



**Vilniaus  
universitetas**

---

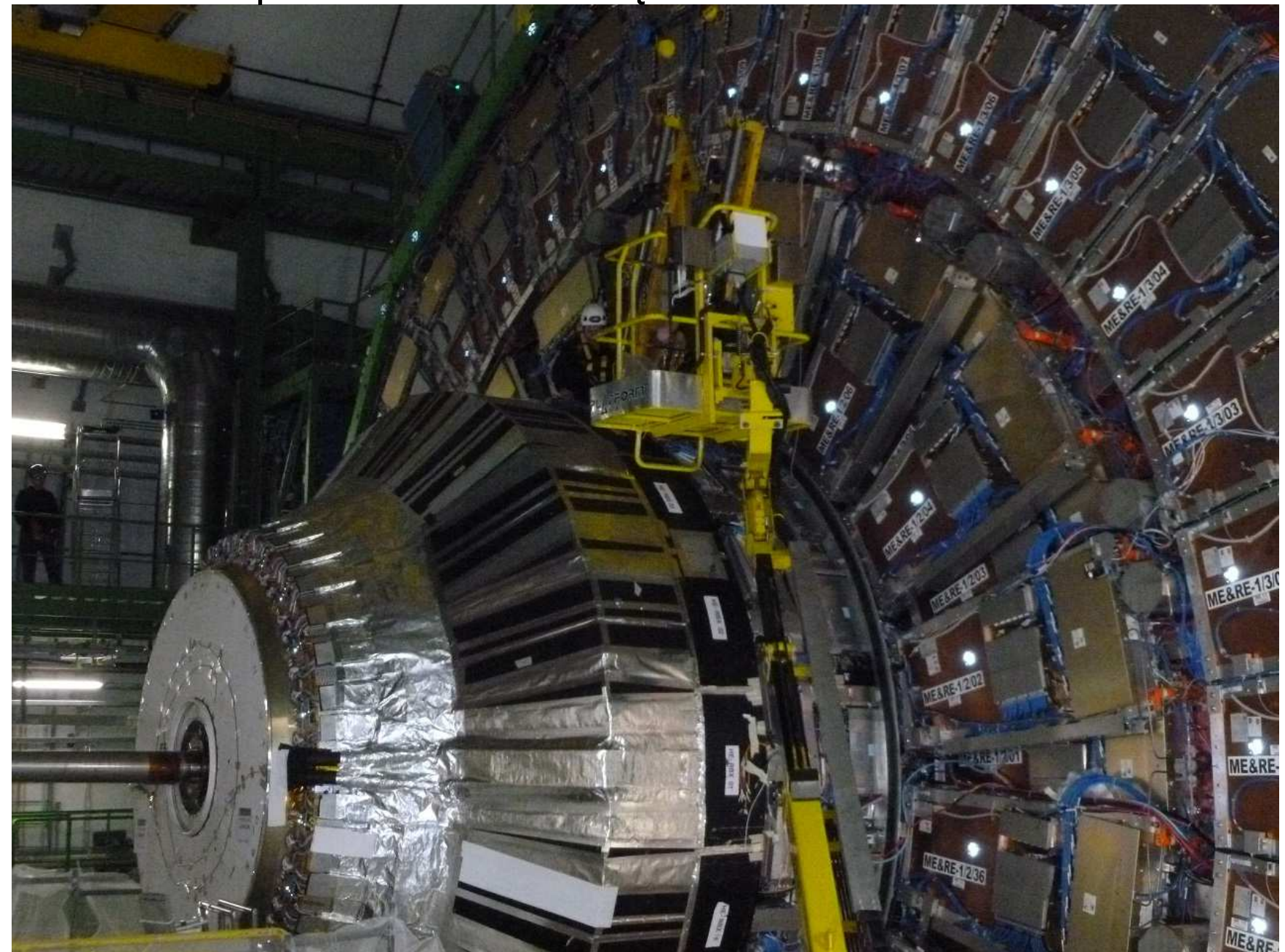
# **Detektoriai – daleles registruojantys prietaisai**

**A.Juodagalvis**

Teorinės fizikos ir astronomijos institutas



CERN "Kompaktiskasis" miuonų solenoido detektorius



# TURINYS

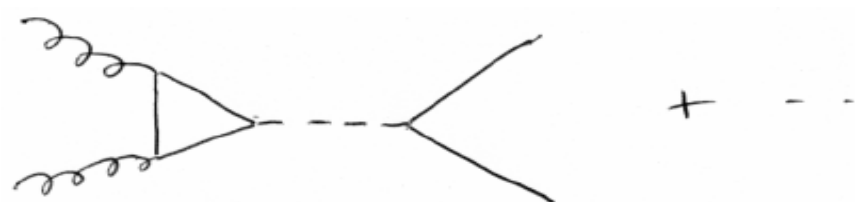
1. Kas yra dalelių detektorius
2. Detektorių pavyzdžiai ir jais atlikti matavimai
3. Protonų susidūrimo detektorius –  
CERN Kompaktiškasis miuonų solenoidas (CMS)



# Teorija ↔ Statistika ↔ Eksperimentas

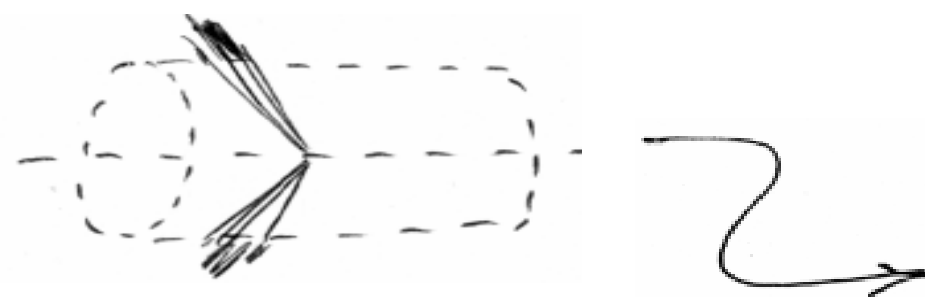
Teorija (modelis, hipotezė):

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \dots$$

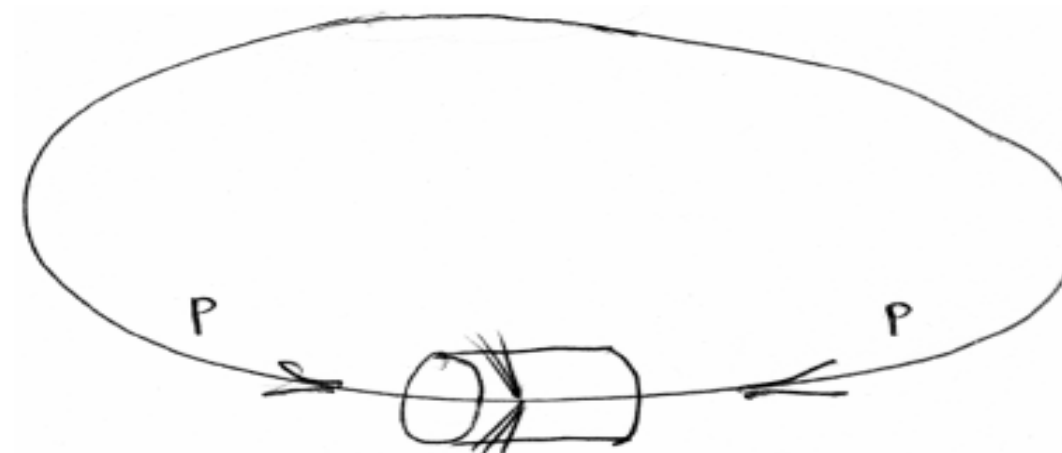


$$\sigma = \frac{G_F^2 \alpha_S^2 m_H^2}{288 \sqrt{2} \pi} \times \dots$$

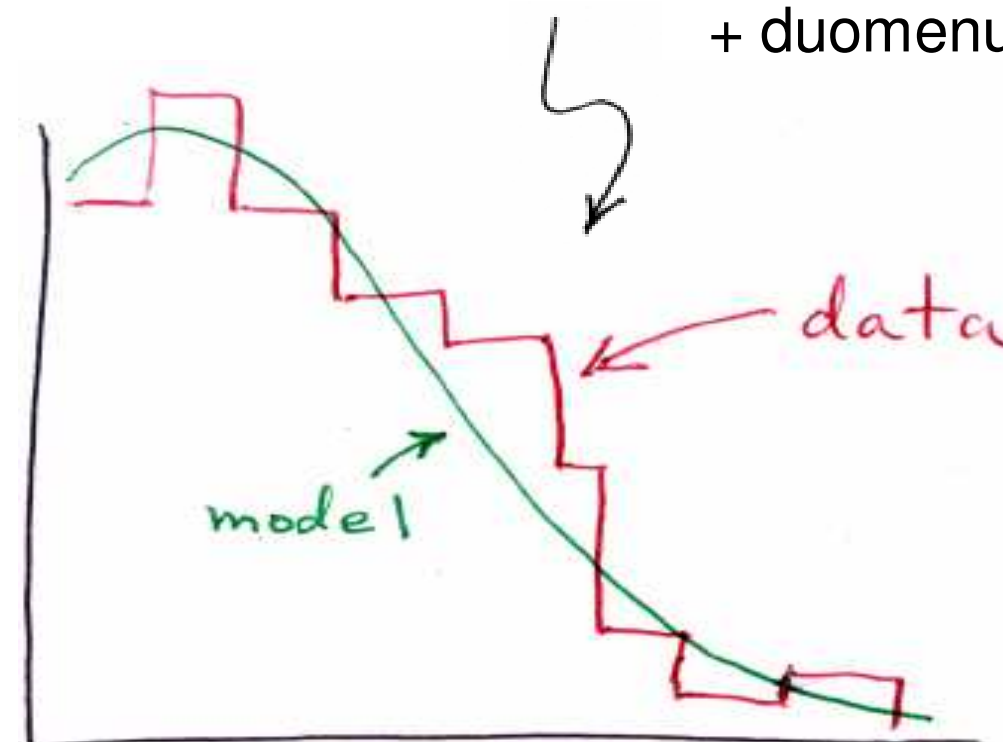
+ detektoriaus ir registravimo modeliavimas



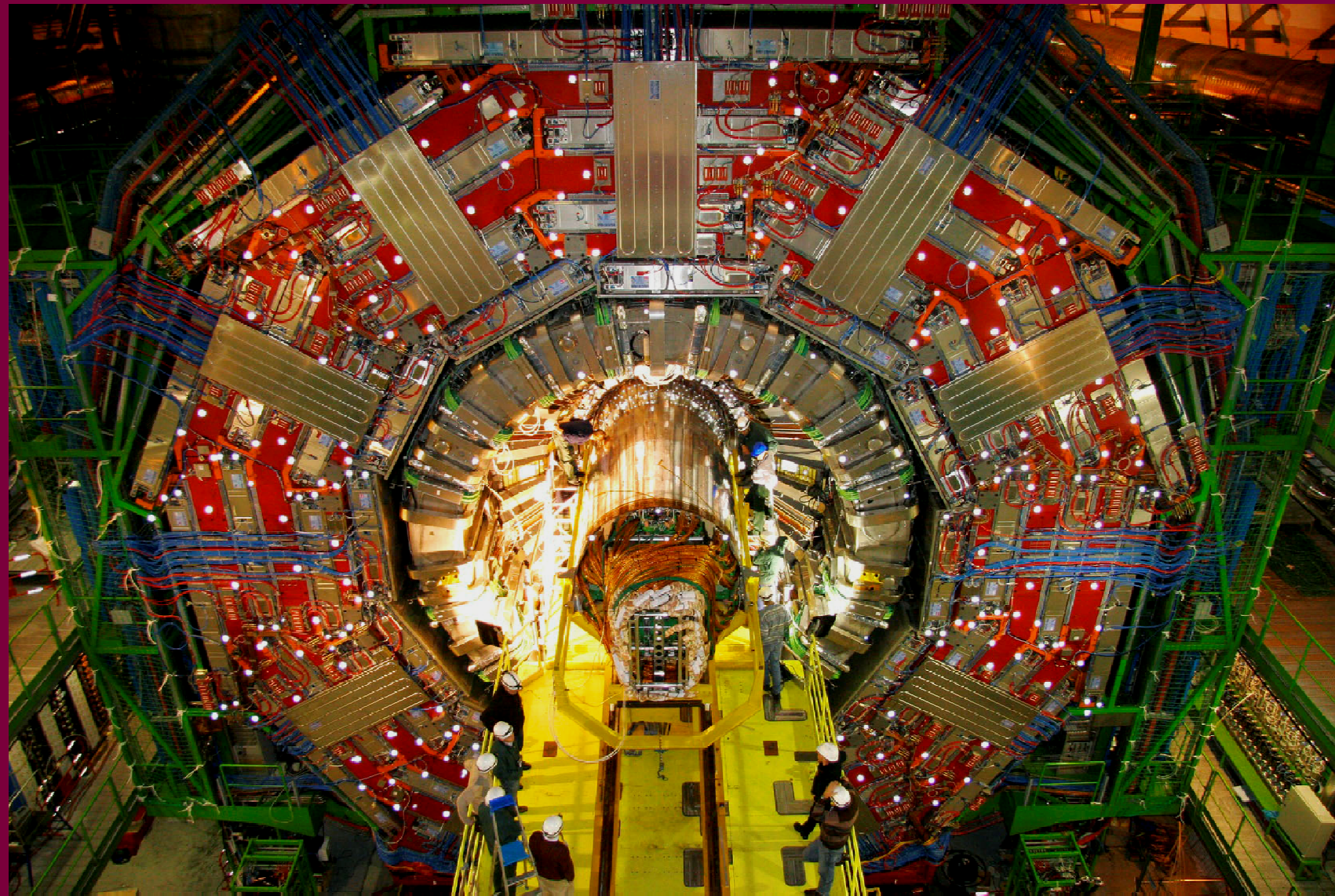
Eksperimentas:



+ duomenų rinkimas



# Detektorius leidžia aptikti pralekiančias daleles



Keli pagrindiniai elementai

1. Pasirenkame terpę arba objektą, kurio būsenos kitimą stebėsime
2. Įsitikiname, kad terpė yra jautri mūsų dominančiam procesui arba reiškiniui
3. Sukuriame duomenų registravimo strategiją

# Keli pavyzdžiai



—

Pripūstas oro balionas – aštrių daiktų aptikimo prietaisas

Jeigu sprogsta, jį palietė aštrus daiktas!

—

Kieme gulintis akmuo – lietaus detektorius

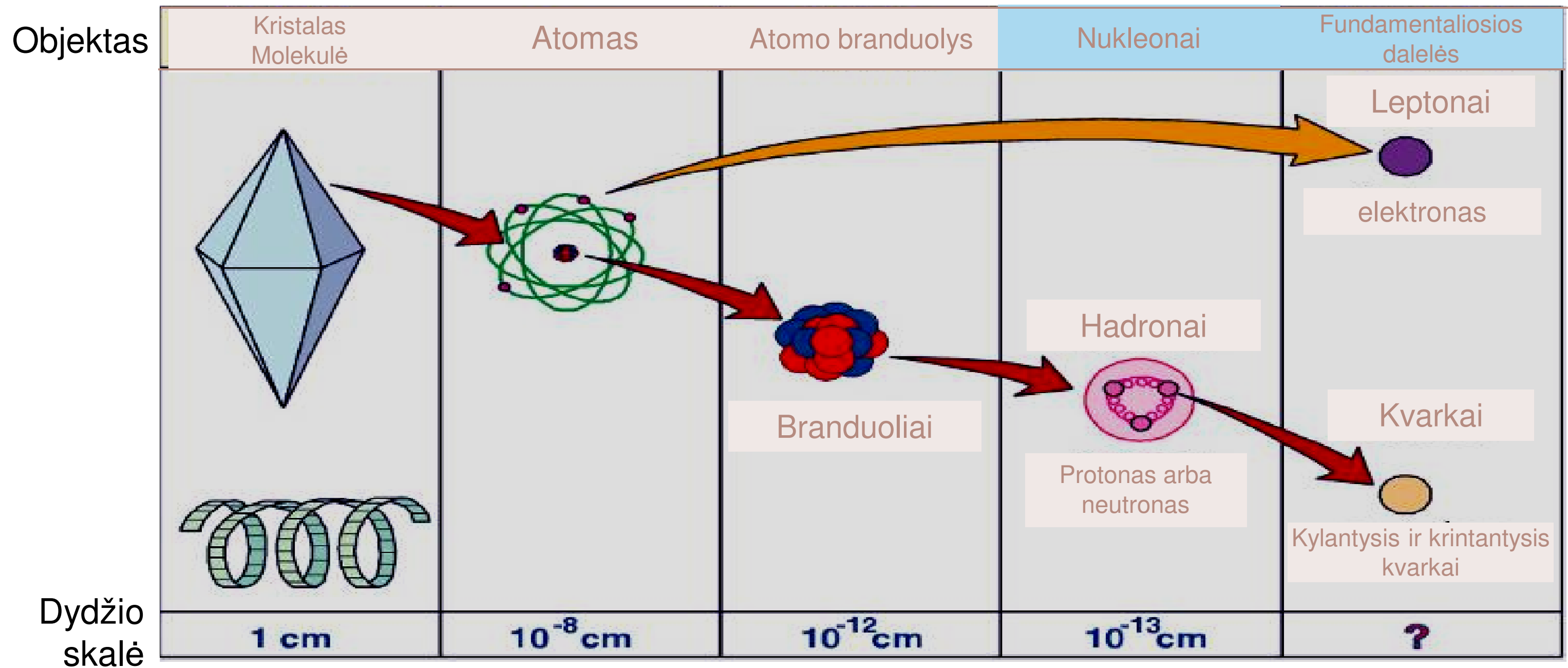
Jeigu šlapias – lyja!

—

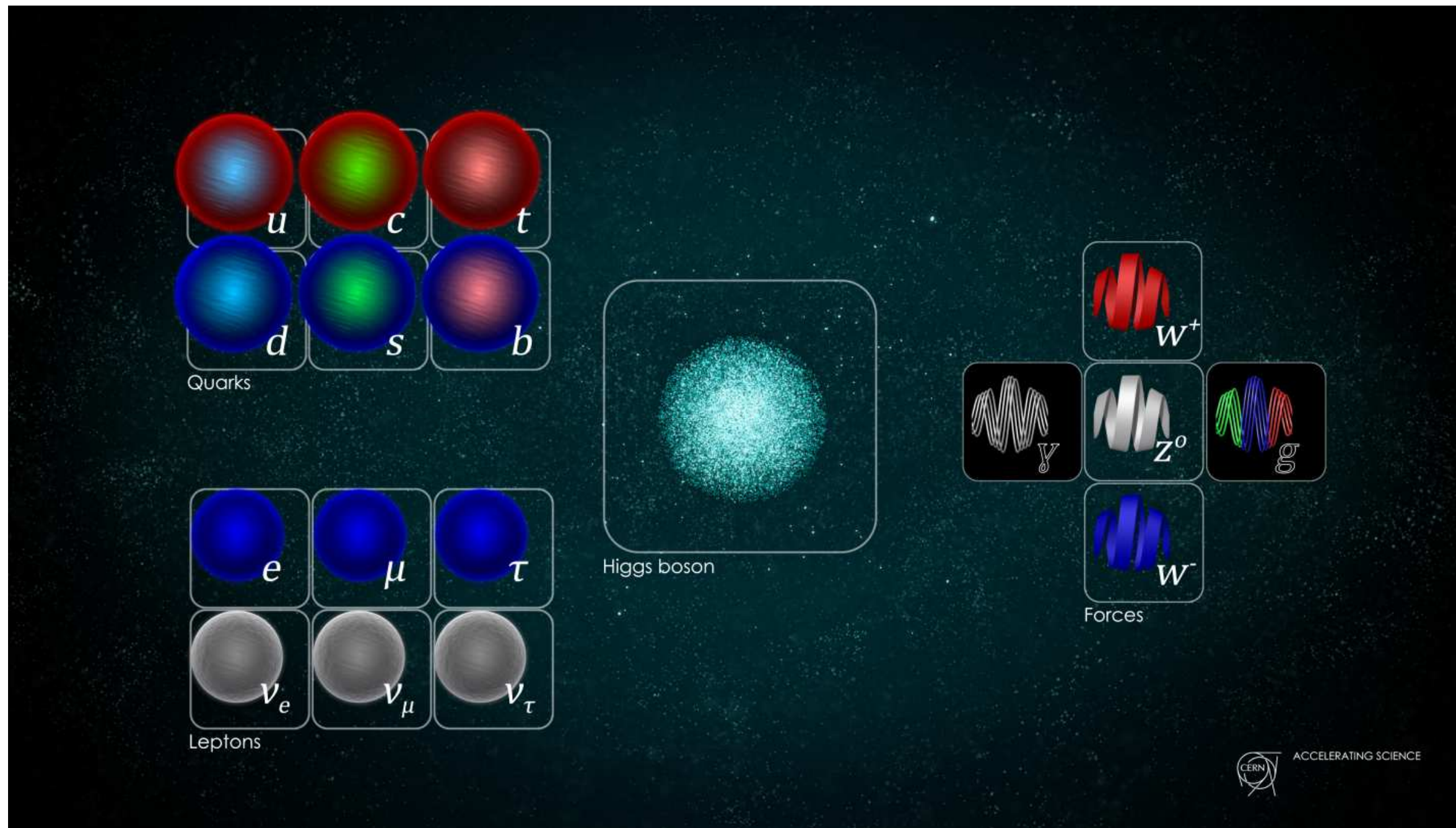
Vandens baseinas kieme – meteoritų detektorius

Bangelės išduoda įkritusį akmenį!

# Medžiagos sandara



# Fundamentaliųjų dalelių standartinis modelis





# Kosminių spindulių tyrinėjimo istorija prasidėjo nuo elektroskopo

Vienas pirmųjų elektroskopų (elektrinio krūvio matavimo prietaisų) pavaizduotas piešinyje

Viename adatos gale buvo metalinis rutuliukas (žalias), kuris įprastomis sąlygomis galėjo liesti kitą metalinį rutuliuką (raudoną)

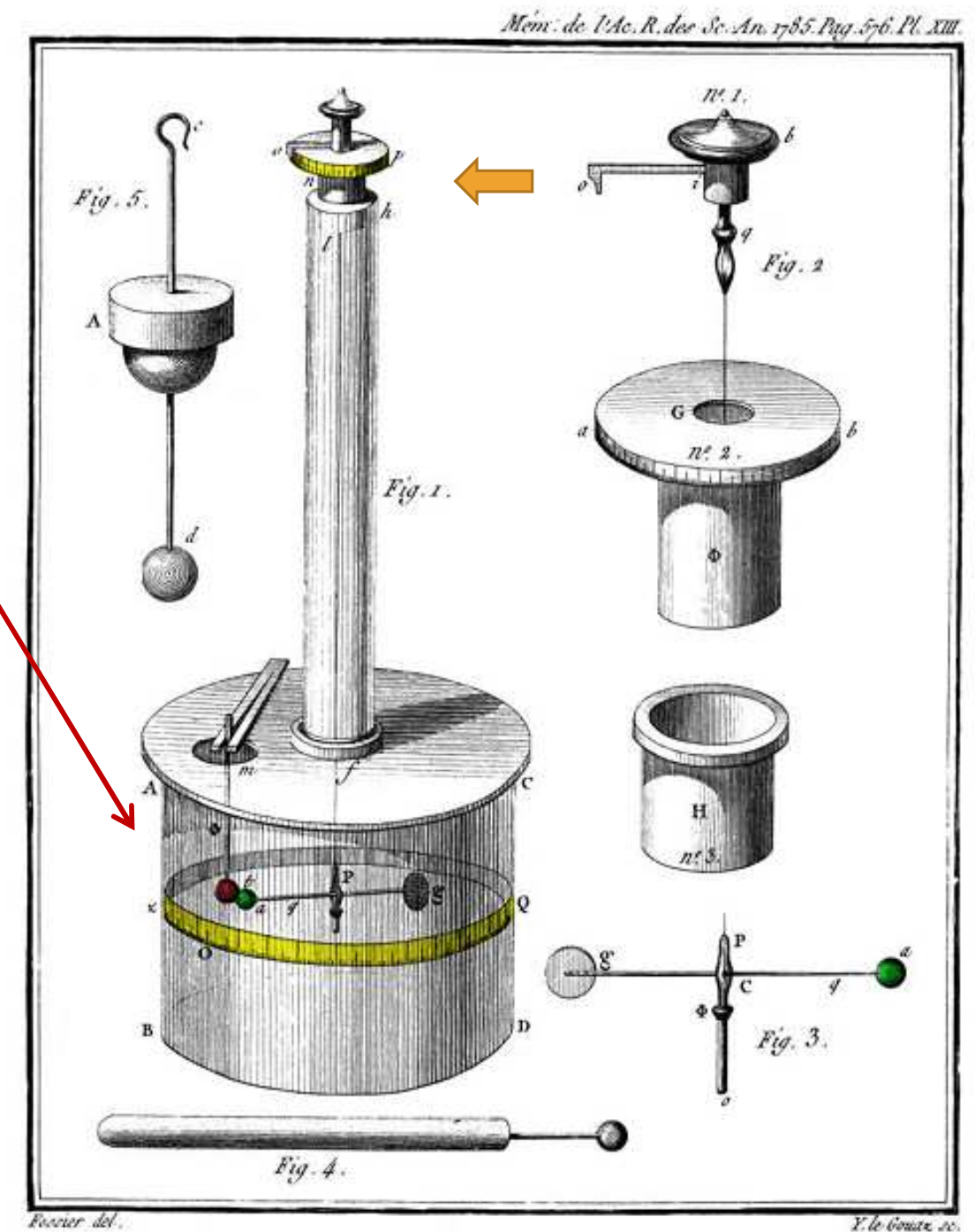
Raudonam rutuliukui įgijus elektrinį krūvį, dalis jo pareidavo į žalią rutuliuką, ir jis atšokdavo pasukdamas vielutę

Sužymėtos padalos (geltona) leisdavo kiekybiškai įvertinti posūkio kampą.

1785 metais Kulonas (Coulomb) išvedė krūvių sąveikos jėgos formulę

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Instrumentas išsikraudavo savaime...



# Iš kosmoso ateinanti radiacija

Vilniaus  
universitetas

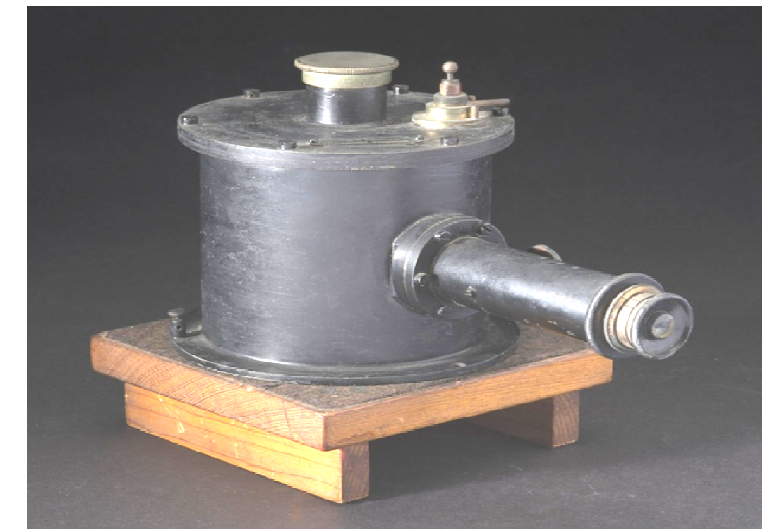
Atradus radiaciją, elektroskopas buvo naudojamas įvertinant jos intensyvumą

1911 m. Domenico Pacini atrado, kad radiacija po vandeniu yra silpnesnė nei vandens paviršiuje

1912 m. Victor Hess išmatavo radiacijos lygį skrisdamas oro balionu

Kylant aukštin, radiacijos lygis didėjo

1936 m. gavo Nobelio fizikos premiją



[https://airandspace.si.edu/collection-objects/detector-electroscope-victor-hess/nasm\\_A19910023000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/detector-electroscope-victor-hess/nasm_A19910023000)

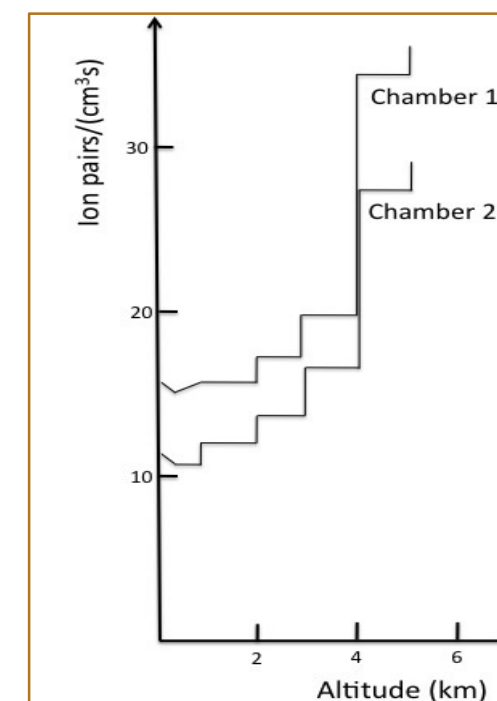
Wulf'o konstrukcijos elektroskopas



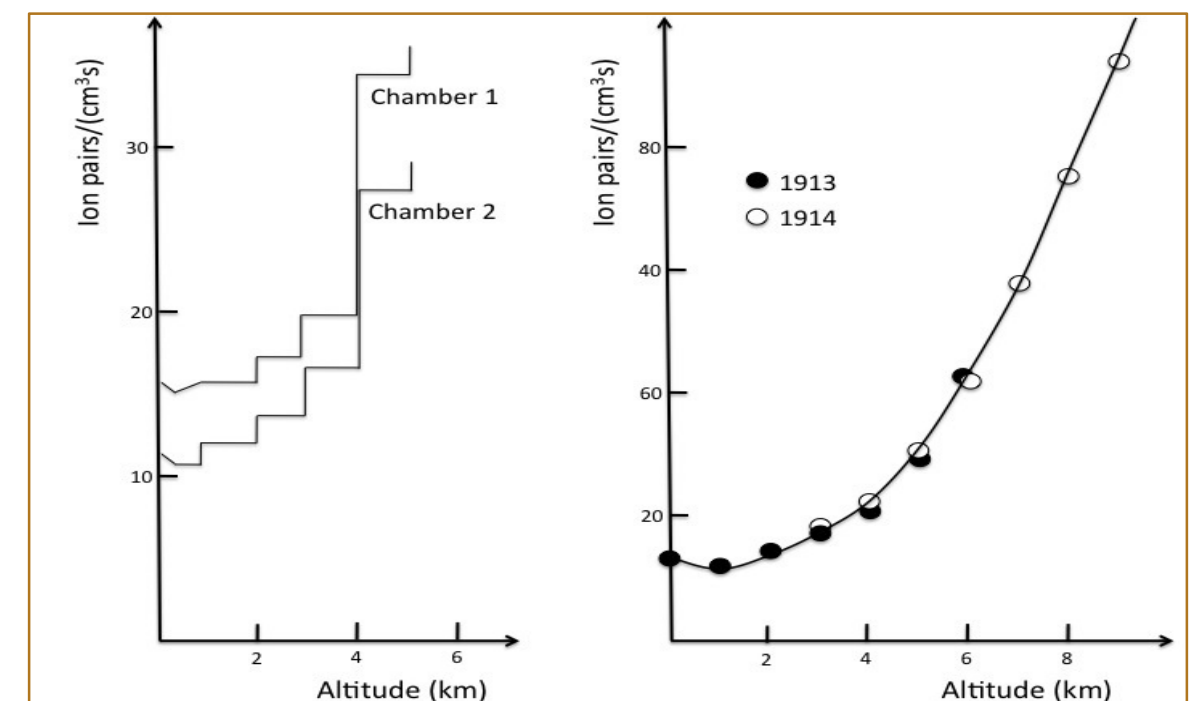
VF Hess draugija,

<https://phys.org/news/2012-07-century-discoveries-physicists-celebrate.html>

V.Hess



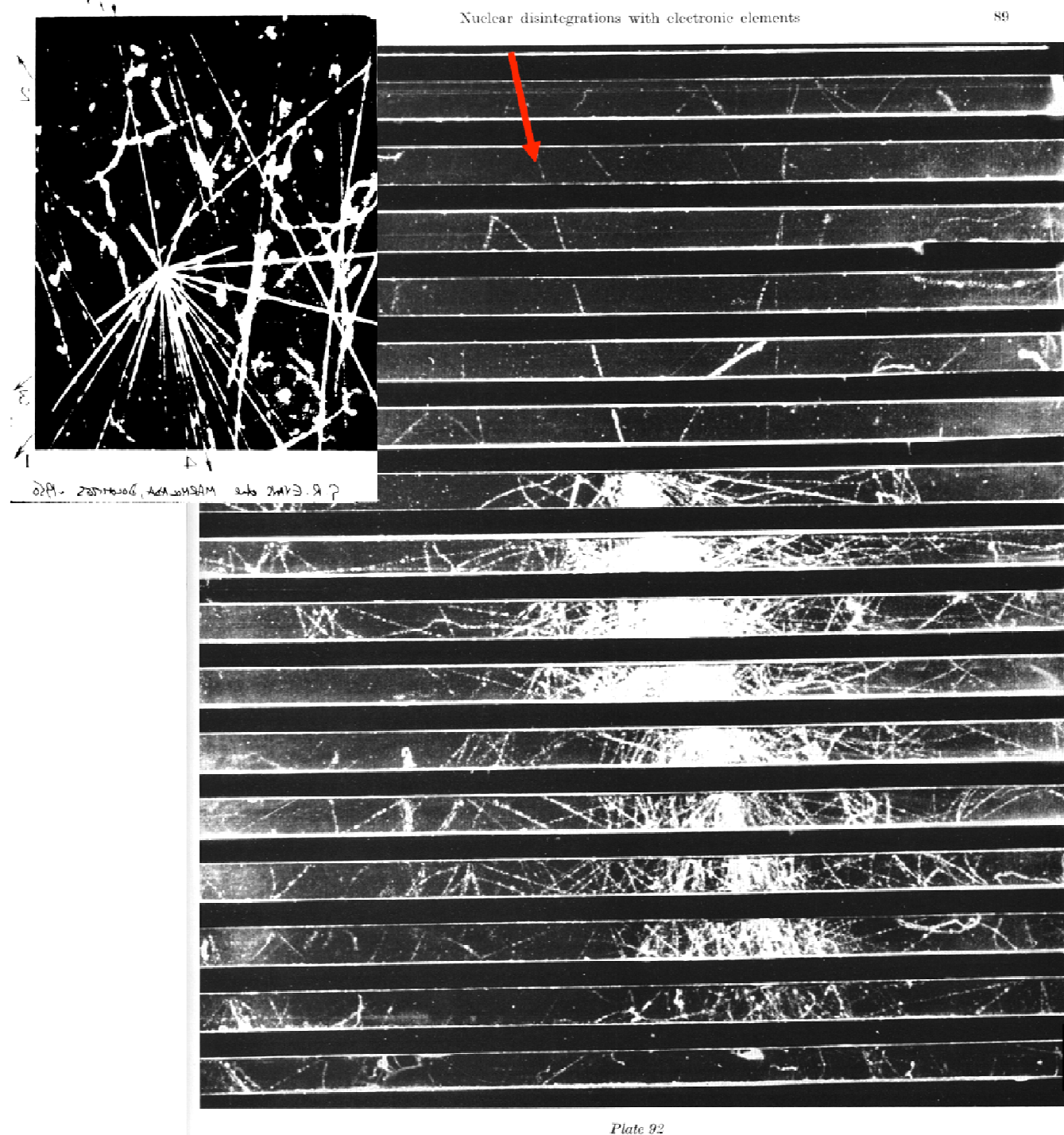
W.Kolhörster



A. de Angelis, CC BY-SA 3.0,

<https://en.wikipedia.org/wiki/File:HessKol.jpg>

# Protono suirimas



1.3 cm Pb

10 GeV proton

Didelės energijos protonas švino plokštėse sukuria antrinių dalelių dušą, stebimą Wilson'o kameroje

Fretter: Echo Lake, 1949

42

From A.Watson, <https://www.astroteilchenschule.nat.fau.de/schule2015/>

# Antrinių dalelių kaskados

Kai kosminis spindulys trenkiasi į oro molekules branduolį, susidaro daugybė antrinių dalelių.

Medžiagos dalelės juda pradine kryptimi, o šviesos dalelės skrieja į visas puses

1936 m. tyrinėjant kosminius spindulius buvo atrastas miuonas

Kosminių spindulių intensyvumas

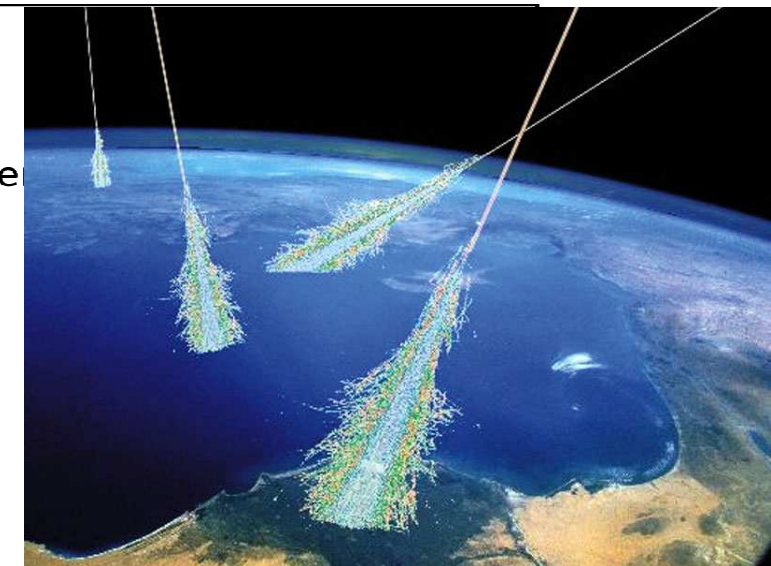
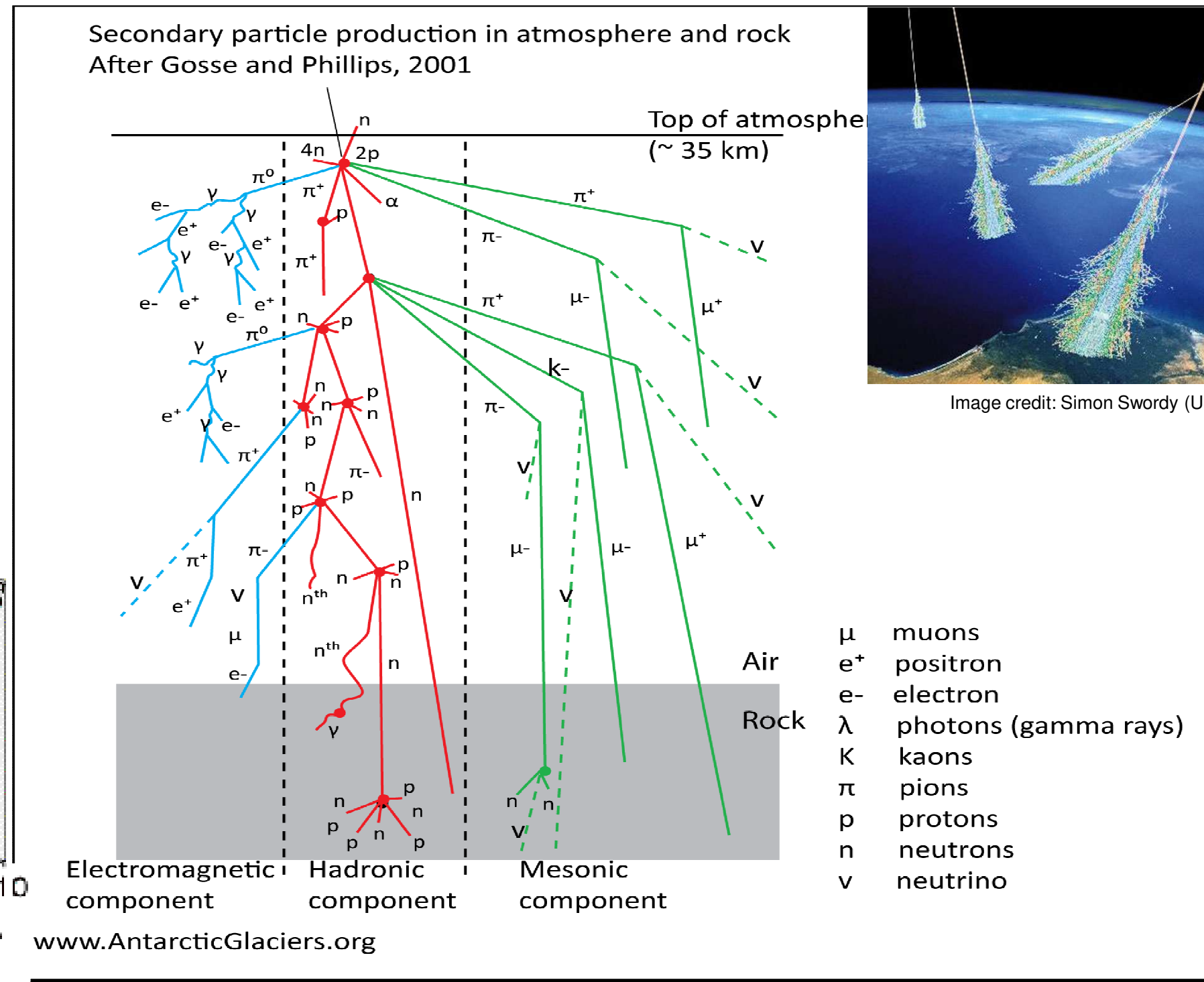
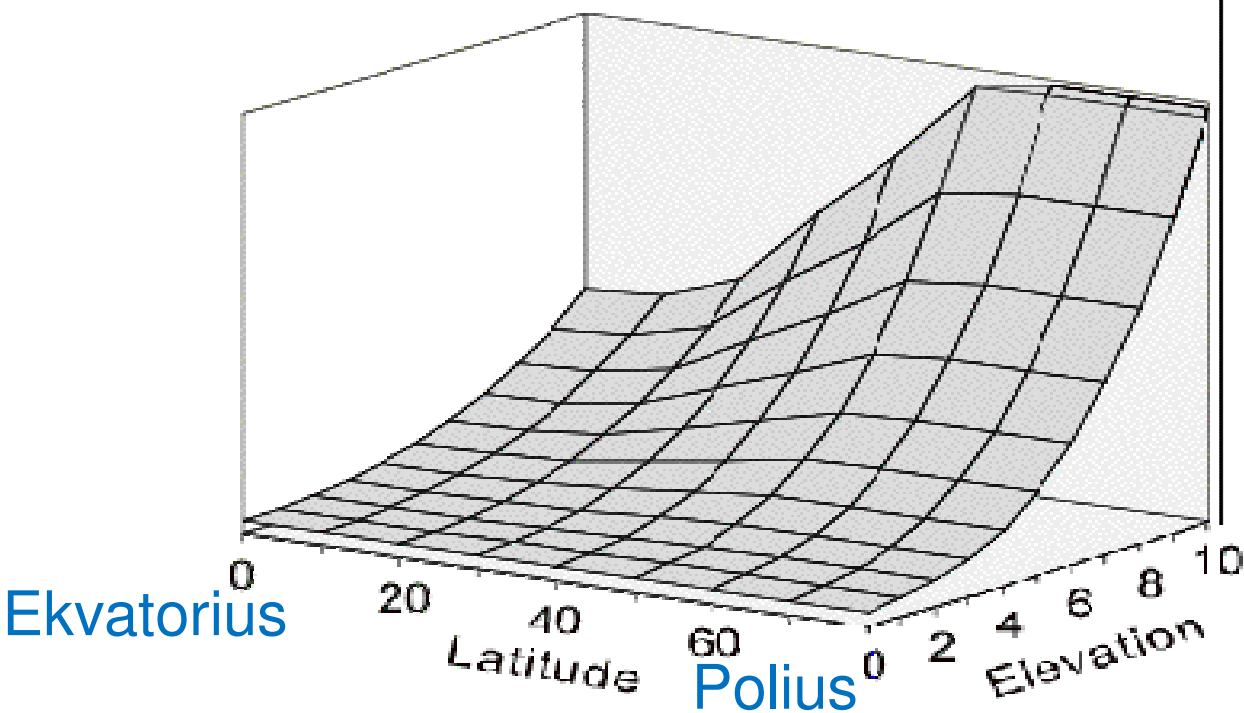
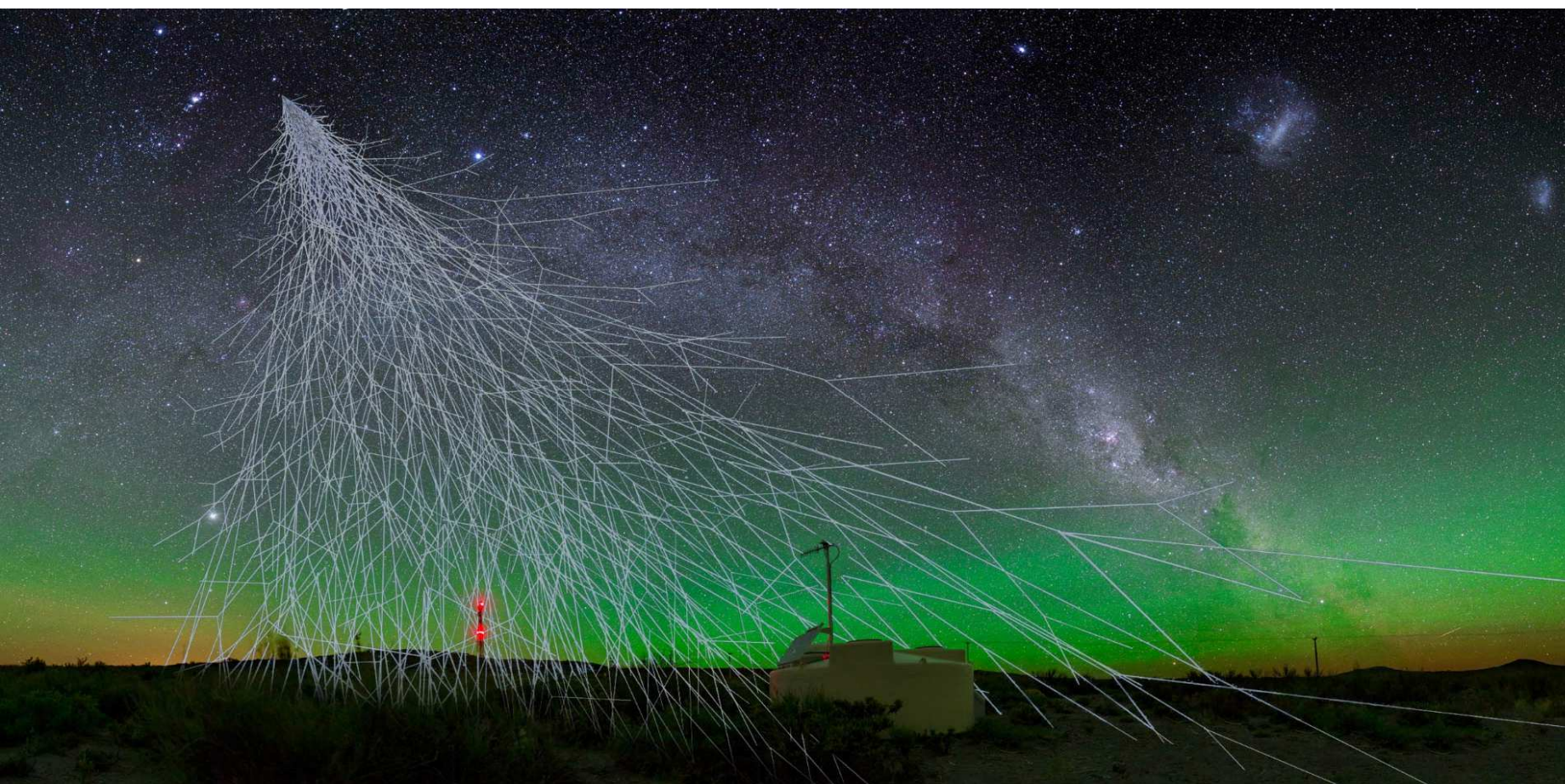


Image credit: Simon Swordy (U. Chicago), NASA

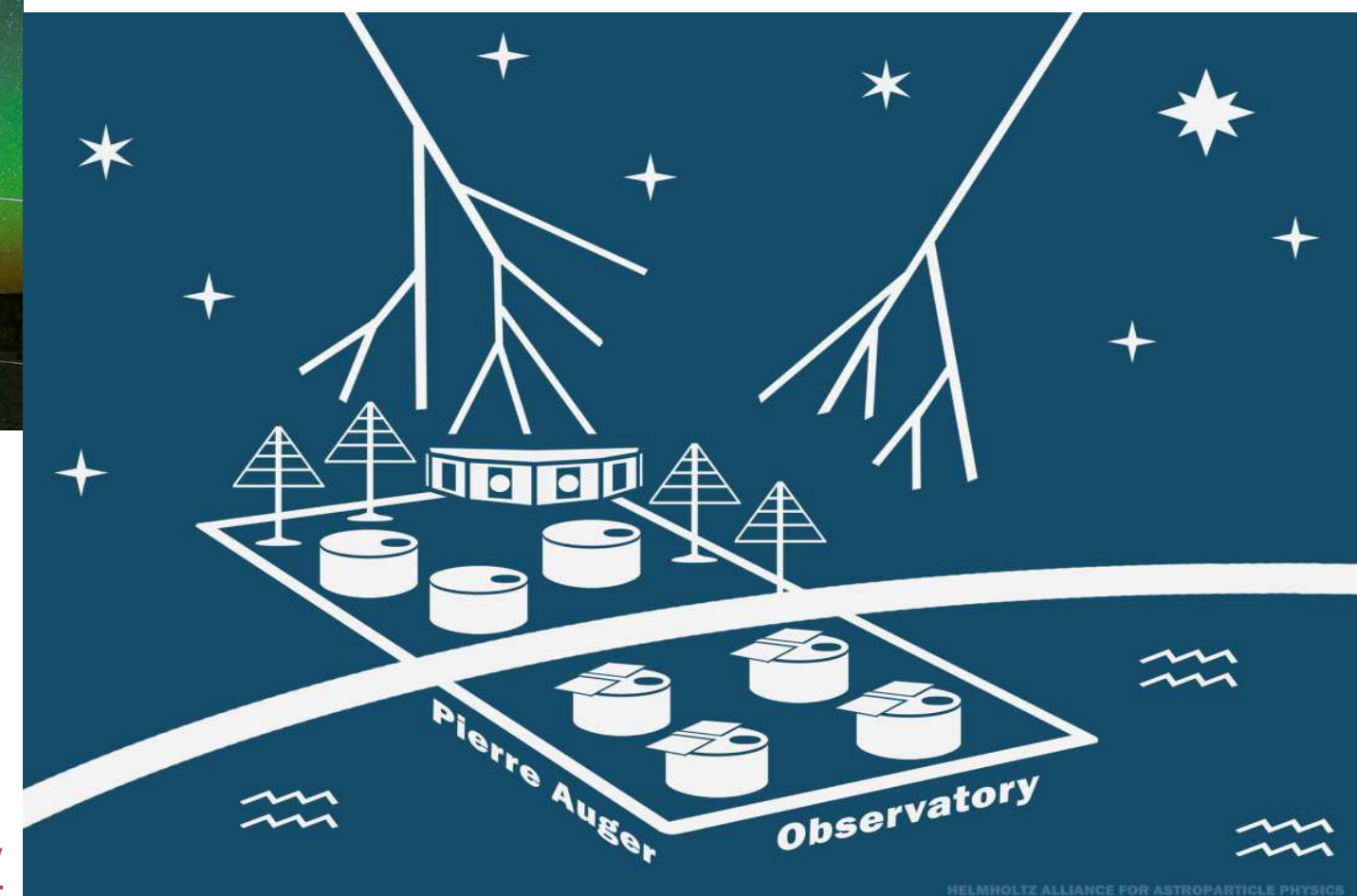


- Greitaveikės foto-kameros stebi oro švytėjimą ultravioletinių spindulių spektre
- Vandens talpos gaudo antrines daleles žemės paviršiuje
- „Detektorius“ – apie 3000 km<sup>2</sup> ploto

<https://www.auger.org/>

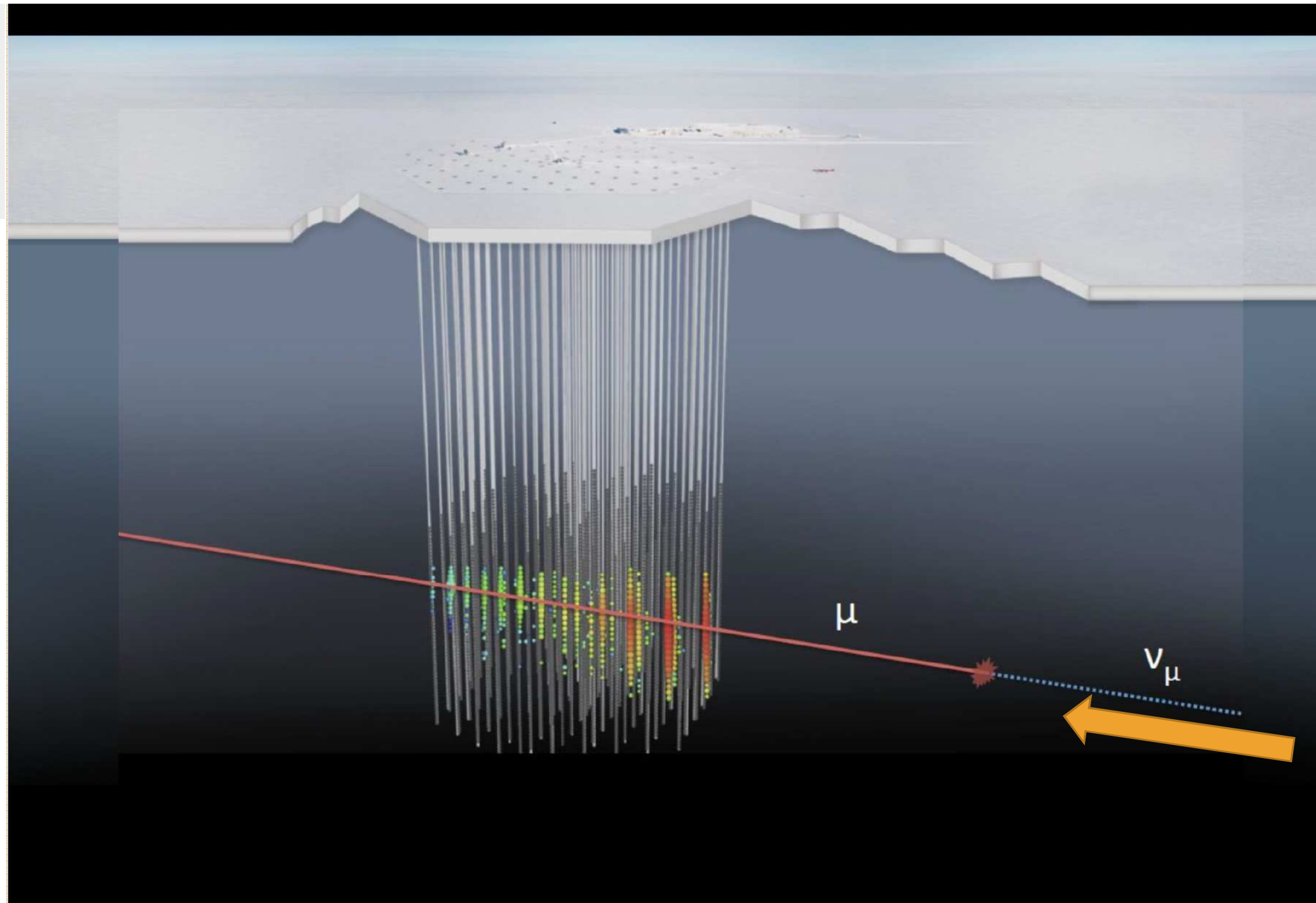
Iš kosmoso atskrieja dalelės:

- energija apie 10<sup>6</sup> TeV
- srautas: 1 dalelė/1 km<sup>2</sup>/100 metų

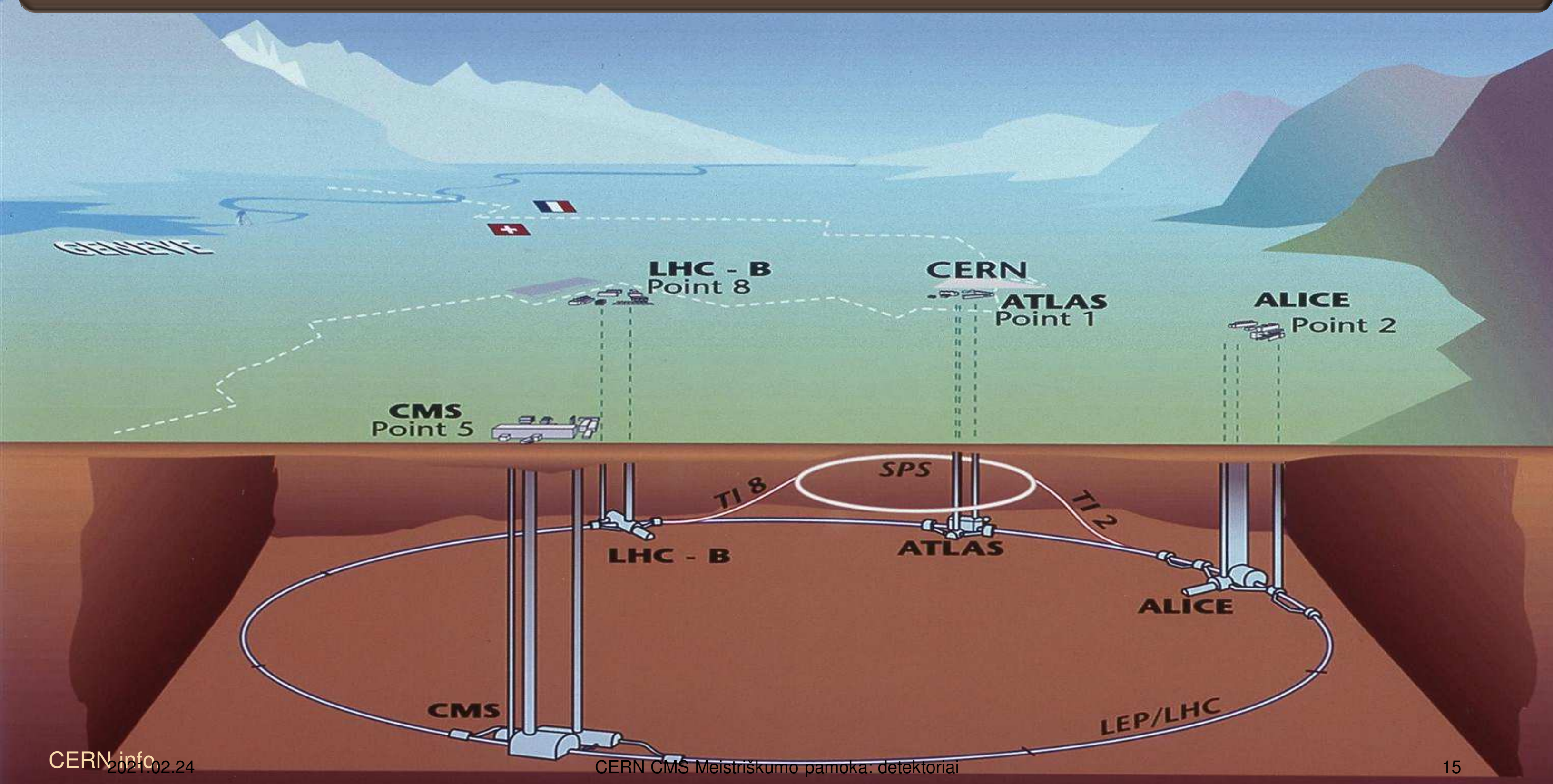




IceCube: aktyvi terpė – 1 kubinis kilometras natūralaus ledo 1.45 km gylyje



# CERN didieji eksperimentai



# ATLAS detektoriaus vidus

Detektoriaus matmenys:

- \* ilgis – 46m
- \* skersmuo – 25m
- \* sveria 7000 tonų
- \* laidų – apie 3000km

Dokumentinis filmas  
“Dalelių karštinė”  
pasakoja apie ATLAS  
eksperimentą





# CMS detektorius

Vilniaus  
universitetas

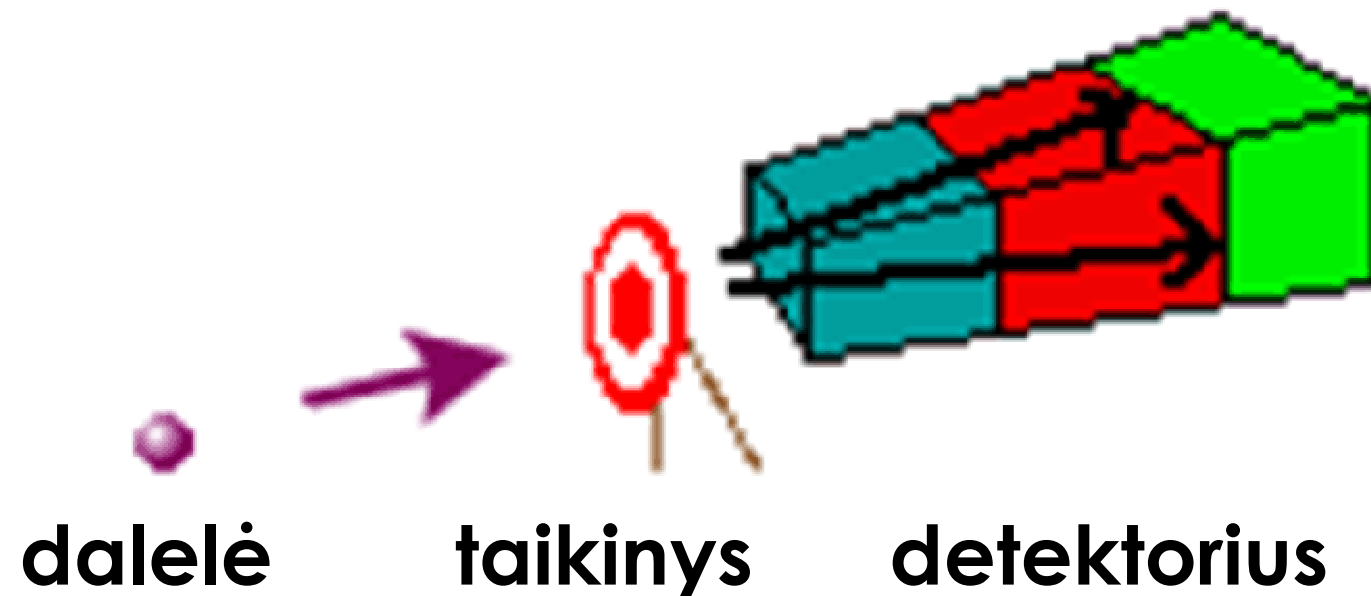
Detektoriaus matmenys:

- \* ilgis – 21.6m
- \* skersmuo – 15m
- \* sveria 14000 tonų

Nuotrauka:  
Technikai keičia CMS  
juostinį detektorių

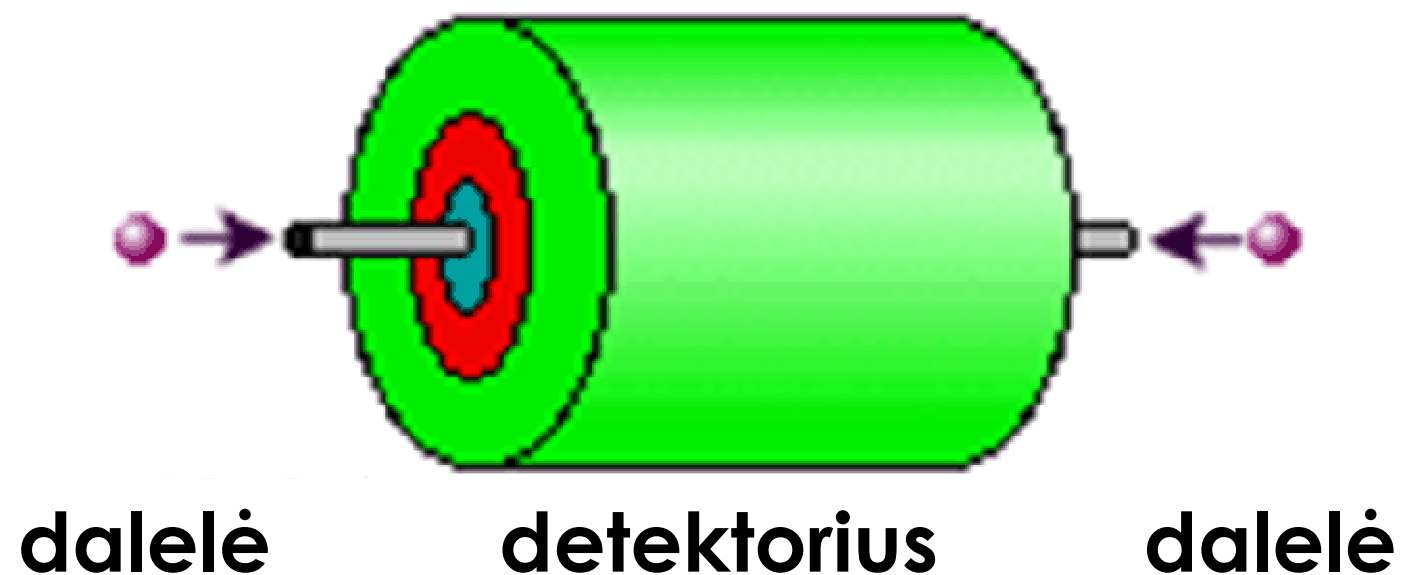


# Detektorių formos



Nejudančio taikinio eksperimentuose dauguma susidarančių dalelių skrieja viena kryptimi – statomi kūginiai detektoriai

- \* Atskirais atvejais stebima įvairiais kampais
  - pvz., branduolys buvo atrastas pastebėjus atšokančias alfa daleles!



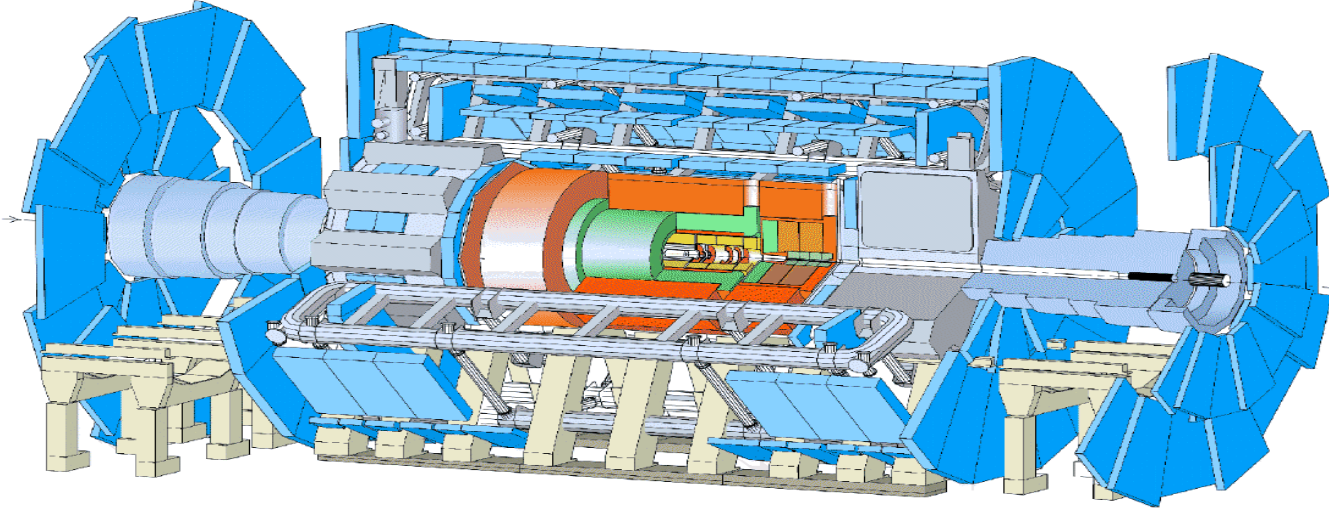
Priešpriešinių susidūrimų eksperimentuose dalelės skrieja visomis kryptimis, todėl detektoriai būna sferiški arba cilindro formos

THE PARTICLE ADVENTURE

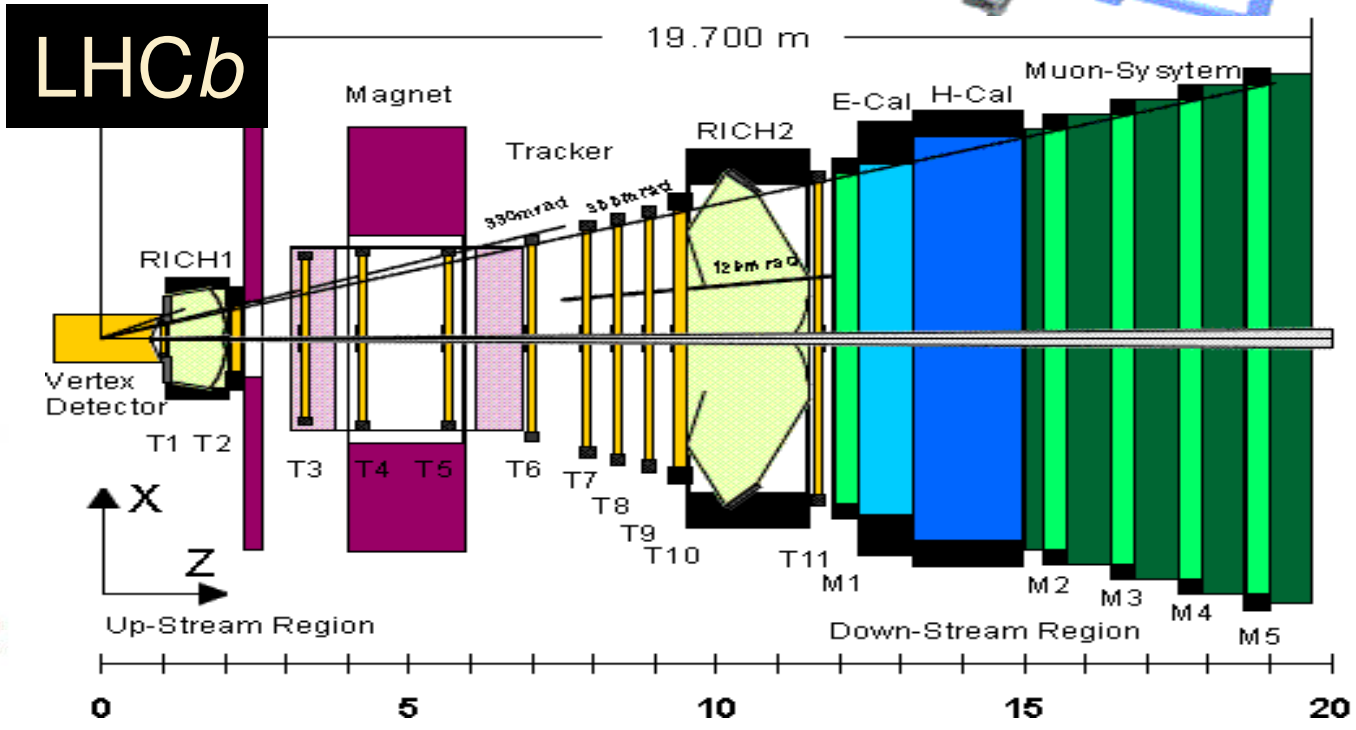
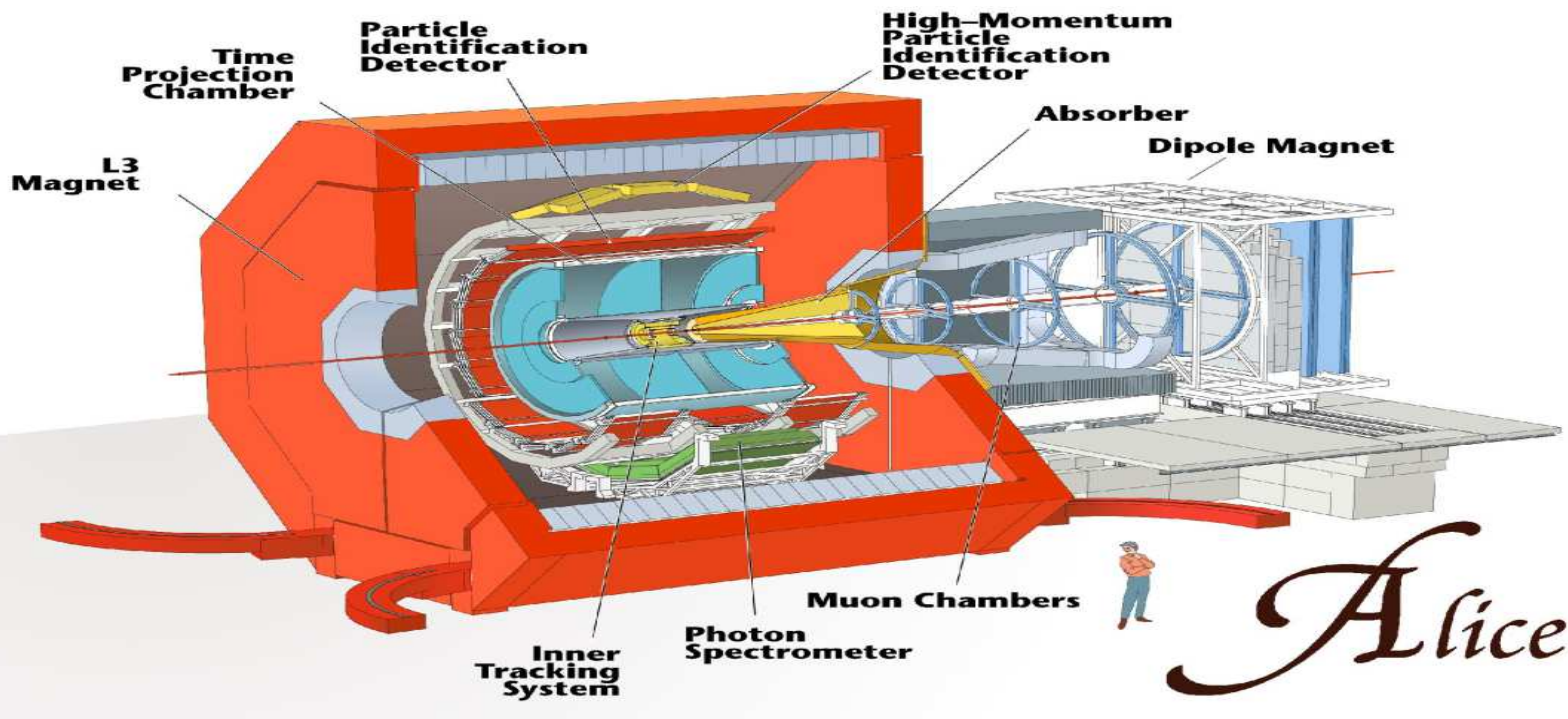
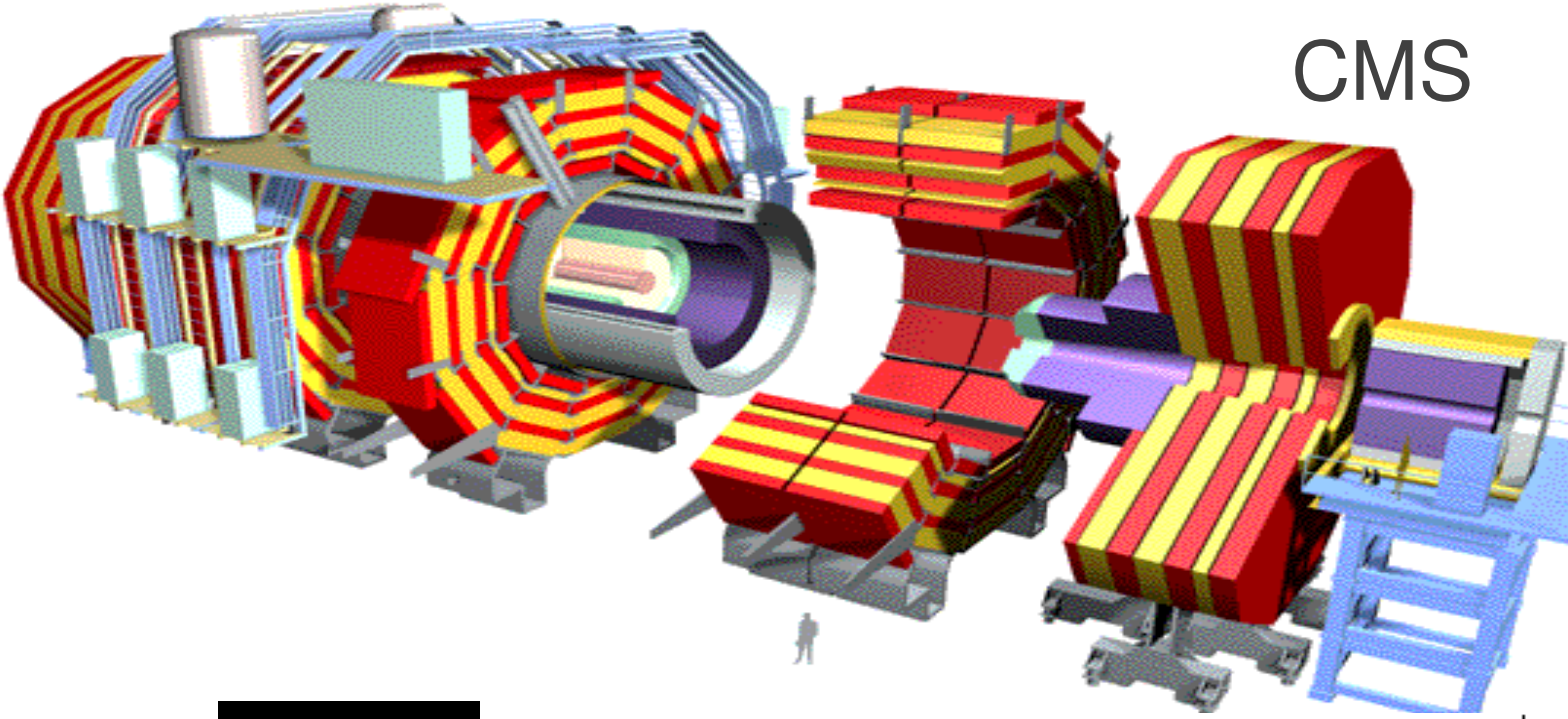
[https://particleadventure.org/shape\\_detector.html](https://particleadventure.org/shape_detector.html)

# Keturi didieji eksperimentai

ATLAS



CMS



# Dalelių medžioklė

Vilniaus  
universitetas

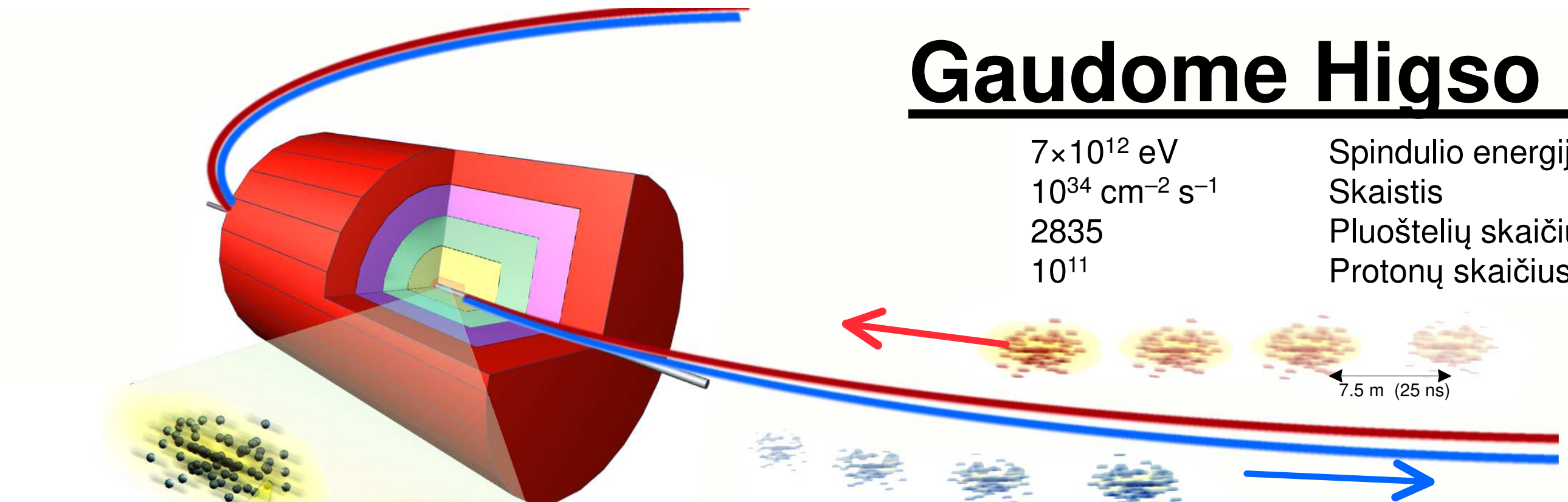


K. Mirziashvili (CERN, CMS)

# Gaudome Higso bozoną

$7 \times 10^{12}$  eV  
 $10^{34}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>  
 2835  
 $10^{11}$

Spindulio energija  
 Skaistis  
 Pluoštelių skaičius spindulyje  
 Protonų skaičius pluoštelyje



**7 TeV Proton Proton**  
 susiduriantys pluošteliai

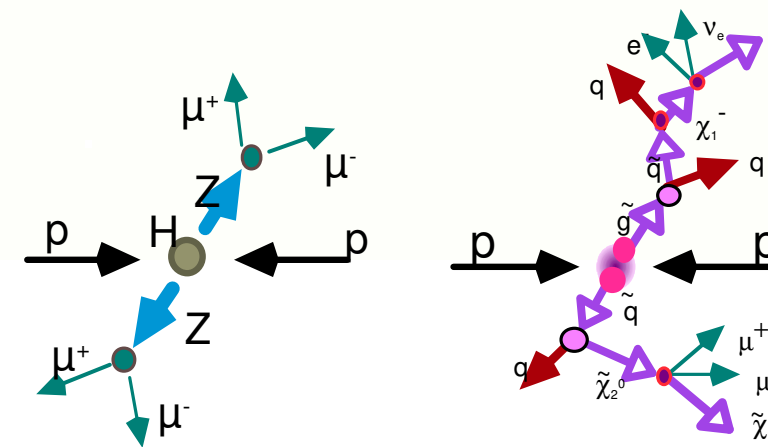
Pluoštelių susidūrimų dažnis  
 40,000,000 kartų per sekundę

Protonų susidūrimų dažnis  
 1,000,000,000 kartų per sekundę

Partonų susidūrimai

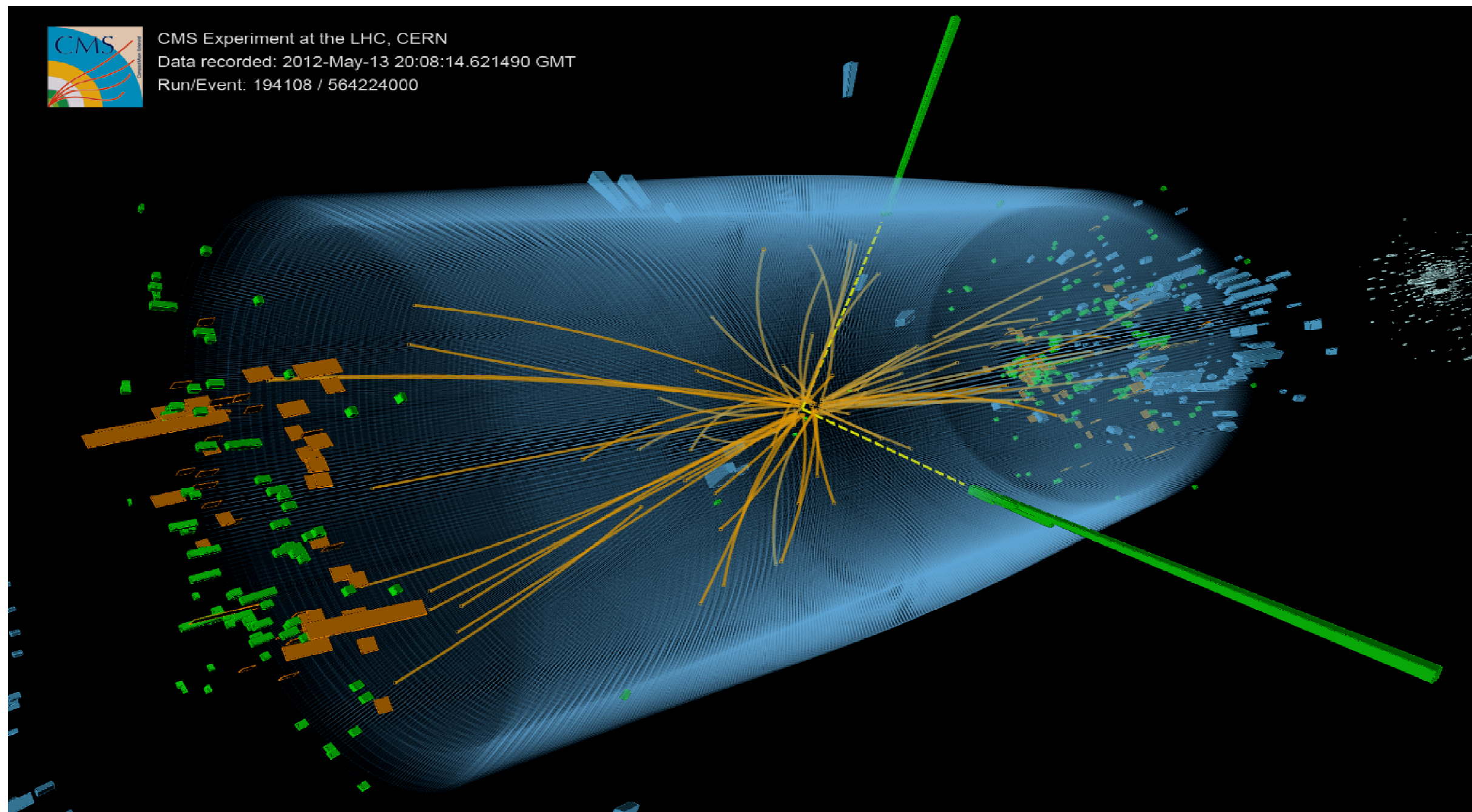
Įdomių dalelių susidarymo dažnis  $10^{-5}$  Hz  
 (Higso bozonas, SUSY dalelės, ir pan.)

Projektiniai įverčiai!



**Reikia rasti 1 įdomų įvykį tarp 100,000,000,000,000!**

# Higso bozono skilimas į du fotonus



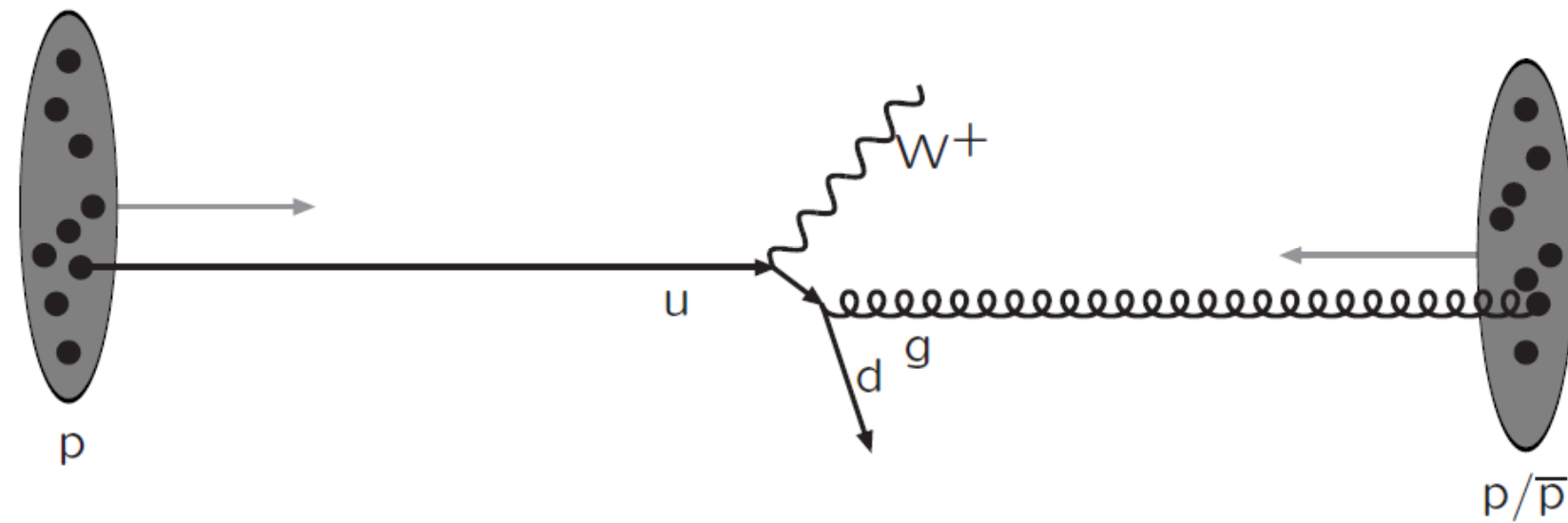
# Įvykio struktūra - 1

Warning: schematic only, everything simplified, nothing to scale, ...



Incoming beams: parton densities

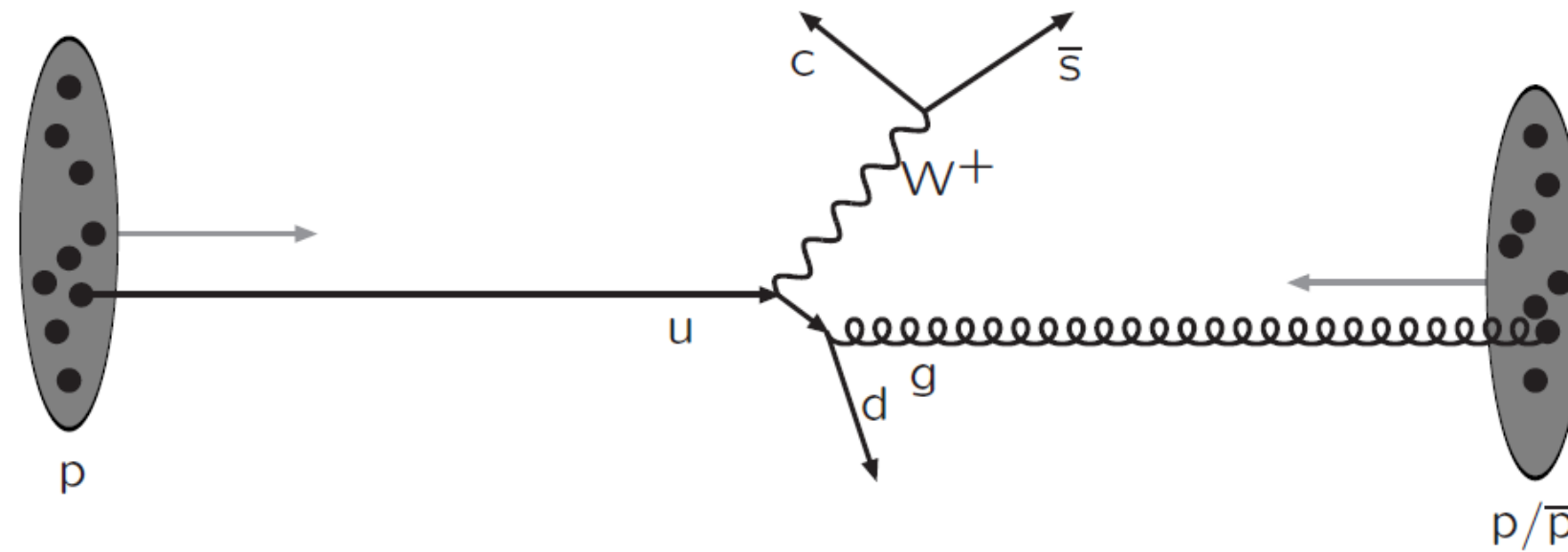
## Įvykio struktūra - 2



Hard subprocess: described by matrix elements

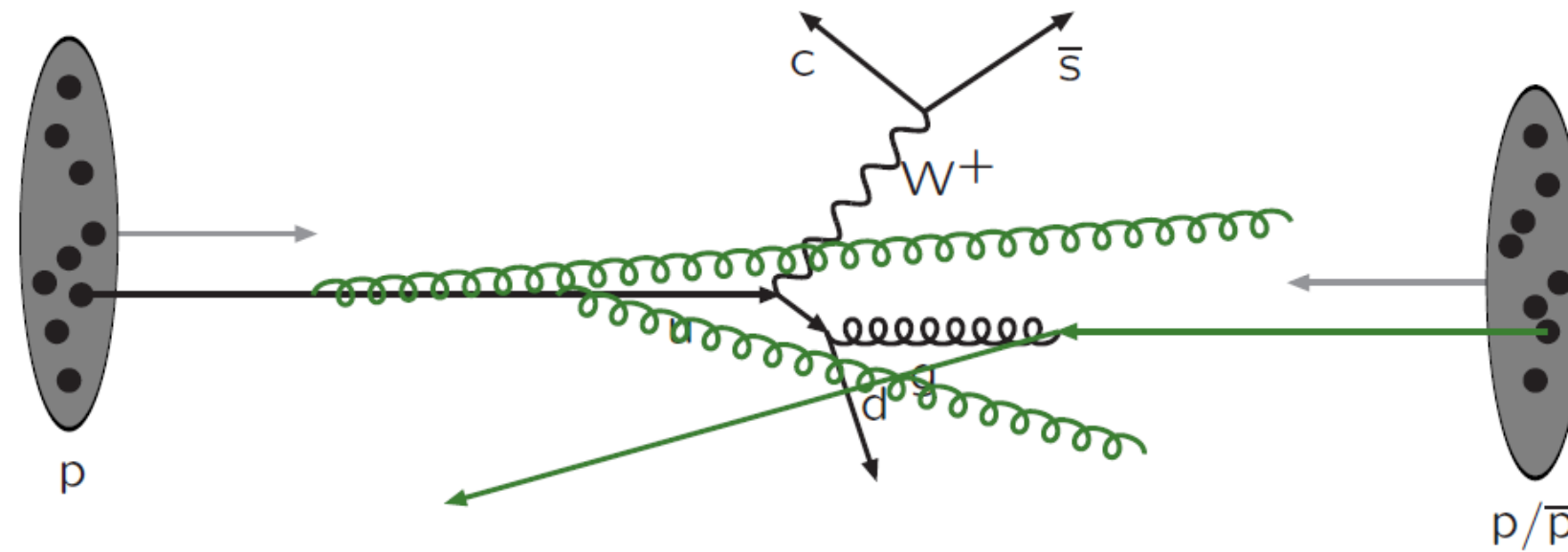


# Įvykio struktūra - 3



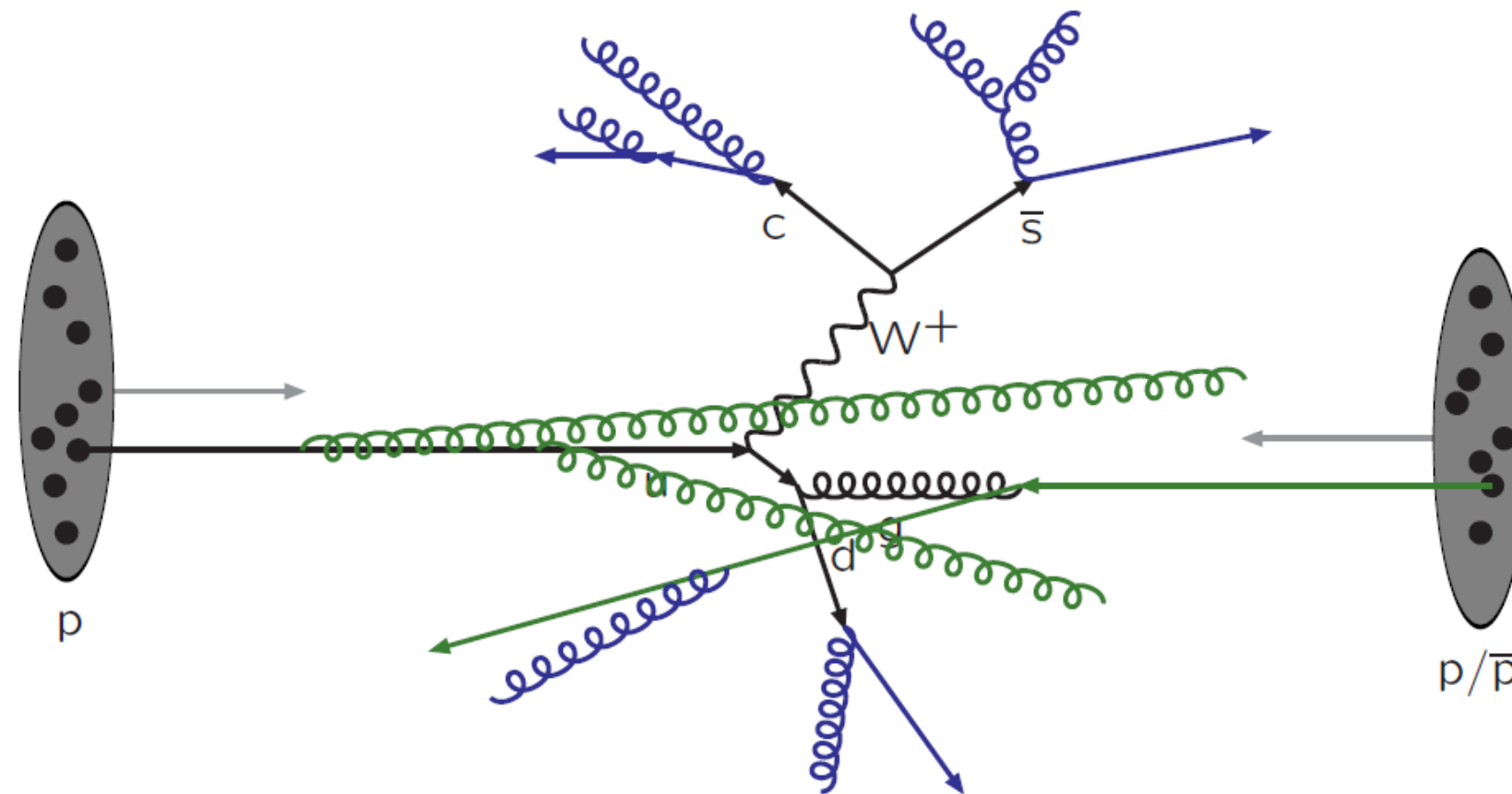
Resonance decays: correlated with hard subprocess

# Įvykio struktūra - 4



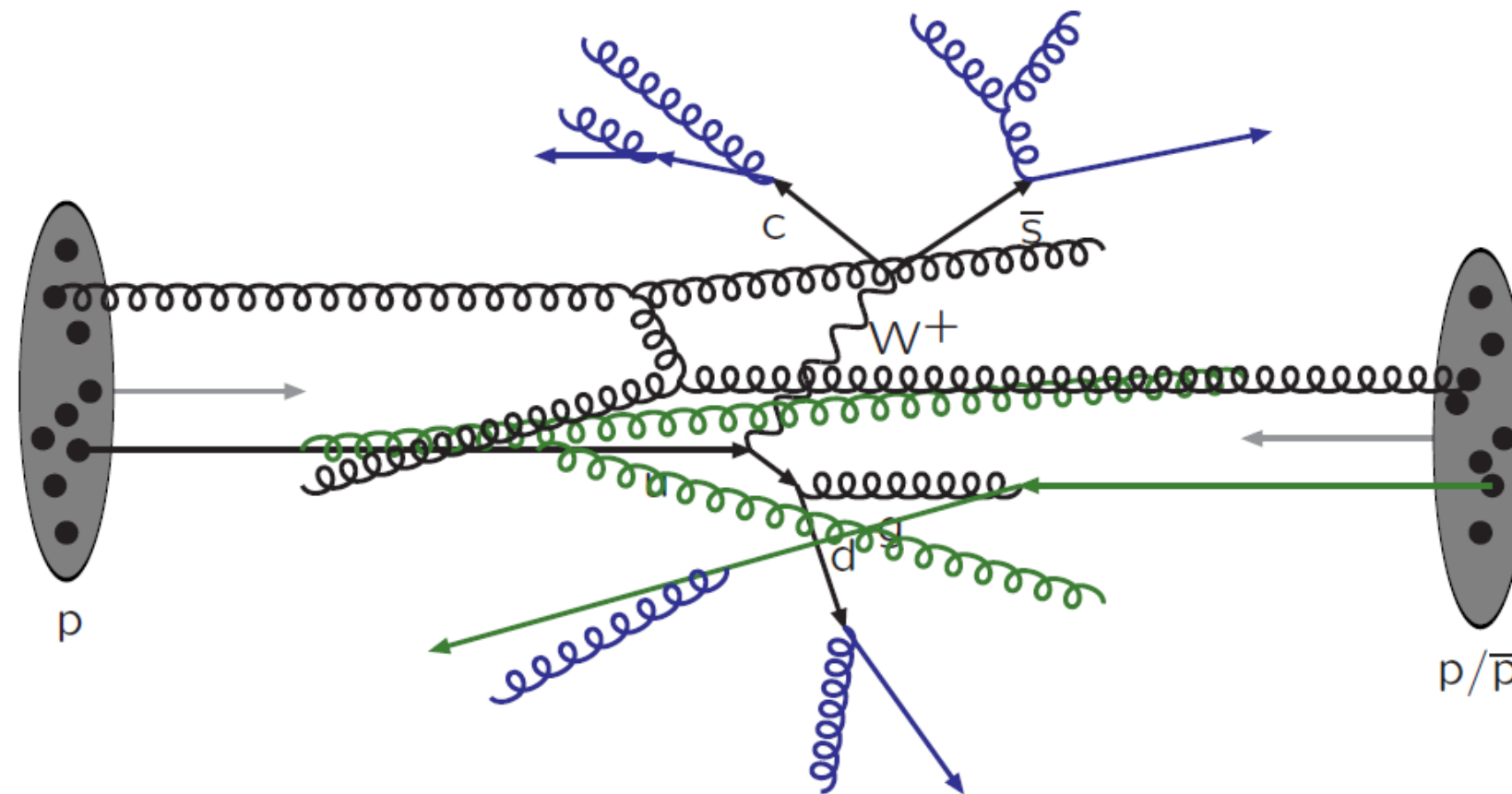
Initial-state radiation: spacelike parton showers

# Įvykio struktūra - 5



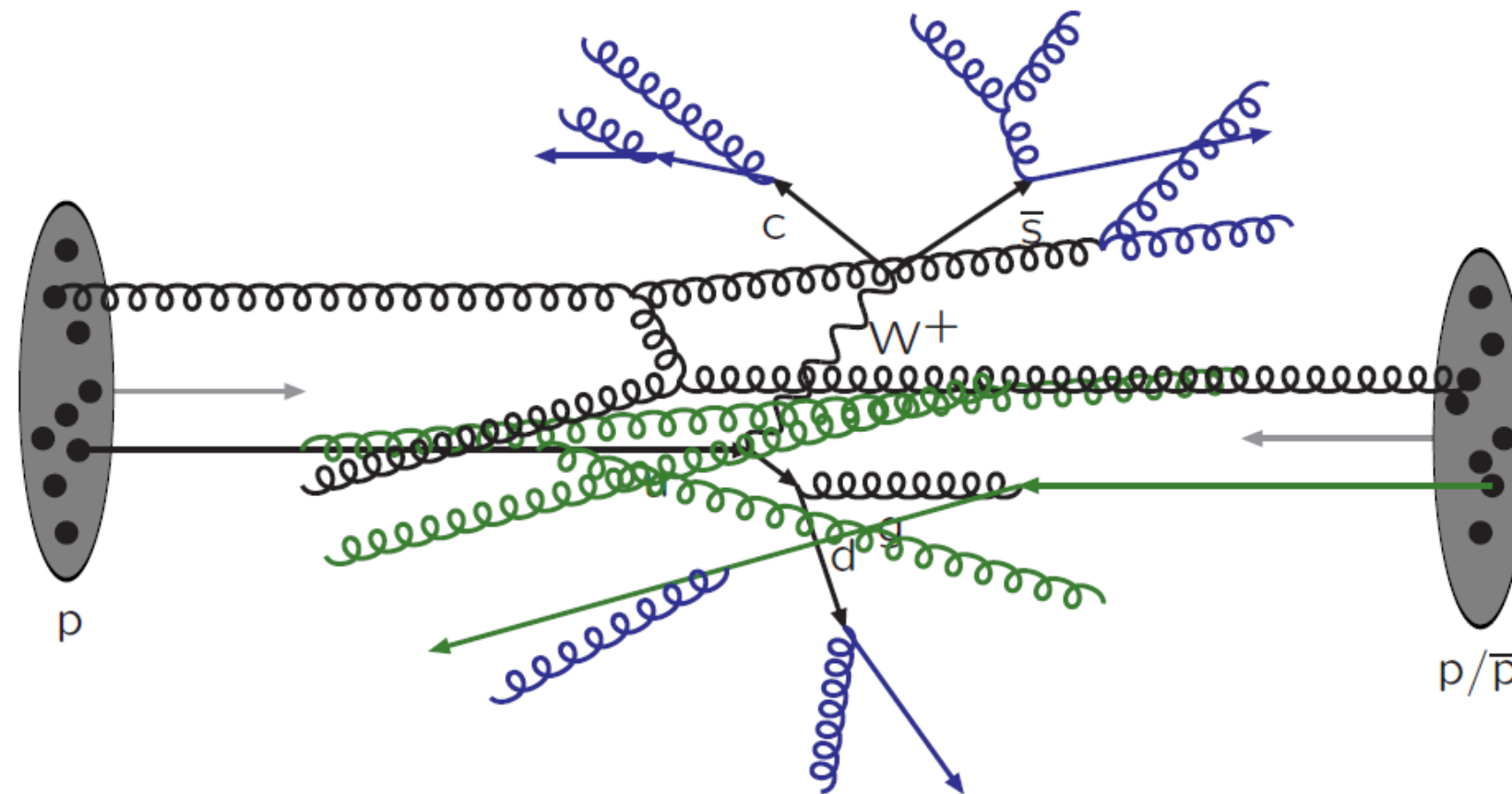
Final-state radiation: timelike parton showers

# Įvykio struktūra - 6



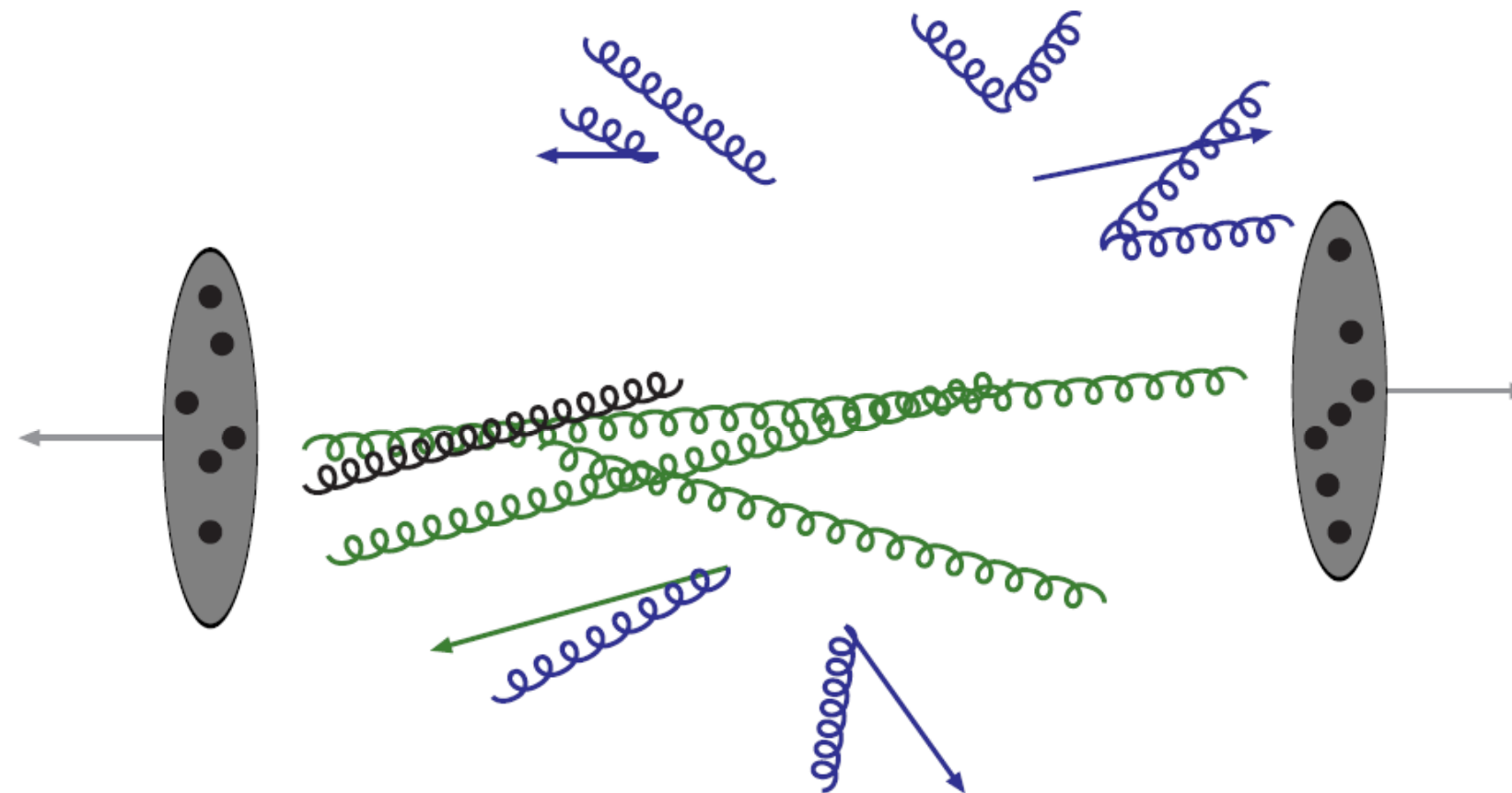
Multiple parton-parton interactions ...

# Įvykio struktūra - 7



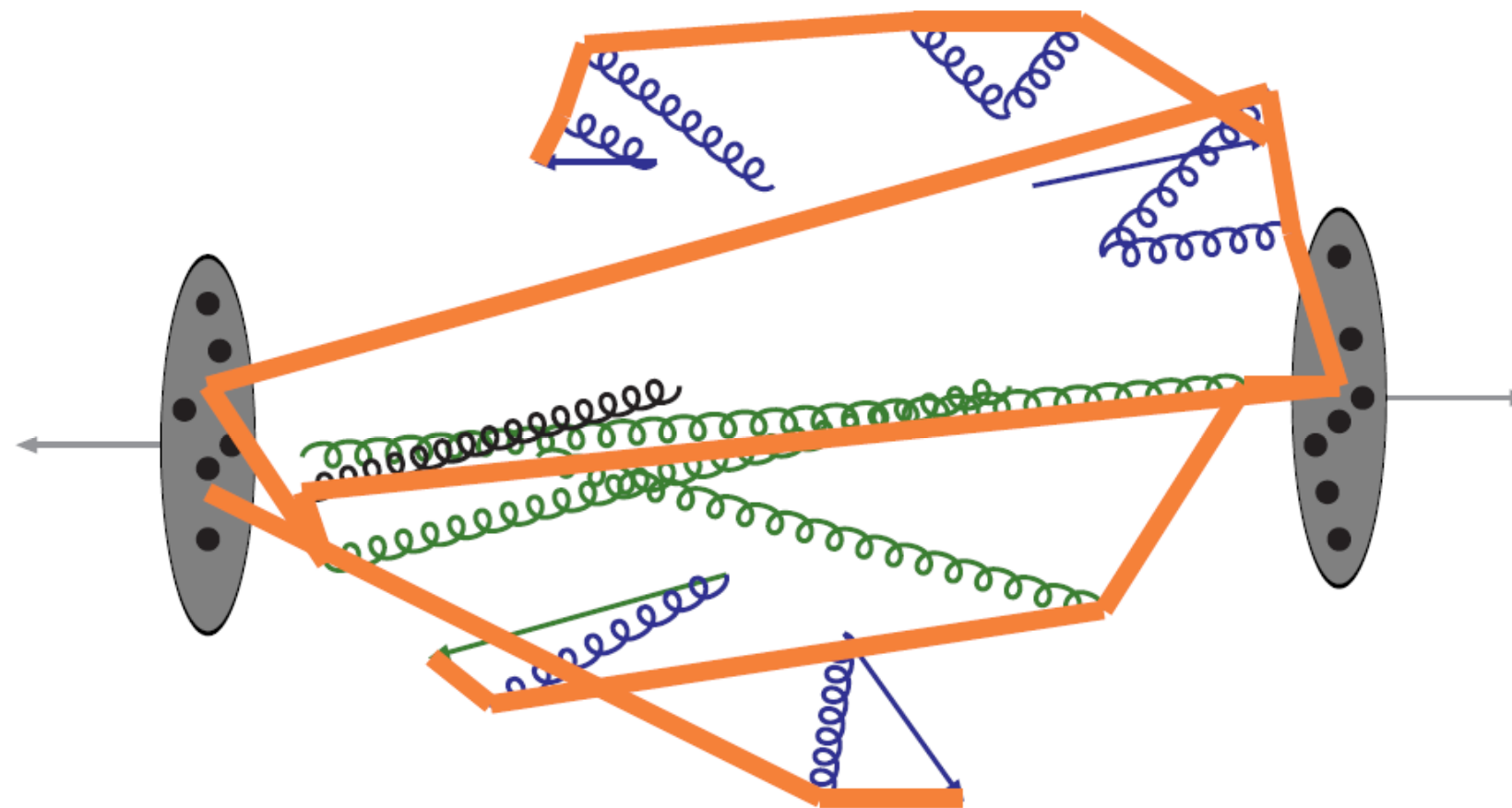
... with its initial- and final-state radiation

## Įvykio struktūra - 8



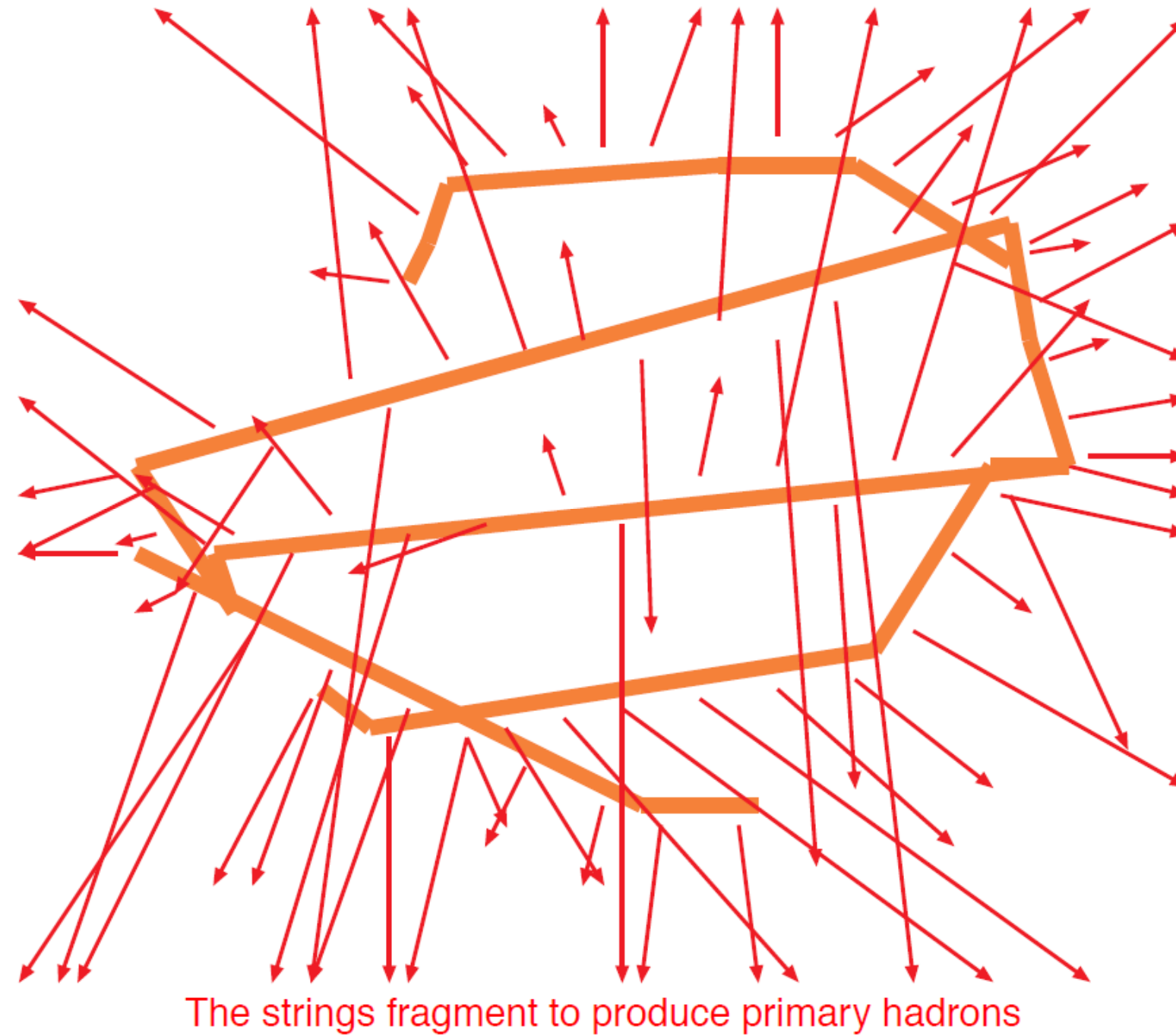
Beam remnants and other outgoing partons

## Įvykio struktūra - 9



Everything is connected by colour confinement strings  
Recall! Not to scale: strings are of hadronic widths

## Įvykio struktūra - 10





## Įvykio struktūra - 11

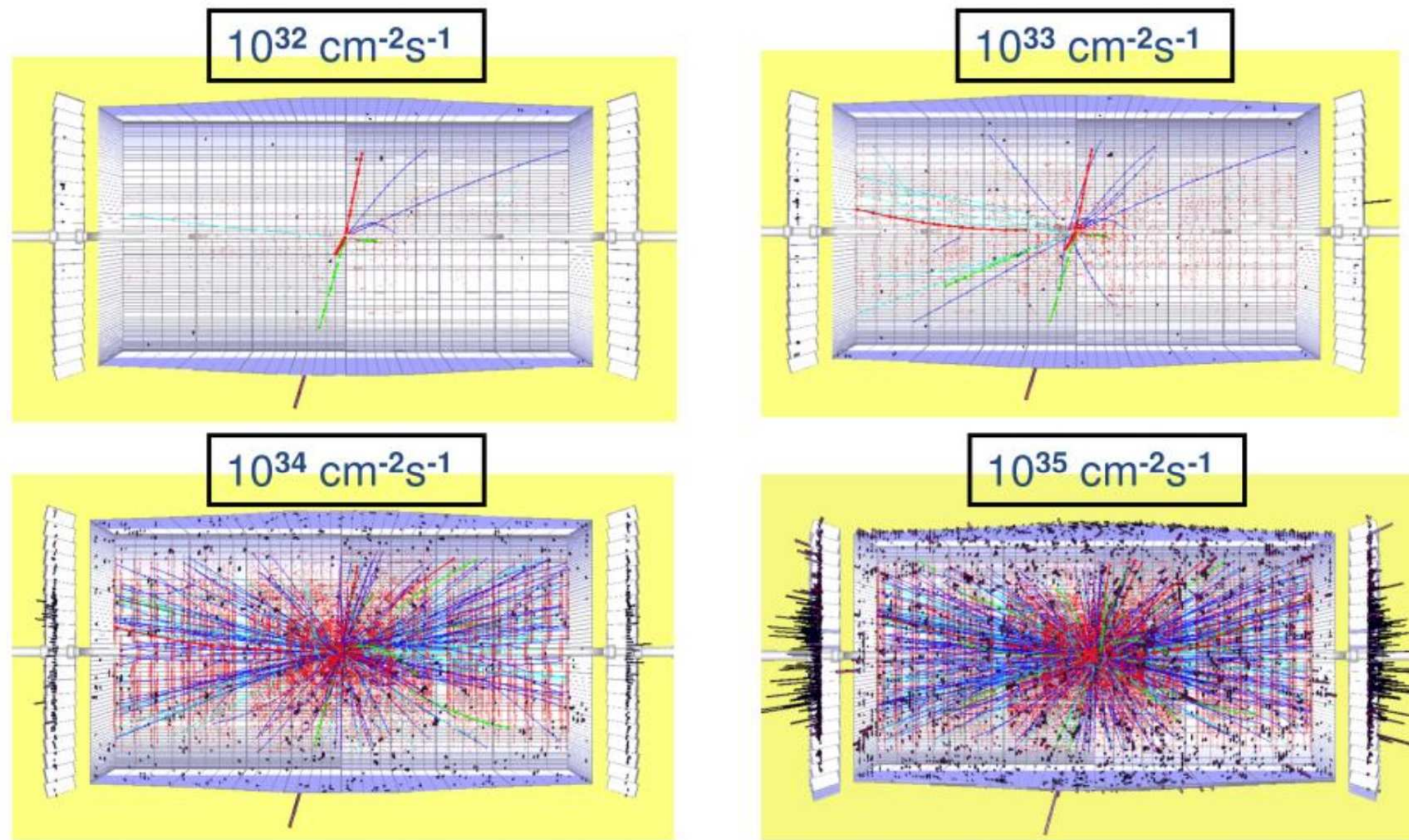


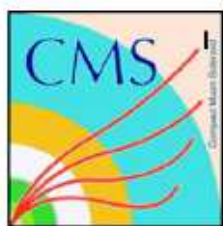


# Detector Luminosity Effects

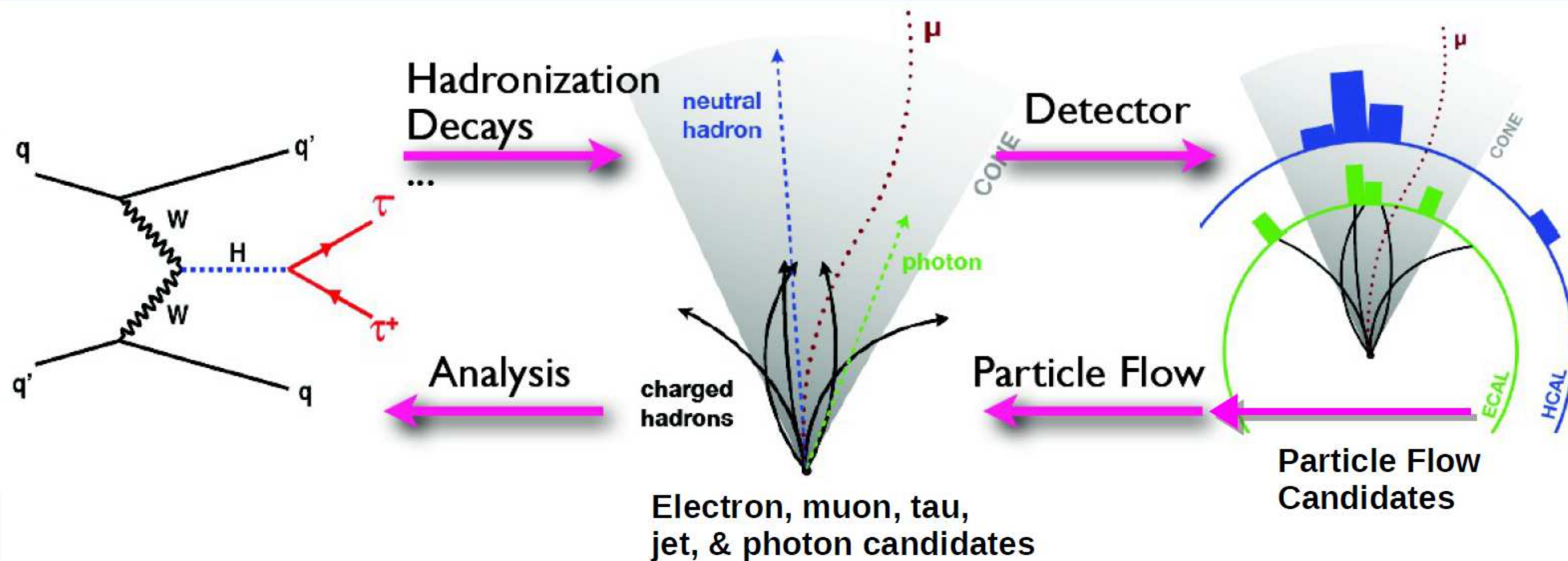


$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu ee$ ,  $M_H = 300$  GeV for different luminosities in CMS

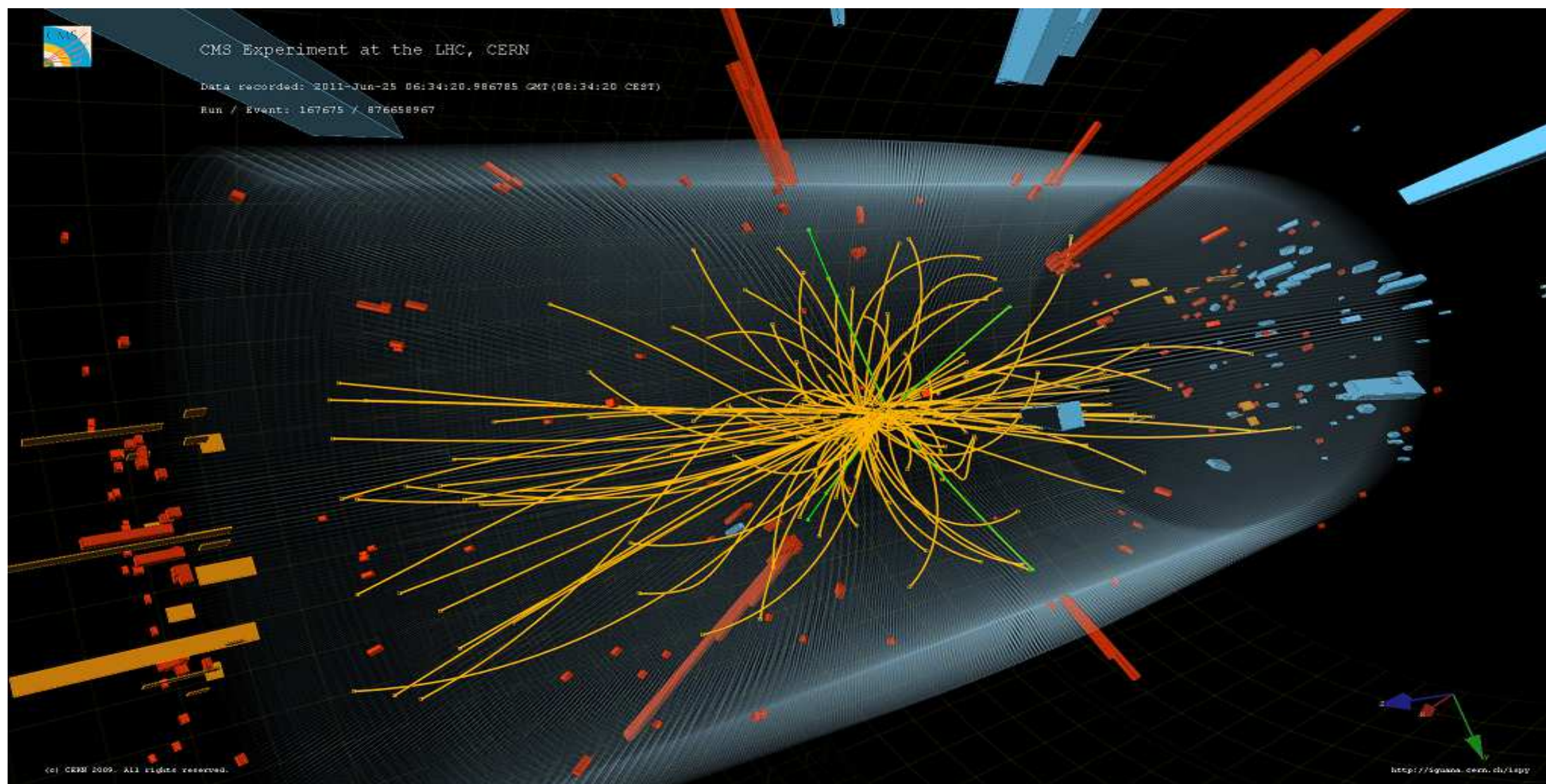


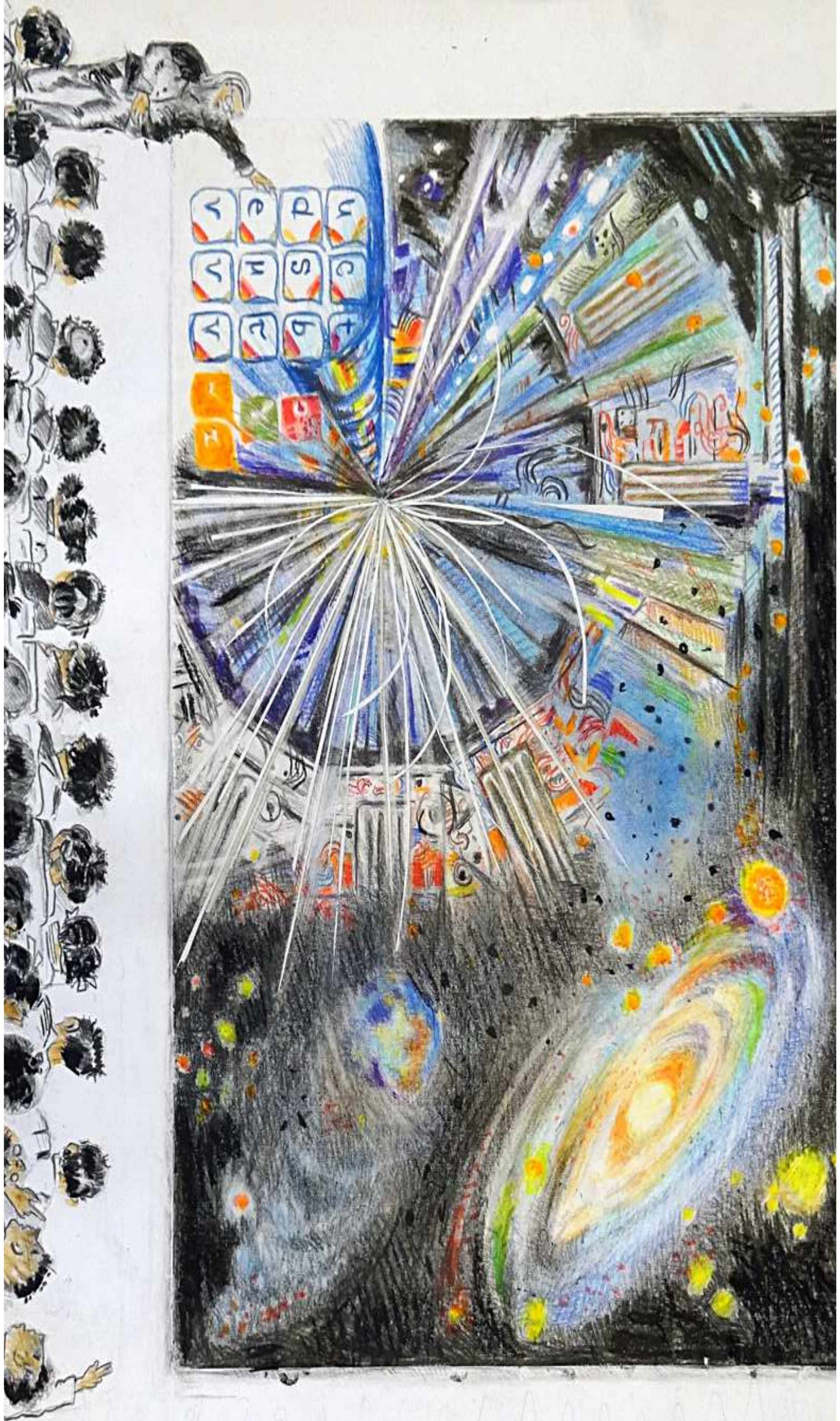


# Dalelių srauto algoritmas



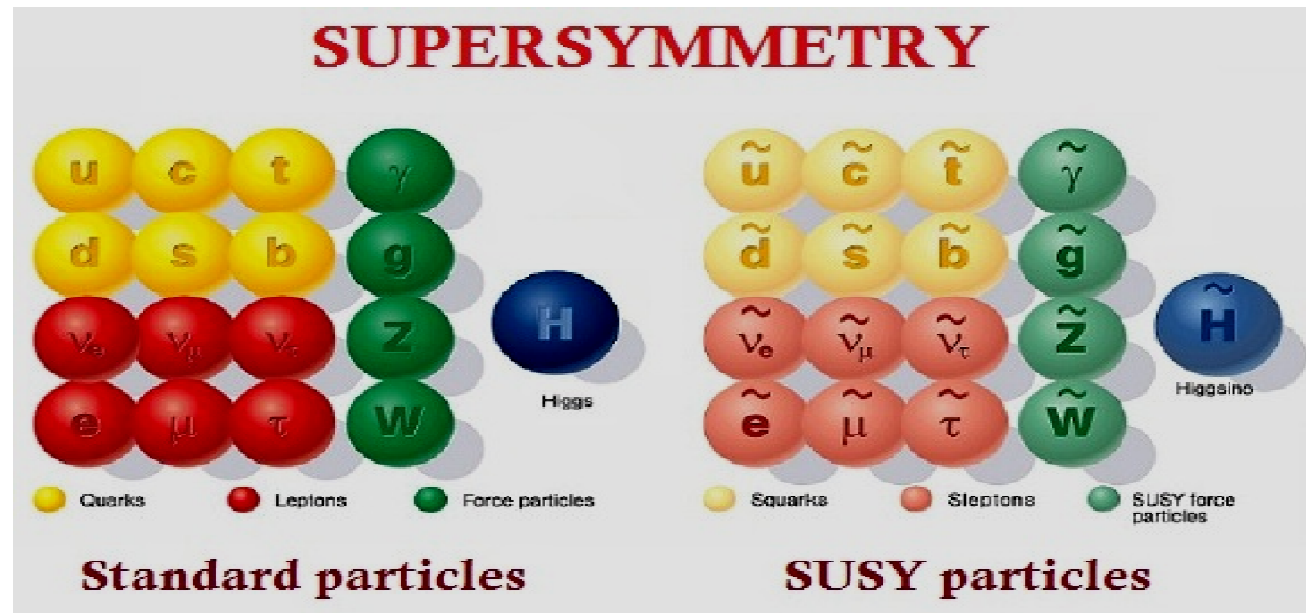
# Higso bozono skilimas į keturis elektronus



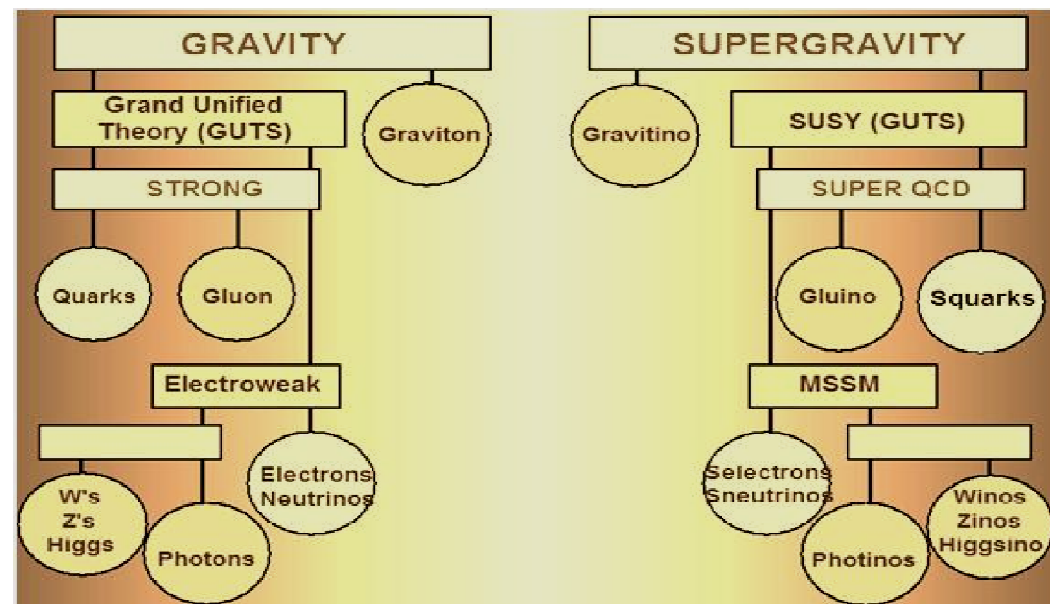
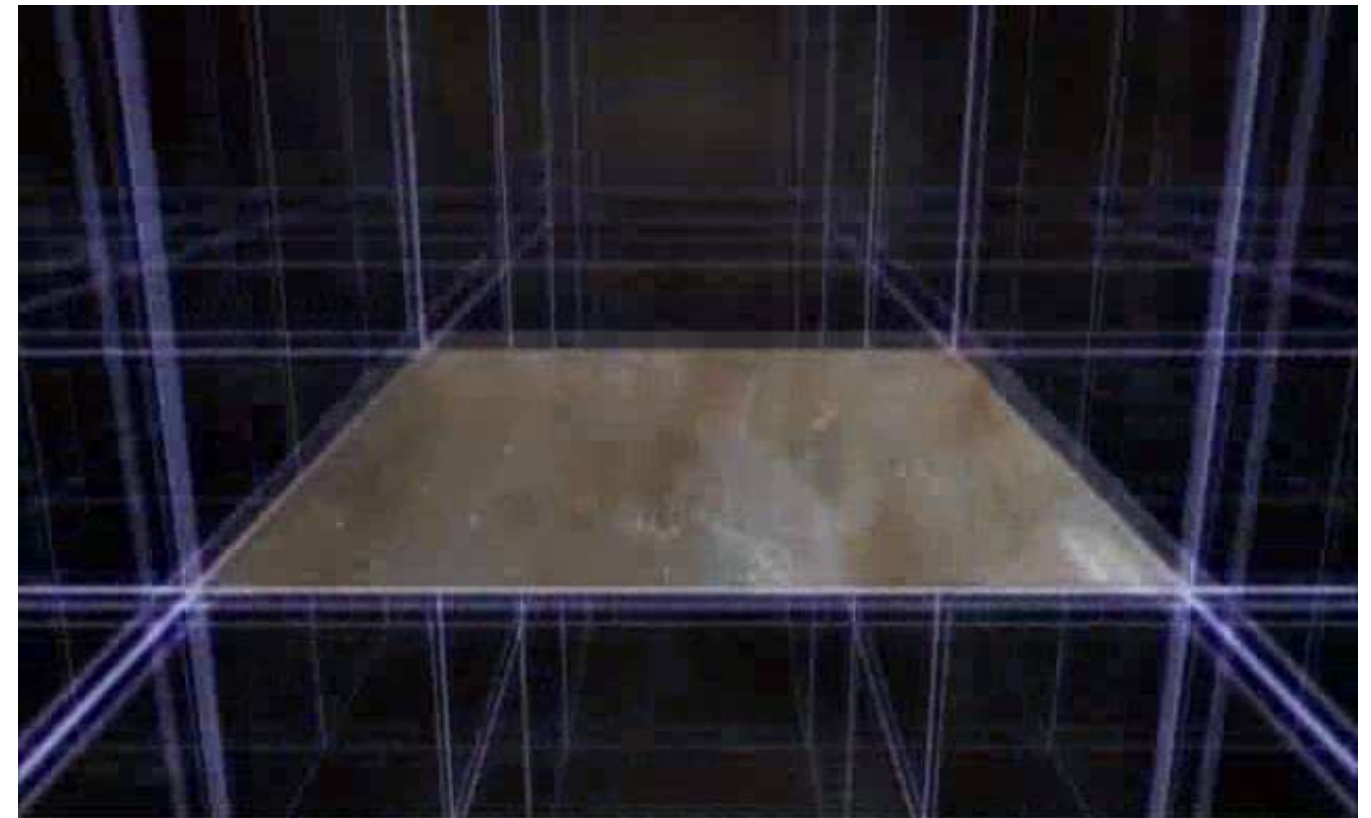


# Dar laukiantys iššūkiai

Ar galioja supersimetrija?



Ar yra daugiau erdvės matavimų?



Kaip veikia gravitacija?

Kur dingę antimedžiaga?

Kas yra tamsioji medžiaga?

Kodėl neutrino keičia aromata?



# **CMS detektorius CERN**

**<https://www.youtube.com/watch?v=S99d9BQmGB0>**

**(Yra lietuviški titrai!)**





**Vilniaus  
universitetas**

---

# KONTAKTAI

Andrius Juodagalvis

Vyresnysis mokslo darbuotojas

Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

[andrius.juodagalvis@tfai.vu.lt](mailto:andrius.juodagalvis@tfai.vu.lt)



# SPRACE (San Paolo Research and Analysis Center)

Vilniaus  
universitetas

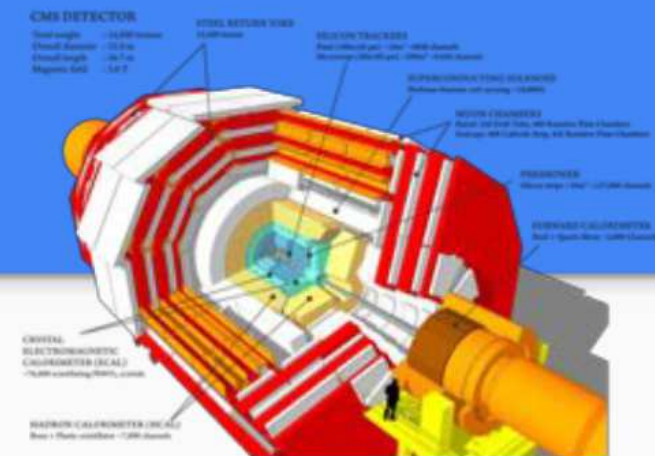
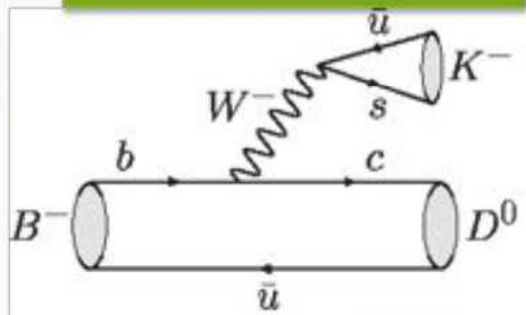
Sprace2 – kompiuterinis žaidimas, supažindinantis su dalelėmis ir medžiagos sandara  
<https://sprace.org.br/index.php/education-outreach/sprace-game>



# Reality



Decay of unstable particles



Detector electronics

Trigger (selection)

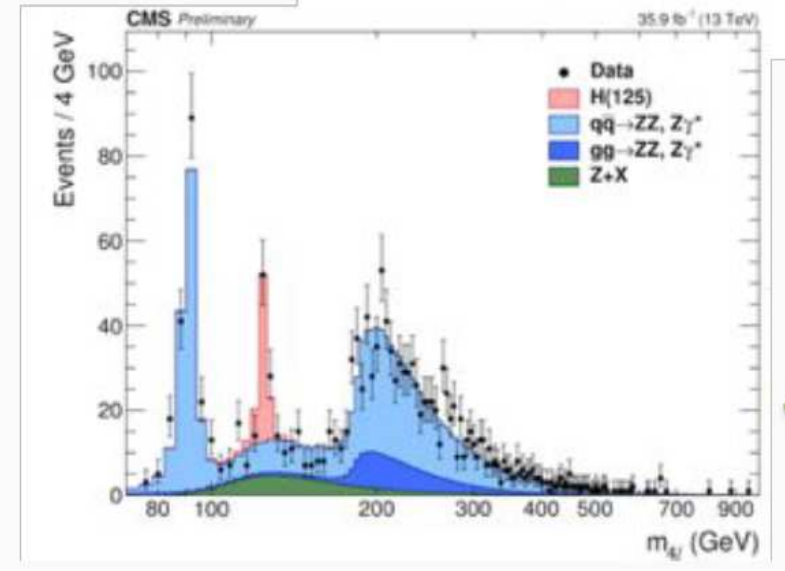
Reconstruction

Analysis

SW

SW

SW



T.Boccali, <https://indico.cern.ch/event/758324>

# Beamline for schools



Konkursas „Dalelių pluošteliai mokykloms“ (B4S)

Aukštųjų mokyklų komandos gali dviem savaitėms tapti CERN laboratorijos mokslininkais

Tereikia sėkmingai parašyti projektą, ką norėtų ištirti, jei turėtų įgreitintų dalelių srautą

Nuotraukoje – 2018 m. nugalėtojai iš Filipinų

# Fizikos edukacija: S'Cool LAB

<http://scool.web.cern.ch/>

Vilniaus universitetas

**S'Cool LAB**

## Summer CAMP 2018

**CERN, Geneva**  
the world's largest particle physics laboratory

**Free of charge**  
accommodation, meals & travel covered by CERN

**24.7. - 4.8.18**  
apply until 05.02.2018  
[cern.ch/s-cool-lab](http://cern.ch/s-cool-lab)

$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$

$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$

$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$

$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln f(\beta) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$

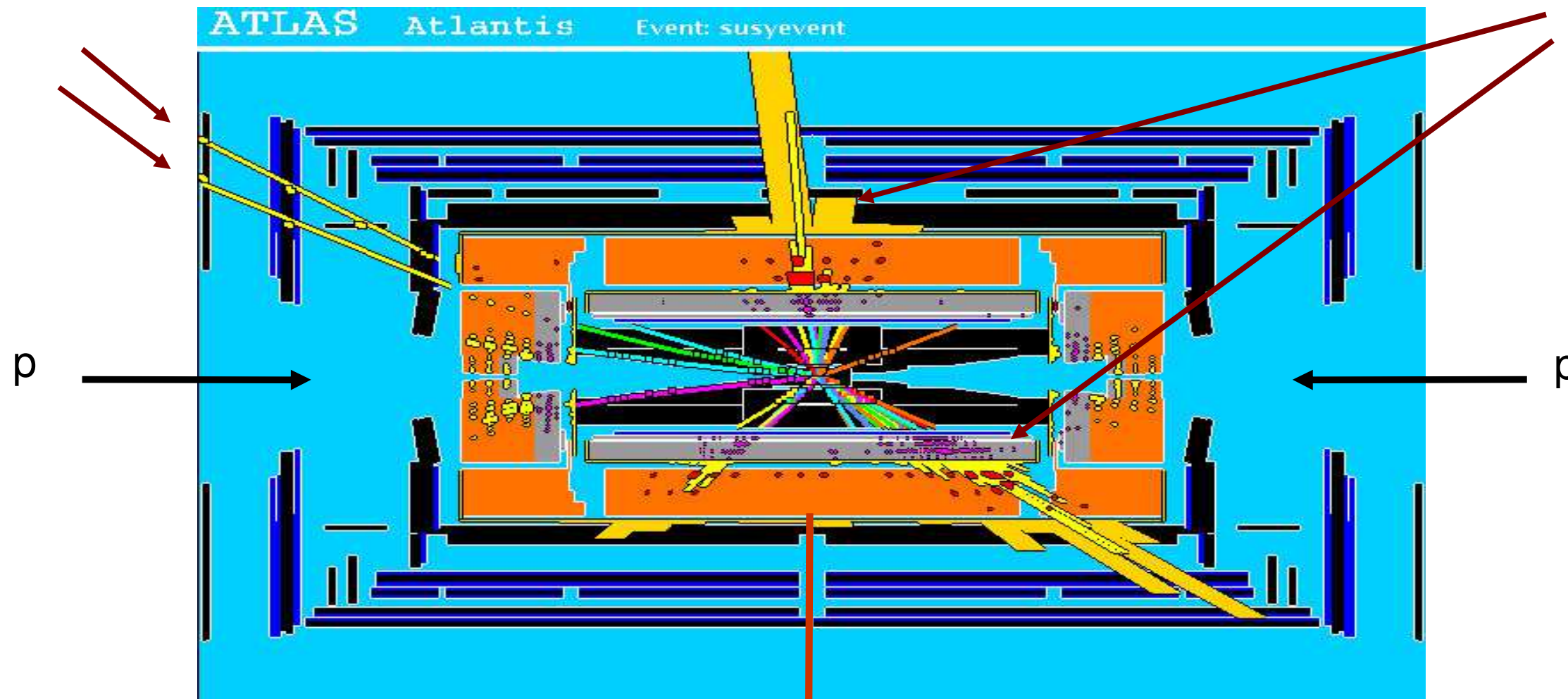
$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$

Handwritten diagrams include:  
 - A coordinate system with axes x, y, z and a magnetic field vector B.  
 - A Feynman diagram showing an electron-positron pair ( $e^+e^-$ ) annihilating into a photon ( $\gamma$ ), which then decays into another electron-positron pair.  
 - A Feynman diagram showing a quark ( $q$ ) emitting a gluon ( $g$ ) and a photon ( $\gamma$ ), which then decays into a neutrino-antineutrino pair ( $\nu\bar{\nu}$ ).  
 - A Feynman diagram showing a quark ( $q$ ) emitting a photon ( $\gamma$ ), which then decays into an electron-positron pair ( $e^+e^-$ ).  
 - A Feynman diagram showing a quark ( $q$ ) emitting a gluon ( $g$ ), which then decays into a quark-antiquark pair ( $q\bar{q}$ ).

# A simulated SUSY event (“Signal”)

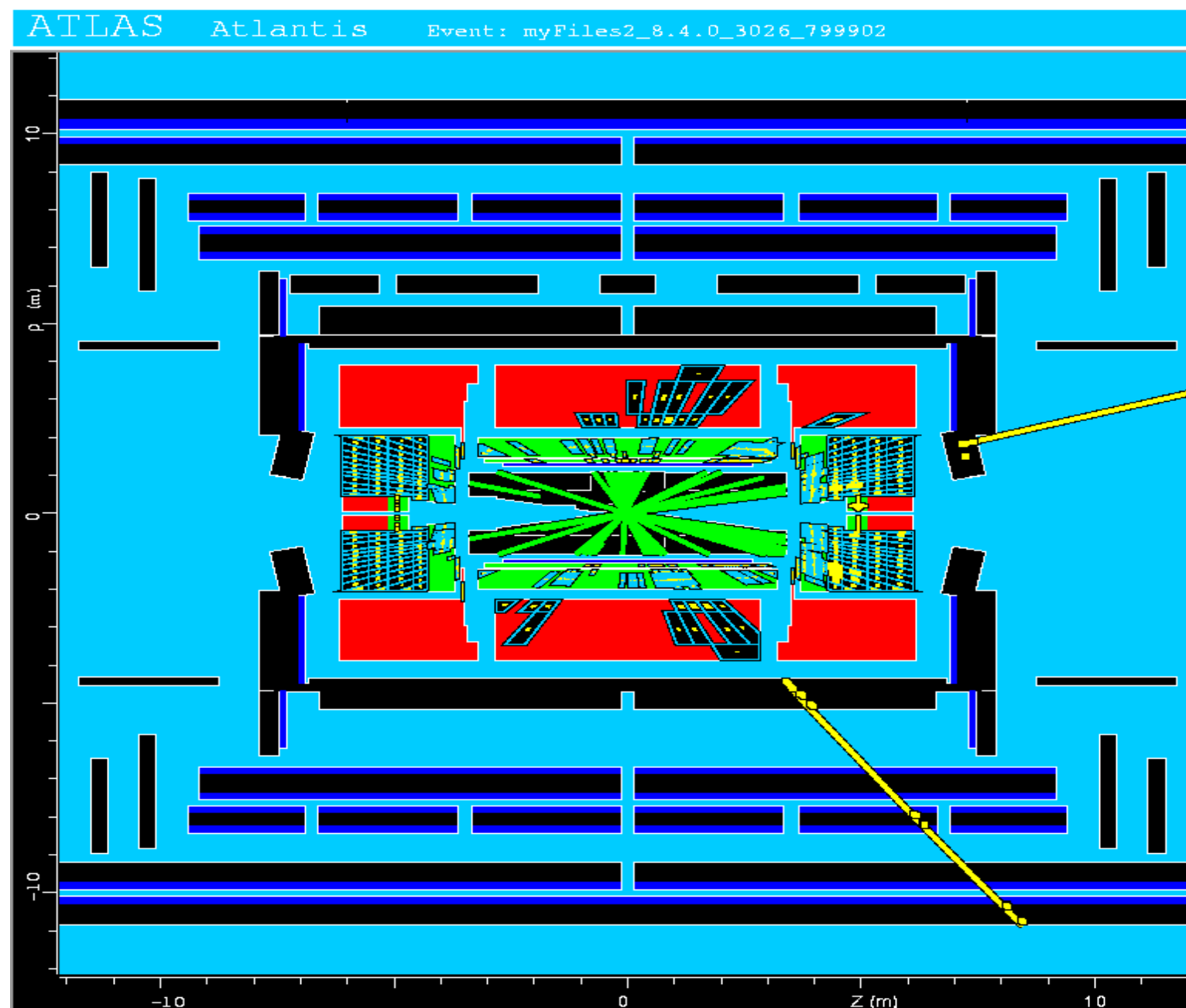
high  $p_T$   
muons

high  $p_T$  jets  
of hadrons



missing transverse energy

# Background events



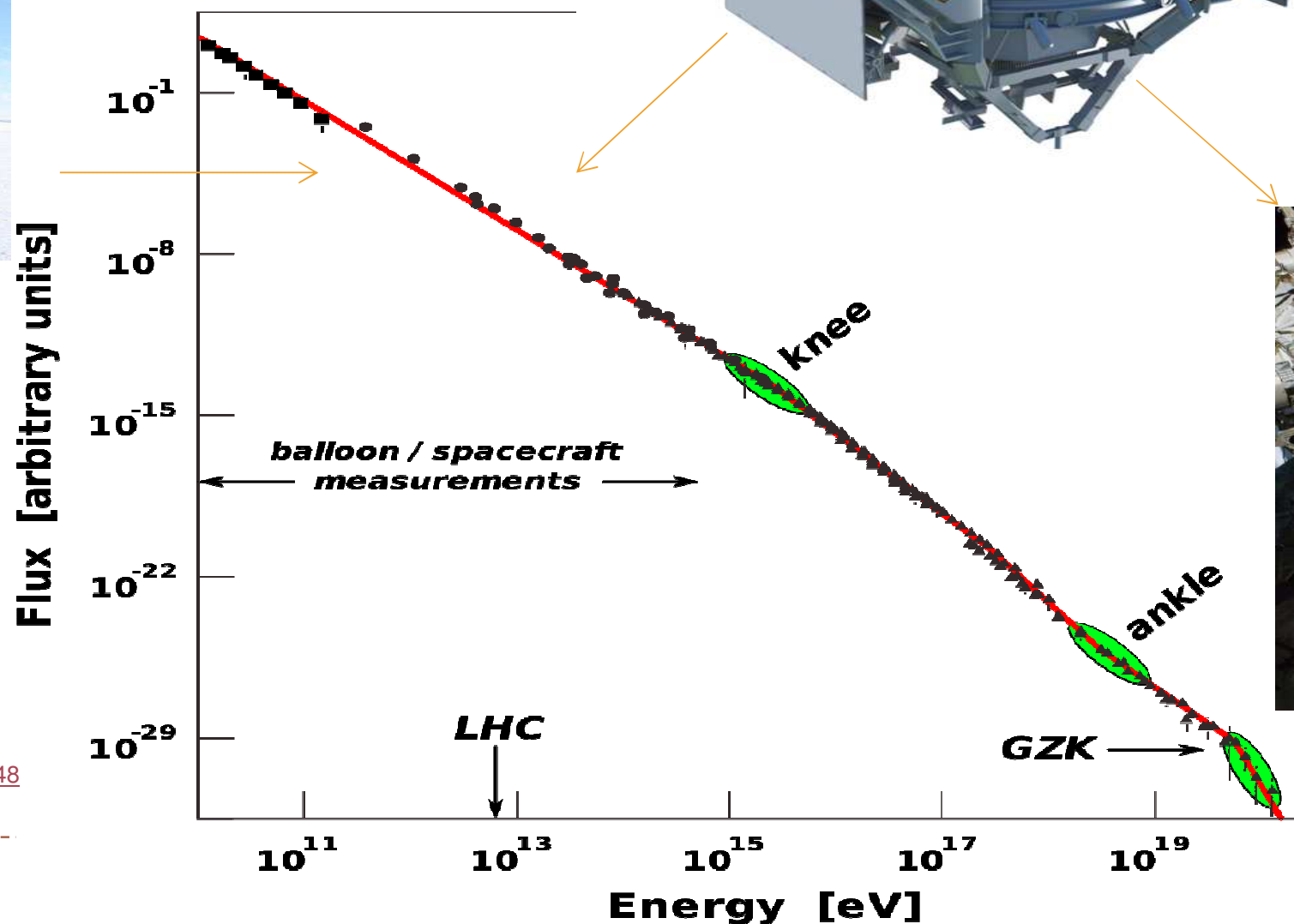
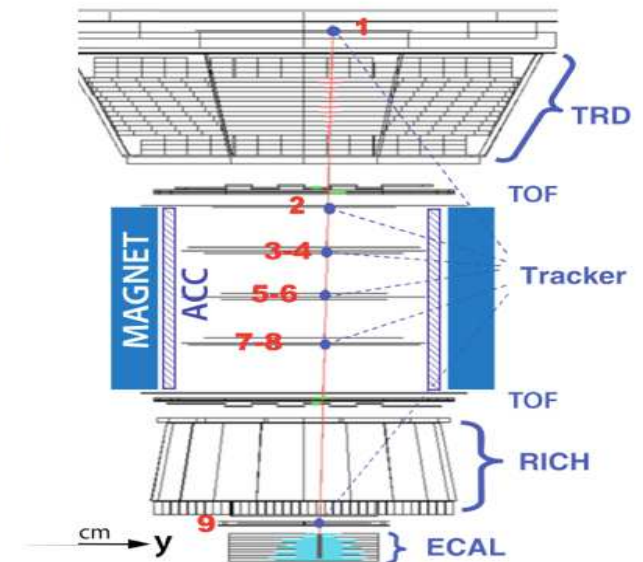
This event from Standard Model  $t\bar{t}$  production also has high  $p_T$  jets and muons, and some missing transverse energy.

→ can easily mimic a SUSY event.

# Cosmic ray study methods



Alpha Mass Spectrometer-2



Two astronauts working on the Space Station near AMS

From L.Miramonti, <https://slideplayer.com/slide/4157148>