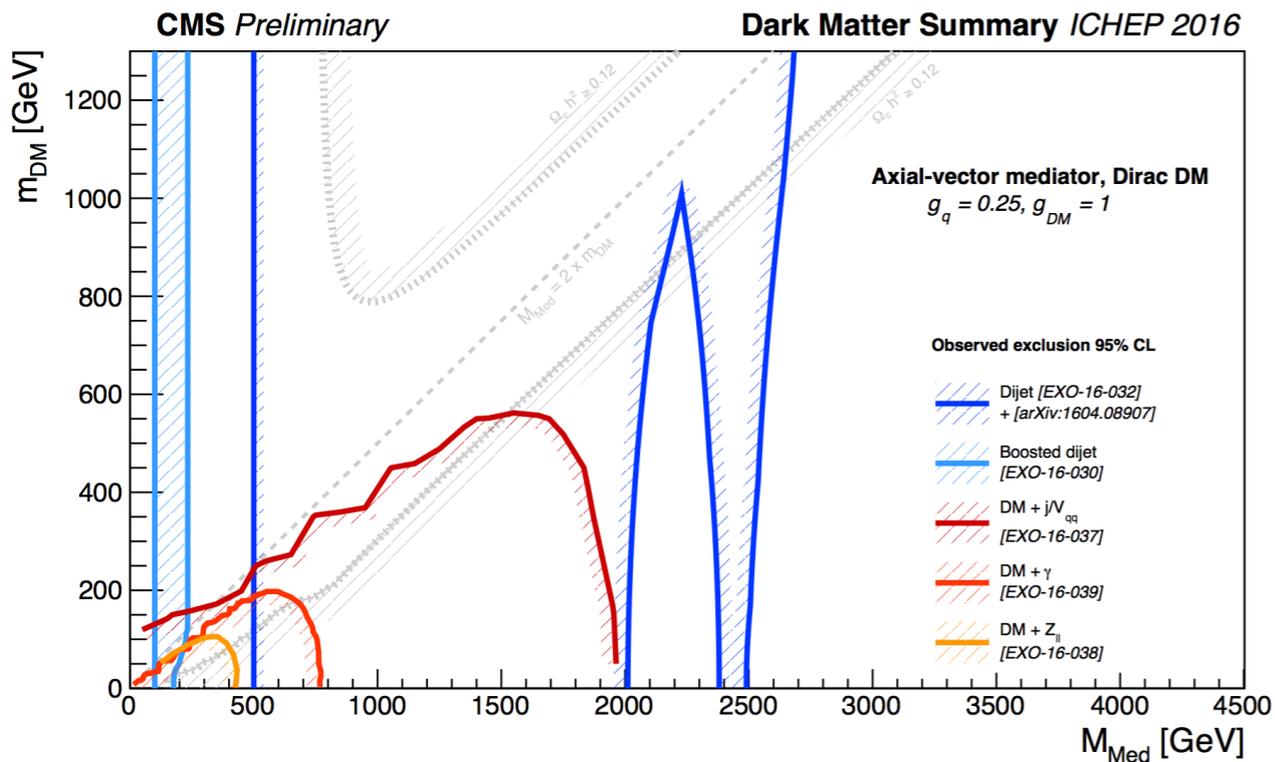
- ▶ Mediators coupling to quarks and gluons can be searched for in di-jet final state
  - ▶ one of the most sensitive channels for new dijet resonances
- ▶ Strong limits are set for mediators with couplings to SM as low as  $g_q \sim 0.1$

# Invisible Higgs

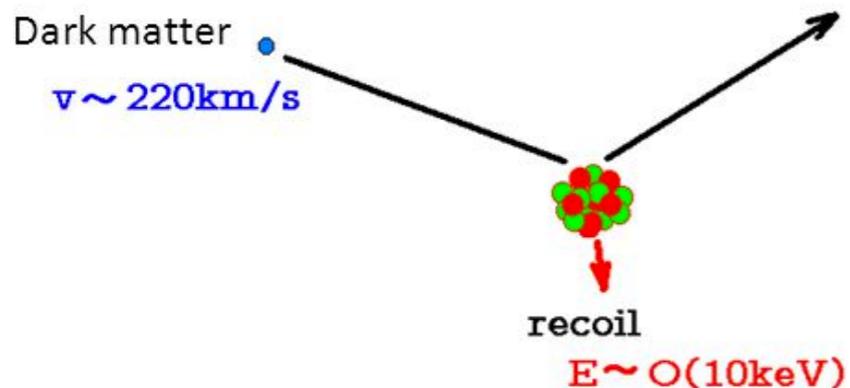


- ▶ Higgs boson can be the mediator between Dark Matter and SM sector
- ▶ Direct and Indirect searches for invisible Higgs decay provide stringent limits on this model
- ▶ Expand limits set by DD searches at low DM mass

# Summary Plots

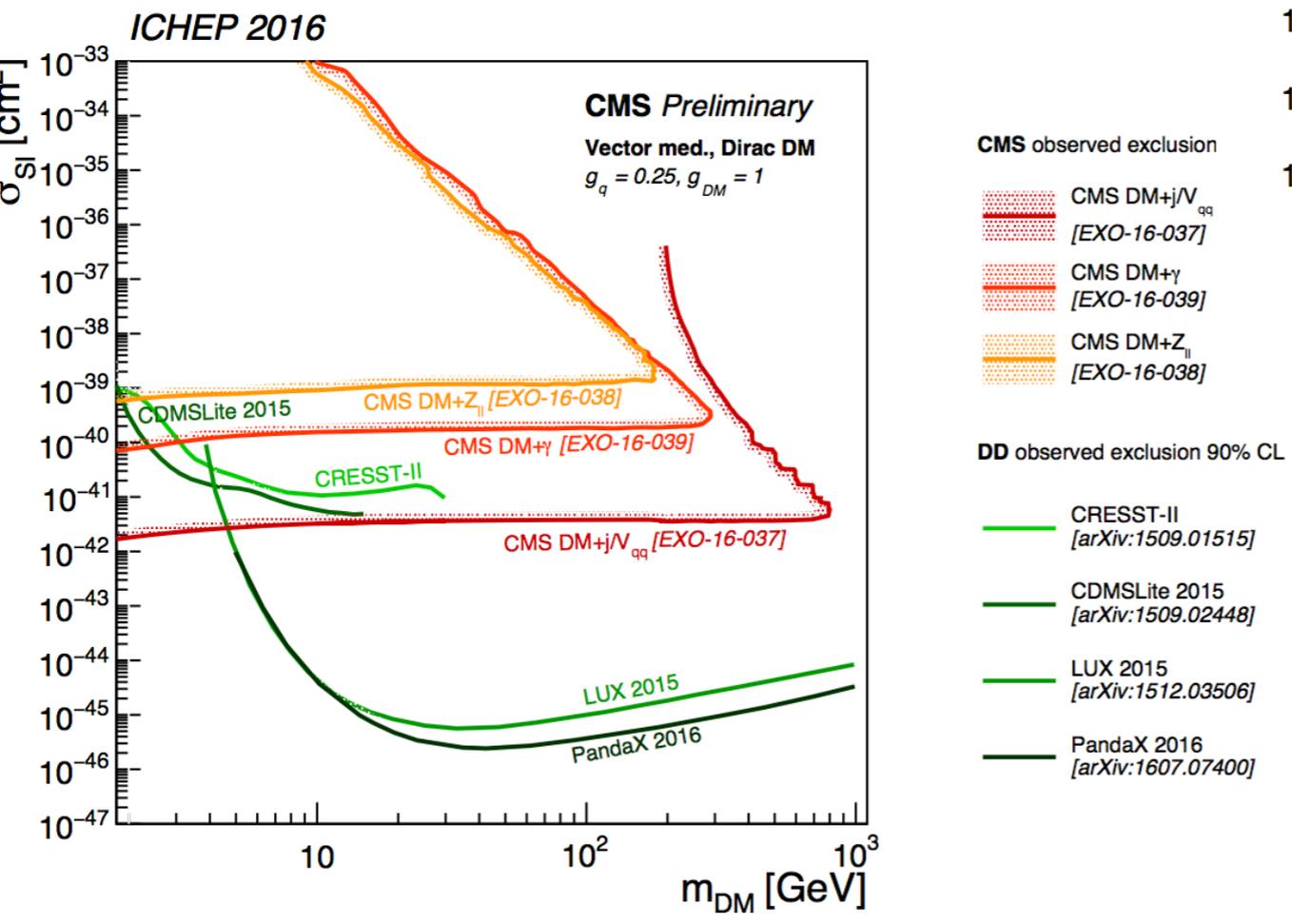
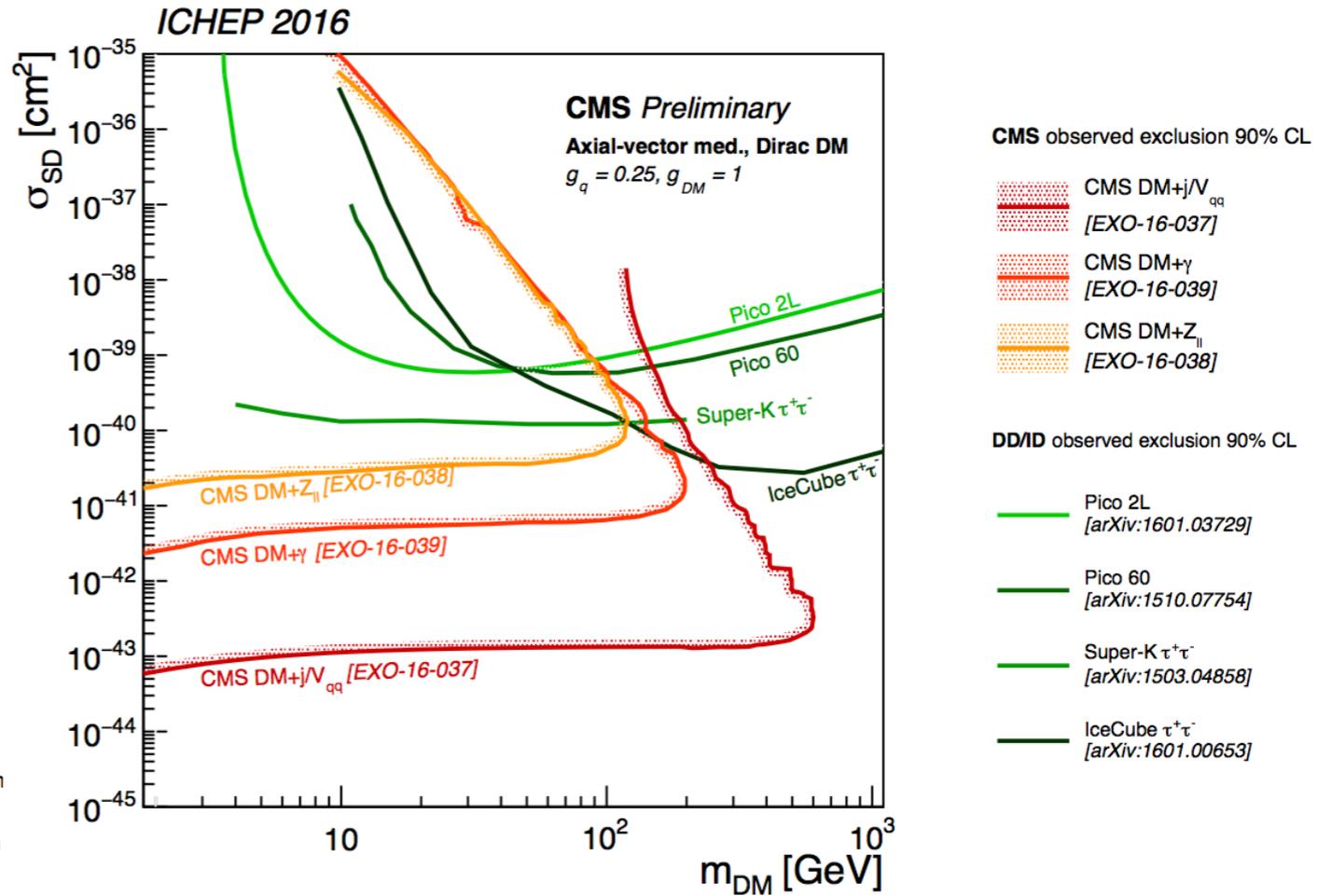


- ▶ MET+X Dark Matter searches can be combined with the dijet Mediator searches
- ▶ Plots show Simplified Model with axial-vector mediator
- ▶ For  $g_q=0.25, g_{DM}=1$  dijet results dominate, but the picture is changing when couplings to SM are reduced



$$\mathcal{L} = \sum_{N=p,n} f_N \bar{\chi}^0 \chi^0 \bar{N} N + a_N \bar{\chi}^0 \sigma_a \chi^0 \bar{N} \sigma_a N$$

Spin-independent (SI) interaction      Spin-dependent (SD) interaction



- ▶ Simplified Models allow for comparisons with Direct and Indirect Detection searches
- ▶ Relict density is not used in the constraints
- ▶ Results strongly depend on the choice of SM and DM couplings

- ▶ Существование Темной Материи общепризнанный факт
- ▶ Поиск Темной Материи одно из важнейших направлений физики частиц и высоких энергий
- ▶ Большой класс экспериментов чувствителен к Темной Материи
  - ▶ Недостаток сведений о Темной Материи требует широкомасштабного подхода к ее поиску
- ▶ Новые результаты ожидаются весной 2017 года