



# **Тъмна материя**

## **Модели извън стандартния модел**

*Румяна Хаджийска*  
*ИЯИЯЕ - Българска академия на науките*

quarks

leptons

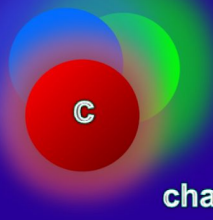
1-st generation

2-nd generation

3-rd generation



up



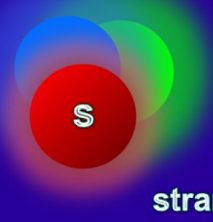
charm



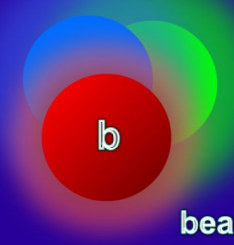
top



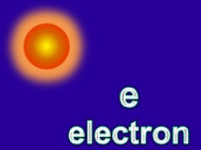
down



strange



beauty



e  
electron



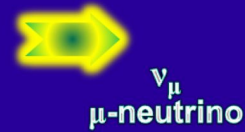
μ  
muon



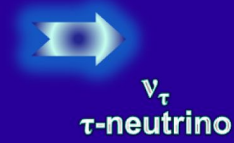
τ  
tau



ν<sub>e</sub>  
e-neutrino



ν<sub>μ</sub>  
μ-neutrino

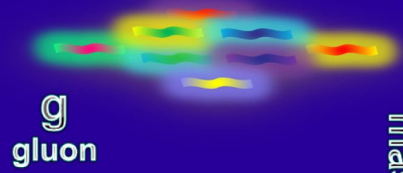


ν<sub>τ</sub>  
τ-neutrino

fermions

force carriers

strong interaction



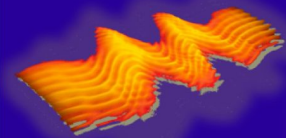
g  
gluon

electromagnetic interaction



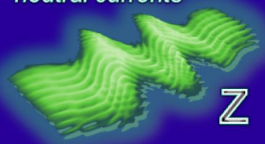
γ  
photon

weak interaction  
charged currents



W<sup>+</sup>W<sup>-</sup>

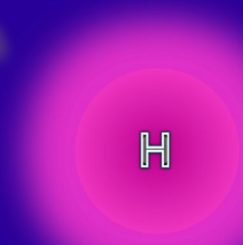
weak interaction  
neutral currents



Z

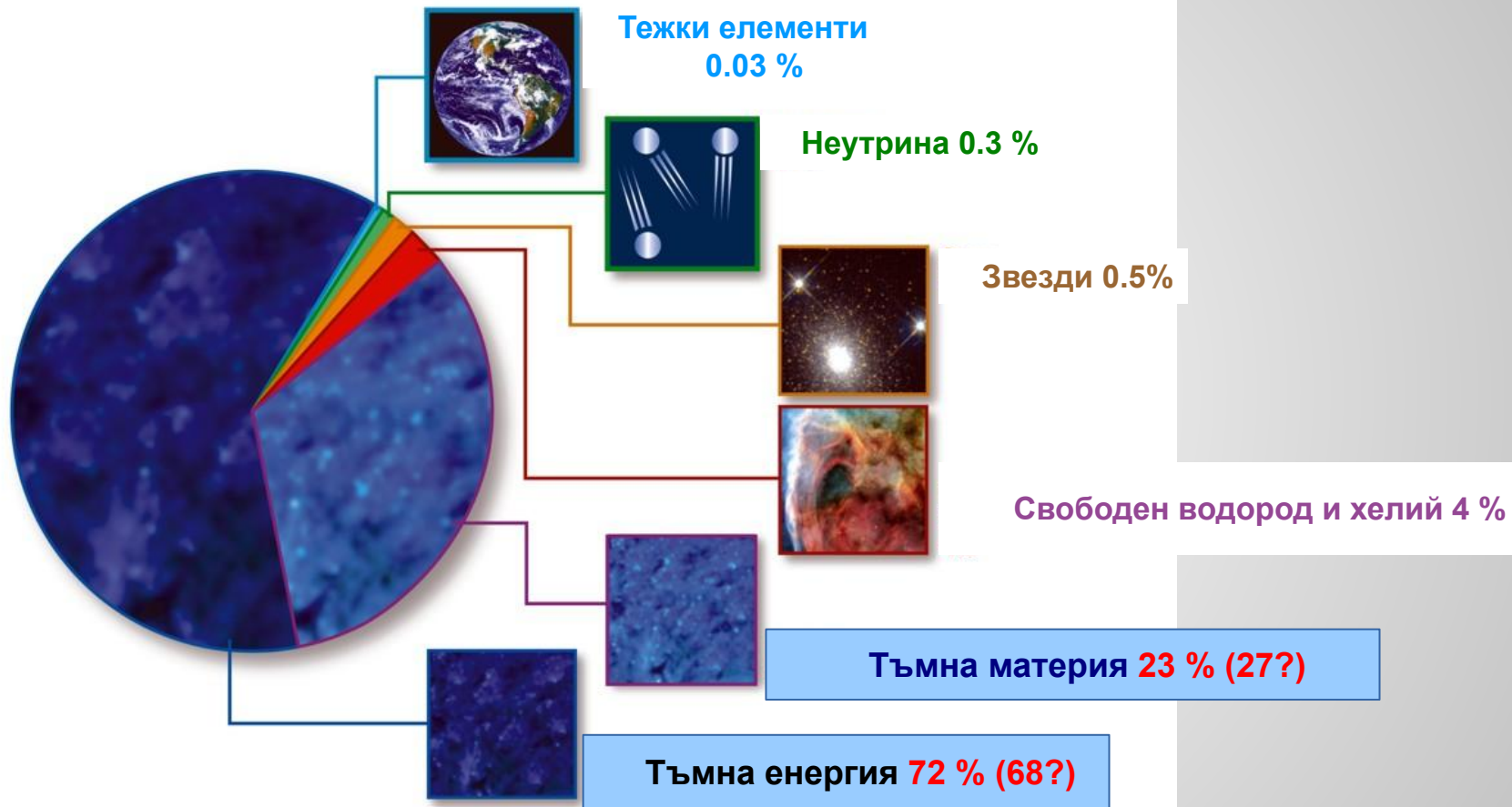
bosons

electro-weak  
symmetry breaking  
mass generating



H

## COMPOSITION OF THE COSMOS



# Тъмна енергия

90-те години на миналия век – **доминиращо разбиране за забавяне на разширяването на Вселената.**

- Енергията във Вселената е достатъчна за да спре да се разширява и да колапсира обратно;
- Дори и тази енергия да е недостатъчна, гравитацията ще забавя това разширение с времето

1998 – Hubble Space Telescope

- Наблюдение на далечни Супернови – **всъщност много отдавна Вселената се е разширявала много по-бавно.**

## Евентуални обяснения

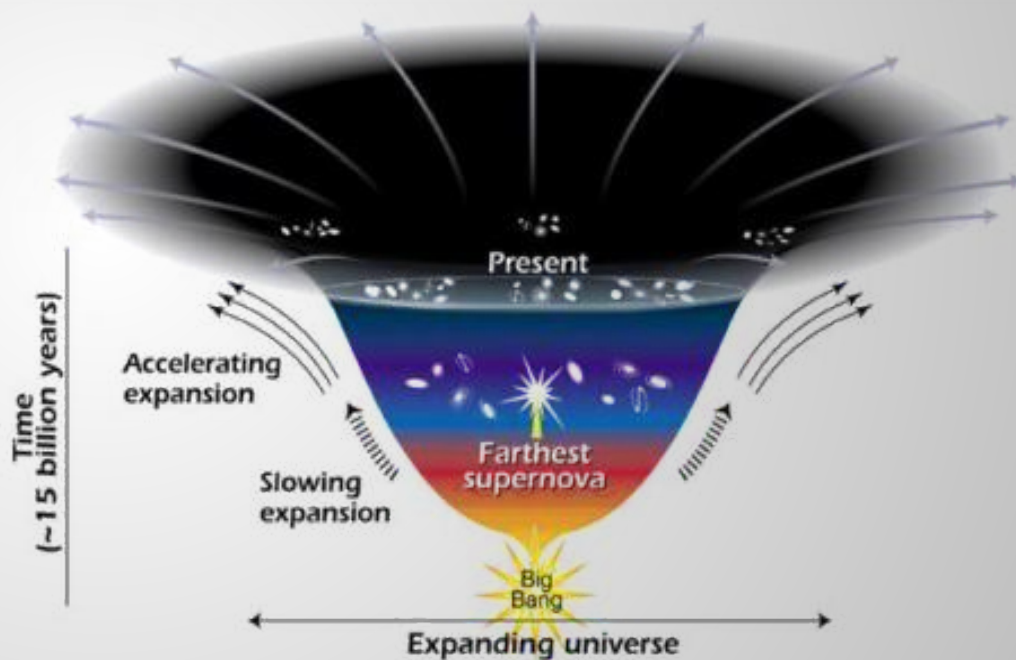
- Значението на „космологичната константа“;
- Някакъв енергиен „флуид“, изпълващ Вселената;
- Може би теорията и представата ни за гравитацията е грешна и ни трябва ново поле, което създава това ускорение на разширяване.
- ...

# Тъмна енергия - какво (не) знаем?

Колко е тъмната енергия?

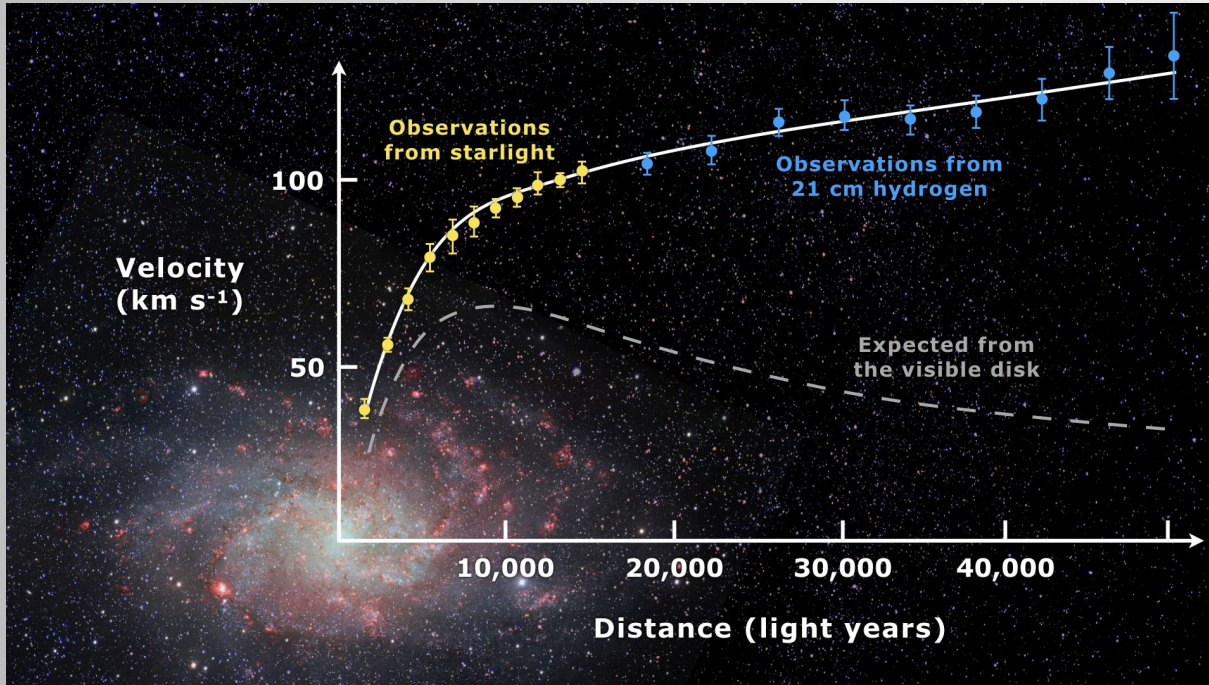
- От наблюдение как тя въздейства на разширяването на Вселената
  - По груба оценка: 68% тъмна енергия и 27% тъмна материя [7];
  - Останалото все още е загадка.

*Диаграмата показва промяната в скоростта на разширяване на Вселената. Кривата се променя чувствително някъде около преди 7.5 милиарда години.*



Credit: NASA/STSci/Ann Feild

# Астрофизични и космологични доказателства за съществуването на тъмна материя



credit: By Mario De Leo - Own work, CC BY-SA 4.0, [link](#)

*Криви на въртене на галактичните кълъстери - пример с галактиката M33.*

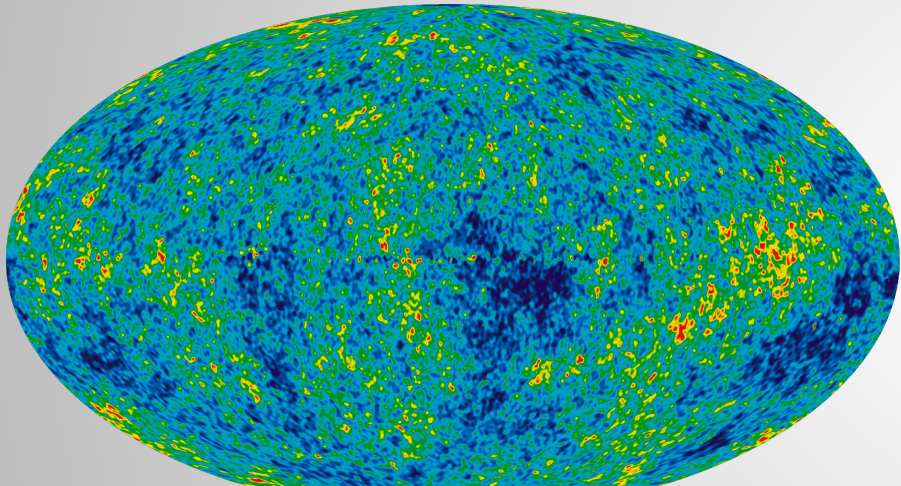
*Скоростта на въртене като функция на разстоянието на кълъстера от центъра на галактиката.*

*Сравнение между експериментални наблюдения (плътна линия) и очакванията (пунктирна линия), ако те съдържат само барионна материя.*

*Галактиките се въртят много по-бързо, отколкото ако съдържат само барионна материя.*

# Развитие на парадигмата за тъмна материя <-> СМВ

1982, Джим Пийбълс – „Наблюдаваните характеристика на космичния микровълнов фон (СМВ) също изискват съществуването на тъмна материя.“

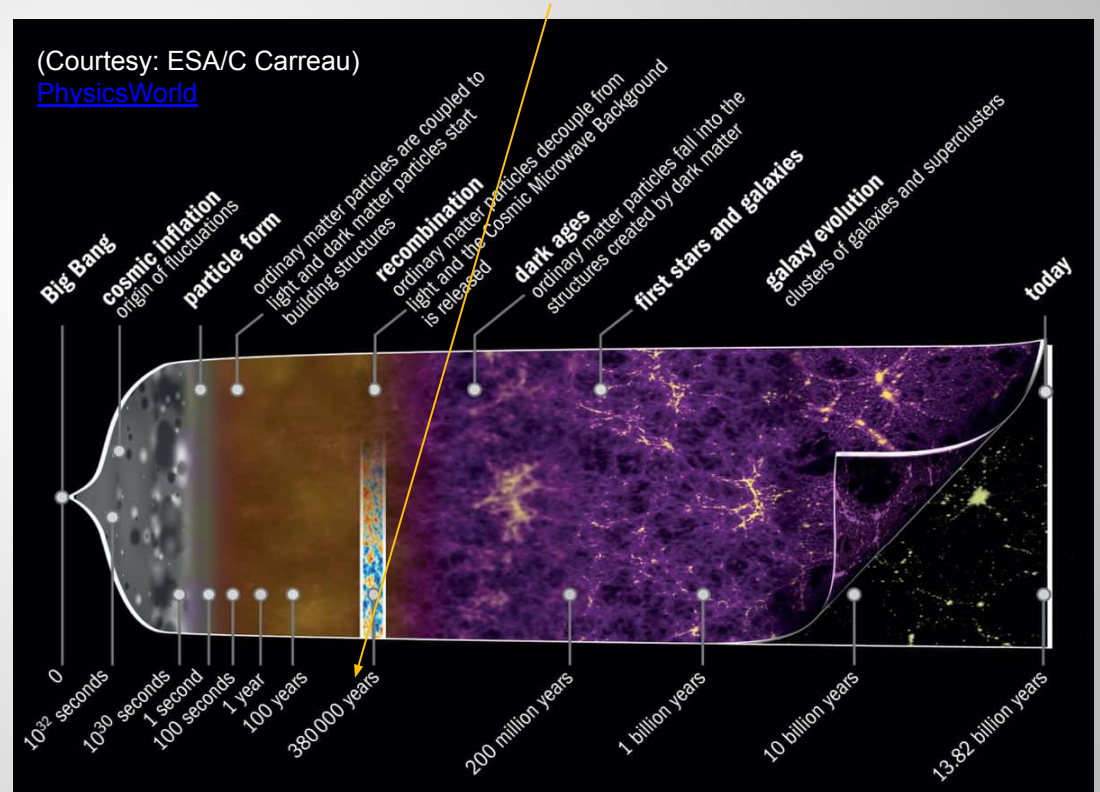


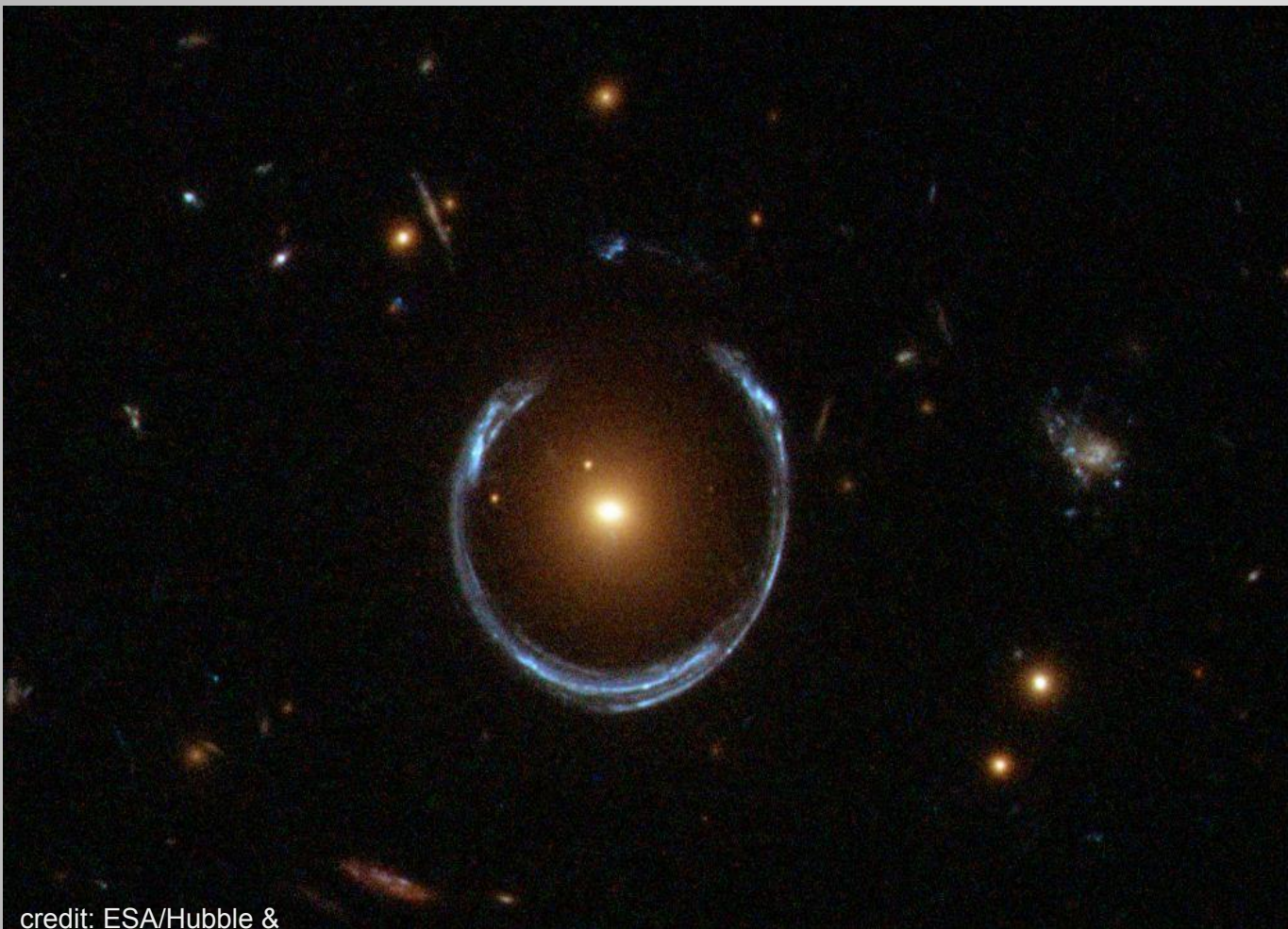
Credit: NASA / WMAP Science Team WMAP # 121238, [link](#)

*Карта на температурните разлики на космичното микровълново лъчение.*

СМВ:  $T = 2.73 \text{ K}$ ; дължина на вълната (пик на разпределението)  $\sim 1.063 \text{ mm}$  (микровълни); енергия на фотоните  $\sim 6.626 \times 10^{-4} \text{ eV}$

Съществуване на масивни слабо взаимодействащи частици, чиито проявления (флуктуации на плътност) започват да нарастват преди отделянето на материята и радиацията (времето, когато се ражда космическият фон).





credit: ESA/Hubble &  
NASA

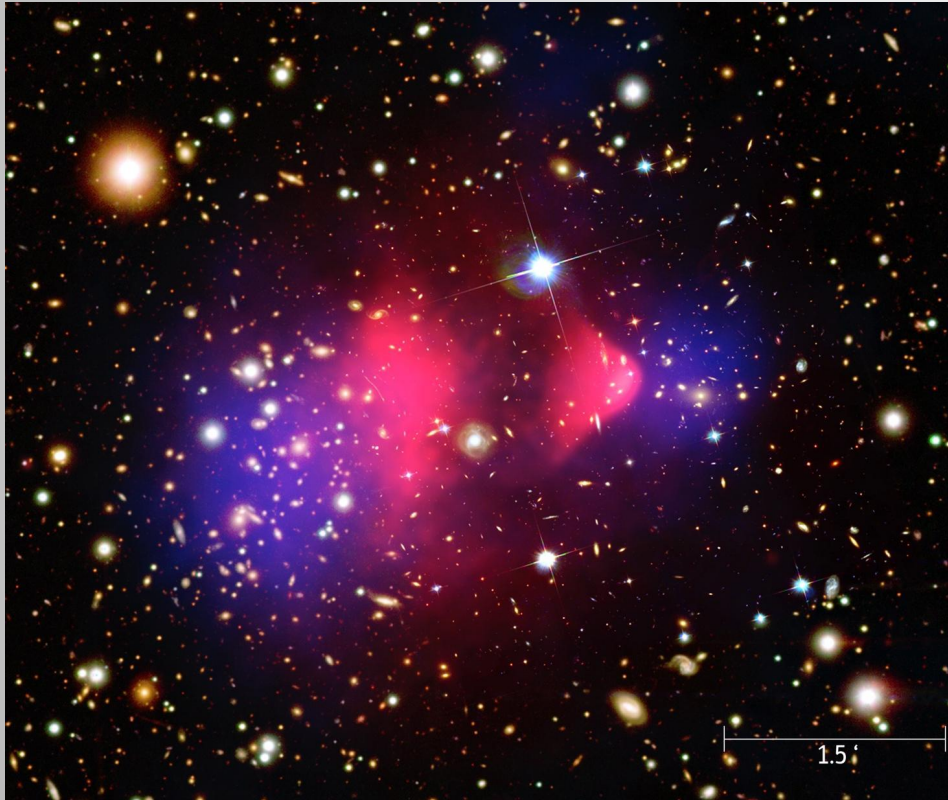
**Гравитационна леща.**  
Снимката е получена с помощта на космическия телескоп Hubble. В случая, галактиката зад масивния клъстер се наблюдава под формата на почти затворен пръстен - Пръстен на Айнщайн

допълнителна информация - [линк](#)

гравитационна леща - принцип: [видеоклип](#)



# Астрофизични и космологични доказателства за съществуването на тъмна материя



## Direct Proof of Dark Matter

This composite image shows the galaxy cluster 1E 0657-56, also known as the "bullet cluster." This cluster was formed after the collision of two large clusters of galaxies, the most energetic event known in the universe since the Big Bang.

Hot gas detected by Chandra in X-rays is seen as two pink clumps in the image and contains most of the "normal," or baryonic, matter in the two clusters. The bullet-shaped clump on the right is the hot gas from one cluster, which passed through the hot gas from the other larger cluster during the collision. An optical image from Magellan and the Hubble Space Telescope shows the galaxies in orange and white. The blue areas in this image show where astronomers find most of the mass in the clusters. The concentration of mass is determined using the effect of so-called gravitational lensing, where light from the distant objects is distorted by intervening matter. Most of the matter in the clusters (blue) is clearly separate from the normal matter (pink), giving direct evidence that nearly all of the matter in the clusters is dark.

The animation below shows an artist's representation of the huge collision in the bullet cluster. Hot gas, containing most of the normal matter in the cluster, is shown in red and dark matter is in blue. During the collision the hot gas in each cluster is slowed and distorted by a drag force, similar to air resistance. In contrast, the dark matter is not slowed by the impact, because it does not interact directly with itself or the gas except through gravity, and separates from the normal matter.

Left: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al., Below: NASA/CXC/M.Weiss

# Тъмна материя - оценки

Сравняване на теоретичния модел за състав на Вселената с комбинирани космологични наблюдения – 68% тъмна енергия, 27% тъмна материя, 5% „нормална“ материя.

- **Тъмна** – не е под формата на звезди и планети, които виждаме
  - Няма достатъчно видима материя, която да „запълни“ тези 27%
- **Не е „тъмни“ облаци от барионна материя,**
  - барионната материя – бихме могли да я регистрираме чрез различни наблюдения – примерно чрез линиите на поглъщане на лъченията, които минават през нея
- **Не е антиматерия** – не наблюдаваме характерните гама лъчи, които се излъчват при анихилиране на материя и антиматерия.
- **Черните дупки?**
  - гравитационни лещи – не наблюдаваме достатъчно такива събития за да достигнем 27%

Евентуален кандидат за тъмна барионна материя – „MACHOs“ (massive compact halo objects) – материята е затворена в кафяви джуджета или формирания от тежки метали

**Най-разпространено – тъмната материя не е барионна, а се състои от WIMP (слабо взаимодействащи масивни частици), или частици, подобни на аксиони.**

# Развитие на парадигмата за тъмна материя

## Връзка с физиката на елементарните частици

60 и 70-те години на 20-ти век: „Тъмната материя се състои от един или повече все още неоткрити видове субатомни частици“ ?

### Слабо взаимодействащи частици – **WIP** (Weakly Interacting particles)

- **Неутрино** като кандидат за тъмна материя:

- Стабилно
- Не взаимодейства електромагнитно или силно
- Проблем с оценката на масата
- Вайнберг и Ли: „Ако бъде открит стабилен тежък неутрален лептон с маса от порядъка на 1–15 GeV, гравитационното поле на тези тежки неутрино ще осигури правдоподобен механизъм за затваряне на Вселената“

Днес знаем, че неутрино от СМ не може да обясни липсващата маса във Вселената.

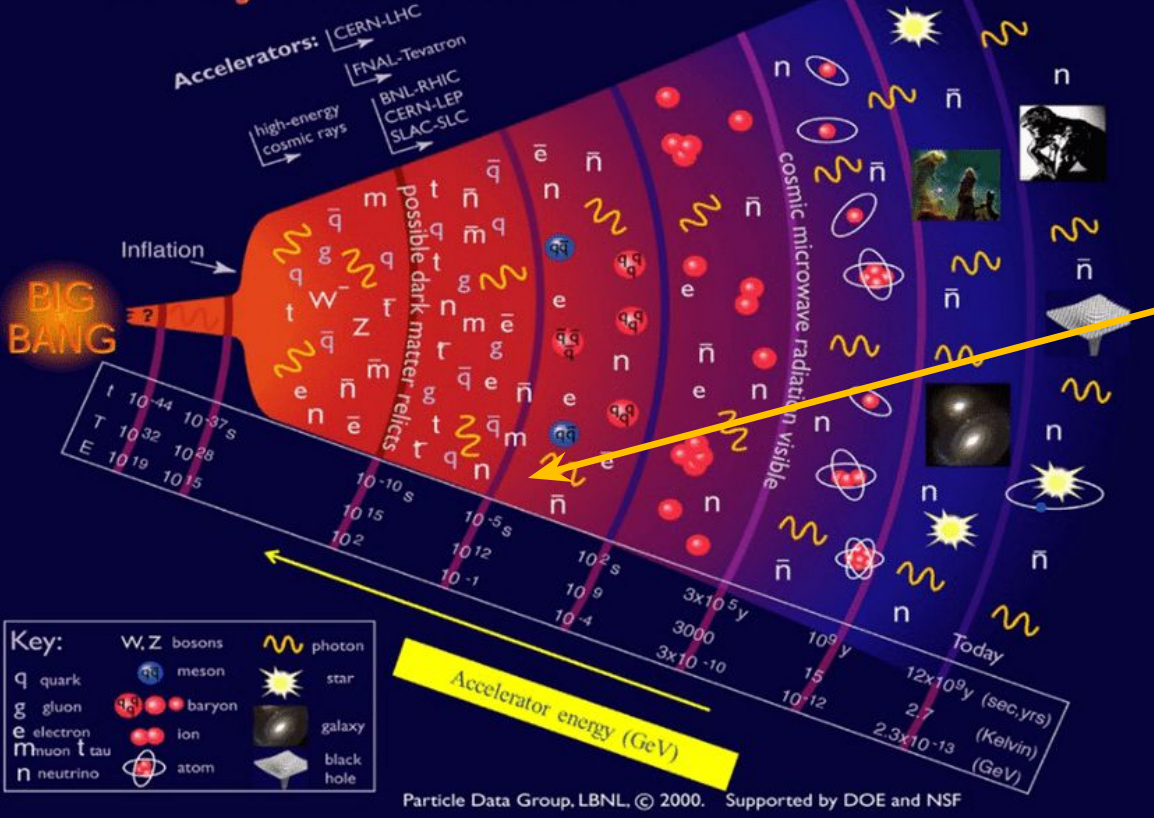
- Но изследванията в тази област са важен шаблон за следващи подобни изследвания:

### От **WIP** към **WIMP** (Weakly Interacting Massive Particles)

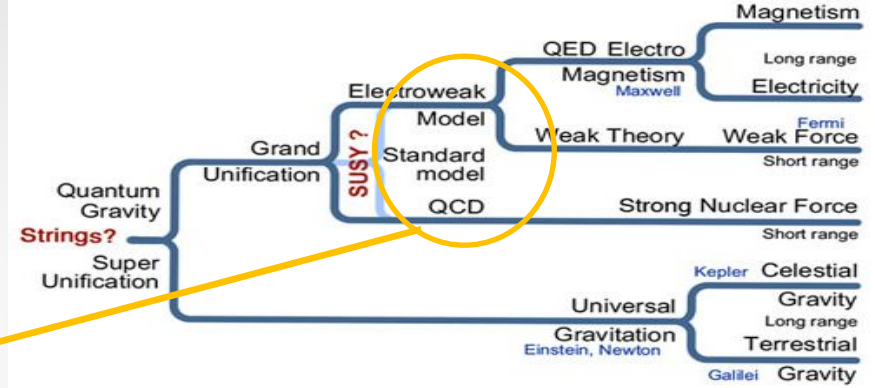
От слабо взаимодействащи частици -> към слабо взаимодействащи **МАСИВНИ** частици

# Тъмна материя и връзка с физиката на елементарните частици

## History of the Universe

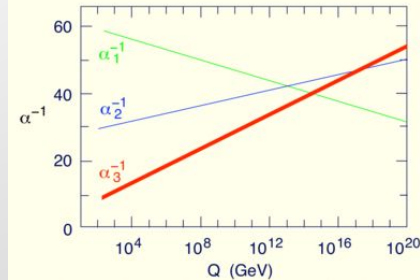


Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

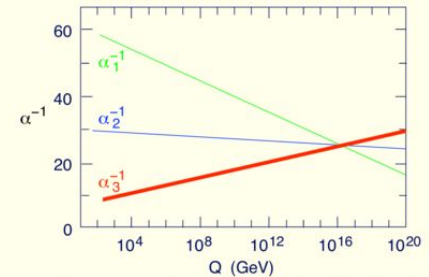


### Gauge Coupling Unification

#### Standard Model



#### MSSM



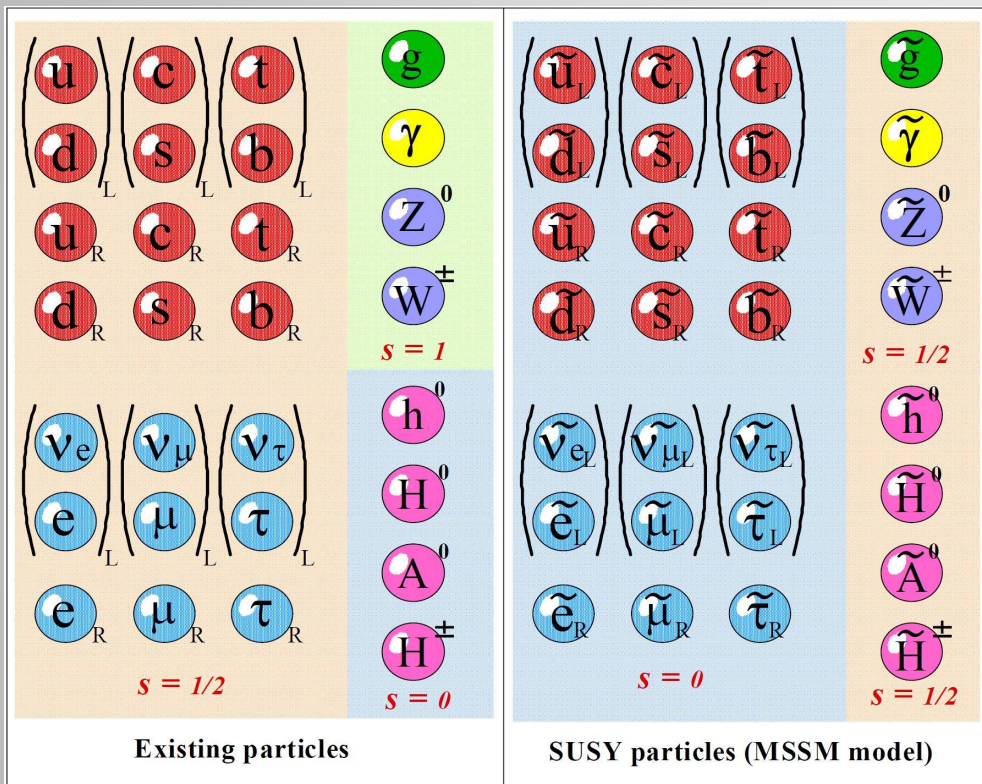
# Тъмна материя и връзка с физиката на елементарните частици

## Търсения извън стандартния модел на елементарните частици

- Extra dimensions searches
- $W'$ -boson searches
- $Z'$ -boson searches
- Supersymmetry: theory
- Supersymmetry: experiment
- Axions and other similar particles
- Quark and lepton compositeness, searches for
- Dynamical electroweak symmetry breaking: implications of the  $H(0)$
- Grand unified theories
- Leptoquarks
- Magnetic monopoles

# Кандидати за тъмна материя – теории извън стандартния модел

## Минимален суперсиметричен модел (MSSM)



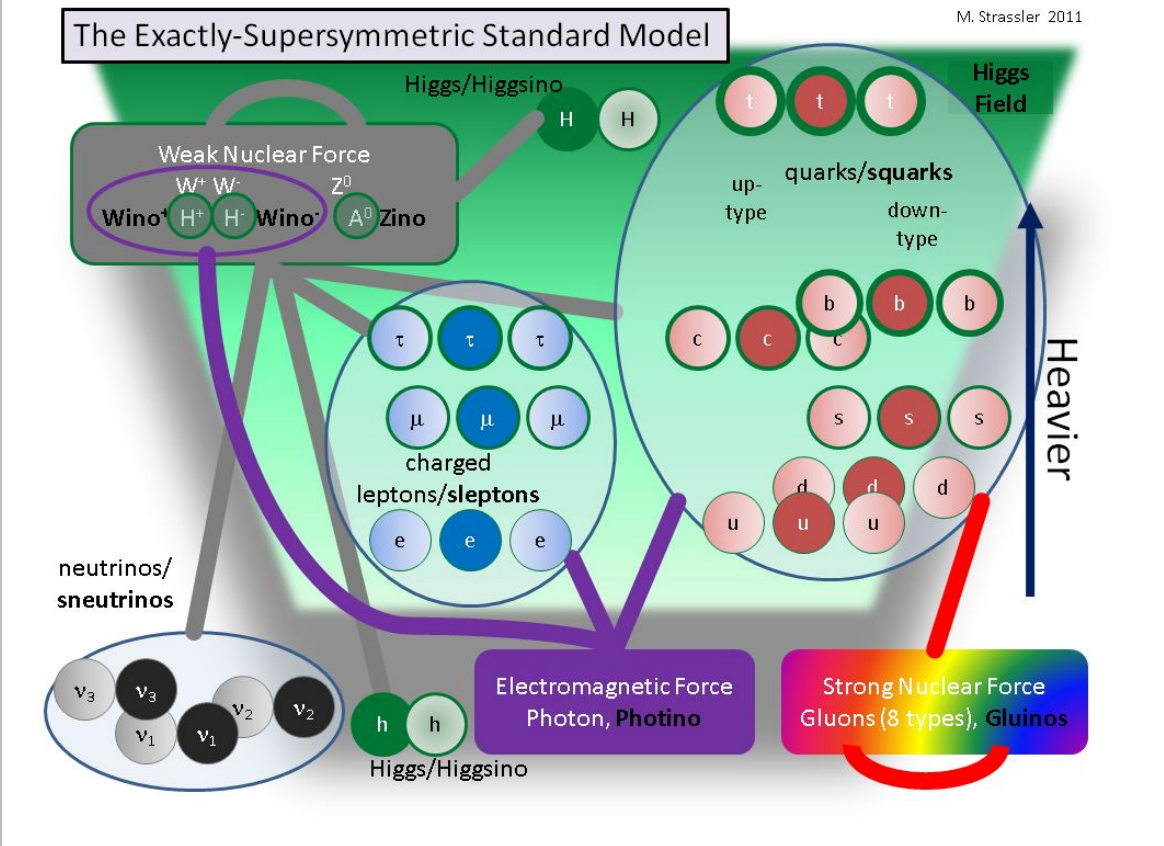
## Supersymmetry (SUSY)

- Всяка частица има своя суперсиметричен партньор, който се различава с  $1/2$  спин.
- Фермионите (получислен спин) имат за партньор бозони (целочислен спин) и обратното
- Унификация на фундаменталните взаимодействия при много високи енергии
- Решава проблема с финното определяне на масата на Хигс.

Courtesy: Mattia [9]. Отляво – частиците от стандартния модел + минимално разширения Хигсов спектър, предречени от MSSM; Отдясно – техните партньори от Минималния суперсиметричен модел

# Кандидати за тъмна материя – водещи теории извън стандартния модел

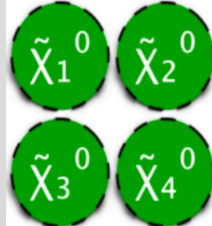
## Минимален суперсиметричен модел (MSSM)



Leptons → **sleptons** (selectron, smuon, ...)  
 Quarks → **squarks** (stop, sbottom, ...)

Калибровъчните полета → **gauginos** (Wino, Bino, gluino, ...)  
 Калибровъчни полета в комбинация с хигсино:

**Неутралино**



**Чарджино**

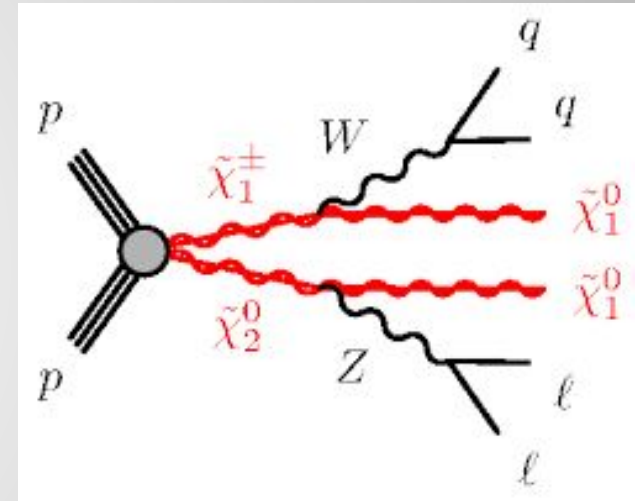
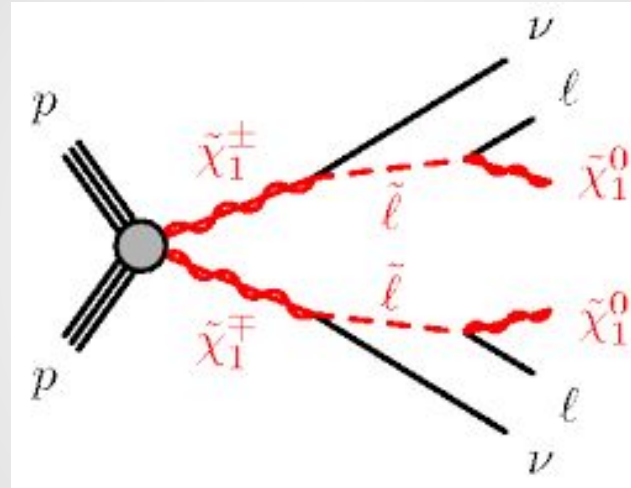
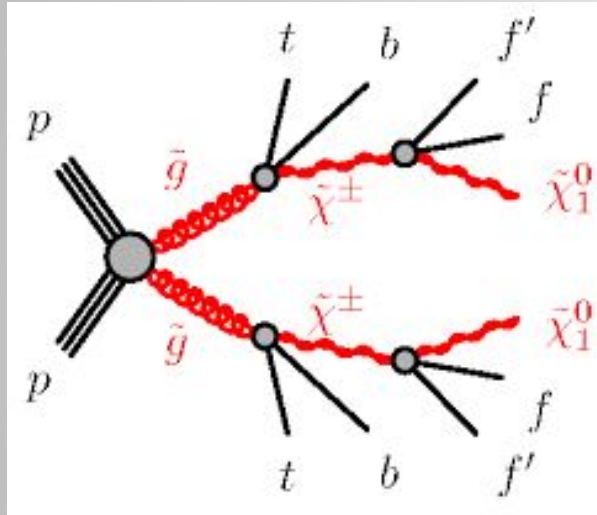


Courtesy: M. Strassler  
[Paper link](#)

**LSP (Lightest supersymmetric particle) – най-лека суперсиметрична частица**

# Минимален суперсиметричен модел (MSSM)

Примерни разпади (не изчерпват всички възможности) и сигнатура за търсене



Каскадни разпади

Крайни състояния с много голяма липсваща енергия (MET) + лептони и/или адронни струи

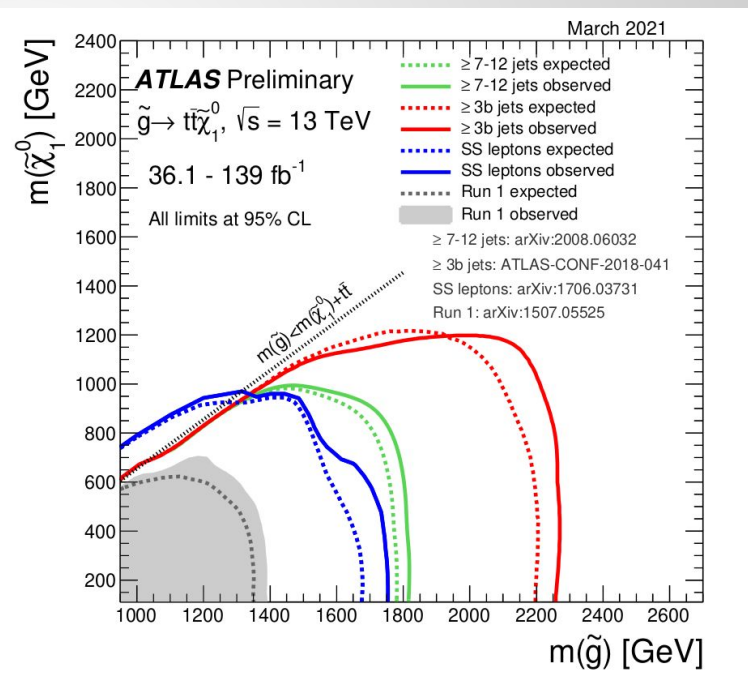
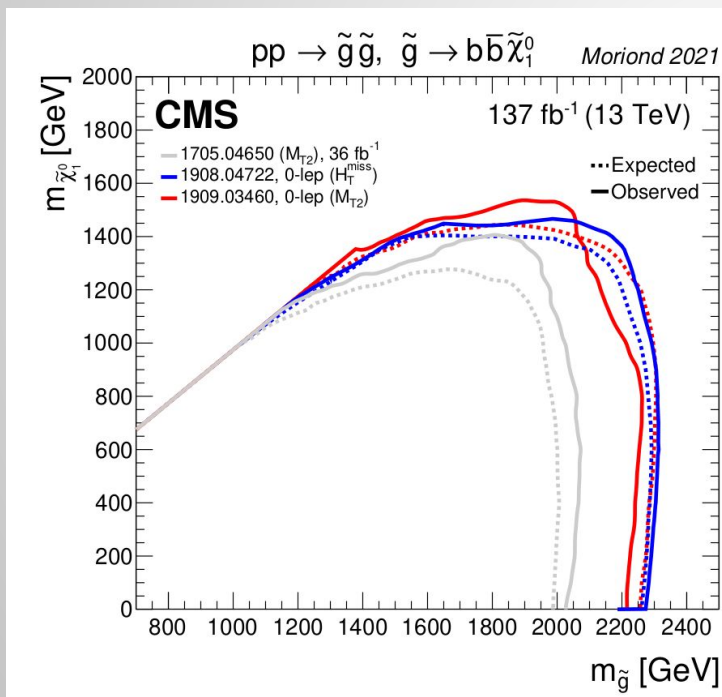


# Експериментално наблюдавани ограничения по маси на $s$ -частиците

- MSSM - модел с повече от 100 свободни параметъра
- Различни хипотези при провеждане на изследванията, примерно запазване или не на  $R$ -четността

Показаните по-долу резултати са за долни граници по маса за глуино, неутралино и  $s$ -кварк в MSSM със запазване на  $R$ -четността и най-лекото неутралино като LSP.

Повече информация и детайли могат да бъдат намерени в статията на PDG (Particle Data Group) [myk \[3\]](#).

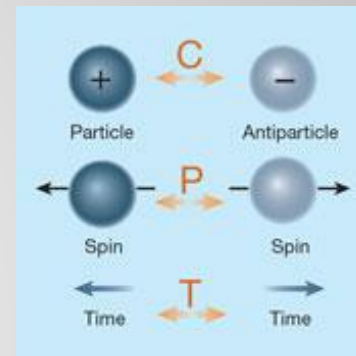
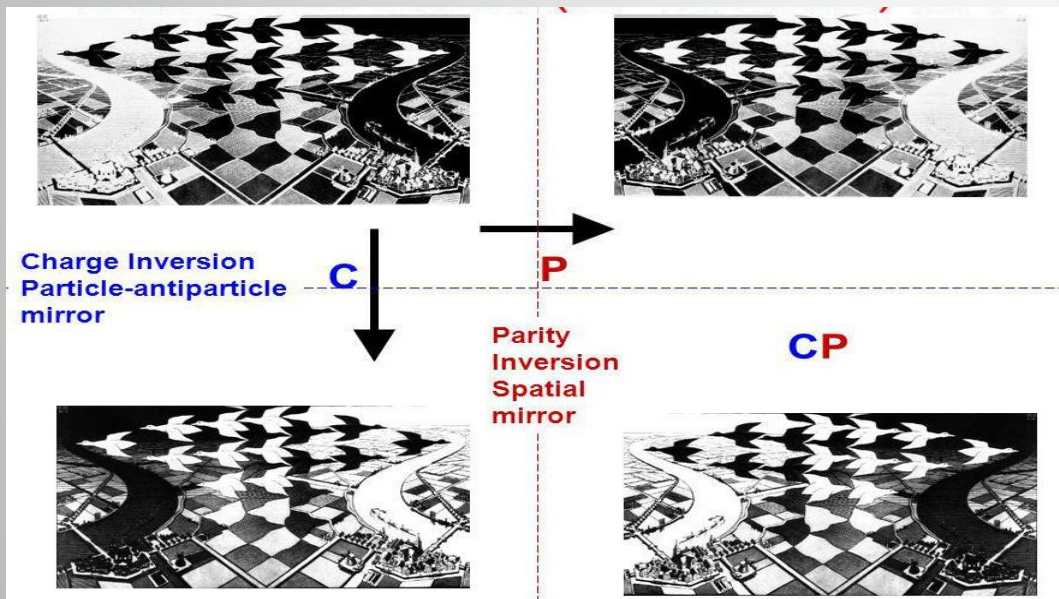


# Дискретни симетрии

„P“ - пространствена четност, преобразование на координатите, огледално отражение, аксиалните вектори запазват посоката си, докато полярните я променят противоположно

„C“ - зарядова четност, преобразуване на зарядите

„T“ – временна четност, обръщане на посоката на времето



Общата CPT симетрията се запазва,  
Но слабите взаимодействия  
нарушават P, а също и комбинираната  
CP инвариантност

credit: Chris Parkes

<http://slideplayer.com/slide/774084/>

# От WIMP към WISP и от TeV към $\mu\text{eV}$ - Аксиони

Силните взаимодействия не нарушават CP симетрията

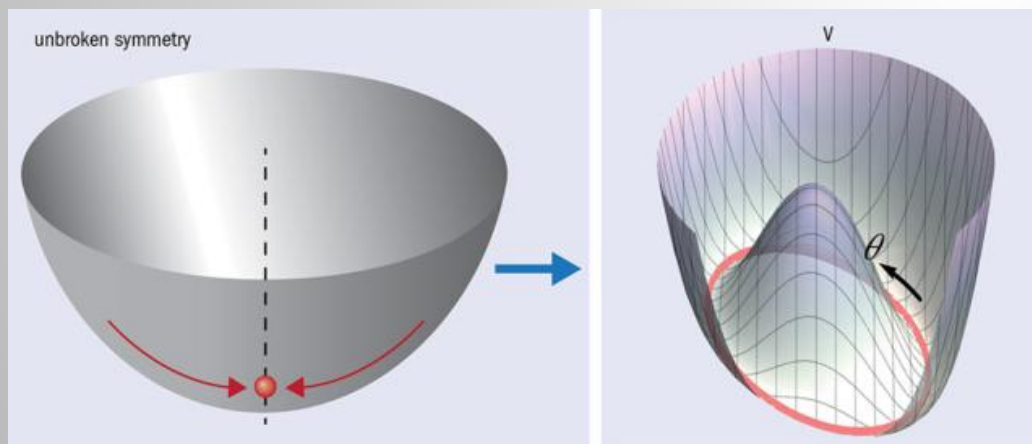
- проблем - може да доведе до диполен момент на неутрона

Въвеждане на нова симетрия - Пече и Куин - PQ аксиална симетрия

- Спонтанно нарушаване на U(1) PQ симетрията - нова частица Аксион

Аксион – кандидат за **WISP** (Weakly Interacting Sub-eV Particle )

- Голяма дължина на вълната (по-голяма от някои галактики) - “размити” частици
- **WISP – може да са родени в ранната Вселена**
- ALP – Axion Like Particles – частици, подобни на аксионите, но не решават т.н. CP проблем



*Потенциалът на полето на първичната плазма в много ранната Вселена (ляво) приема формата на сомbrero (дясно), когато температурата пада под скалата, съответстваща на нарушаването на симетрията.*

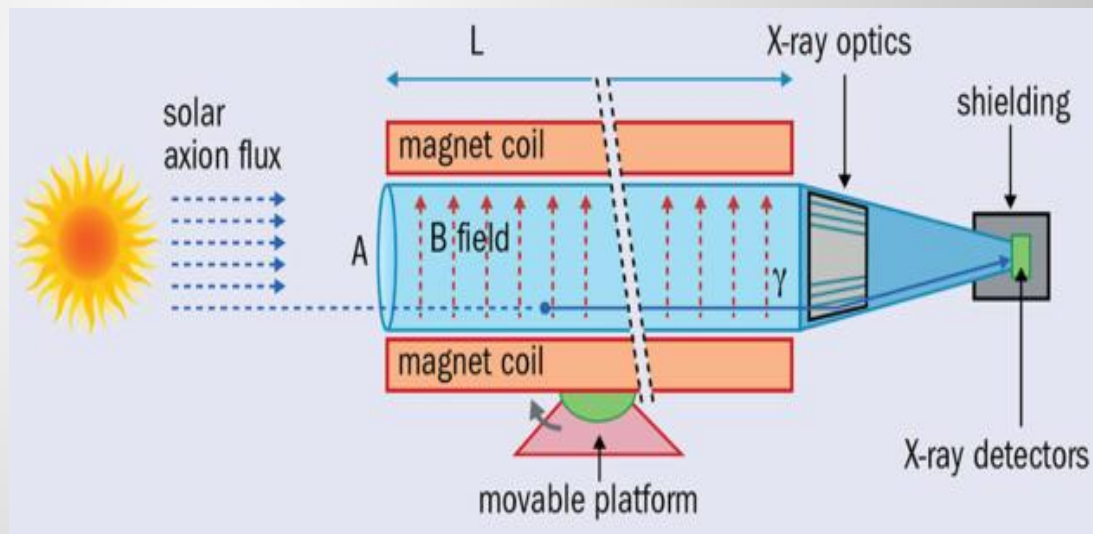
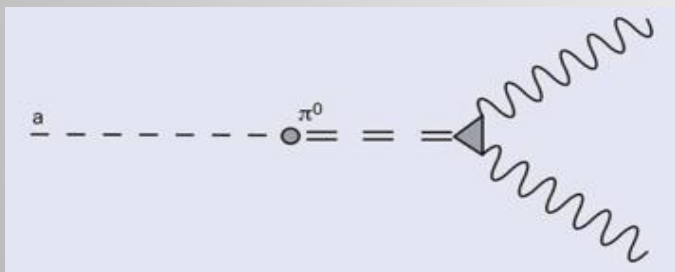
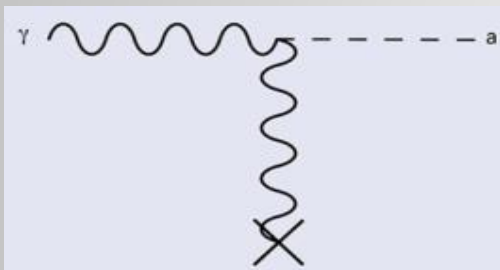
*Аксионите – аксиални колебания около минимума.*

# От WIMP към WISP и от TeV към $\mu\text{eV}$ - Аксиони

Раждане на аксиони и регистрация на аксиони - т.н. ефект (и обратен ефект) на Примаков.

Могат да бъдат родени и в звездите, примерно слънчевата корона

- Фотоните могат да взаимодействат виртуални фотони в полето на протоните в слънчевата кора, което да доведе до раждането на аксиони
- В присъствието на силно магнитно поле, Аксионът конвертира в  $\pi^0$  мезон, който се разпада на 2 фотона



credit: IAXO collaboration

# Аксиони - експерименти в ЦЕРН

**CAST** ([CERN Axion Solar Telescope](#)), **IAXO** (International Axion Observatory) - продължение на CAST (CERN + DESY)

- Търси слънчеви аксиони, като разчита на т.н. обратен ефект на Примаков
- Аксионът след взаимодействие с виртуален фотон на магнитното поле ще конвертира в два фотона в рентгеновата област.

Ограничения по маси: зависят от канала на взаимодействие и интензивността на това взаимодействие ( $g_{a\gamma}$ )

- Показани резултати (като пример): **Ограничения** за маса на аксиона при аксион-фотонно взаимодействие от CAST [12, 13].



credit: CAST collaboration

$$g_{a\gamma} \lesssim 8.8 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$$

за  $m_a \lesssim 0.02 \text{ eV}$

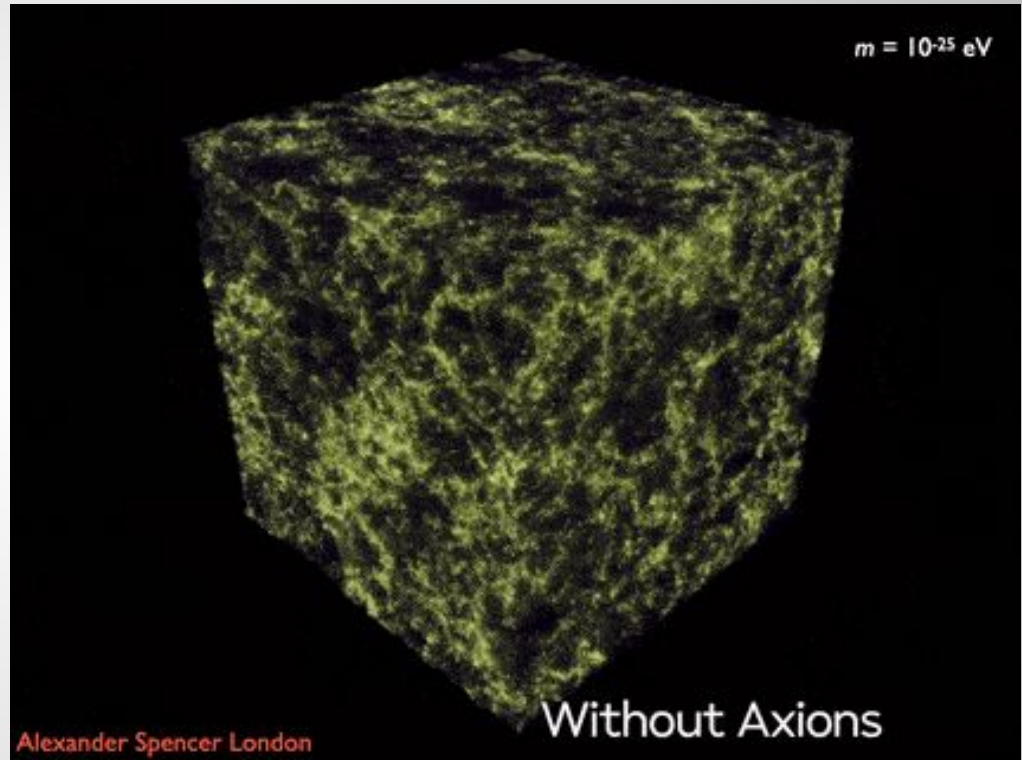
$$g_{a\gamma} \gtrsim 4 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-1}$$
$$34.6738 \mu\text{eV} < m_a < 34.6771 \mu\text{eV}$$

# Аксиони и структура на космическата мрежа (предположение)

## Космологични изследвания

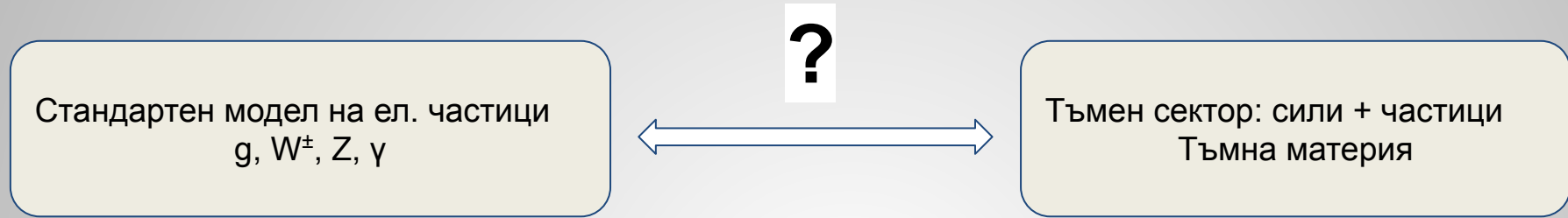
### Структура на космическата мрежа

- от близо – наблюдаваме клъстери, свързани с „нишки“ от материя – „космическа мрежа“ – неравномерно разпределена структура
- поглед от далече – много по-равномерно разпределение на материята, отколкото очакваме
- Наблюдения на SDSS (Sloan Digital Sky Survey) + Компютърен модел със и без аксиони
- Аксионите би трябвало да имат голяма дължина на вълната (по-голяма от някои галактики) - "размити" частици
- Ако се докаже тяхното съществуване, това би могло да обясни наблюдаваното "размиване" на структурите в нашите наблюдения [14]



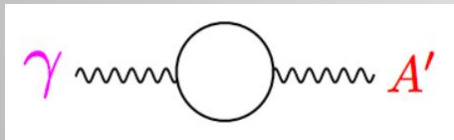
(източник [14])

# Тъмен фотон (Dark Photon) - $A'$

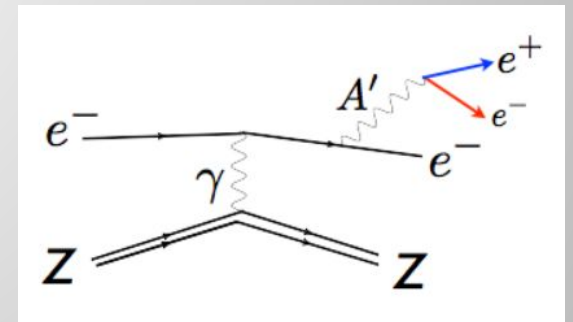


Възможни (негравитационни) портали към тъмния сектор:

- Аксиони, или подобни на тях частици (ALP - Axion Like Particles)
- Тъмен скалар (екзотични разпади на Хигс бозона)
- Неутрино
- **Тъмен фотон,  $A'$**  - разширяване на групата на симетрия на СМ с допълнителна група (U1)
  - векторен бозон и има същите взаимодействия като фотона от СМ, но може да има маса, може да се ражда заедно с фотона от СМ.



*Примерна схема на експеримент за регистриране на тъмен фотон*

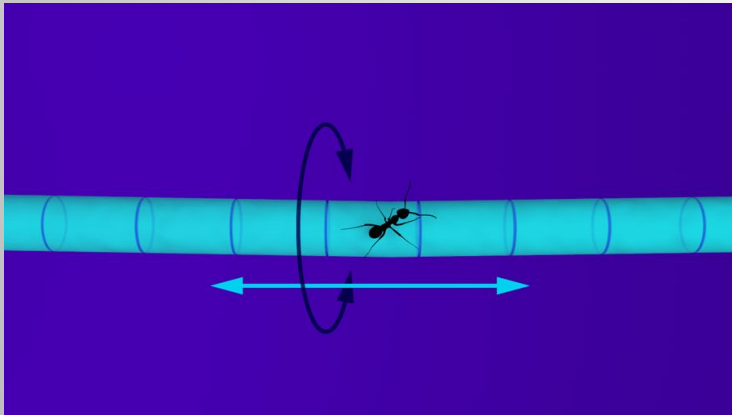


# Модели с допълнителни измерения (Extra Dimensions)

*Забележка: схематично представените два модела са за пример и не изчерпват всички разглеждани модели.*

**Допълнителното измерение (доп. измерения) е много малко и не сме чувствителни към него**

- Модел на Калуца-Клайн - обединение на електромагнетизма с теория на гравитацията:
- Във всяка една точка от пространството, допълнителното измерение е закривено и затворено в кръг.
- Поредица от възбудени състояния спрямо основното (нашето, на наблюдателя), които водят до появата на нови частици.



**ADD - Arkani-Hamed, Dimopoulos and Dvali (1998)**

- Нашият свят (1 време + 3 пространствени оси) е 3-Брана (3-brane) в 4+n размерна вселена
- Съществуват и други такива 3-branes
- Останалата част от 4+n пространството - бълк (bulk)
- Само гравитацията може да пренася взаимодействия от една брана до друга



Нашият свят

Скритият свят



- Представените модели не изчерпват пълния списък от модели извън стандартния модел, търсещи тъмна материя. А са показани по-скоро като референция за насоките, в които се развива подобни търсения.
- За момента няма експериментално наблюдаван кандидат за тъмна материя, но това вероятно тепърва предстои.

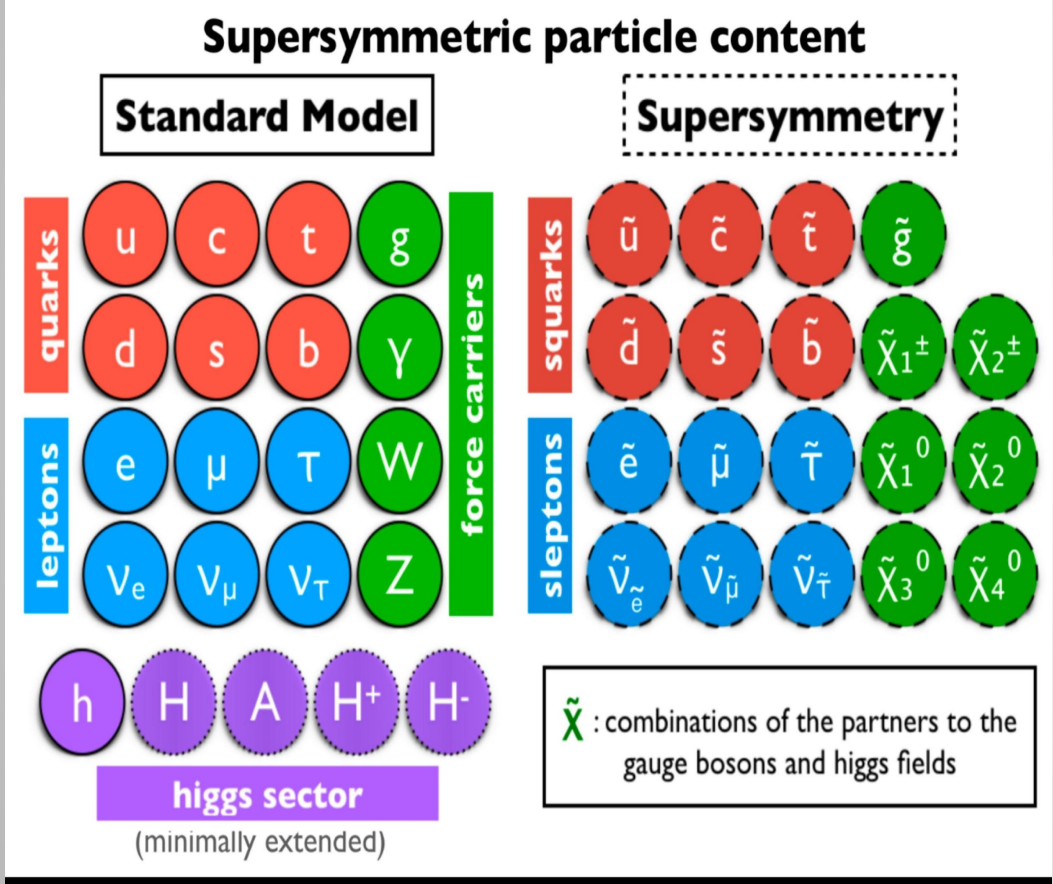
**Благодаря за вниманието!**

## Библиография и източници:

1. Particle Adventures [side](#)
2. Dissertori G. 2015 The pre-LHC Higgs hunt. Phil. Trans. R. Soc. A 373:20140039. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0039>
3. R.L. Workman et al. ([Particle Data Group](#)), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) and 2023
4. Antonio Pich, The Standard Model of Electroweak Interactions, [arXiv:1201.0537](https://arxiv.org/abs/1201.0537), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0537>
5. ZAP Physics, Spontaneous Symmetry Breaking and The Higgs Mechanism - [видеоклип](#)
6. Arvin Ash, The Crazy Mass-Giving Mechanism of the Higgs Field Simplified - [видеоклип](#)
7. Dark Energy, Dark Matter, NASA Science, [link](#)
8. Gianfranco Bertone, Dan Hooper, "How dark matter became a particle", CERN Courier, 2017, [link](#)
9. Mattia, The Minimal Supersymmetric extension of the Standard Model (MSSM), Particles and friends, [link](#)
10. Conversations About Science with Theoretical Physicist Matt Strassler, Of Particular Significance, [link](#)
11. Search for WISPs gains momentum, CERN Courier, [link](#)
12. Álvarez Melcón, A., Arguedas Cuendis, S., Baier, J. et al. First results of the CAST-RADES haloscope search for axions at 34.67  $\mu\text{eV}$ . J. High Energ. Phys. 2021, 75 (2021). [link](#)
13. CAST Collaboration, An improved limit on the axion-photon coupling from the CAST experiment, JCAP04(2007)010, [link](#)
14. University of Toronto, Invisible Architects: New Link Discovered Between Dark Matter and Clumpiness of the Universe, SciTechDaily, June 19, 2023, [link](#)
15. Stefan Theisen, "Extra dimensions – and how to hide them" in: Einstein Online Band 04 (2010), 03-1013

# Кандидати за тъмна материя – теории извън стандартния модел

## Минимален суперсиметричен модел (MSSM)



Leptons → sleptons (selectron, smuon, ...)  
 Quarks → squarks (stop, sbottom, ...)

Калибровъчните полета → gauginos (Wino, Bino, gluino, ...)  
 Калибровъчни полета в комбинация с хигсина:  
 neutralino (смес бино и зино)  
 chargino (вино)

Нещо любопитно :)

Тъмни звезди:

<https://nauka.offnews.bg/kosmos/dzhejms-ueb-mozhe-da-e-ot-kriil-parvoto-dokazatelstvo-za-zvezdi-ot-tam-199347.html>

<https://www.sciencealert.com/massive-suns-powered-by-darkness-may-have-been-spotted-at-the-dawn-of-time>