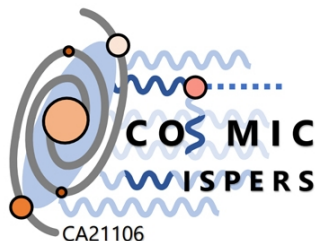


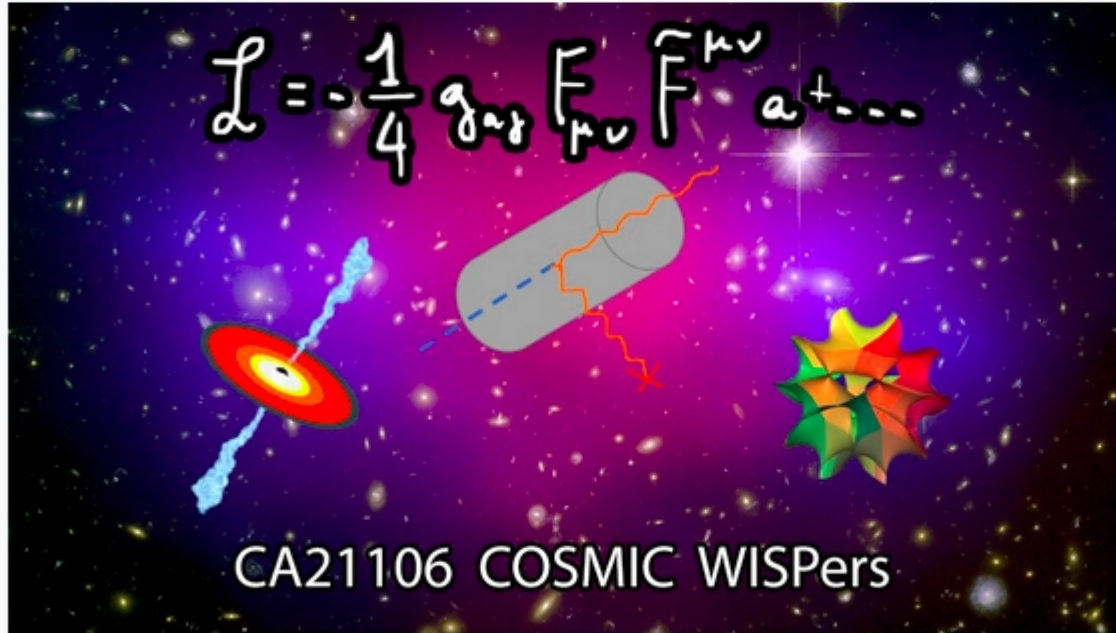
COSMIC WISPerS in the Dark Universe

Астрофизика, космология, теория и експерименти
в търсене на обяснение на Тъмната материя



Cost Action 21106 COSMIC WISPerS

COSMIC WISPerS in the Dark Universe: Theory, astrophysics and experiments



The main aim of the COSMIC WISPerS Action is to promote the formation of a team of scientists with different and complementary expertise to carry on WISP studies on a systematic and coherent basis in the intersecting and interdisciplinary area of particle physics, astrophysics and cosmology.

Our main goals are the following:

- Provide a discussion forum for the European coordination of WISPs Physics activities and express collective view on the development of WISPs research.
- Develop a Roadmap for WISPs Physics in Europe, a description of the status and perspectives of the field within Europe, linking them to activities in other parts of the world.
- Develop a common database on WISPs theoretical models, experimental and astrophysical bounds.
- Provide cross community discussions to enable new experiments.

Cost Action 21106 COSMIC WISPer



Cost Action 21106 COSMIC WISPers

WG 1: WISPs Model Building

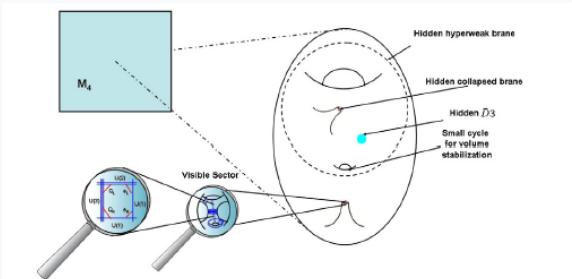


Figure taken from J. Jaeckel, A. Ringwald, *Ann. Rev.Nucl.Part. Sci.* 60 (2010) 405

Objectives: Determine the nature, number, masses and couplings of WISPs that arise in well-motivated theories of fundamental physics, and in particular within string compactifications that join moduli stabilisation with (semi)-realistic matter sectors.

WG 3: WISPs in Astrophysics



Objectives: Deepen the studies of the signatures of WISPs in astroparticle physics. These include WISP oscillations into photons, WISP-induced energy loss in stellar systems and signatures from gravitational waves and from primordial black-hole superradiance.

WG 2: WISPs Dark Matter and Cosmology

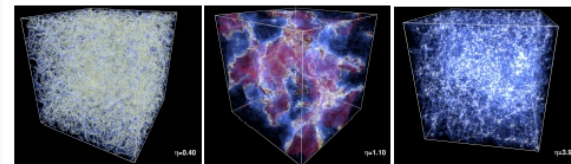


Figure taken from Bauschmann, Foster Safdi, [PRL 124, 161103 \(2020\)](#)

Objectives: Obtain precise predictions of axion and WISP DM relic abundance, and identify distinguishing features of WISP DM in Large Scale Structure data.

WG4: Direct WISPs searches

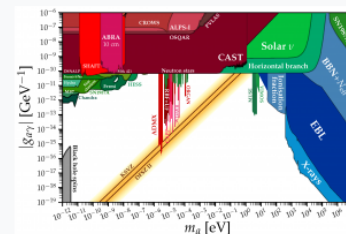


Figure taken from [Ciaran O'Hare Github](#)

Objectives: Produce a complete, updated and revised summary of the status of WISP searches, highlighting parts of the (relevant) parameter space, models or couplings that are not under test by present or future searches. It will outline a roadmap to WISP discovery and a way to disentangle among different WISP models. The goal of the WG is to perform a broad array of DM searches, interpreting the experimental results in a consistent way with clear identification of the theoretical models, relevant for the particular search.

За какво ще си говорим днес :)

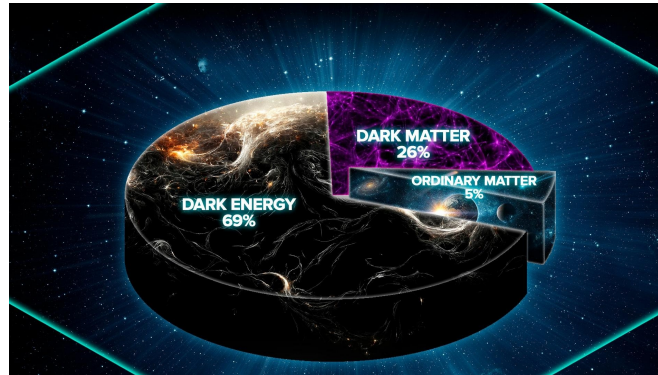
- Какво знаем за Вселената – Стандартния модел
- А какво не знаем?

Как е възникнала хипотезата за Тъмната материя и какво се опитваме да обясним с нея?

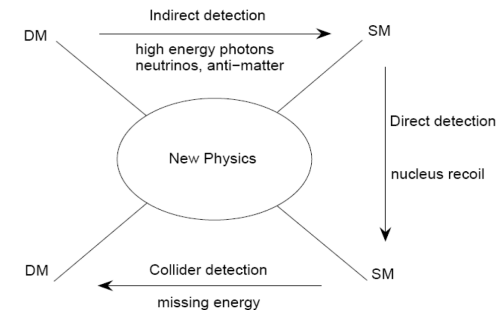
- Различните предположения за **състава на Тъмната материя** и **експериментите**, които сме създали, за да ги тестваме
 - **Пряко и непряко** търсене на Тъмна материя
 - **Тежки и леки** частици
- **Резултатите**: какво е открито, какво е отхвърлено, **какво очакваме**

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)					interactions / force carriers (bosons)	
QUARKS	I	II	III			
	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 $\frac{0}{1}$ $\frac{0}{1}$	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
	u up	c charm	t top	g gluon		H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon		
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{0}{1}$ $\frac{1}{2}$		
LEPTONS	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson		
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson		
	$\approx 0.8 \text{ eV}/c^2$ $\frac{0}{1}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 0.17 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{0}{1}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.8 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{0}{1}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 80.392 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{0}{1}$ $\frac{1}{2}$		



Detection of particle dark matter



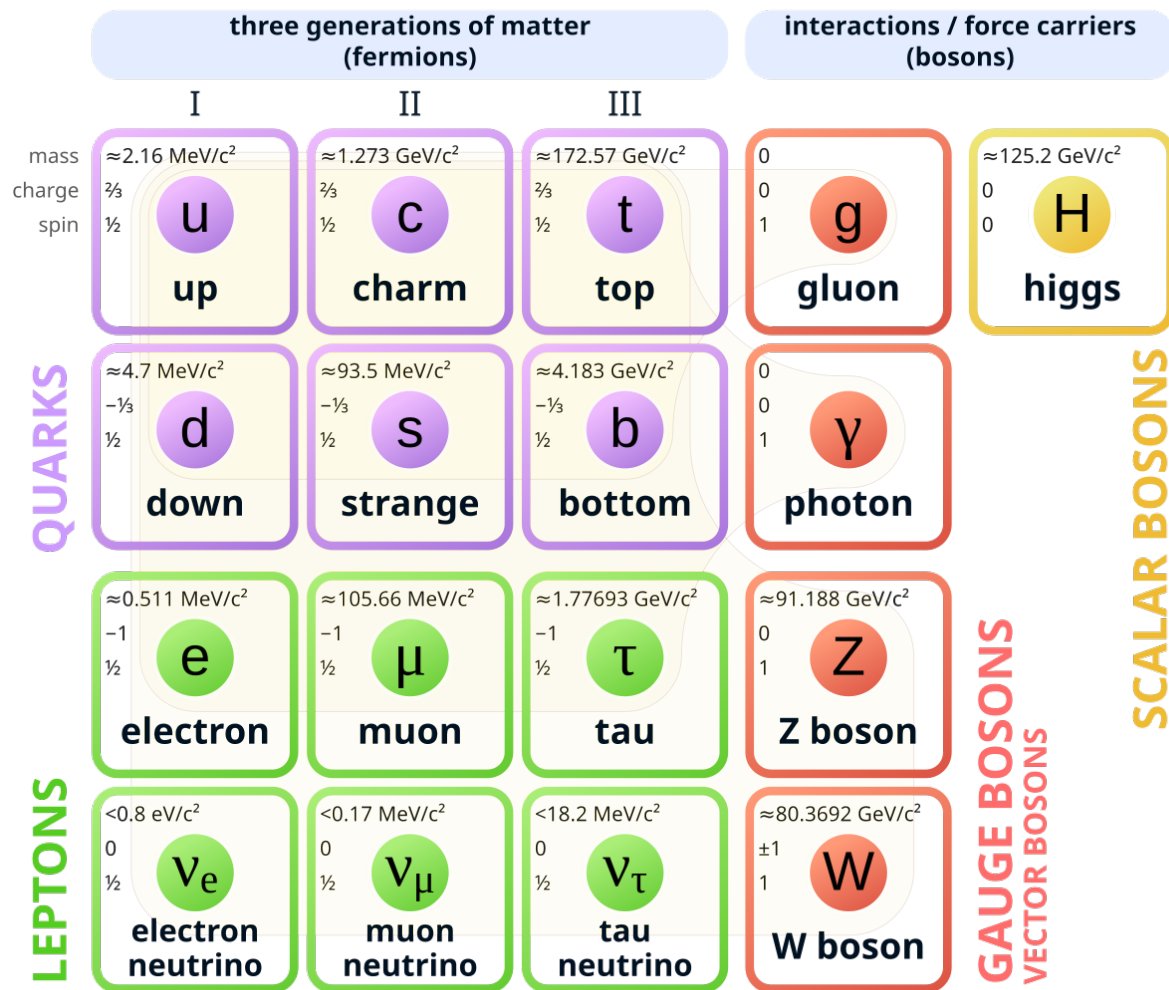
Какво знаем:

Стандартен модел

(на силните и електрослабите взаимодействия)

- 12 частици, изграждащи целия познат ни свят, разделени в три поколения
 - Кварки: частици, участващи в силните взаимодействия
 - Лептони: леки частици
- 3 взаимодействия, 4 преносителя
- Поле на Хигс
- Материя и антиматерия: на всяка частица съответства нейната античастица

Standard Model of Elementary Particles



А какво не знаем?

Стандартният модел е най-прецизната теория, създадена от човека:

- Всички познати тежки елементарни частици се разпадат до по-леки
- Стабилни са протонът и електронът; те образуват всичко около нас

Въпреки това наблюдаваме много ефекти, които не можем да обясним в рамките на това, което знаем дотук!

Първите идеи за Тъмна материя



През 1933 г., Фриц Цвики наблюдава галактичния куп Кома и забелязва, че галактиките в него се движат твърде бързо за видимата маса на купа. Затова той предлага съществуването на някаква допълнителна, невидима маса, „тъмна материя“, която ги държи заедно.

Тъмната материя в купове от галактики



Използвайки Доплеровия ефект, можем да оценим скоростите на галактиките в куповете.

Масата, която получаваме за такива скорости е около **50 пъти по-голяма** от масата, която видимо имат куповете от тяхната светимост.

Скоростите на въртене на галактиките

Няколко десетилетия по-късно, Вера Рубин изследвала въртенето на галактиките и забелязала необичайна форма на кривите на зависимост на скоростта от разстоянието от центъра на галактиката.

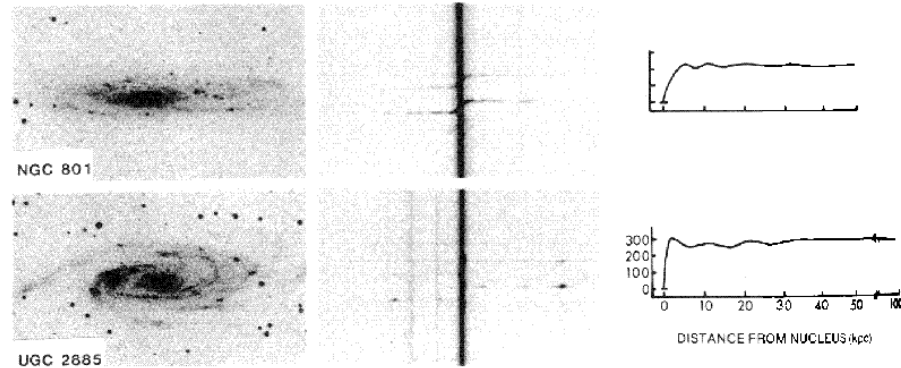
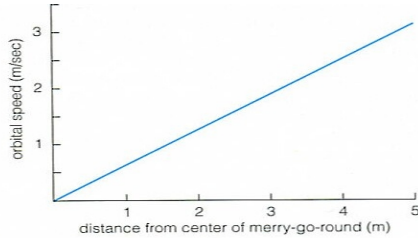


Figure 10-1. Photographs, spectra, and rotation curves for five Sc galaxies, arranged in order of increasing luminosity from top to bottom. The top three images are television pictures, in which the spectrograph slit appears as a dark line crossing the center of the galaxy. The vertical line in each spectrum is continuum emission from the nucleus. The distance scales are based on a Hubble constant $h = 0.5$. Reproduced from Rubin (1983), by permission of *Science*.

see: Binney, Tremaine (1994) *Galactic Dynamics* p.600

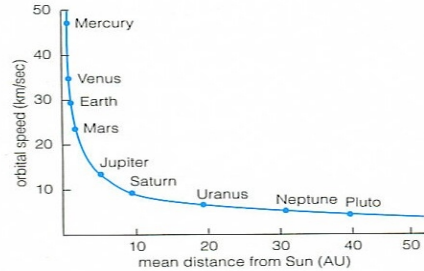
Примери за скорости на въртене



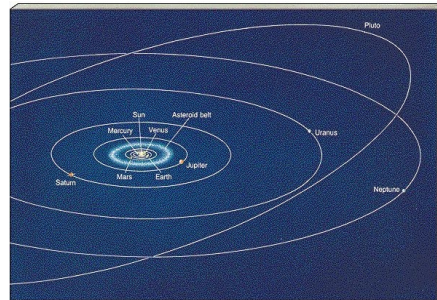
a A rotation curve for a merry-go-round.



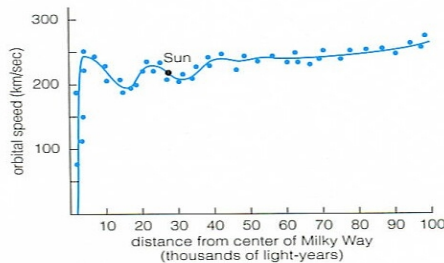
- Въртележка: скоростта се увеличава линейно с отдалечаване от центъра



b The rotation curve for the planets in our solar system.

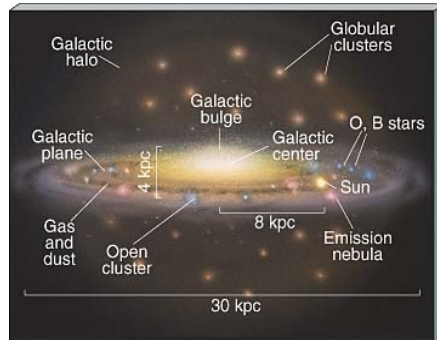


- Планетите в Слънчевата система: скоростта намалява с отдалечаване от Слънцето



c The rotation curve for the Milky Way Galaxy.

FIGURE 18.19 Rotation curves show how the orbital speed of a system depends on distance from its center. The solar system's rotation curve declines with radius because its mass is concentrated at the center. The Milky Way's rotation curve is flat, indicating that the Milky Way's mass extends well beyond the Sun's orbit.



- Звездите около центъра на галактиката – наблюдава се плато

Скорости на звездите в спиралните галактики

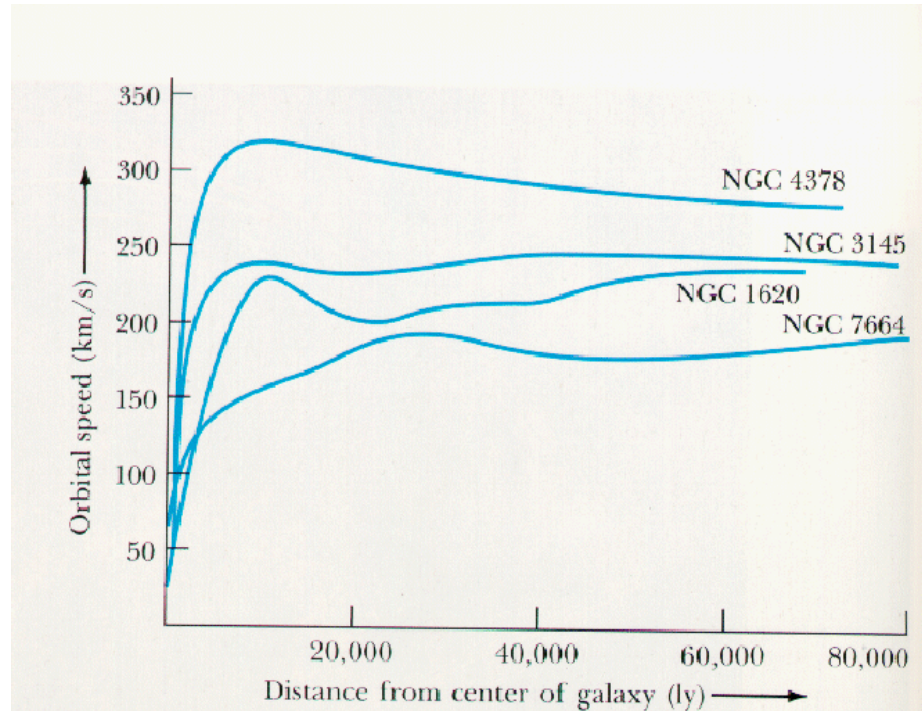
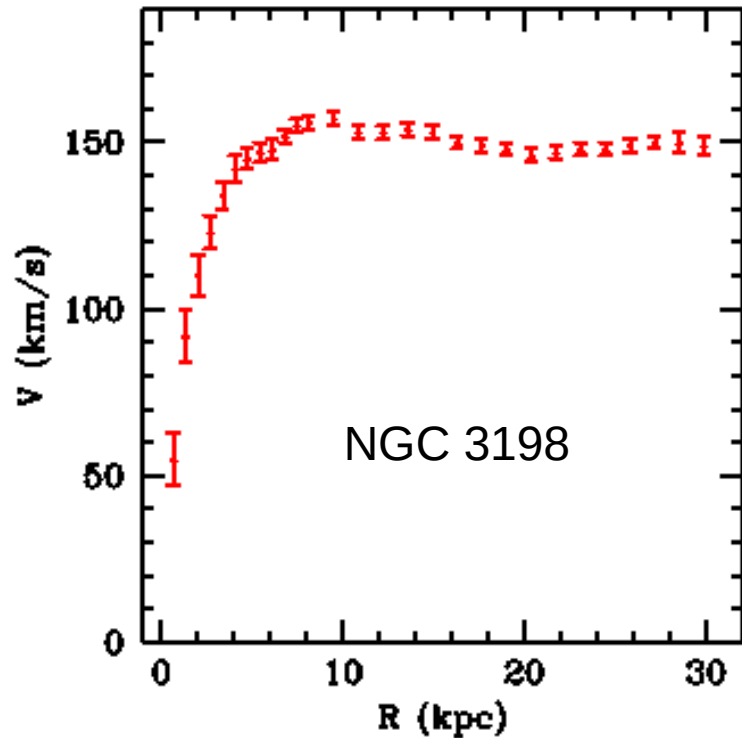
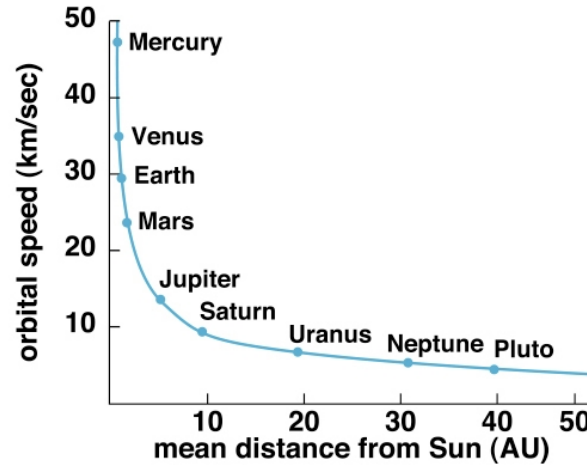
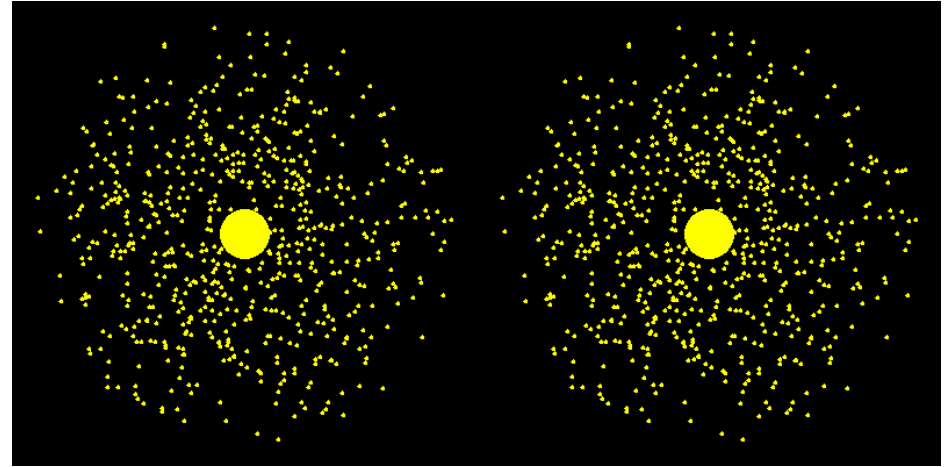
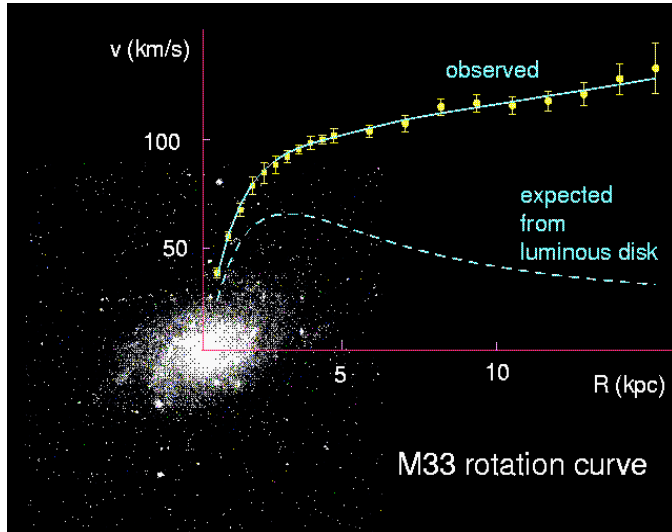


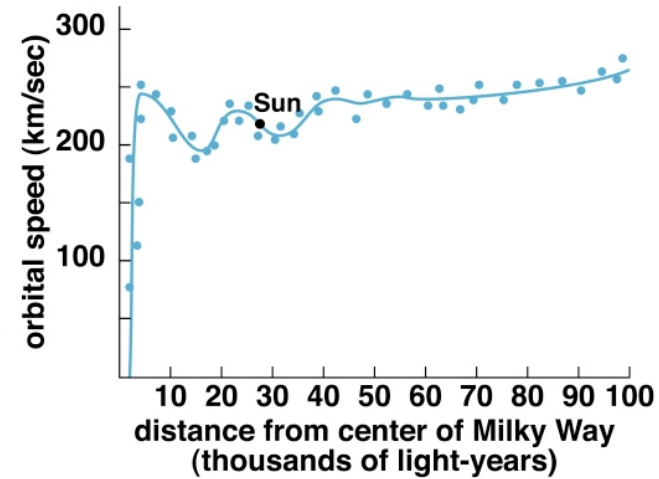
FIGURE 26-25 The Rotation Curves of Four Spiral Galaxies This graph shows the orbital speed of material in the disks of four spiral galaxies. Many galaxies have flat rotation curves, indicating the presence of extended halos of dark matter. (Adapted from V. Rubin and K. Ford)

Какво значи това?

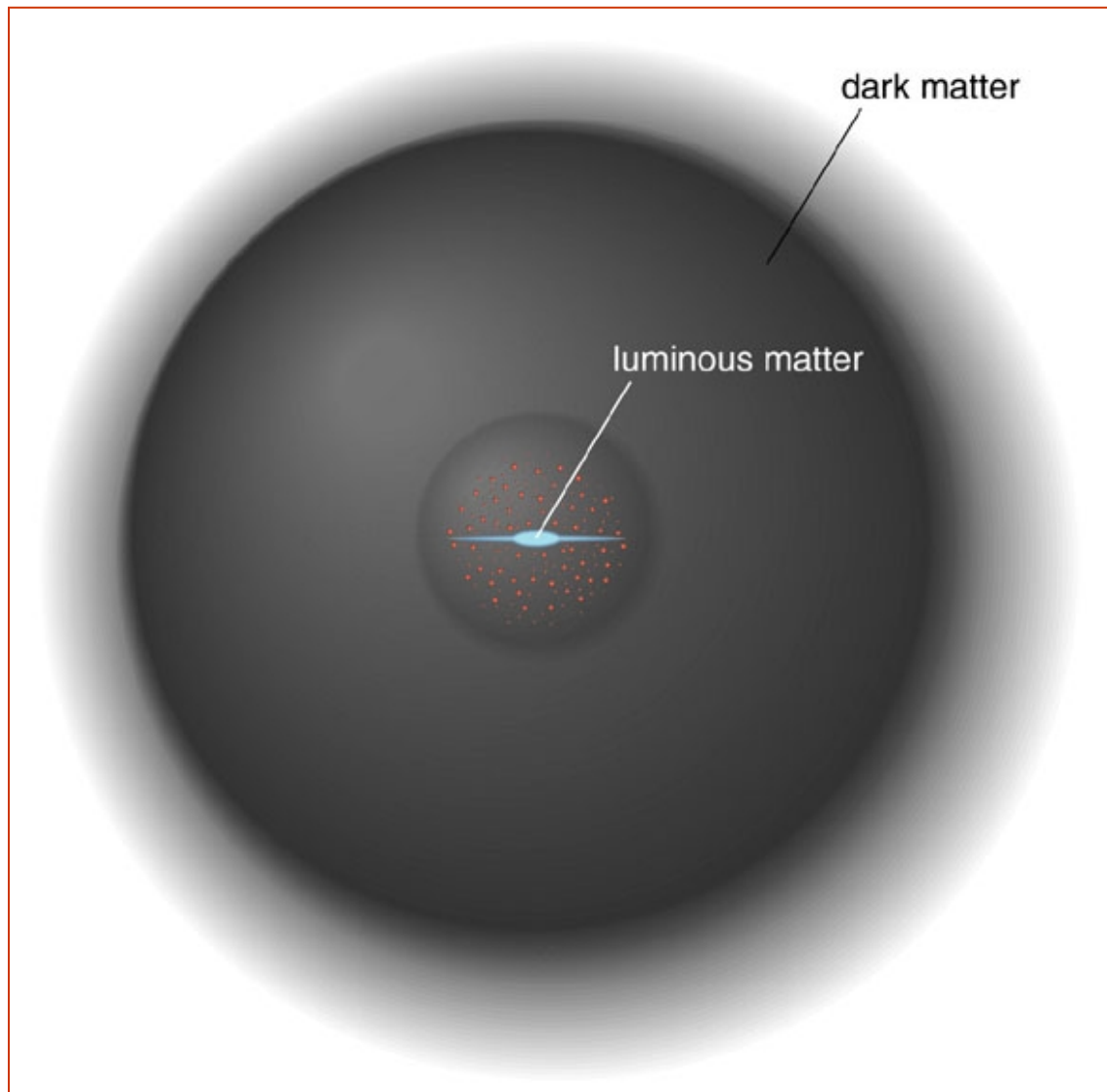
Как изглежда тази разлика във въртенето?



(b)
Copyright © Addison Wesley

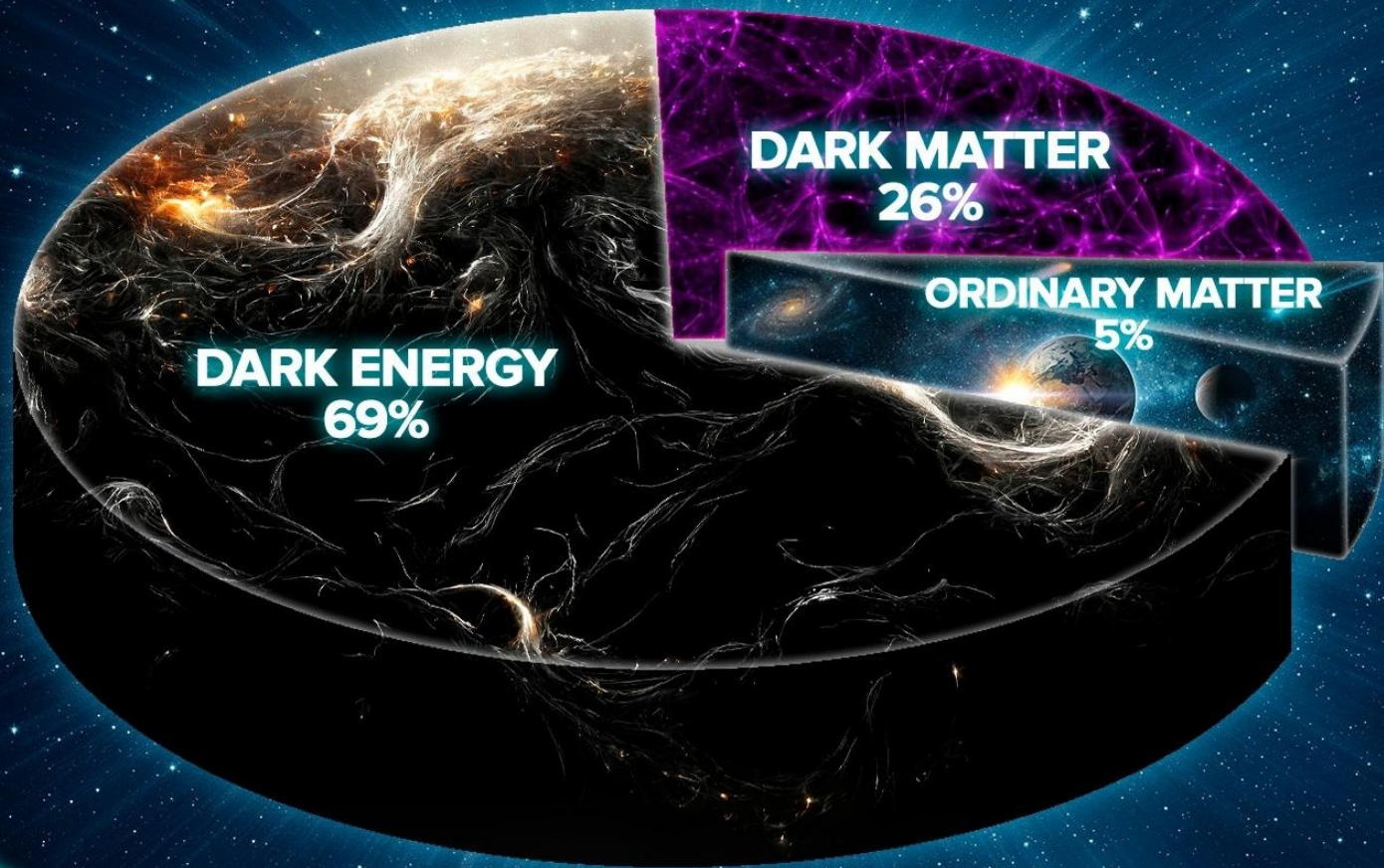


(c)
Copyright © Addison Wesley



Галактиките са разположени
дълбоко в хало от Тъмна материя

Тя представлява около 25% от
съдържанието на Вселената!



Защо тъмна материя?

- Наблюденията на движението на масивни обекти в Космоса се различават от теоретичните очаквания: има някакво невидимо вещество, което оказва гравитационно влияние, но ние не можем да го видим
- Много други космологични ефекти търсят своето обяснение
- Текущи проблеми във физиката на елементарните частици: аномален магнитен момент на мюона и др., липса на потвърждение на много предложени решения (суперсиметрии и т.н.)

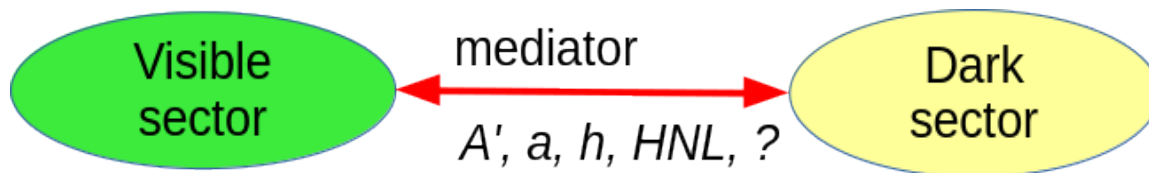
Обяснението на Тъмната материя може да реши много от тези проблеми.

Но какво, къде и как да търсим?

- Няма ограничения върху това колко типа частици трябва да съставят тъмната материя
- Няма ограничения върху тяхната маса
- Няма изискване те да взаимодействат по познатите ни дотук начини. Възможно е съществуването на непознати до момента взаимодействия

Търсене на Тъмна материя във физиката на елементарните частици

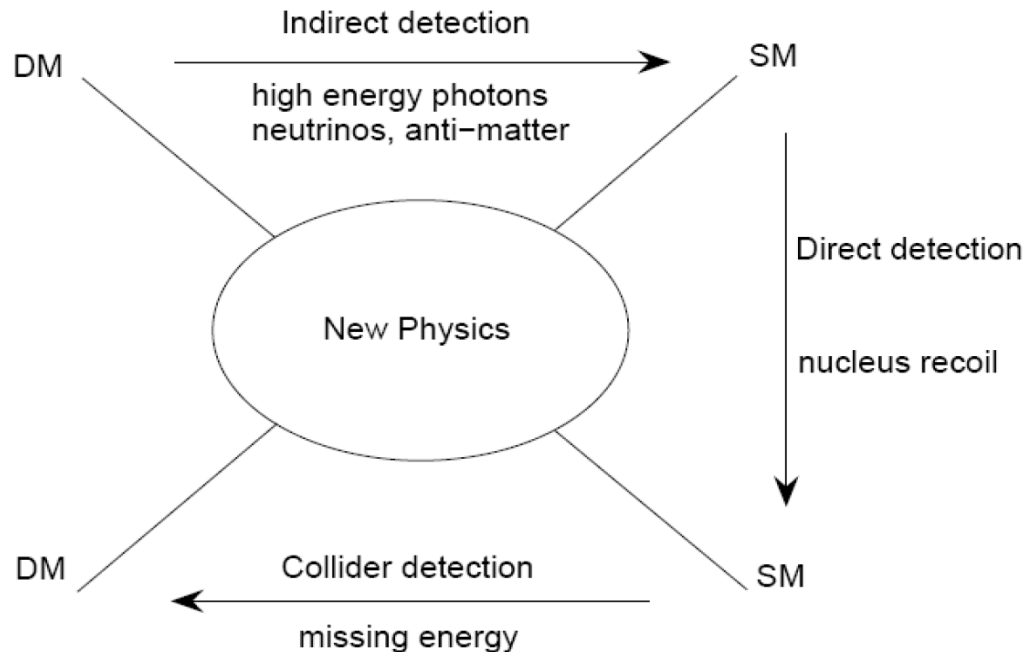
- За да можем да наблюдаваме Тъмната материя, тя трябва да взаимодейства по някакъв начин с частиците от познатата ни материя (освен гравитационно, разбира се)
- Предполагаме съществуването на цял „скрит сектор“ от частици
- Частиците от скрития сектор взаимодействат с тези от видимия чрез частици-медиатори



Търсенето на тъмна материя е насочено както към частиците от скрития (тъмния) сектор, така и към медиаторите.

Различни техники за търсене на Тъмна материя

Detection of particle dark matter



Direct

$$\chi + p \rightarrow \chi + p$$

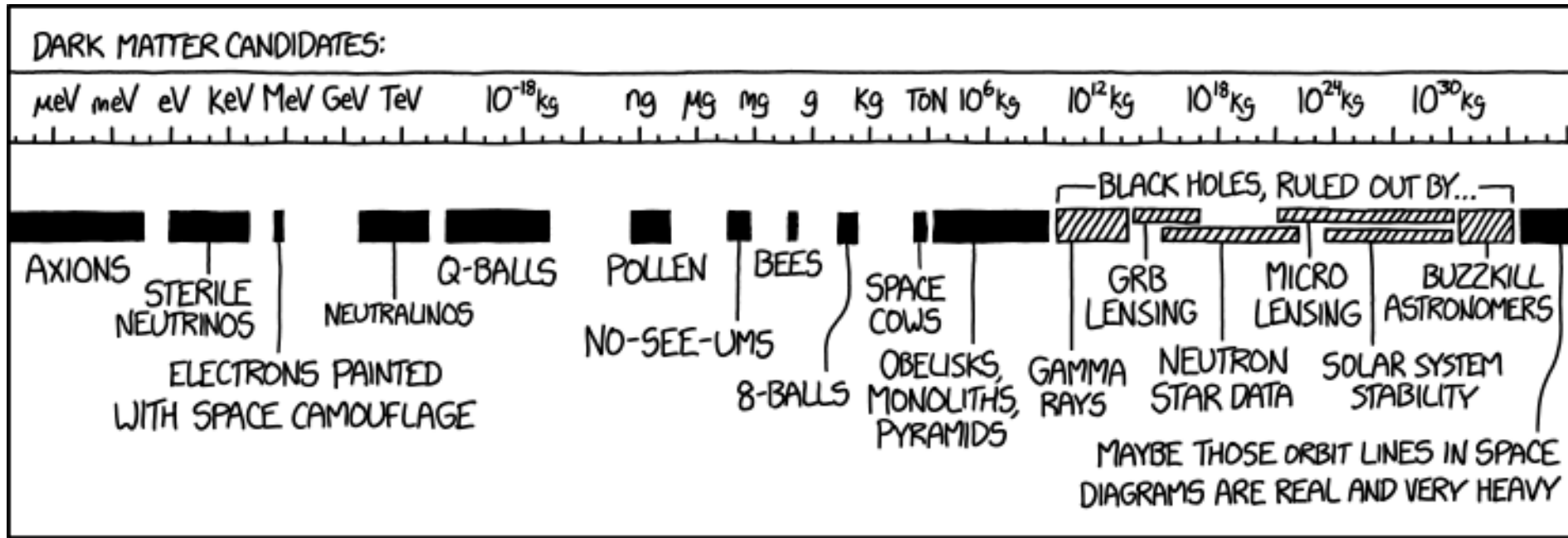
Indirect

$$\chi + \chi \rightarrow p + \bar{p}$$

Production

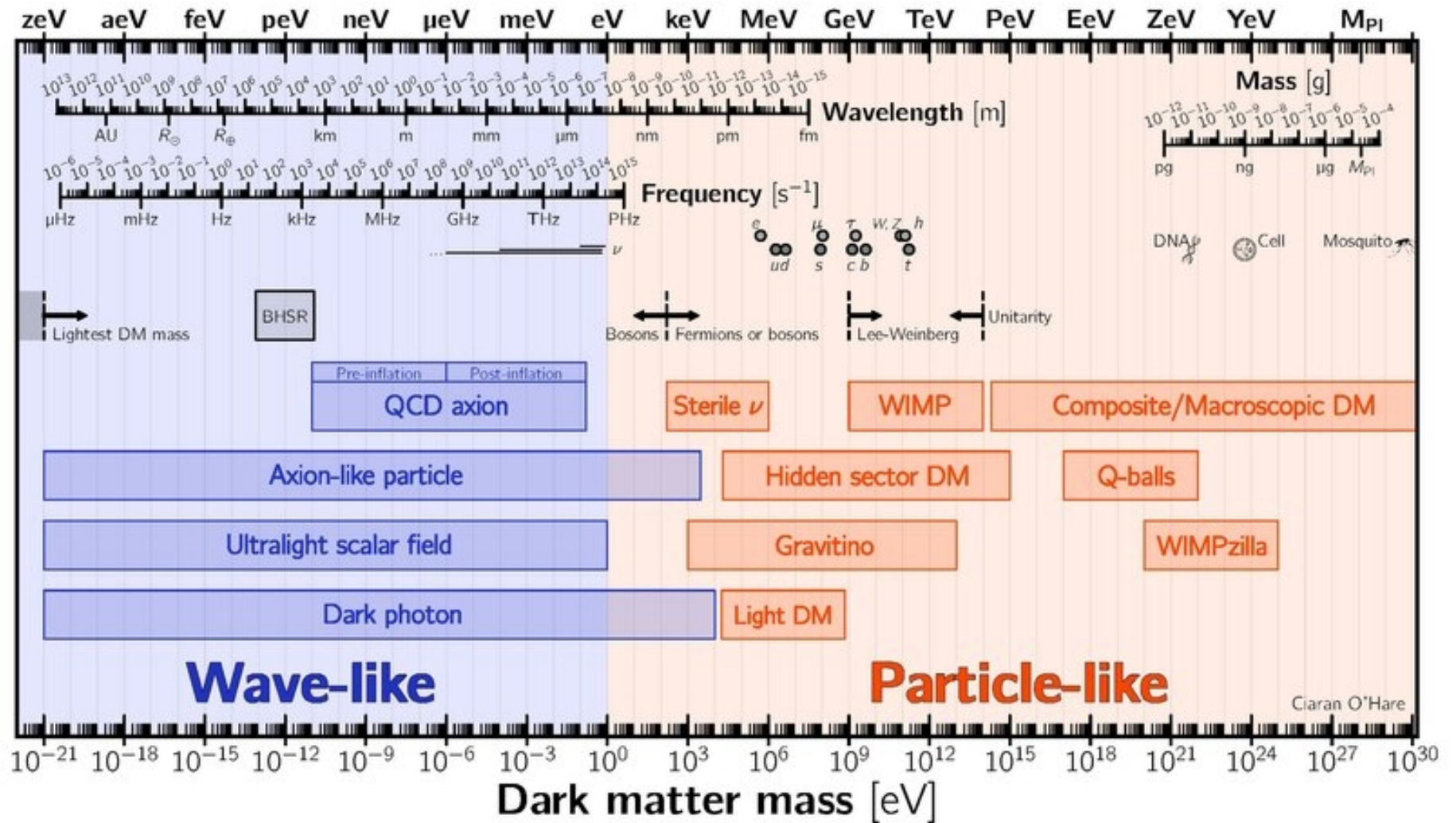
$$p + \bar{p} \rightarrow \chi + \chi$$

От какво точно е изграден Скрытият сектор?



https://www.explainxkcd.com/wiki/index.php/2035:_Dark_Matter_Candidates

Dark Matter Candidates



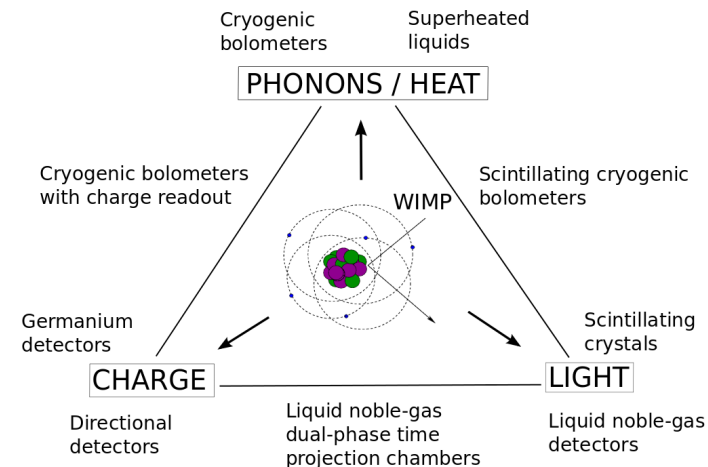
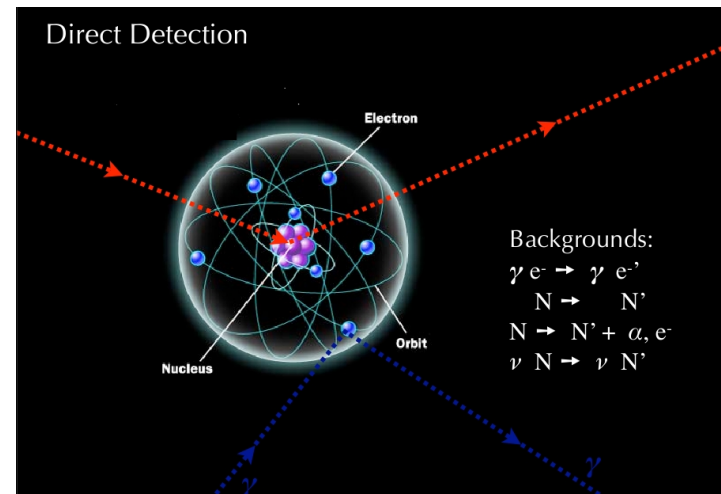
Пряко търсене на Тъмна материя

- Търсене на откатни частици при разсейване на частици Тъмна материя:



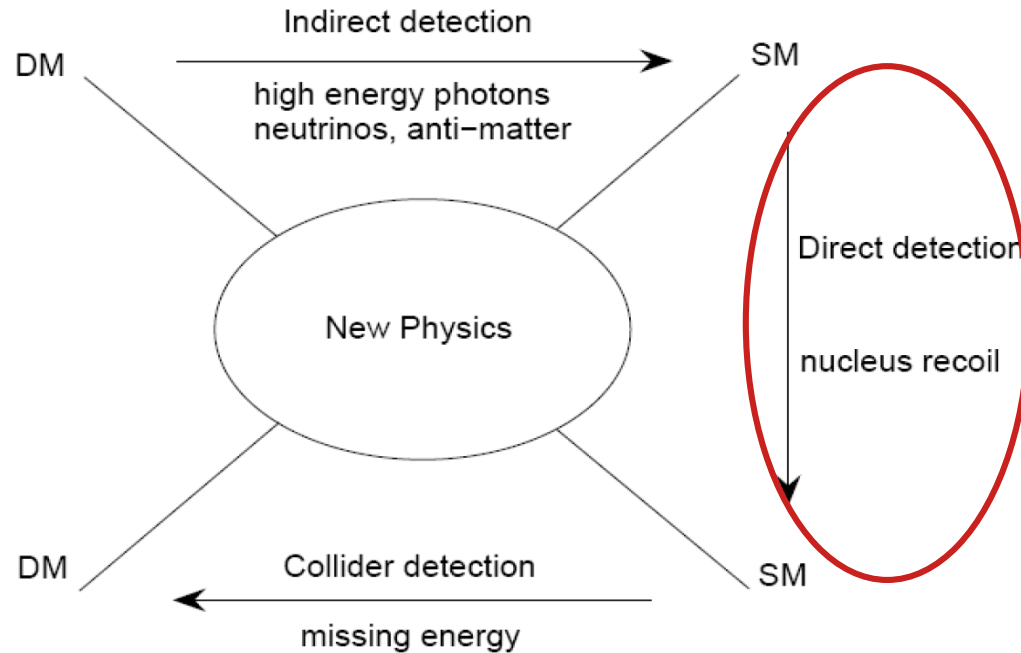
- Земята, Слънчевата система и Галактиката се движат непрекъснато през Тъмна материя

Основен механизъм за прякото търсене на Тъмна материя е разсейването ѝ в материала на експерименти със свръхниско ниво на фон.



Различни техники за търсене на Тъмна материя

Detection of particle dark matter



Direct

$$\chi + p \rightarrow \chi + p$$

Indirect

$$\chi + \chi \rightarrow p + \bar{p}$$

Production

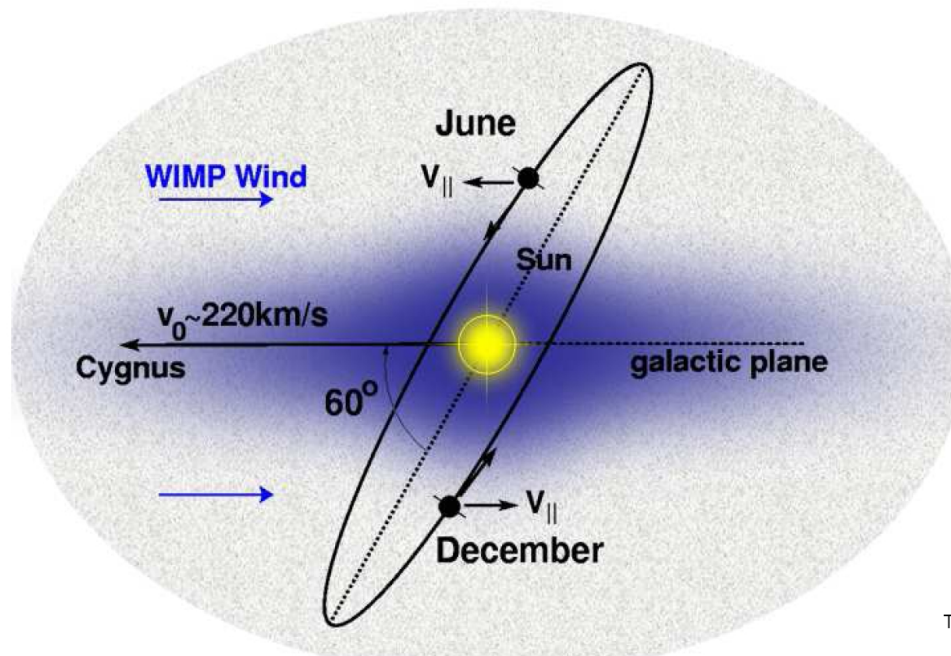
$$p + \bar{p} \rightarrow \chi + \chi$$

Разсейване на Тъмна материя

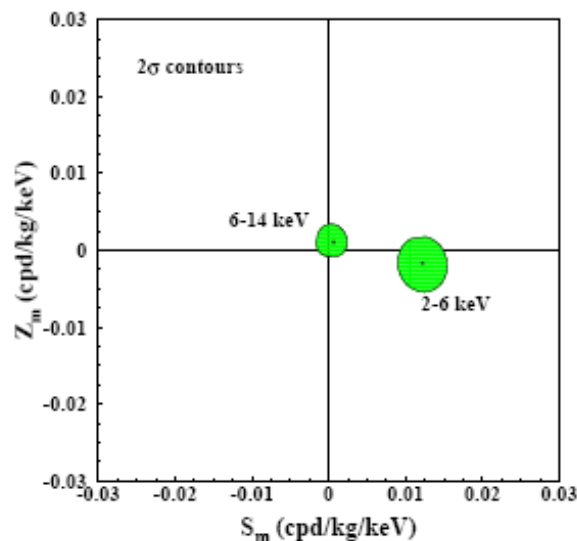
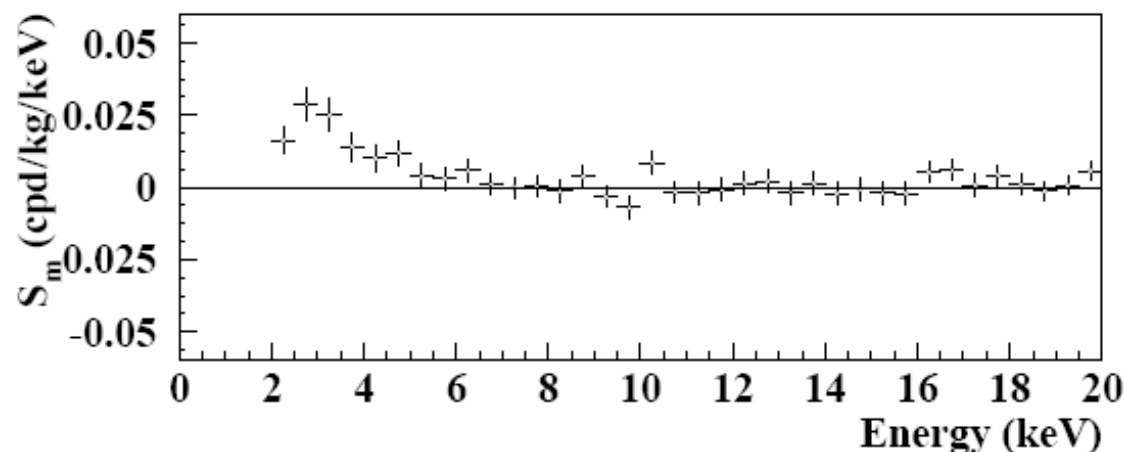
$$f_{\oplus}(\vec{v}, t) = f_{\text{gal}}(\vec{v} + \vec{v}_{\odot} + \vec{v}_{\oplus}(t))$$

sun velocity: $\vec{v}_{\odot} = (0, 220, 0) + (10, 13, 7) \text{ km/s}$

earth velocity: $\vec{v}_{\oplus}(t)$ with $v_{\oplus} \approx 30 \text{ km/s}$



DAMA/Libra: результати



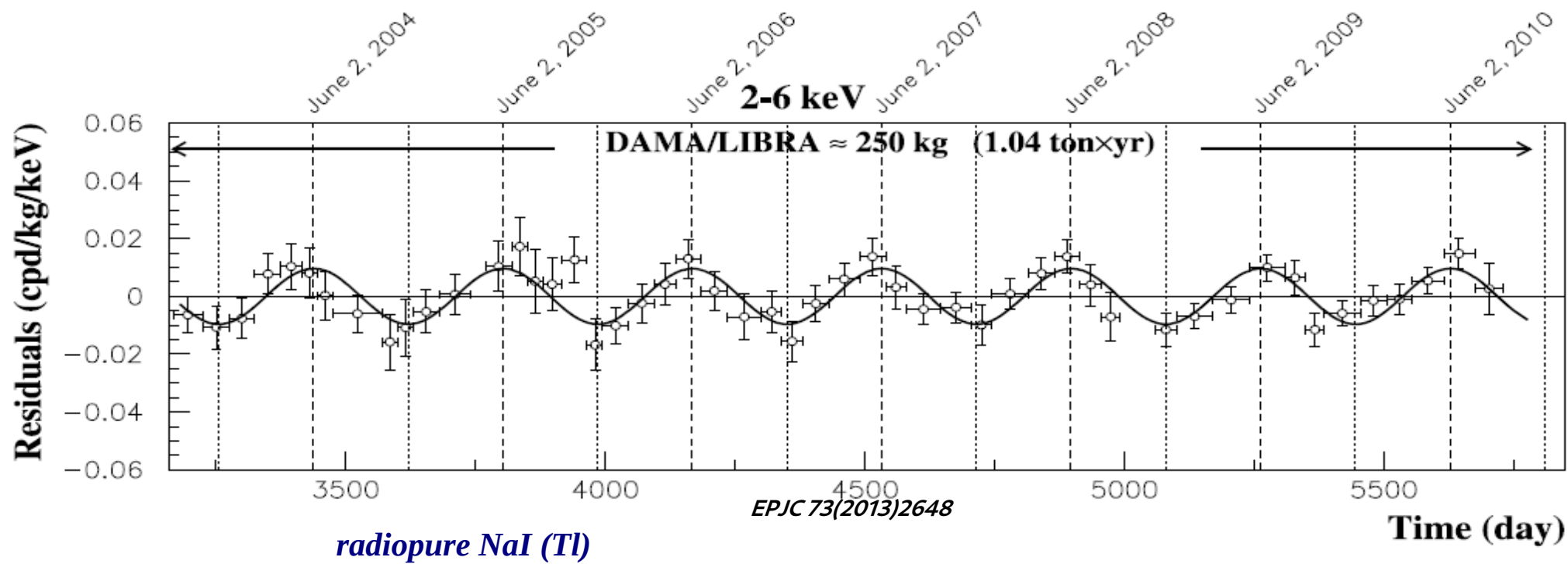
modulation signal at 2 – 6 keV
above 6 keV no modulation

fitting:

$$S_0 + S_m \cos \omega(t - t_0) + Z_m \sin \omega(t - t_0)$$

with $t_0 = 152$, $T = 1$ yr

DAMA/Libra: результати



Непряко търсене на Тъмна материя

1. Аниhilация на масивни частици

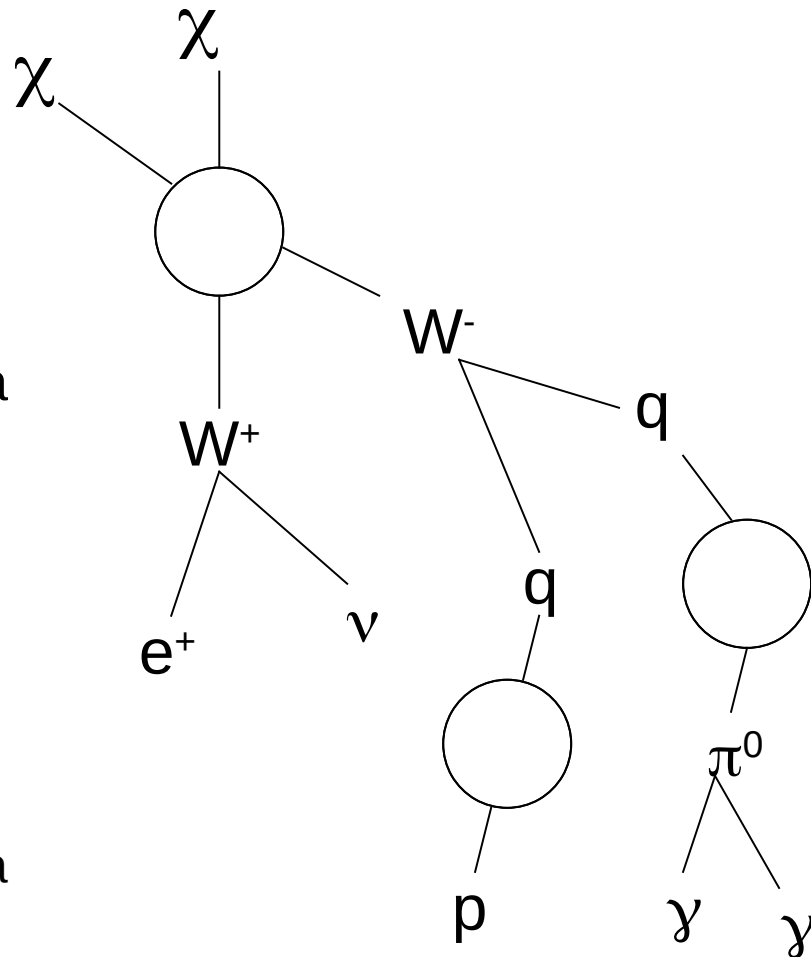
Тежки фермиони в крайно състояние, бозони (вкл. Хигс).

2. Фрагментация/разпад

Разпад или фрагментация на продуктите на аниhilация до комбинации от електрони, неутрино, гама-фотони и др.

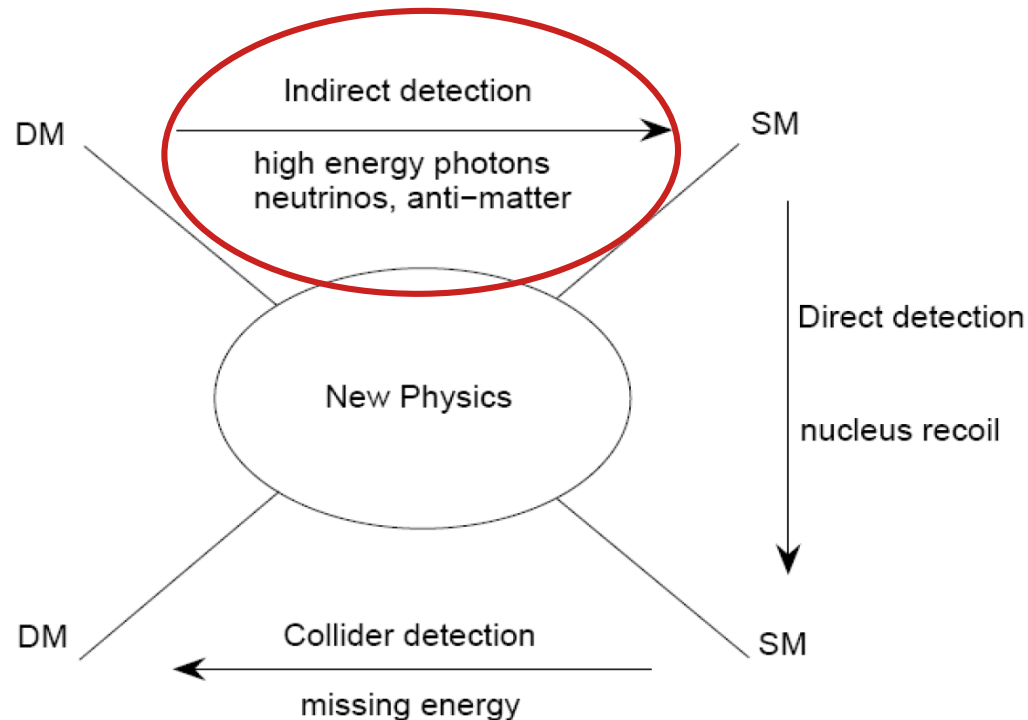
3. Синхротронно излъчване; обратно Комптъново разсейване

Синхротронно излъчване при взаимодействие с магнитни полета; разсейване на фотони от релативистки електрони, при което се увеличава енергията им.



Различни техники за търсене на Тъмна материя

Detection of particle dark matter



Direct

$$\chi + p \rightarrow \chi + p$$

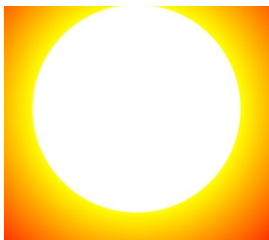
Indirect

$$\chi + \chi \rightarrow p + \bar{p}$$

Production

$$p + \bar{p} \rightarrow \chi + \chi$$

Възможни източници на частици Тъмна материя



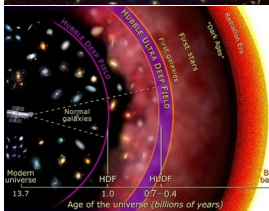
Слънцето



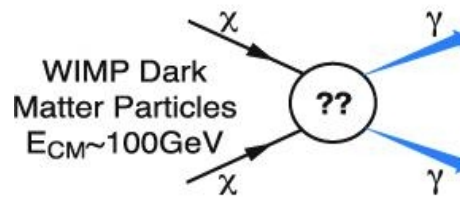
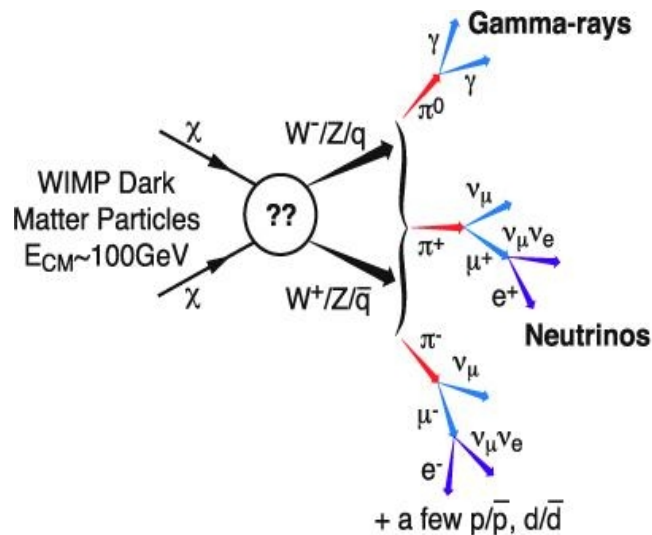
Галактиката



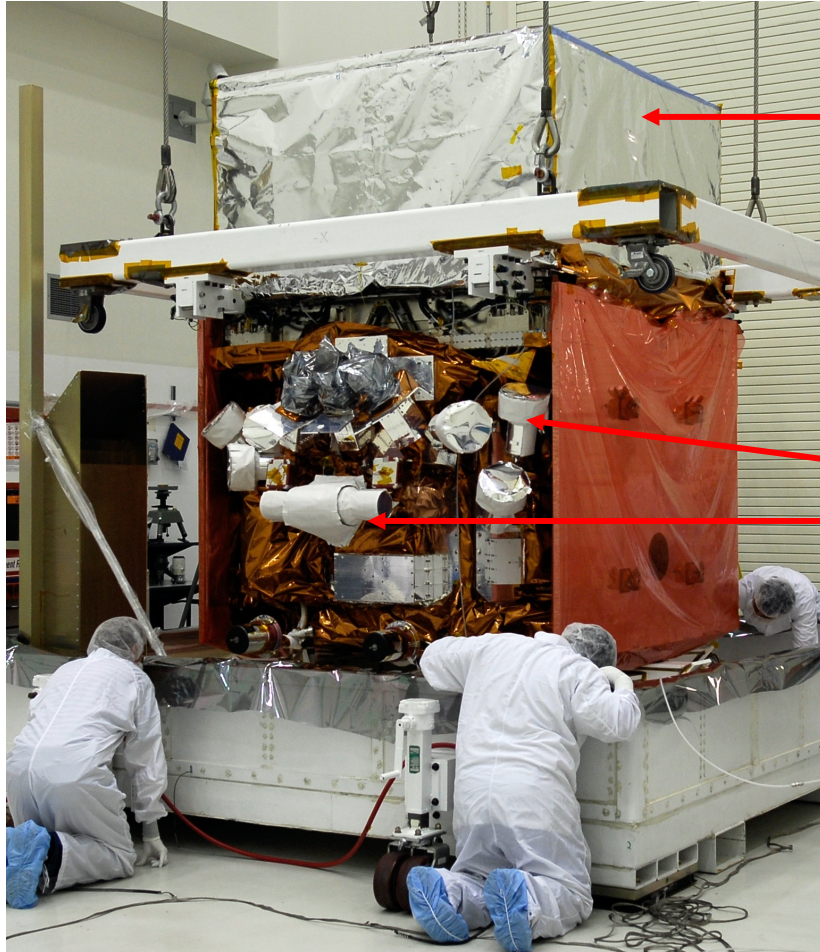
Галактичні купове



Извънгалактичното
пространство;
ранната Вселена



Fermi Gamma-ray Space Telescope



Large Area Telescope

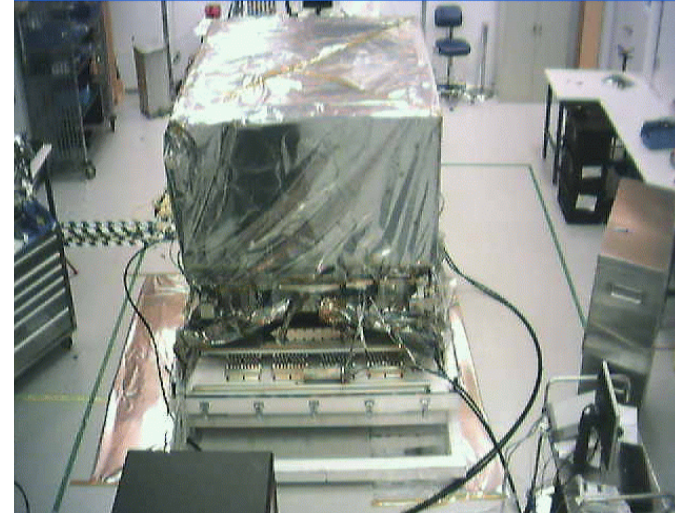
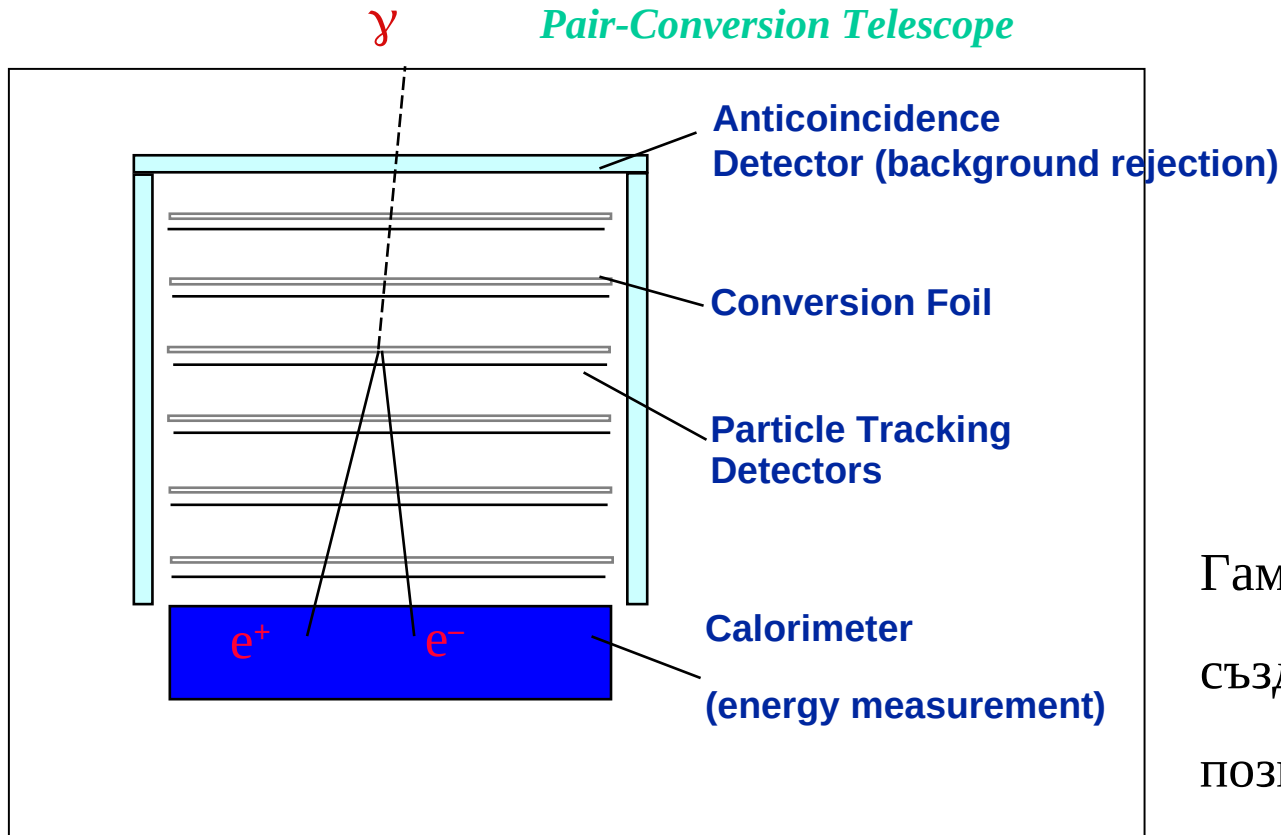
LAT

*GLAST Burst
Monitor*

GBM

*Successors to EGRET and
BATSE on the Compton
Gamma Ray Observatory*

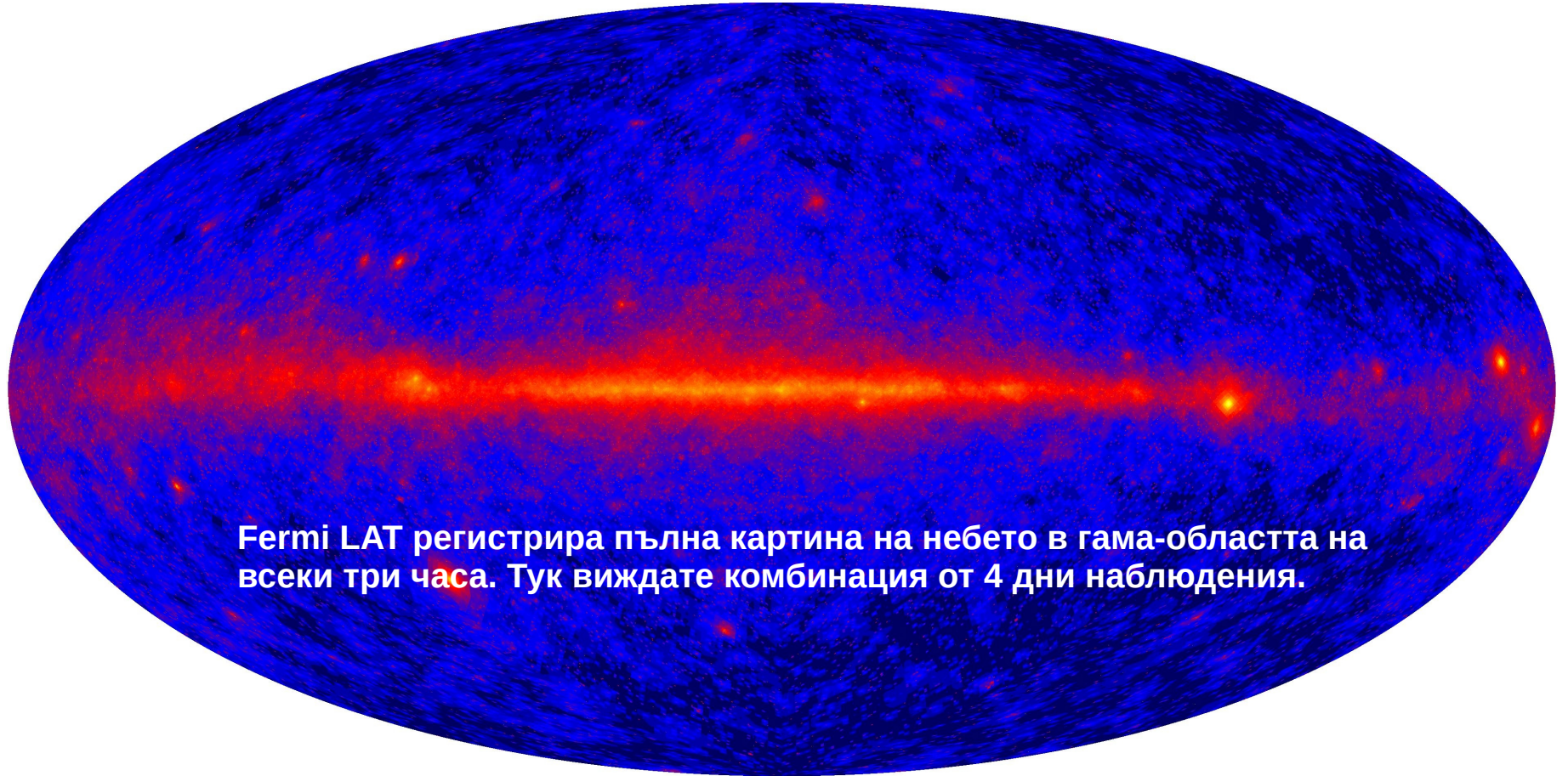
Fermi Large Area Telescope (LAT)



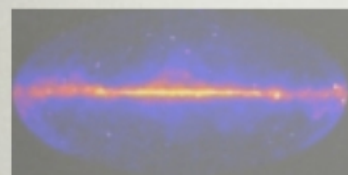
Гама фотоните взаимодействат чрез създаване на двойка електрон-позитрон, които се регистрират от детектора.

Fermi Large Area Telescope (LAT)

Пълна гама-картина на небето в Галактични координати



Fermi LAT регистрира пълна картина на небето в гама-областта на всеки три часа. Тук виждате комбинация от 4 дни наблюдения.



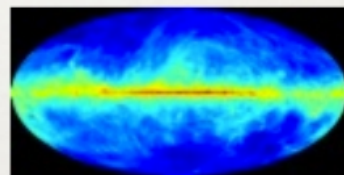
data

=



sources

+

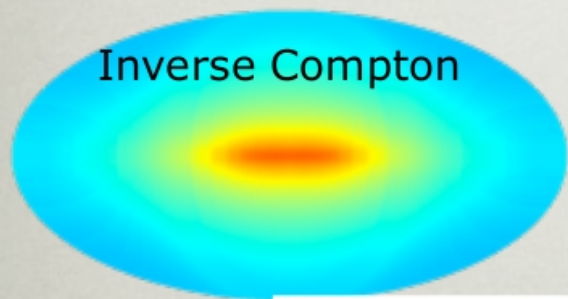
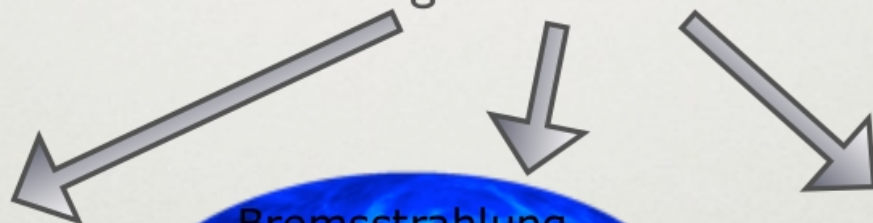


galactic diffuse

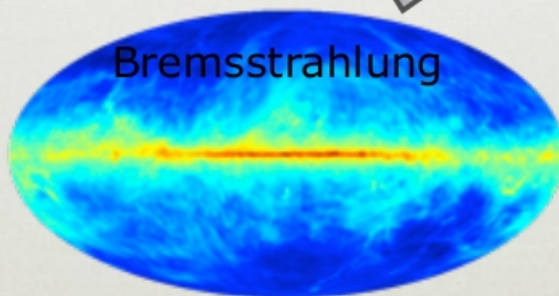
+



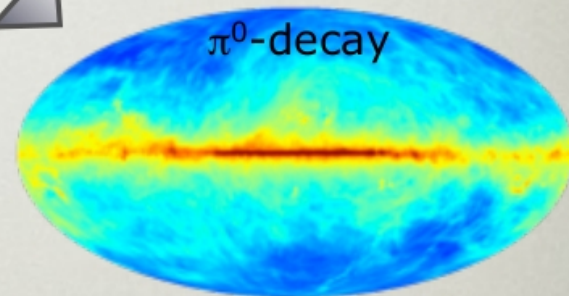
isotropic



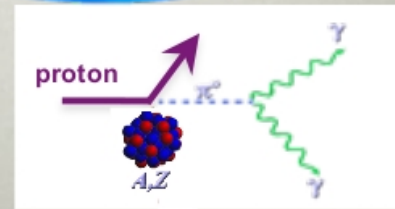
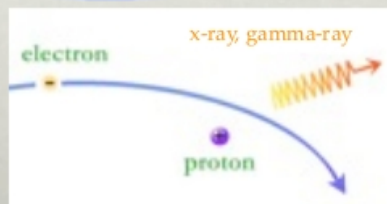
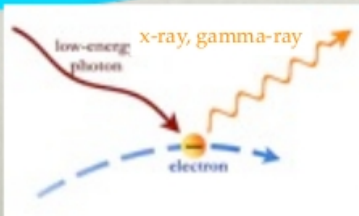
Inverse Compton

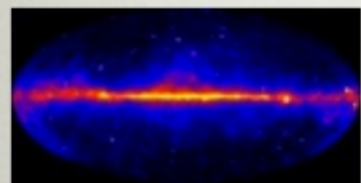


Bremsstrahlung



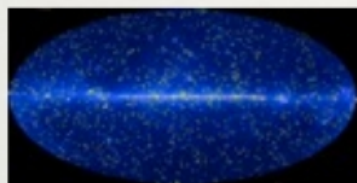
π^0 -decay





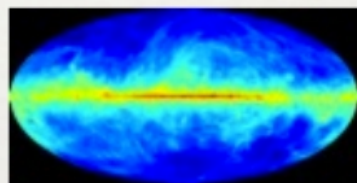
data

=



sources

+



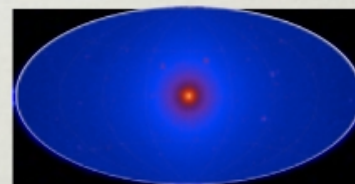
galactic diffuse

+



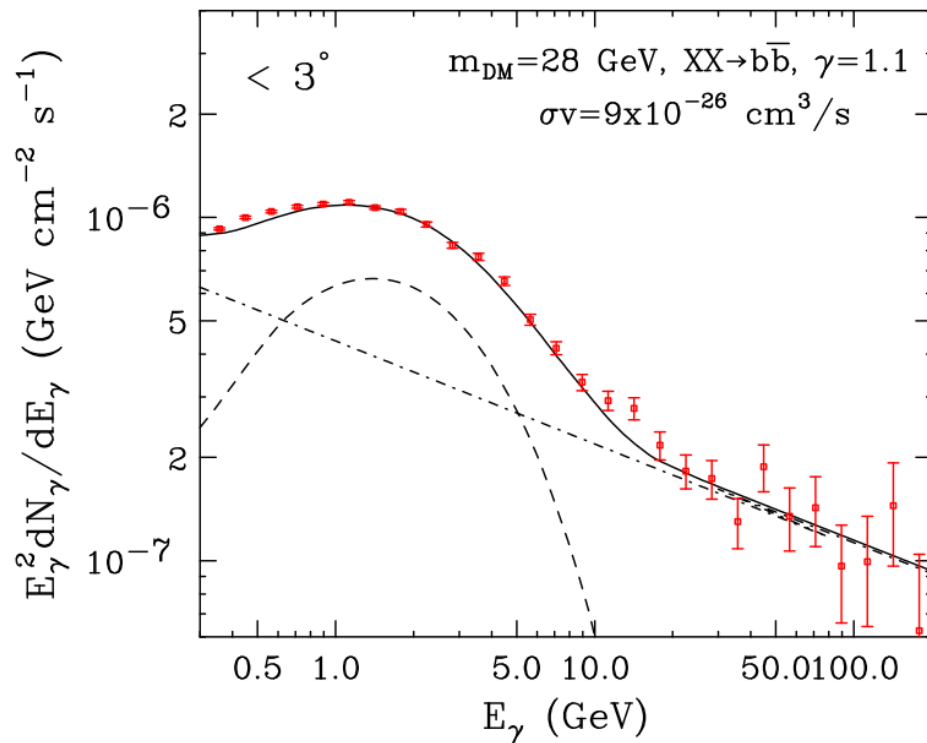
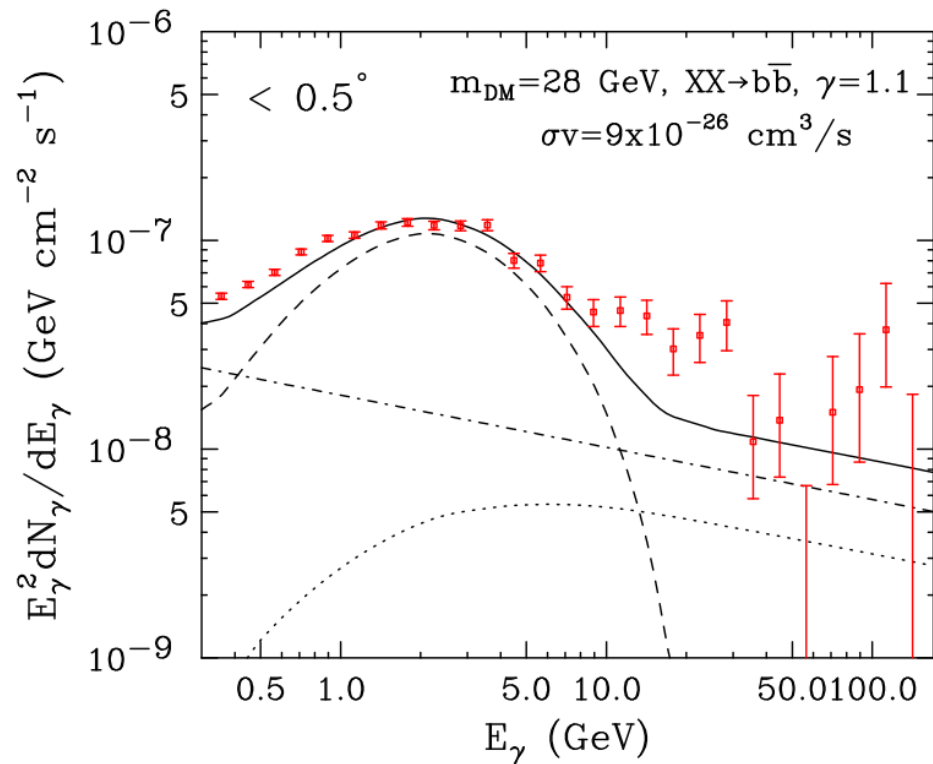
isotropic

+



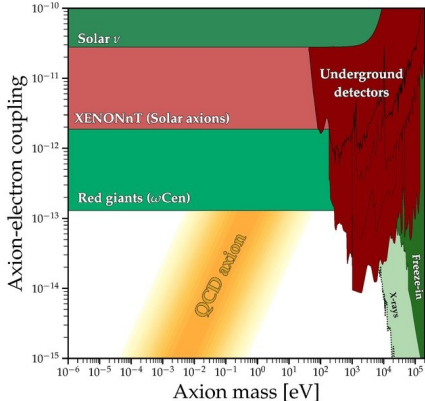
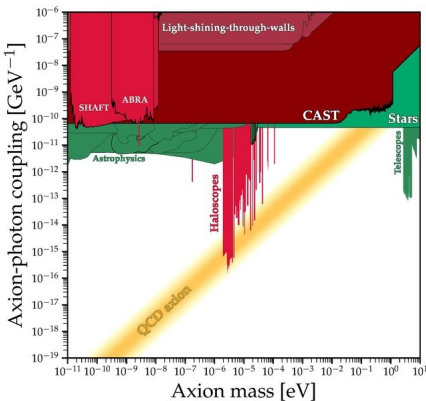
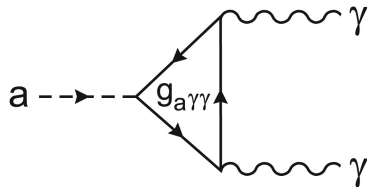
dark matter??

Гама-спектър на центъра на Галактиката

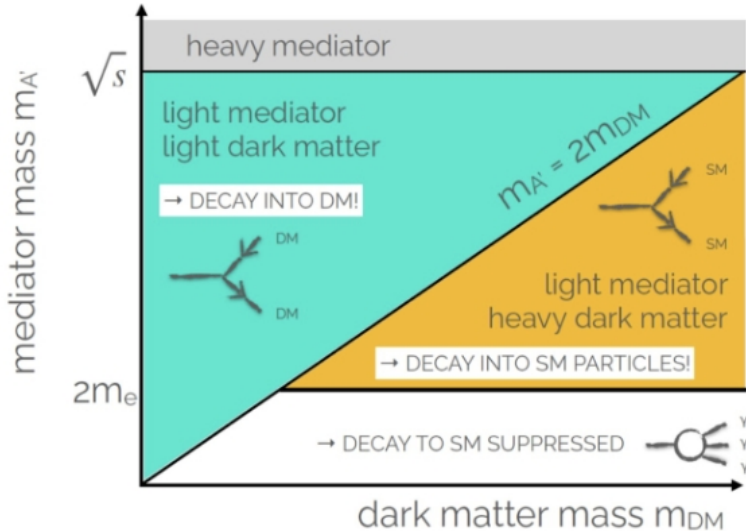
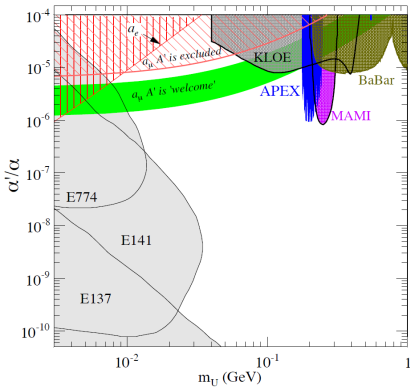


Търсене на нови леки частици (WISPs)

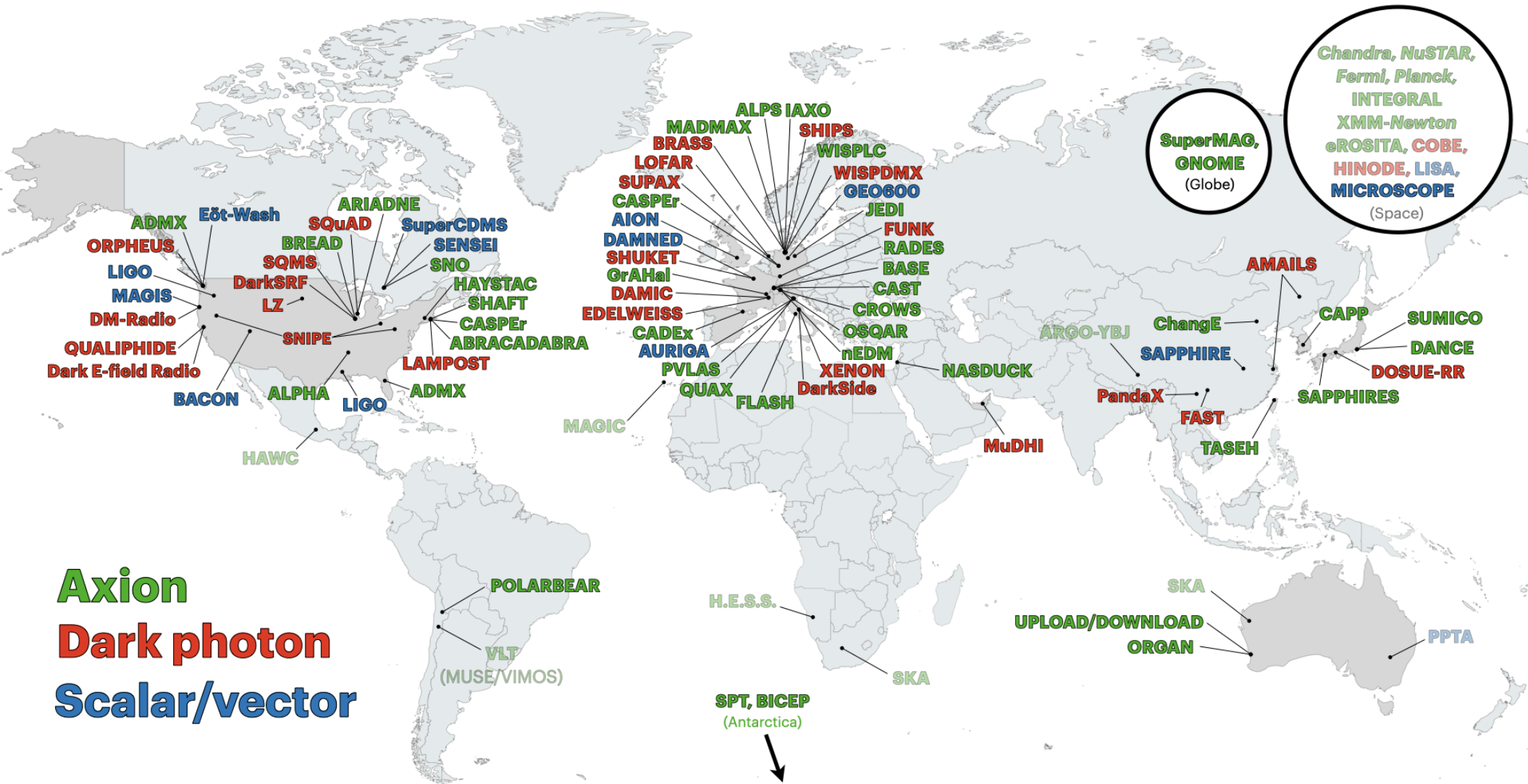
- Аксиони



- Тъмен фотон



- Стерилни неутрина
- Суперсиметрични частици и др.

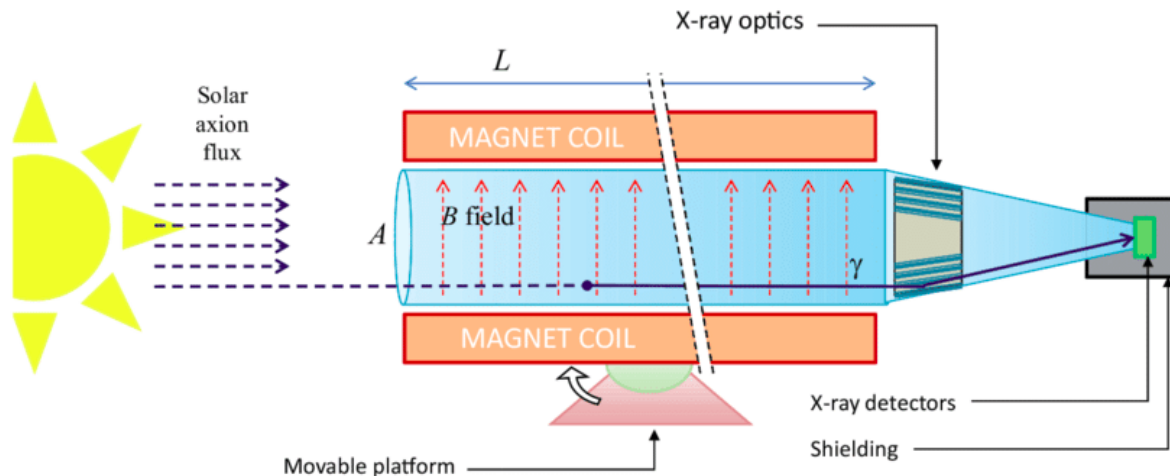
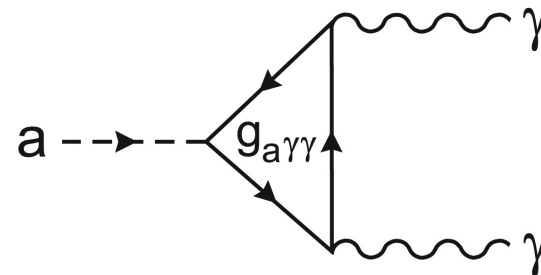


Аксиони



Защо точно „аксиони“?

„Почистват“ проблема с липсата на СР нарушение при силните взаимодействия

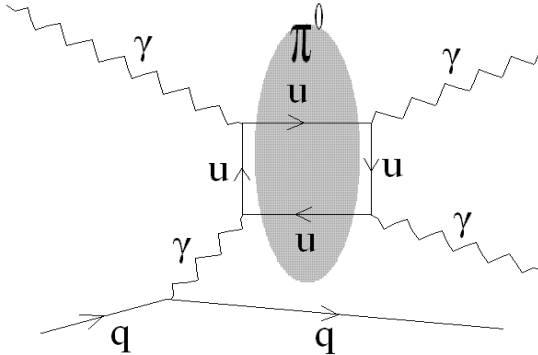


Повечето експерименти за търсене на аксиони се основават на възможността те съвсем слабо да взаимодействат с фотоните

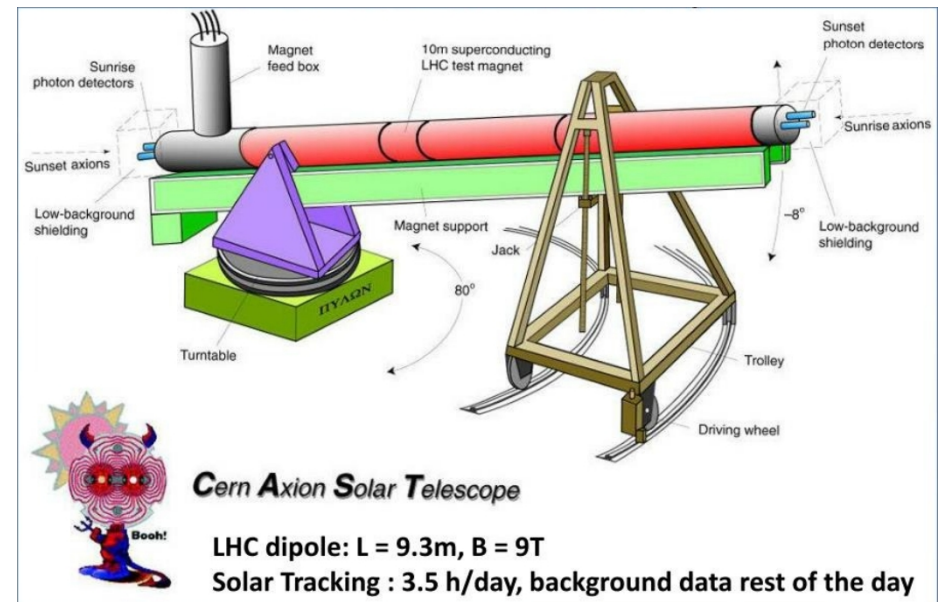
CAST

CERN Axion Solar Telescope

- Използва един от прототипите на диполните магнити, създадени за Големия адронен колайдер
- Рентгенов телескоп: ако аксионите се конвертират във фотони от рентгеновата област, бихме могли да ги засечем



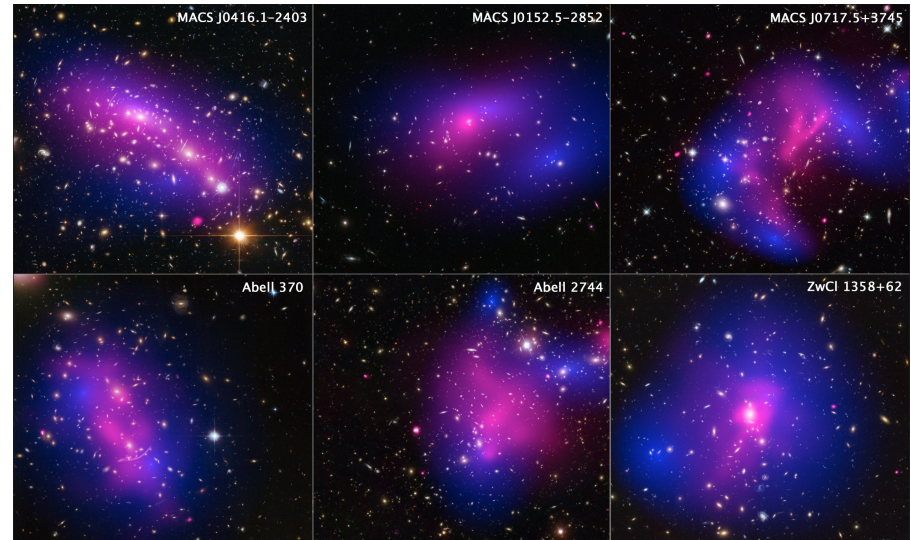
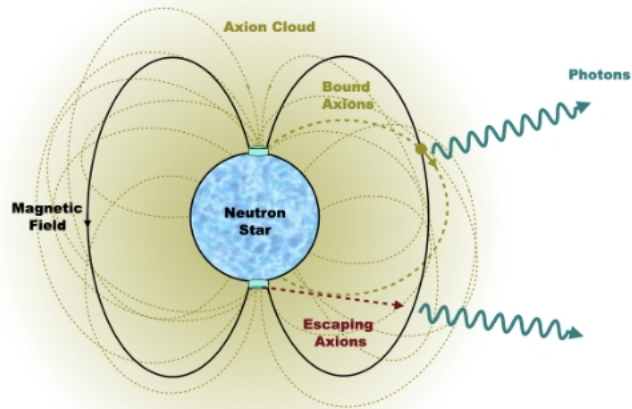
- Резултати? Ограничения за възможните параметри



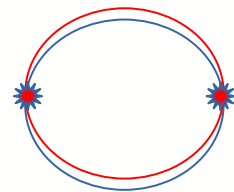
Астрофизични търсения на аксиони

Високоенергетичните събития в Космоса са добро място за търсене на „отпечатъци“ от аксиони

- Неутронни звезди
- Взаимодействащи купове от Галактики

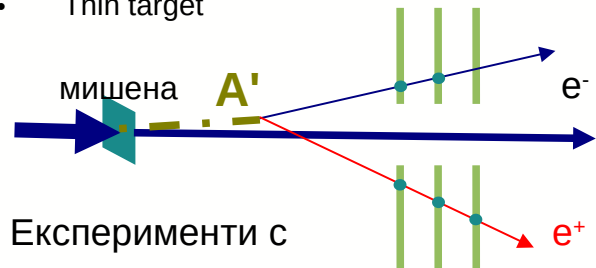


Търсене на Тъмна материя на ускорители



Фиксирана мишена

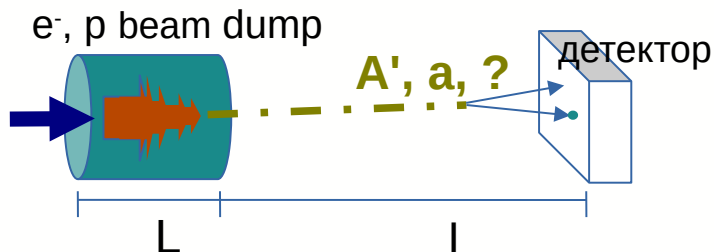
- Thin target



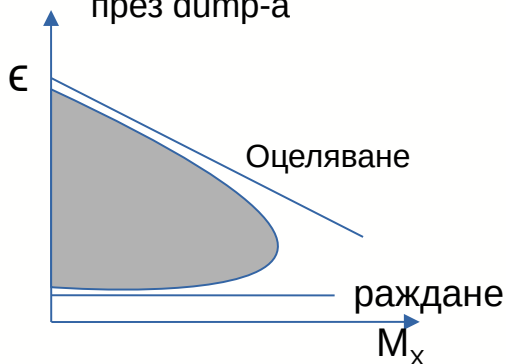
Експерименти с тънка мишена

- Директно раждане на тъмна материя (X-strahlung)
- Търсене на разпади чрез реконструкция на събития
- Създаване на вторичен сноп
 - Обикновено в тънка мишена
 - Търсене на нови частици в разпади на мезони
 - M_X е ограничена от масата на мезоните, чувствителността към взаимодействието – от статистиката

Beam dump

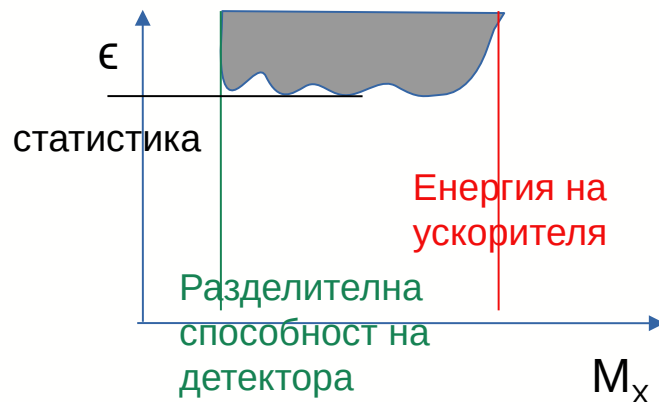


- Раждане: $A'/a/h/?$ -strahlung, лавини, поглъщане...
- Регистриране: всичко е сигнал, кинематика на крайното състояние
 - Новите частици трябва да оцелеят при преминаването през dump-a



e^+e^- колайдери

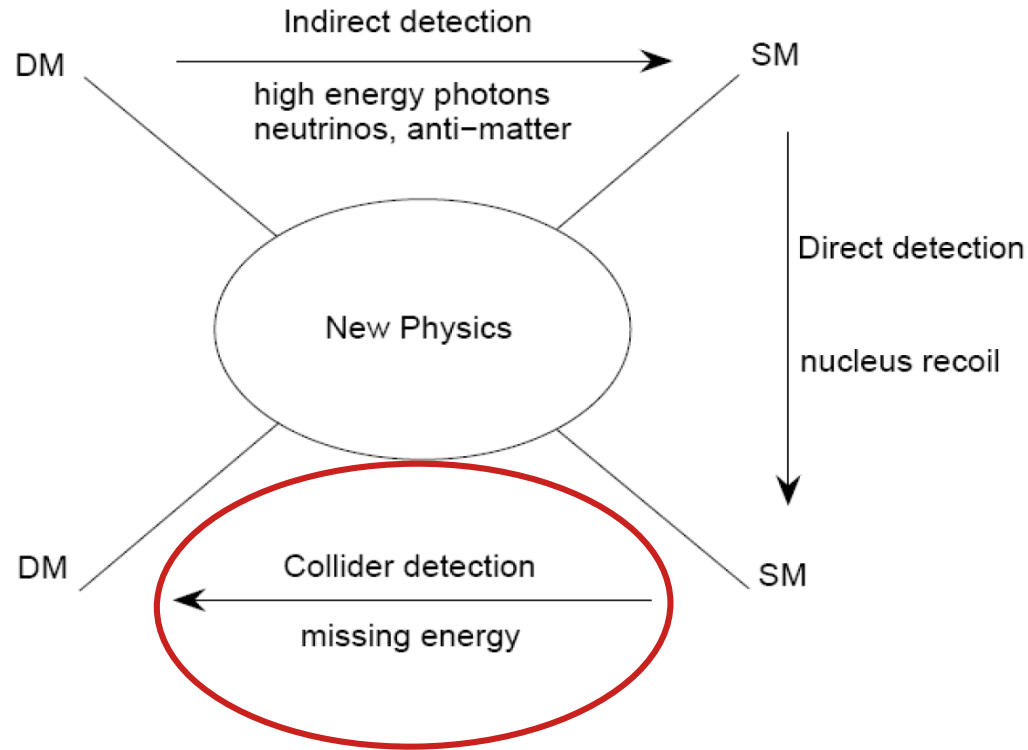
- Асоциирано раждане на нови състояния
- Чувствителността зависи от разделителната способност по липсваща маса



- Търсене и при раждане на мезони

Различни техники за търсене на Тъмна материя

Detection of particle dark matter



Direct

$$\chi + p \rightarrow \chi + p$$

Indirect

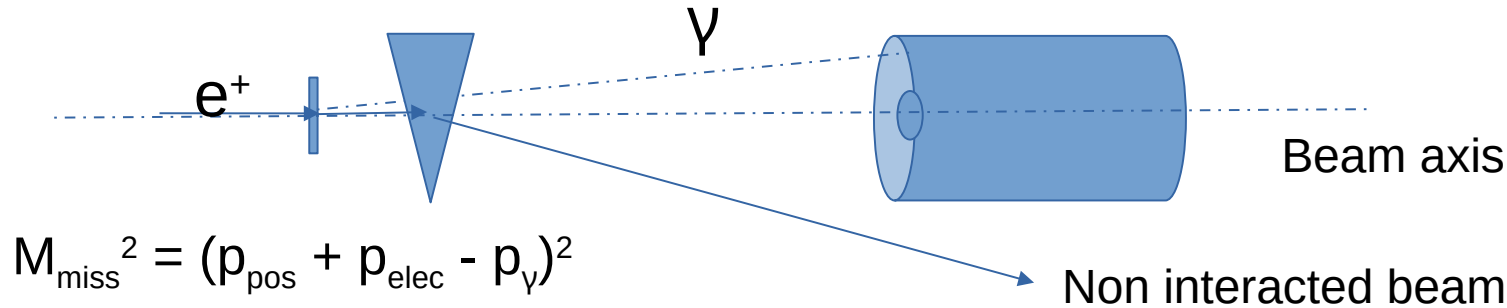
$$\chi + \chi \rightarrow p + \bar{p}$$

Production

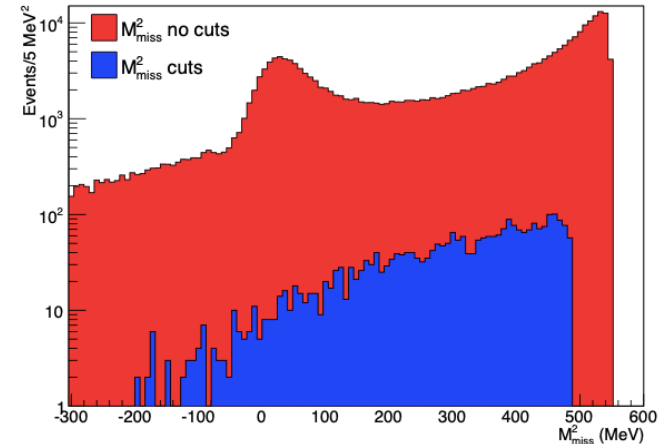
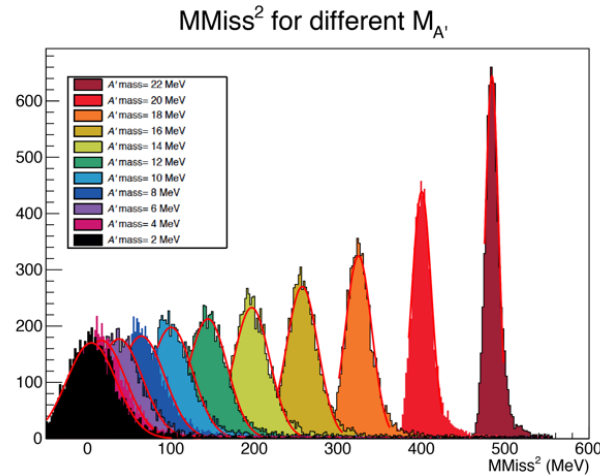
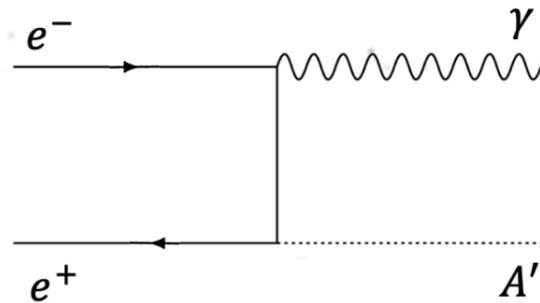
$$p + \bar{p} \rightarrow \chi + \chi$$

Аниhilация на позитрони до нови леки частици

Associated production: $e^+ e^- \rightarrow A' \gamma$



$$M_{\text{miss}}^2 = (p_{\text{pos}} + p_{\text{elec}} - p_{\gamma})^2$$



LNF, INFN

where colliders were born ...



Експериментът PADME

Малък експеримент @ Frascati Beam Test Facility

Комбинация от ускорител и фиксирана мишена

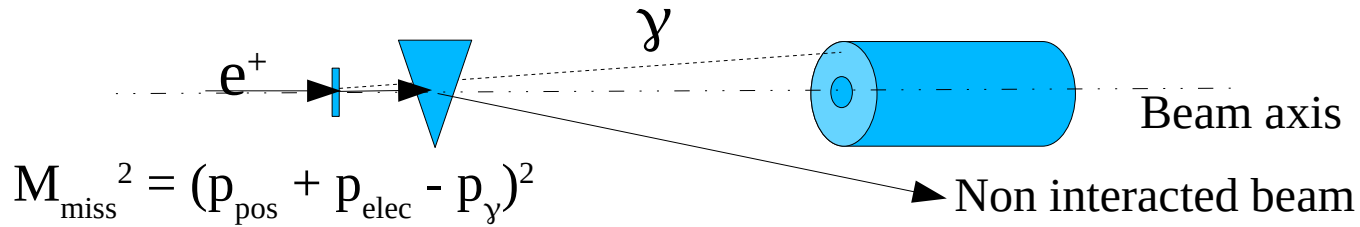
Аниhilация на ускорени античастици в материя



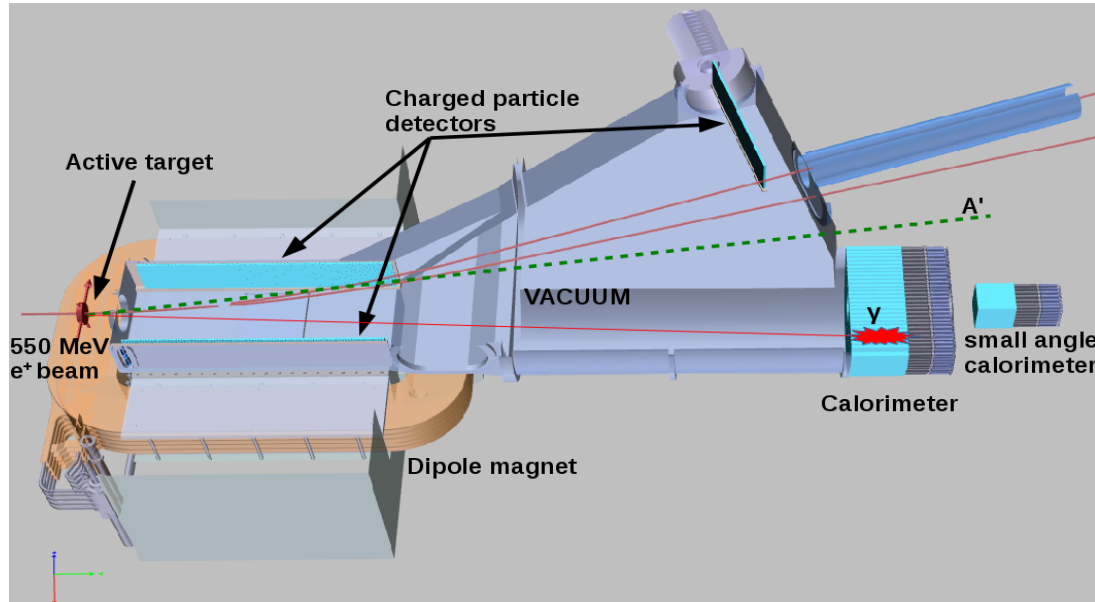
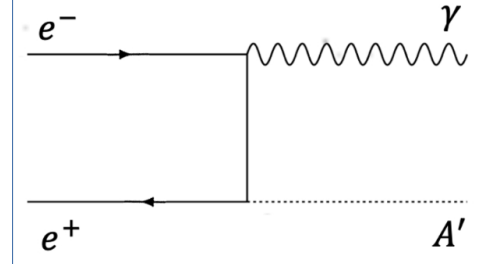
- Ускорени e^+ взаимодействат с тънка активна диамантена мишена
- Крайни състояния: e^+ , e^- , фотони
 - Електромагнитен калориметър
 - Детектори за заредени частици

Експериментът PADME

Positron Annihilation into Dark Matter Experiment



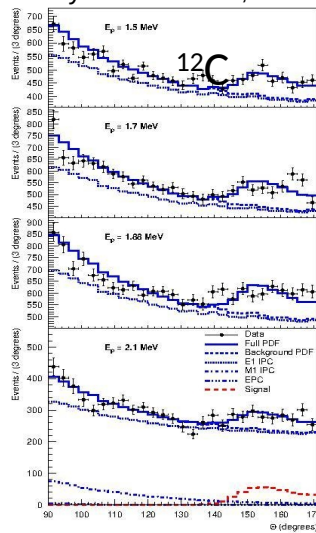
Associated production:
 $e^+ e^- \rightarrow A' \gamma$



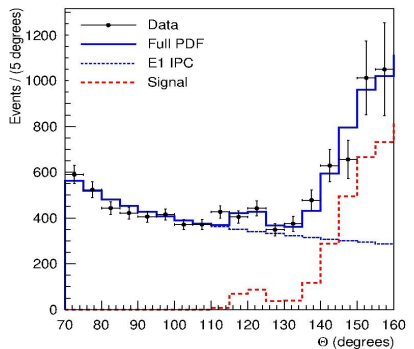
- Маломащабен експеримент с фиксирана мишена
 - e^+ @ Frascati Beam Test Facility
 - Ускорени e^+ взаимодействат с тънка активна диамантена мишена
 - Крайни състояния: e^+ , e^- , фотони
 - Детектори за заредени частици
 - Калориметри
 - Система за мониторинг на снопа

Търсенето на X17

Phys. Rev. C 106, L061601 (2022)

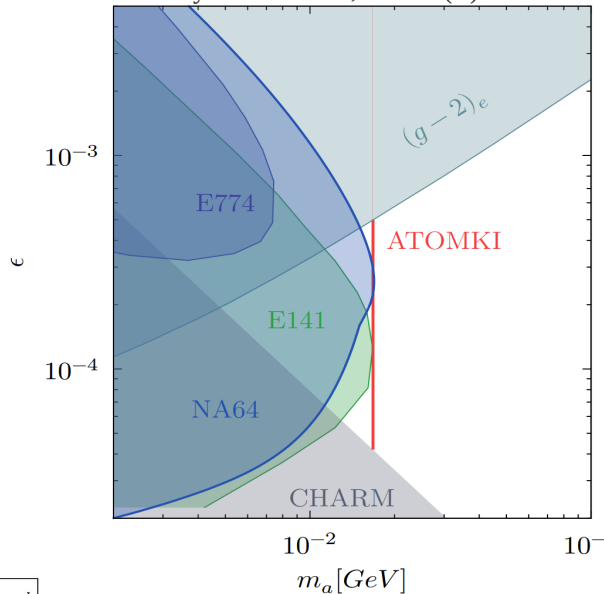


2022

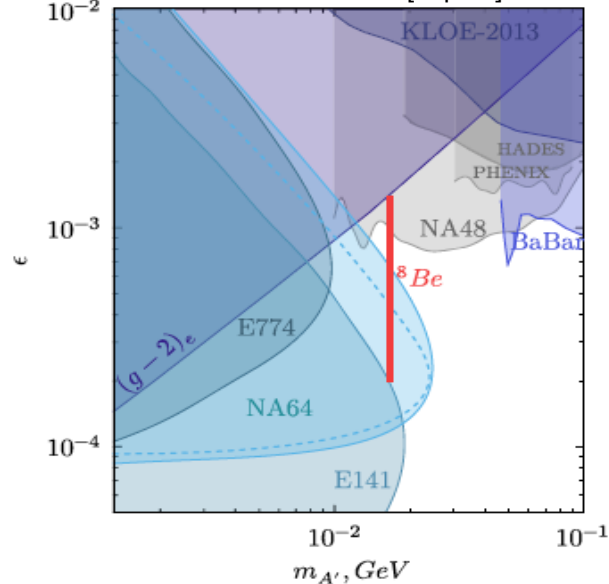


[arXiv:2308.06473](https://arxiv.org/abs/2308.06473) [nucl-ex]

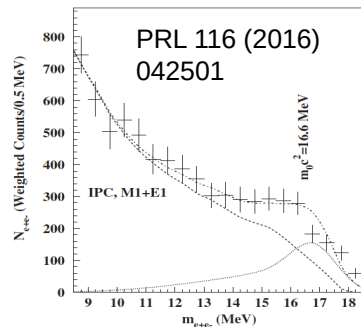
Phys. Rev. D 101, 071101(R)



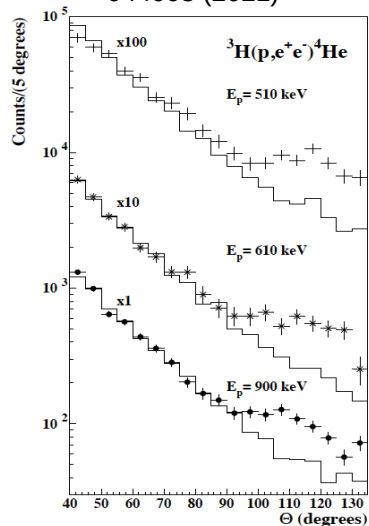
arXiv:2104.13342 [hep-ex]



- Наблюдаван ефект в експерименти с ^8Be , ^4He и ^{12}C
 - 2 лептона в крайно състояние
 - Кинематичните свойства се определят от масата на частицата X

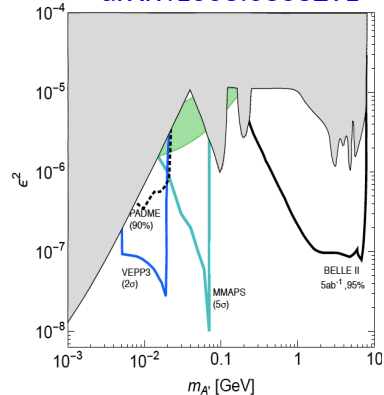


Phys. Rev. C 104, 044003 (2021)



Какво търсим с PADME?

Dark Photon A'
arXiv:1608.08632v1

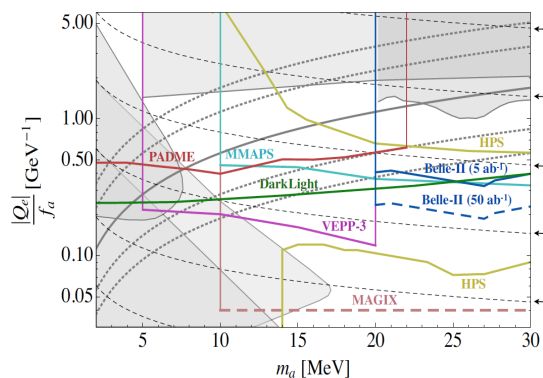


$$e^+e^- \rightarrow \gamma A'$$

Visible, invisible decays:

$$A' \rightarrow \chi\bar{\chi}, e^+e^-$$

Axion Like Particles
JHEP 07 (2018) 092

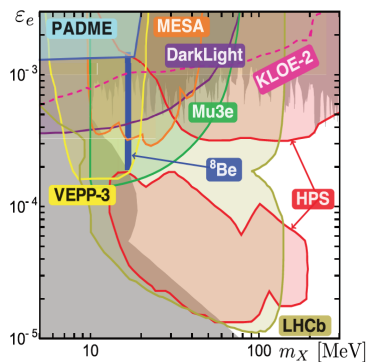


$$e^+e^- \rightarrow \gamma a$$

ALPs final states:

$$a \rightarrow \chi\bar{\chi}, e^+e^-, \gamma\gamma$$

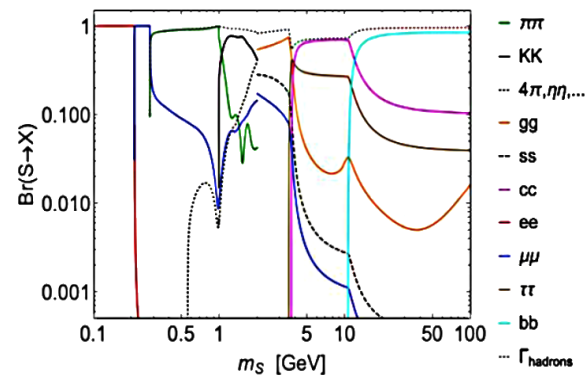
BE anomaly - X boson
PRD 95 (2017) 035017



$$e^+e^- \rightarrow \gamma X_{17}$$

Final state $X_{17} \rightarrow ee$

Dark higgs
arXiv:2102.12143v1



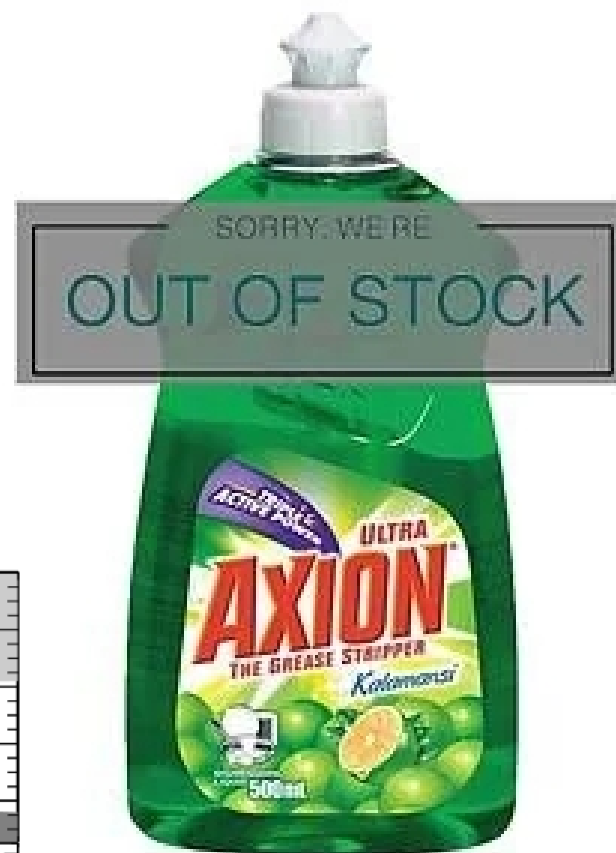
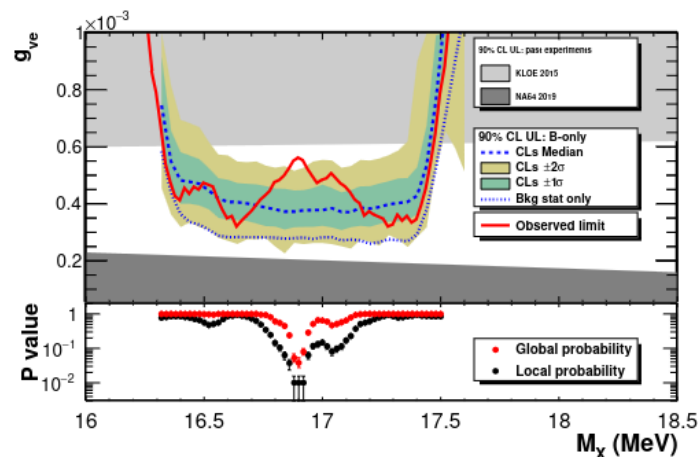
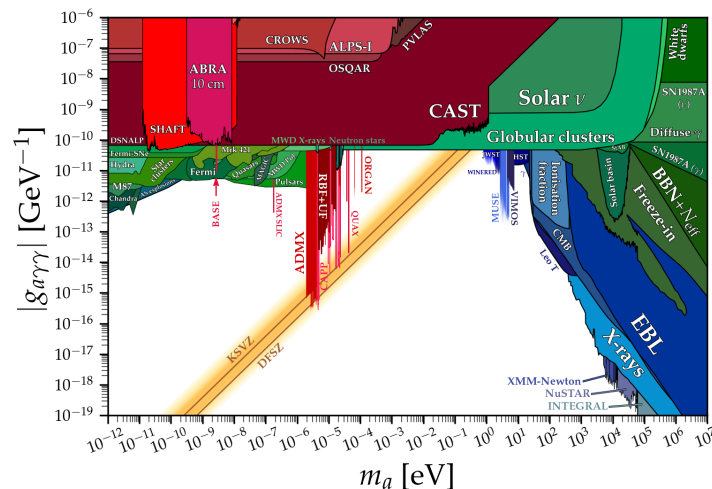
dark higgs decay: $h' \rightarrow$

$$A'A', A' \rightarrow e^+e^-, \chi\bar{\chi}$$

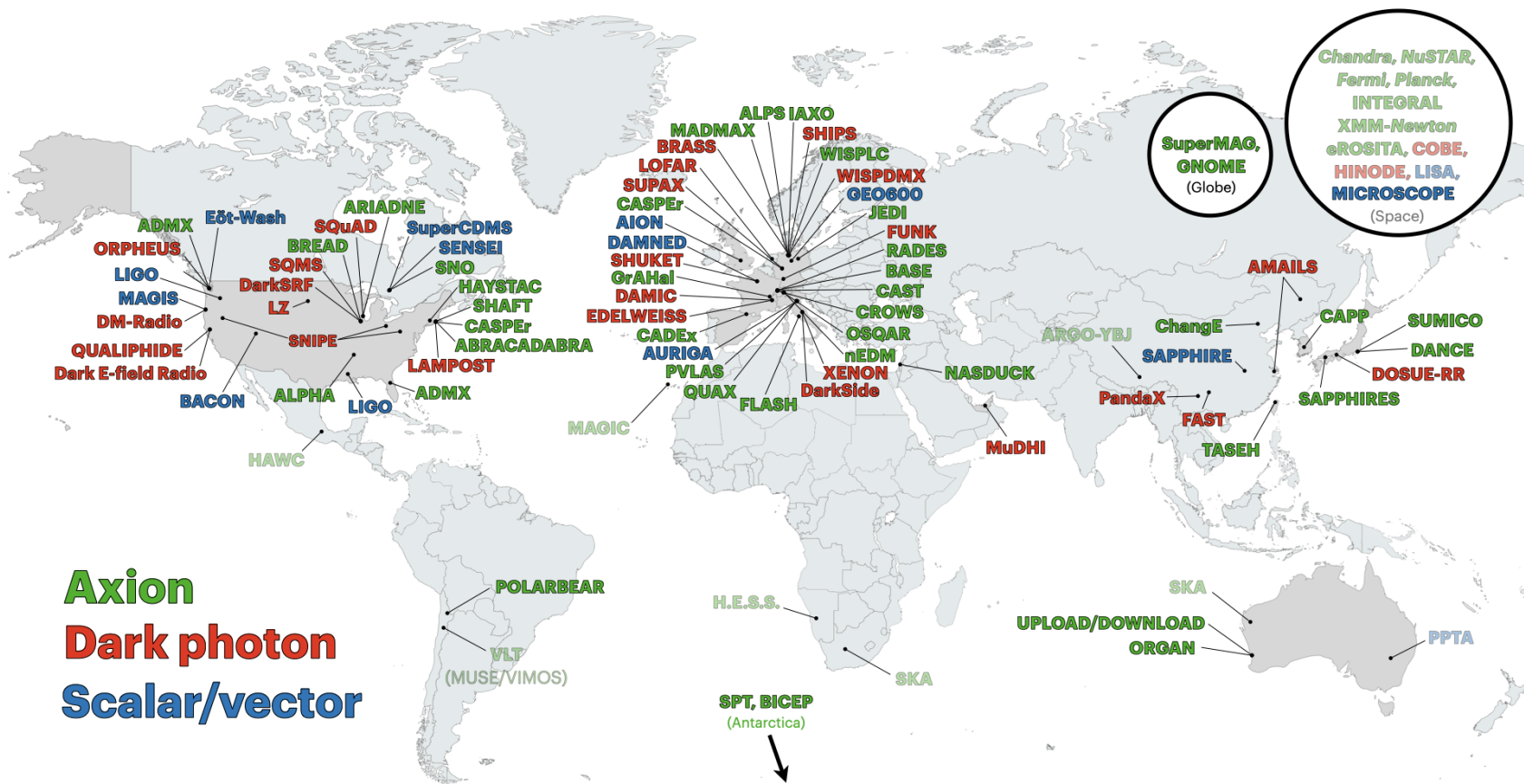
Final state: $A'A'A' \rightarrow e^+e^- e^+e^- e^+e^-$

Какво имаме дотук?

- Необходимост да обясним наблюдаваните астрофизични ефекти
- Търсене на нови леки частици:
 - Ограничения за аксионите
 - X17 частицата, предложена от АТОМКИ
 - Изследване на други хипотези



А сега накъде?





COME
JOIN
THE
DARK
SIDE