



# **Нарушаване на симетрията Хигс бозон и експериментални наблюдения**

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

quarks

leptons

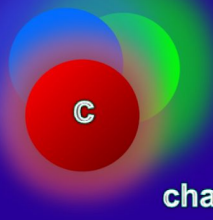
1-st generation

2-nd generation

3-rd generation



up



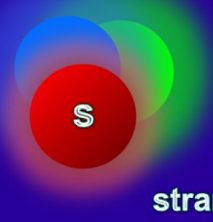
charm



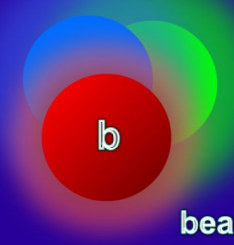
top



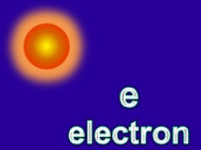
down



strange



beauty



e  
electron



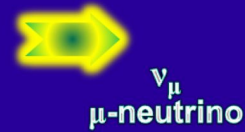
μ  
muon



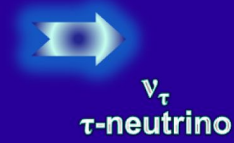
τ  
tau



ν<sub>e</sub>  
e-neutrino



ν<sub>μ</sub>  
μ-neutrino

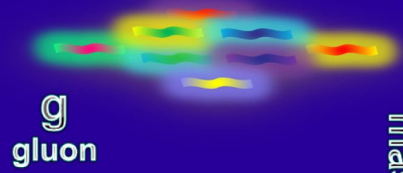


ν<sub>τ</sub>  
τ-neutrino

fermions

force carriers

strong interaction



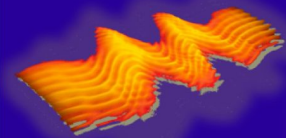
g  
gluon

electromagnetic interaction



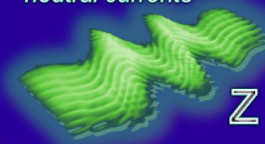
γ  
photon

weak interaction  
charged currents



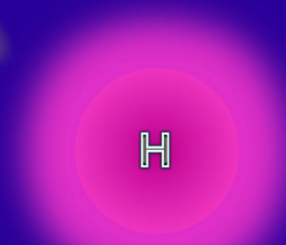
W<sup>+</sup>W<sup>-</sup>

weak interaction  
neutral currents



Z

electro-weak  
symmetry breaking  
mass generating



H

bosons

През 1964 г., шест теоретични физика предлагат хипотезата за съществуването на ново поле (по подобие на електромагнитното), което прониква през цялото пространство и би трябвало да реши критичен проблем на нашето разбиране на вселената [1].



Франсоа Енглерт и Питър Хигс по време на официалното анонсиране на наблюдаването на Хигс бозона 04.07.2012

Независимо от тях, други физици - Глешоу, Вайнберг и Салаам, изграждат теорията за фундаменталните частици, в крайна сметка наречена „Стандартен модел“, която се оказва изключително точна.

Експерименталните тестове на прецизността на отделните части на Стандартния модел показват точност от порядъка на 1 на милиард. (Примерно разстоянието от Ню Йорк до Сан Франциско с точност до 0.4 mm).

Тези иначе несвързани усилия се оказват тясно свързани помежду си, тъй като Стандартният модел се нуждае от механизъм, който да даде маса на фундаменталните частици.

Теорията, разработена от Питър Хигс, Робърт Браут, Франсоа Енглерт, Джералд Гуралник, Карл Хаген и Томас Кибъл, направи точно това.

# Малко терминология

Уравнение на движението -> Лагранжиан:  $L=T-V$

$T$  - кинетична енергия,  $V$  - потенциална енергия

Инвариантна величина - не се променя при трансформации ...

Частича - Поле на частица, възбужданията на полето - самата частица

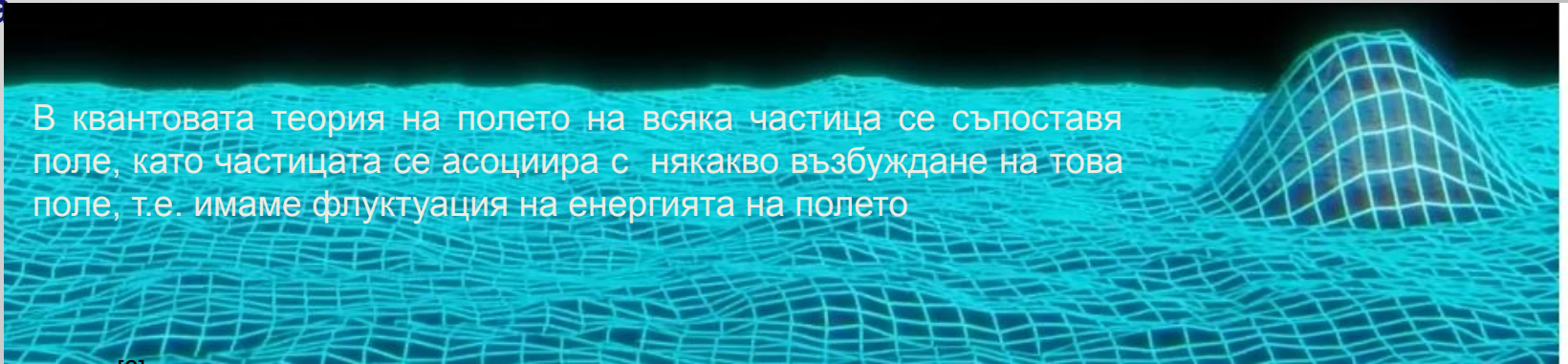
Поле - потенциал на полето

Описание на частиците и техните взаимодействия - Симетрии и групи на симетрии

Най-ниско енергетично състояние на полето - вакуум

Начално състояние - не винаги съвпада с вакуумното състояние

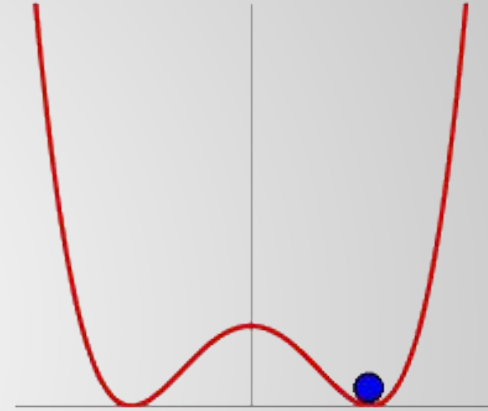
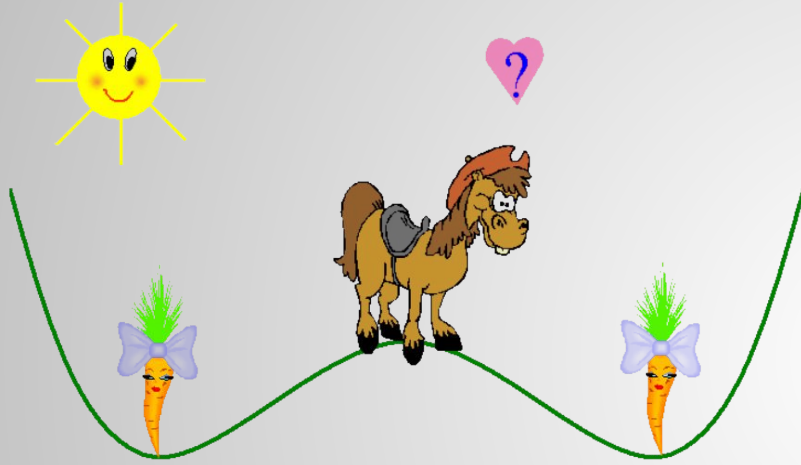
Може да има повече от едно вакуумно състояние - предпоставка за нарушаване на симетрията



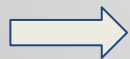
В квантовата теория на полето на всяка частица се съпоставя поле, като частицата се асоциира с някакво възбуждане на това поле, т.е. имаме флуктуация на енергията на полето



# Спонтанно нарушаване на симетрията - [видеоклип](#)

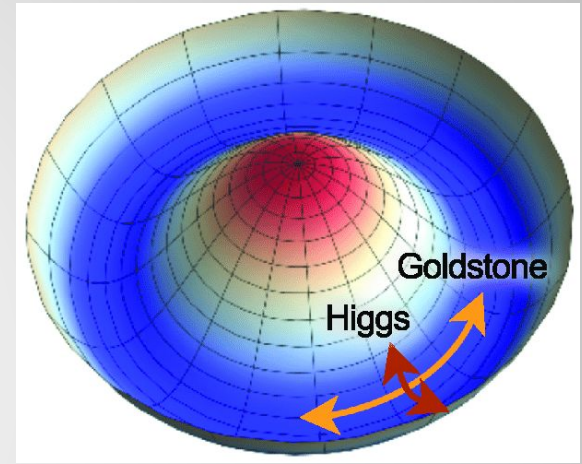
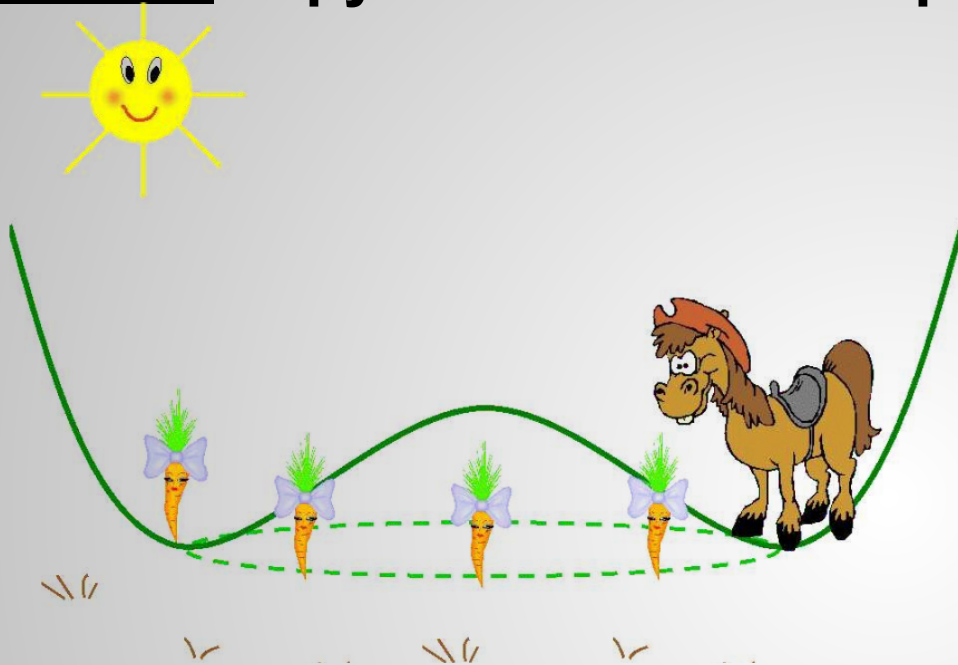


Система с две състояния с най-ниска енергия (вакумни състояния);  
Физическата система се стреми към състоянието с най-ниска енергия;  
Но може да избере само едно от тях;



**Симетрията е спонтанно нарушена!**

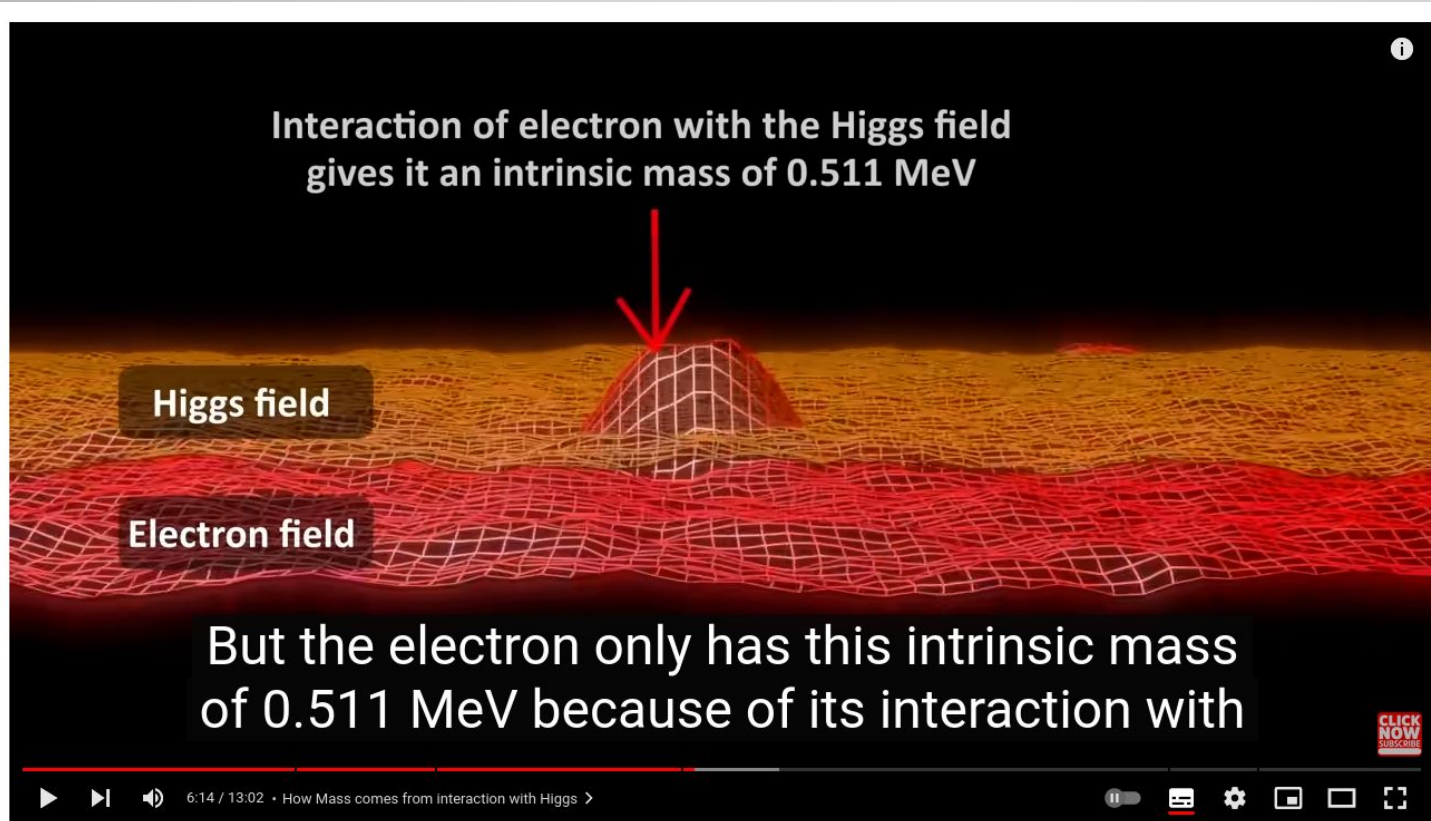
# Спонтанно нарушаване на симетрията - [видеоклип](#)



- Безрой състояния, между които може да се движим без загуба на енергия.
- Аксиалните колебания - безмасови частици (бозони на Намбу-Голдстон)
- Радиалните колебания - повишаване на енергията - масивна частица.

Полето на Хигс нарушава симетрията.

Полетата получават маси, когато взаимодействат с полета, които спонтанно нарушават симетрията.



The Crazy Mass-Giving Mechanism of the Higgs Field Simplified

 Arvin Ash ✓  
847 хил. абонати

Станете член **Абониране**

[гледай тук](#)

 24 хил.   Споделяне

Частичите получават точно определени маси, когато взаимодействат с полето на Хигс.

Масата на частиците е уникална.

Ако знаем масата на частицата - знаем коя е частицата с точност до електрически заряд





Коктейлно парти  
**Поле на Хигс – изпълва  
цялата Вселена**



VIP персоната преминава през залата –  
**Елементарната частица взаимодейства с  
полето на Хигс**



VIP персоната придобива маса поради  
струпването на журналисти и затрудняване на  
придвижването – **частиците придобиват маса**



VIP персоната не преминава през  
залата, а само прави важно  
съобщение – **LHC концентрира  
енергия в точката на сблъскване на  
протоните**



Журналистите бързат към изхода за да  
предадат важното съобщение – **Полето на  
Хигс генерира самовъзбуждане – Хигс  
бозон**

Полето на Хигс генерира собствени  
възбудени състояния при концентрация  
на енергия на LHC – наблюдава се Хигс  
– бозон (регистрират се разпадните  
продукти – 2 фотона или 4 лептона .....)

## Спин на Хигс бозона

Хигсовото поле нарушава спонтанно слабата симетрията. Така че не трябва да се променя при под действието на пространство-времеви трансформации. Такава частица би трябвало да има спин нула.

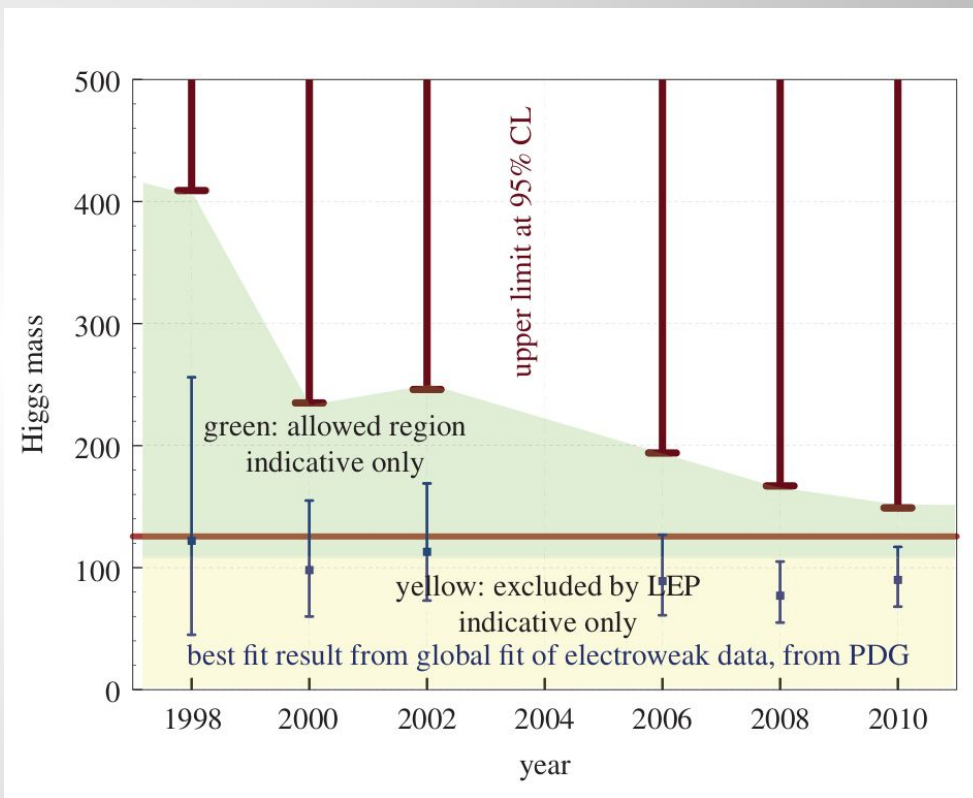
## Маса на Хигс бозона

За съжаление теорията, която предрича съществуването на Хигс бозона, не отговаря на въпроса колко е неговата маса. С течение на времето става все по-ясно, че Хигс бозонът трябва да има голяма маса, като най-вероятно не може да бъде открит на експериментите, построени преди LHC. ( $E = mc^2$ )

**Преди 2010**, времето, когато LHC започва да набира данни, експериментите на други ускорители успяват да поставят долна граница на неговата маса, а именно, че тя трябва да е по-голяма от  $115 \text{ GeV}/c^2$ .

Маса на Хигс бозона -  $125 \text{ GeV}$

## Спин и маса на Хигс бозона



Еволюция във времето на оценките за маса на Хигс бозона. [2]

# Раждане на Хигс бозон

a) Сливане на глюони (ggF) - основен механизъм на раждане на LHC и Tevatron

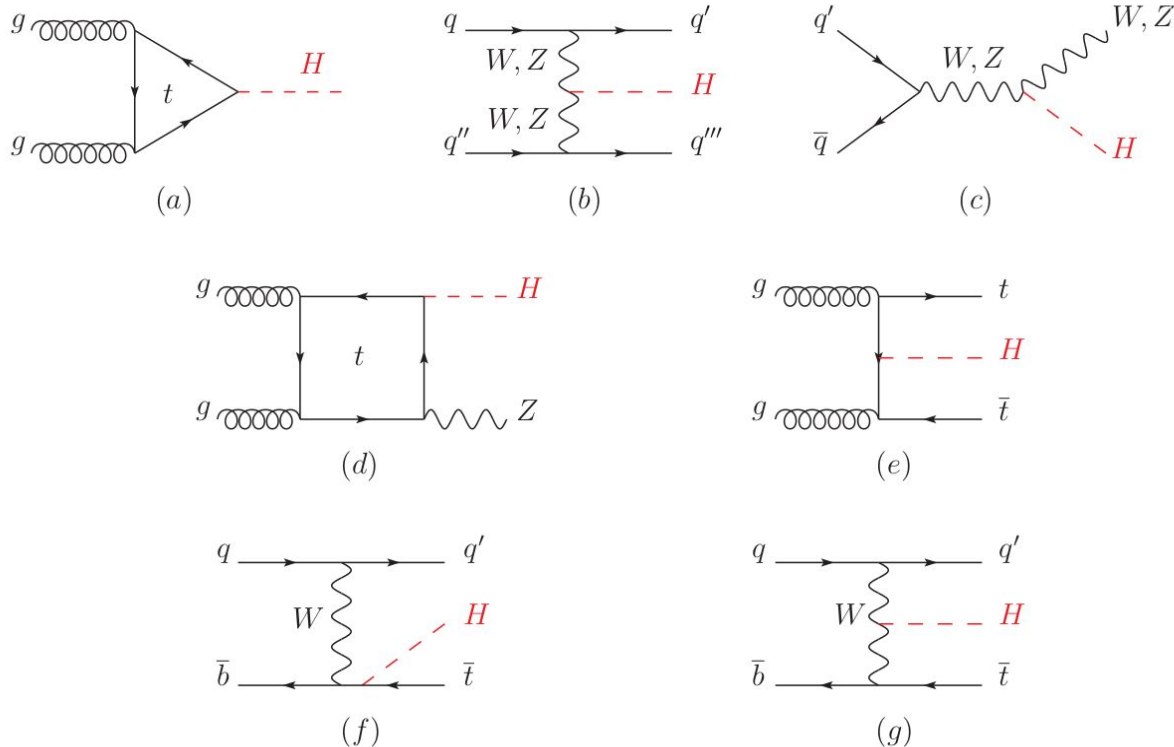
b) Сливане на векторни бозони (VBF)

c) Higgs-strahlung (излъчване на Хигс) - или асоциирано раждане с калибровъчен бозон при кварк-кварк взаимодействие

d) Асоциирано раждане с калибровъчен бозон при глюон-глюонно взаимодействие

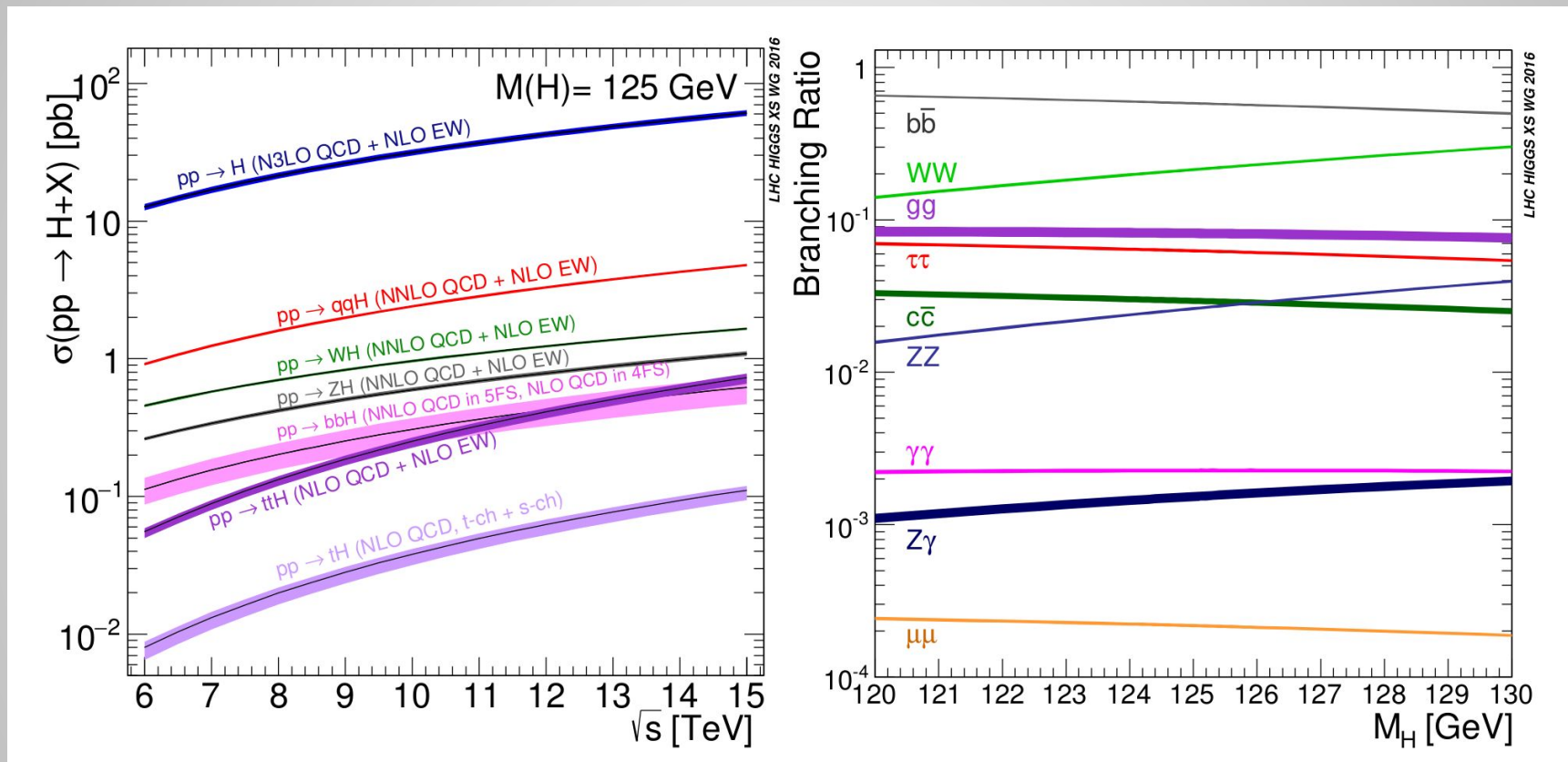
e) Асоциирано раждане с двойка топ кварки (аналогична диаграма с раждане на двойка красиви (bb) кварки)

f-g) Асоциирано раждане с единичен топ кварк.

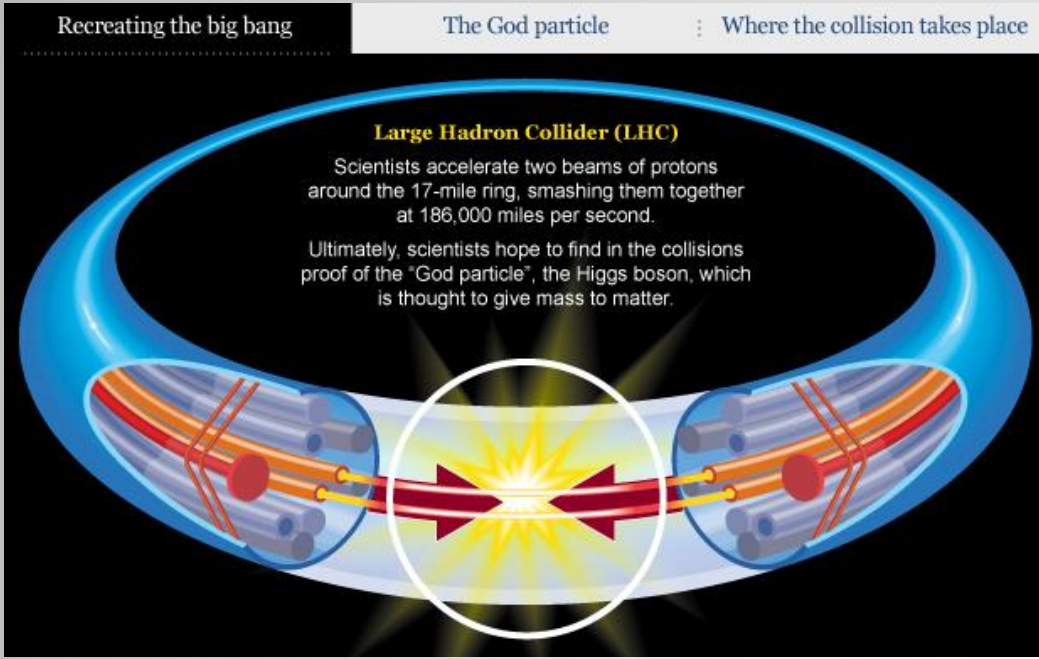


Основни механизми за раждане на Хигс бозон [3].

# Механизми на раждане и разпадане на Хигс бозона



(Ляво) Сечения за раждане на Хигс бозон от стандартния модел като функция на енергията в система център на масите за протон-протонни сблъсъци. (Дясно) Парциални вероятности за основните канали на разпадане на Хигс бозон с маса, близка до 125 GeV [3].



- Ускорител на заредени частици - в нашия случай протони
- енергия на взаимодействието:
  - $E = E(\text{сноп 1}) + E(\text{сноп 2})$
- Най-висока енергия през 2022 и 2023
  - $E = 13.8 \text{ TeV}$
- Проектна енергия на ЛНС:  $E = 14 \text{ TeV}$
- Светимост:

- Моментна светимост

$$L \sim \frac{f N_1 N_2}{4 \pi \sigma_x \sigma_y}$$

$f=40 \text{ MHz}$ ,  $N_1, N_2$  - брой протони в бънч,  $\sigma$  - напречно сечение на снопа.

- Моментна светимост към момента

$$L \sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

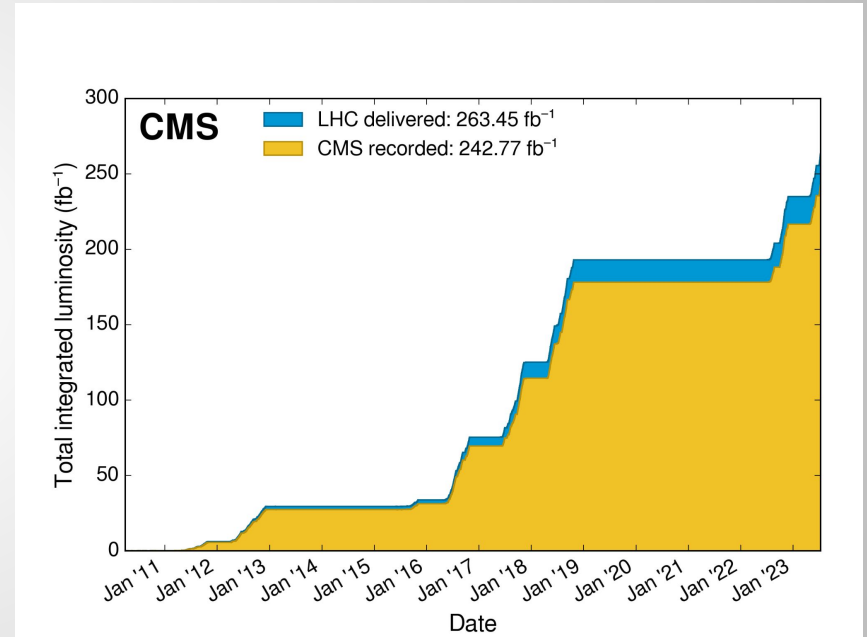
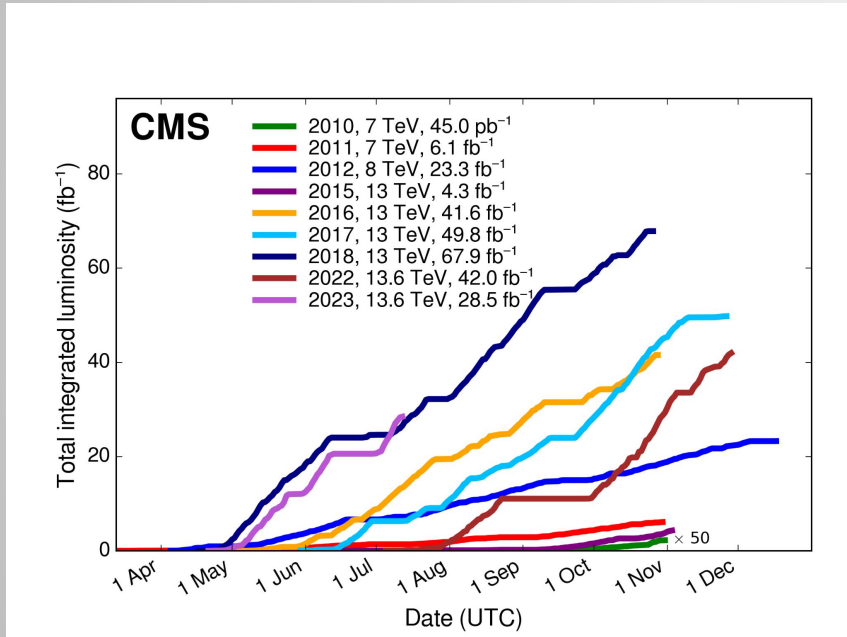
- Интегрална светимост

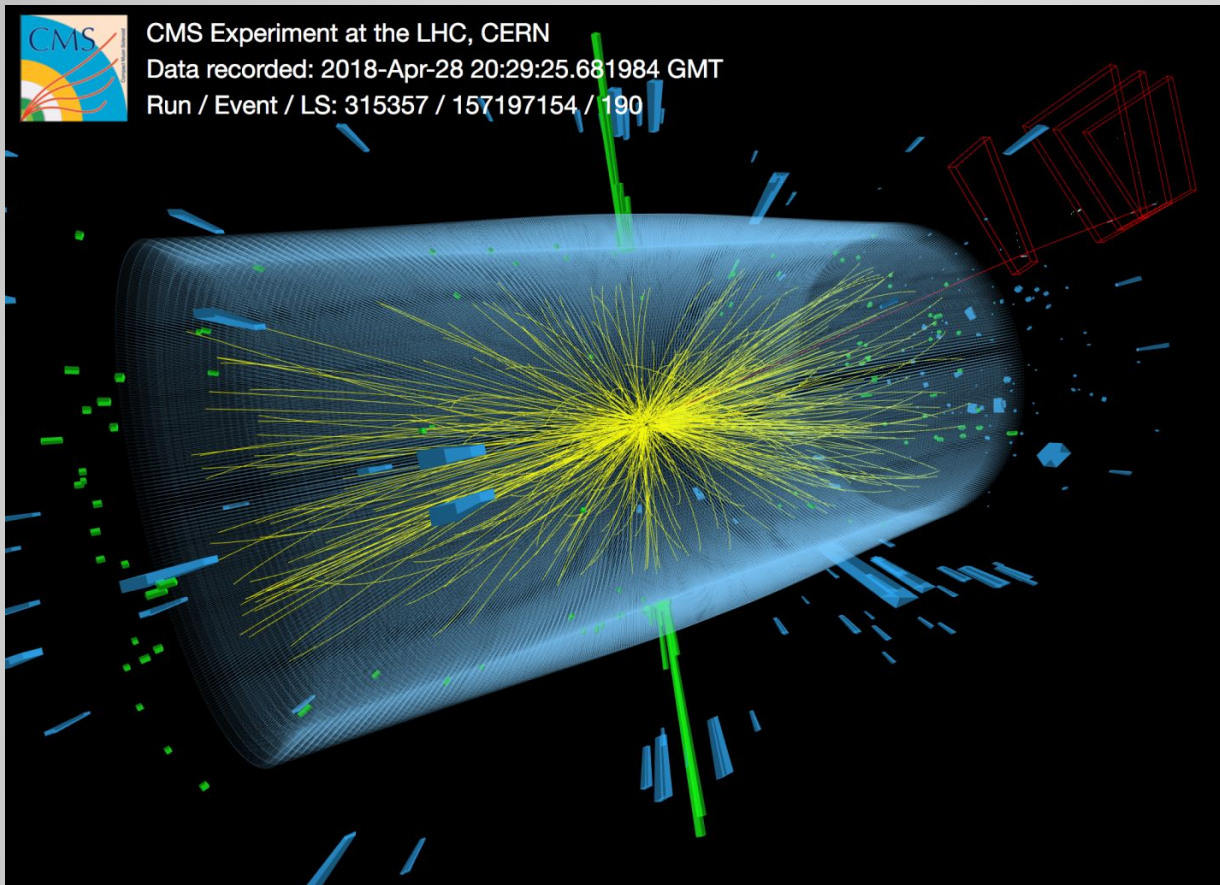
$$\mathcal{L} = \int L dt$$

- мерни единици:  $1/\text{fb}$ ,  $1/\text{pb}$ , ...

- Барн
  - $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- Сечение (вероятност) за процес:
  - измерваме в  $\text{cm}^2$ , в барни или в производните  $\text{pb} = 10^{-36}$ ,  $\text{fb} = 10^{-39}$  ...

# Интегрална светимост записана от експеримента CMS





*The image depicts collisions recorded by the CMS detector on 28 April 2018 from 1200 proton bunches in each circulating beam. The yellow lines represents reconstructed particle trajectories in the tracker. The green and blue rectangles represent energy deposits in the electromagnetic and hadronic calorimeters, respectively. The long red lines represent reconstructed muon trajectories.*

# Визуализация на събития - събития, кандидати за Хигс - Практическа задача

<http://opendata.cern.ch/record/300>

Да се открият трековете на частици, показващи вероятен разпад на H или Z бозон.

Да се пресметне инвариантната маса на кандидата за Z бозон

Могат да се използват данните от csv файла и да се работи с калкулатор или ексел

Могат да се използват и данните, включени в графичния интерфейс.

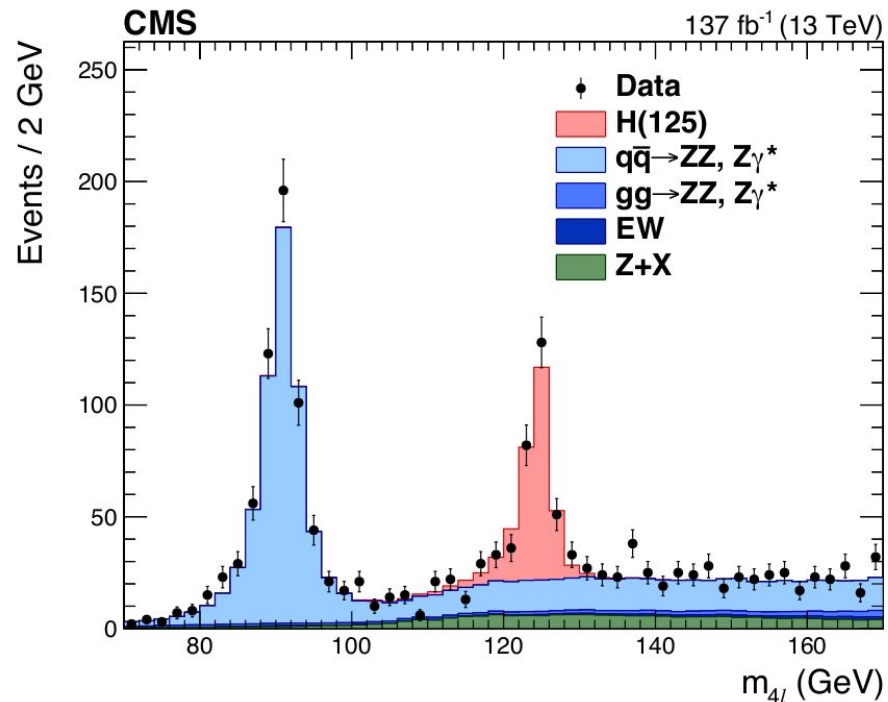
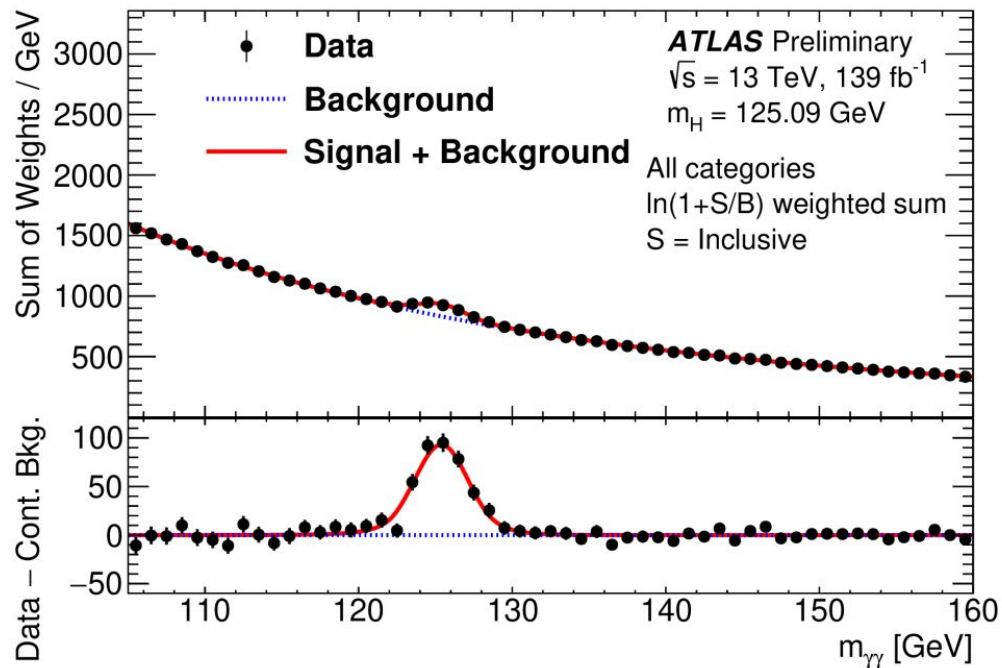
В този случай да се работи с напречните импулси и енергия (ако остане време)

Достатъчно ли е едно добро събитие?

Видео на линка по-долу:

<https://particleadventure.org/images/4l-FloatingScale-NoMuProf2.gif>

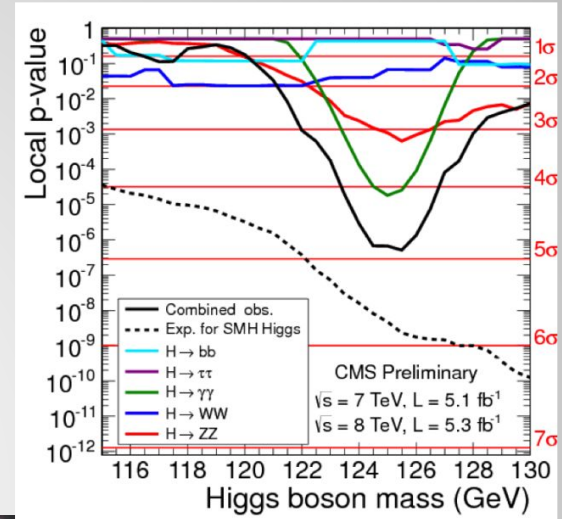
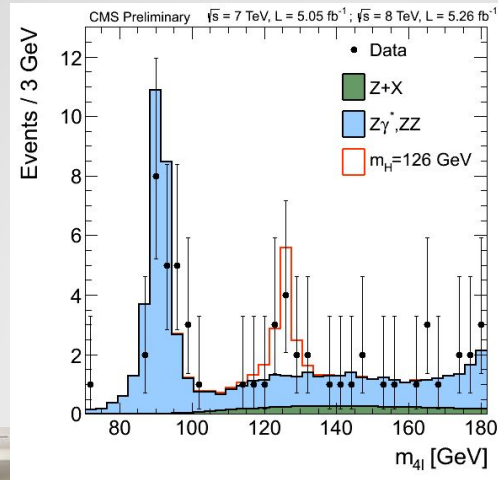
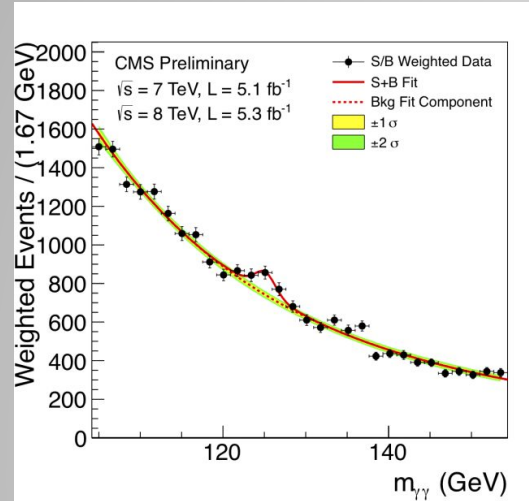




(Ляво) Разпределение по инвариантни маси от кандидати за Хигс от двуфотонни събития, наблюдавани от експеримента ATLAS на Run2. (Дясно) Разпределение по инвариантна маса на 4 лептона с данни от експеримента CMS на Run2 [3].

# Higgs Boson Discovery – 2012

## CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

**Благодаря за вниманието!**

**Въпроси?**

## 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