



CMS subdetektoriai ir kai kurie nauji LHC rezultatai

Aurelijus Rinkevičius

Vilniaus universitetas

2019-11-14



Trumpa biografija



Keletas biografinių faktų:

2010 BSc, VU Fizikos fakultetas.

2014 PhD, University of Florida, FL, USA.

“An Observation of a Higgs Boson in the H to ZZ to Four Leptons Decay Channel and the Studies of Its Spin-Parity Properties”

2015-19 Postdokas, Cornell University, NY, USA.

Kuruoja tris (Cornell) PhD studentus top–Higgs tyrimuose.

Ko-koordinuoja CMS $t\bar{t}H$ multileptonų grupę.

Dalyvauja CMS pixel detektoriaus veikloje.



Turinys



Įvadas

Dalelių fizika

Kaip viskas veikia?

Kaip tiriama?

Infrastruktūra

CMS anatomija

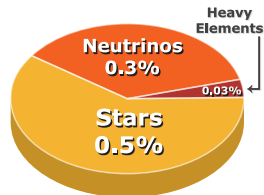
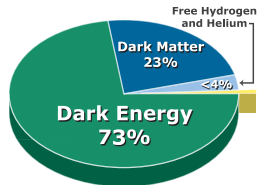
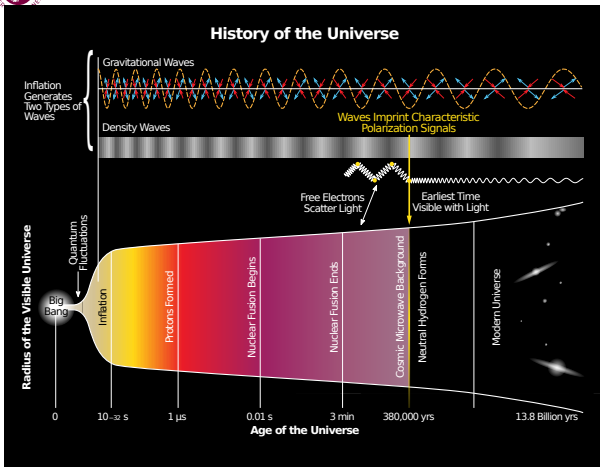
Rezultatai



Įvadas



Nuo sprogdimo iki šiandien



- Vistoje „dominuojanti“ (?) sąveika: gravitacija.
- Mus Žemėje supa „įprasta“ materija.



Aplink mus

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

- Gausybė medžiagų ⇒ periodinė lentelė.
- Pagrindinė sąveika: elektromagnetinė (elektrosilpnoji).

- **Mažoji** visatos masės dalis! (0.5% + 0.03%)
- Akivaizdu, kas gamtos (iš tiek) dar nesuprantame.

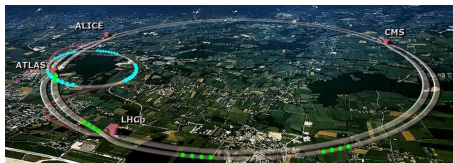


Kaip mokslui tirti?



Makrokosmosas

Mikrokosmosas



Square Kilometre Array (SKA)

Large Hadron Collider (LHC)

Kvadratinio kilometro masyvas

Didysis hadronų daužytuvas

Sąveikų energijos tankis¹:

← Mažos energijos

Didelės energijos →

¹ Jėgų stipris

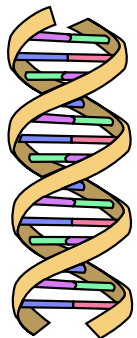


(Neriname į) Dalelių fizika



Kelias į dalelių fiziką (1)

Molekulės,
daugiaatomės
struktūros



Atomai

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 Period	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				** 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

„Be galo“ daug

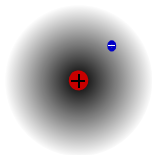
~120 elementų



Kelias į dalelių fiziką (2)



Atomai



~120 elementų

Subatominės dalelės

- e^- elektronai
- p^+ protonai
- n^0 neutronai

3?





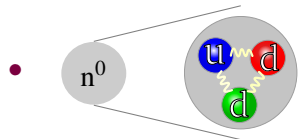
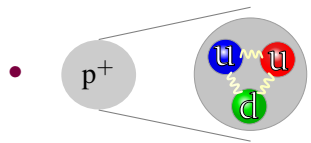
Kelias į dalelių fiziką (3)



Subatominės dalelės

Elementariosios dalelės

- e^-



- Leptonai (e^-, ν_{e^-}, \dots)
- Kvarakai (u, d, ...)
- Sąveikų pernešėjai



?

?



Gamtos sandara šiuolaikinėje fizikoje



Standartinis modelis

Bendroji reliatyvumo teorija (gravitacija)

mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
QUARKS					SCALAR BOSONS
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
					GAUGE BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS					
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

+

- Gravitonai?
- Tamsios dal.?

Medžiaga + medžiaga + sąveikos = 16 + 1

?



Kaip viskas veikia (dalelių fizikoje)?

Įvadas
○○○○

Dalelių fizika
○○○○○

Kaip viskas veikia?
●○○○○○○○

Kaip tiriama?
○○○

Infrastruktūra
○○○○○○○○○

CMS anatomija
○○○○○○○○○○○○○○○○

Rezultatai
○○○○○○○○○○○○○○○○



Kaip atrodo dalelė?



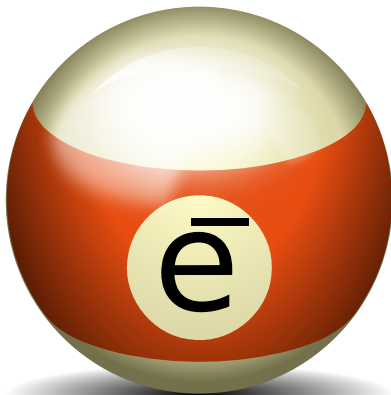


Kaip atrodo dalelė?





Kaip atrodo dalelė?

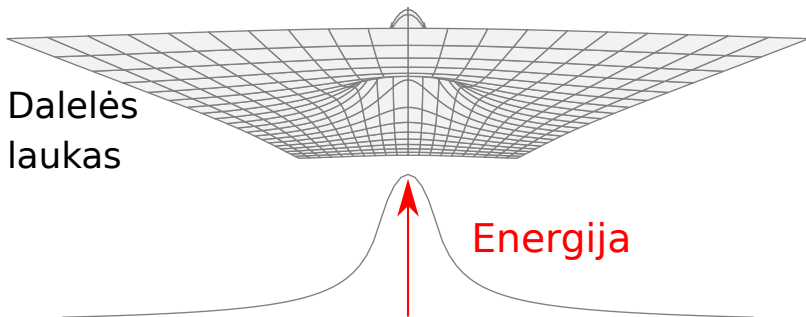




Deja...



Dalelė — lauko sužadėjimas



Girdėjote, kad dalelė yra banga?



Kaip tai veikia?



- Medžiaga yra sudaryta iš dvejų dalelių grupių:
 - **Leptonų** (pvz., e^- , ν_e) gyvuojančių atskirai.
 - **Kvarkų** (pvz., u, d) gyvuojančių tik grupėmis.
(○ Šios dalelės yra $\frac{1}{2}$ sukinio.)
- **Medžiaga** sąveikauja per **bozonus** (sukinys 1).
- **Bozonai** gali sąveikauti **tarpusavyje**.

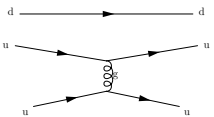
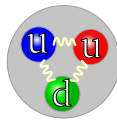
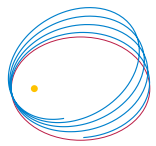
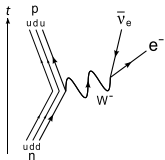
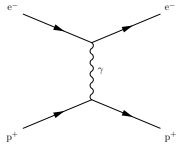
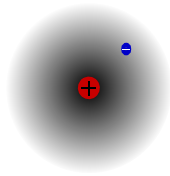


Sąveikos



Žinomos sąveikos yra **keturios** + **1**:

- * ● Elektromagnetinė per fotonus (γ)
- * ● Silpnoji per W ir Z bozonus (W^\pm, Z)
- * ○ „Inertinė“ per Higgs bozonus (H)
- Stiprioji per gliuonus (g)
- Gravitacinė per gravitonus?





Higgso mechanizmas (1)



- **Pastebėta:** silpnoji ir elektromagnetinė sąveikos panašios.
- Apjungus į vieną matematinį mechanizmą gaunami „geri“ rezultatai.
- **Problema:** W ir Z bozonai **sunkūs**.

Sprendimas:

- **Higgso mechanizmas** \Rightarrow teisinga **elektrosilpnoji** sąveika.



Higgso mechanizmas (2)



Minimalus „Higgso” laukas turi keturias dalis:

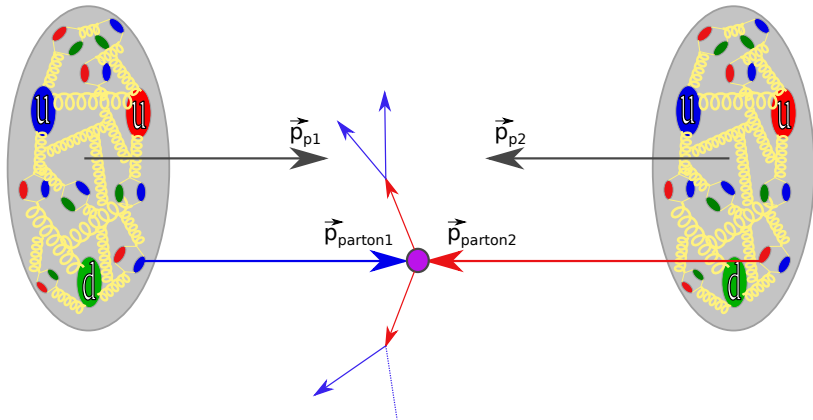
- Trys sukuria masyvius („suteikia mases”) W^\pm ir Z bozonus.
- Paskutinis — Higgso bozonas.
- Elem. dalelės **masyvios** dėl sąveikos su Higgso lauku.



Kaip tiriamas dalelių pasaulis?



Sąveikų tyrimas (1): susidūrimai



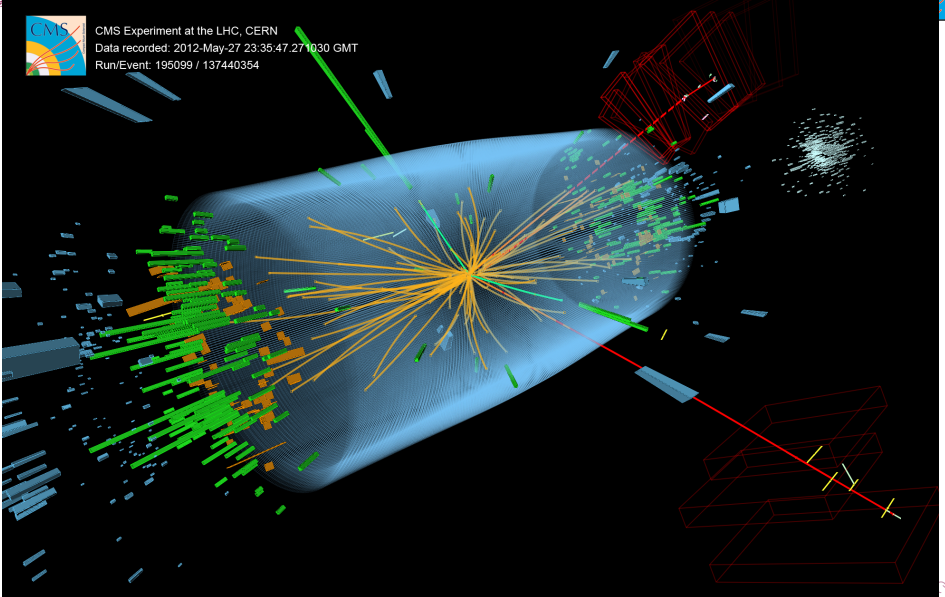
Protonas 1 \rightarrow \leftarrow Protonas 2
 $(\vec{v}_1, \vec{p}_{P1}, E_{kin1})$ $(\vec{v}_2, \vec{p}_{P2}, E_{kin2})$

1 TeV \approx 1000 \times „sunkesni“ protonai

Sąveikų tyrimas (2): realus „kadras“



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

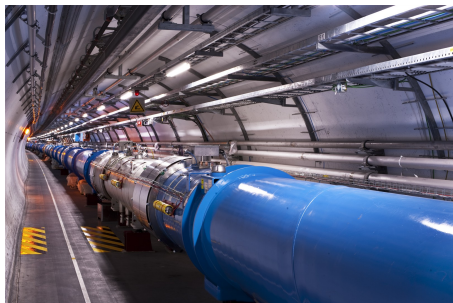
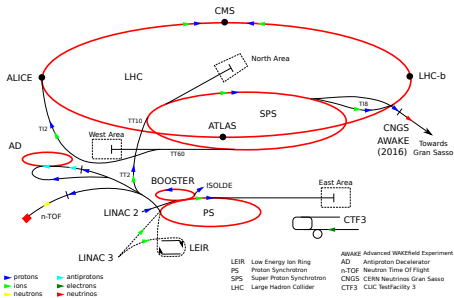




Eksperimentinė infrastruktūra



Greitintuvų kompleksas

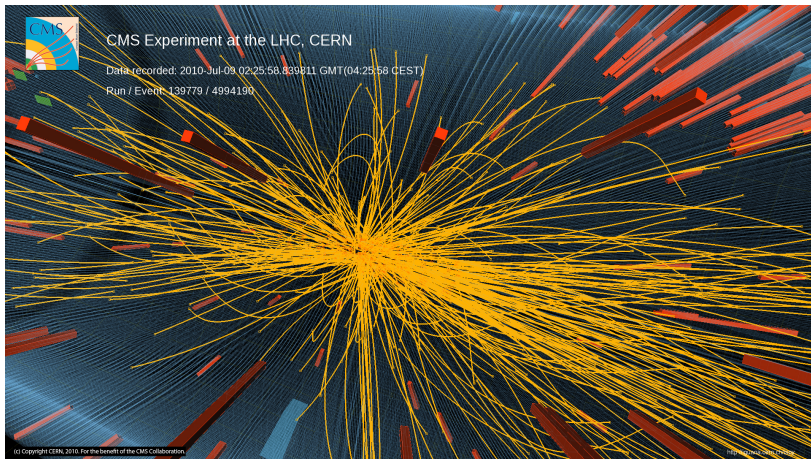


$<7.7 \text{ T @ } 1.9 \text{ K, } \sim 2800 \text{ pluoštai} \times 10^{11} \text{ protonai} \times 6.5 \text{ TeV}$

Visko reikia tam, kad įvyktų ...



Energingi susidūrimai





CERNe viskas — pasidaryk pats!





Tipinis „fotoaparatas“ — kompleksinis detektorius



Detektorius: Kompatinis miuonų solenoidas (CMS)



CMS su išpjova

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) ~16m² ~66M channels
Microstrips (80x180 μm) ~200m² ~9.6M channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying ~18,000A

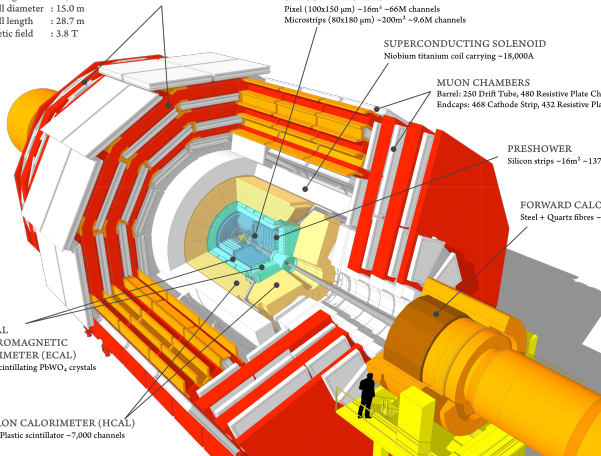
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips ~16m² ~137,000 channels

FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76,000 scintillating PbWO₄ crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels



40 MHz

×

~30–40 p–p
susidūrimų

×

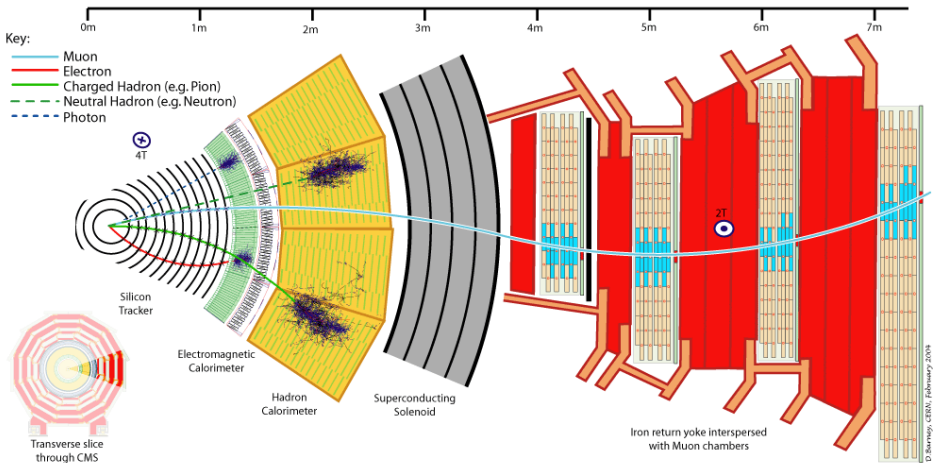
p–p = ~100
skeveldrų

=

~100 Tb/s



Dalelių identifikacija





(Sub)detektorių įvairovė



Klasifikuojama pagal

- **Tipą**
 - Trekinimas (pėdsakas)
 - Kalorimetrija (monolitinė, mėginėliais)
- **Technologiją**
 - Dujos
 - Kristalai
 - Puslaidininkiai
 - Metalai
 - Scintiliatoriai
 - Egzotika
- **Fizinius objektus/daleles**
 - Electromagnetinis
 - Hadroninis
 - Miuoninis
 - Krūvio trekeris
- **Lokaciją**
 - Vidinis
 - Išorinis
 - Bačkos (cilindrinis)
 - Dangtinis (diskinis)

Visos kombinacijos iš **aukščiau** yra naudojamos.



Kompozitiniai detektoriai („eksperimentai“)



Klasifikuojama pagal

- **Fizikos uždavinius**
 - Bendros paskirties
 - Sunkiųjų jonų
 - Preciziniai matavimai
 - Specializuoti

Pagal kontekstą:

dalys: subdetektoriai, sistemos, subsistemos.

Kompozitiniai detektoriai paprastai **aptinka visas daleles.**



Truputis CMS anatomijos...



CMS magnetas



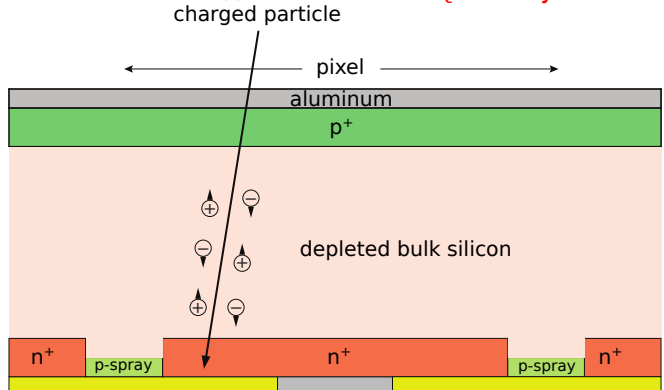
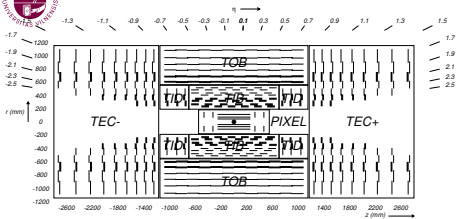
- Superlaidus solenoidinis magnetas, $B = 4 \text{ T}$
- Srovė: 20 kA
- Superlaidininkas: NbTi ($\sim 4 \text{ K}$)
- Matmenys: $13 \times 4 \text{ m}$ — telpa trekeris & kalorimetrai
- Kaina $\sim 80 \text{ MCHF}$



Puslaidininkinis trekeris

Keletas faktų:

- Si sensoriai (juostos, pikseliai).
- „Jaučia“ krūvį: e^\pm , μ^\pm , ...
- Mатуoja impulsą.
- **Taškų nustatymas.**

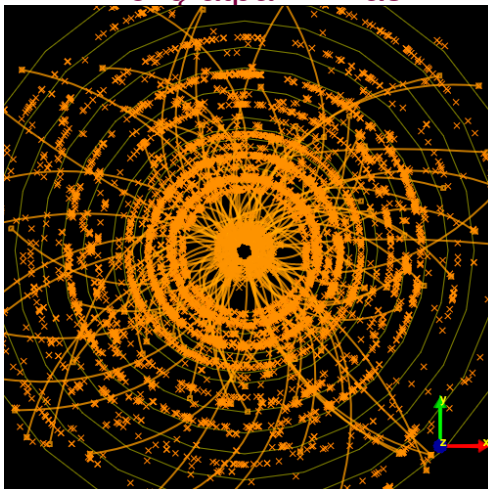




Iš arčiau pikselinis detektorius



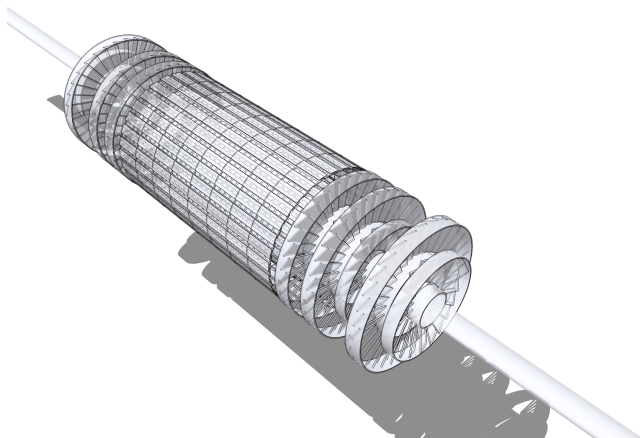
Treky atpažinimas



- >1000 įkraudų pėdsakų per susidūrimą.
- Reikia atpažinti kilmės taškus.



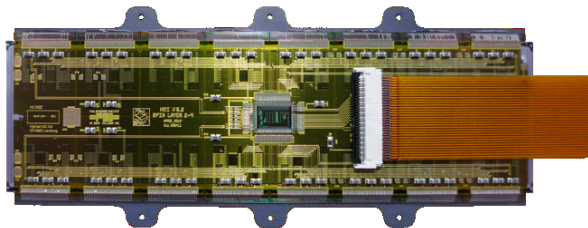
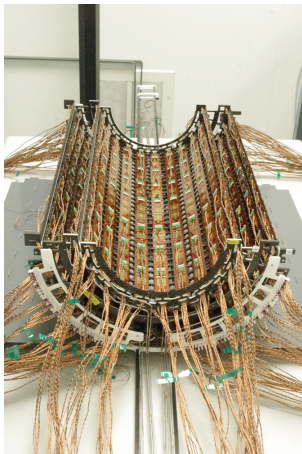
Pikselinis detektorius



- Didelis taškų tankis — pėdsakų pradžia
- Arti reakcijų: 1-asis sluoksnis $r_1 = 3$ cm
- Matmenys: 104×32 cm



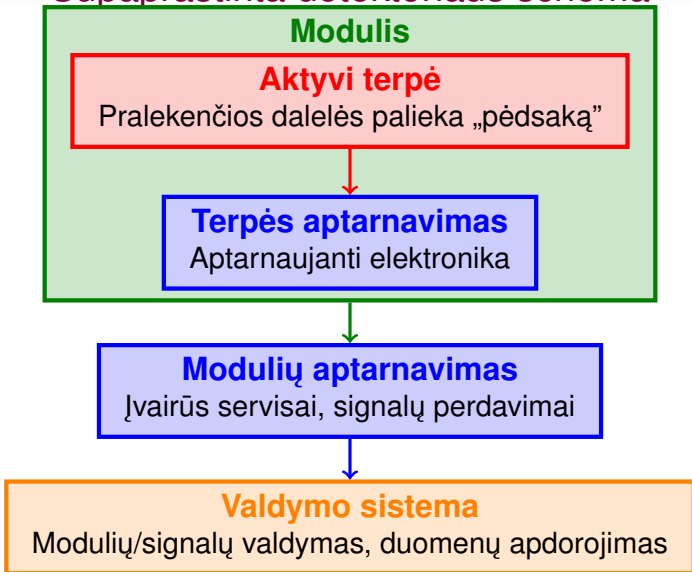
Pikselinis detektorius



- Detektorius sudarytas iš modulių
- Kiekvienas modulis turi 66 560 px
 - $2 (2 \text{ cm}) \times 8 (6.6 \text{ cm}) \times 80 \times 52 \text{ px}$
 - $1 \text{ px} = 100 \times 150 \mu\text{m}$
- 672 FPIX, 1184 BPIX moduliai

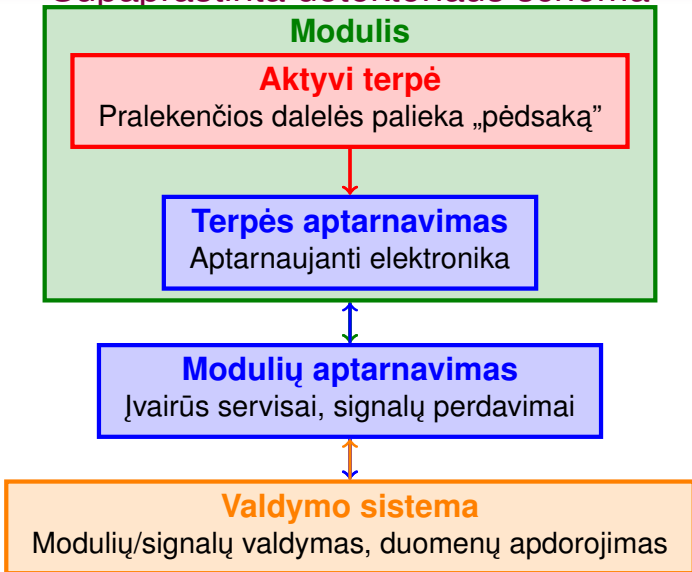


Supaprastinta detektoriaus schema



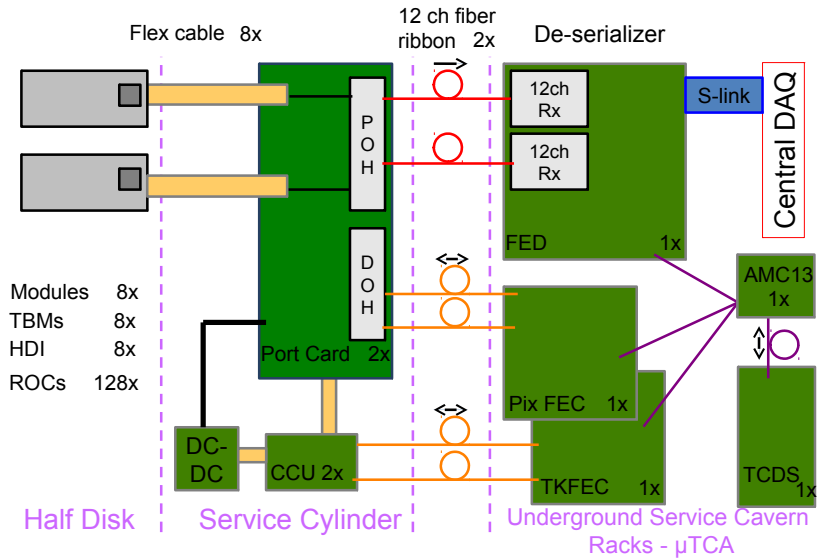


Supaprastinta detektoriaus schema





Pikselinio detektoriaus nuskaitymo schema

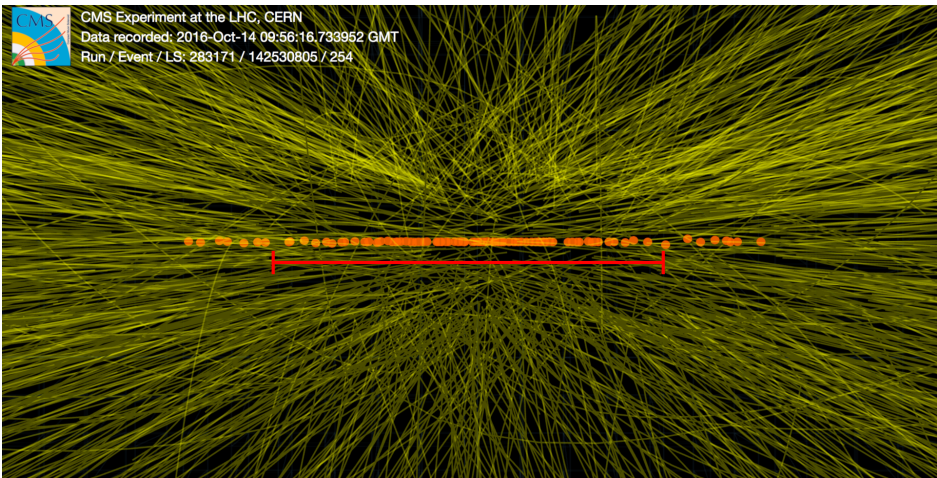




Ateityje — daugiau reakcijų



Nuotrauka su 100 p-p reakcijų (spec. paleidimas)

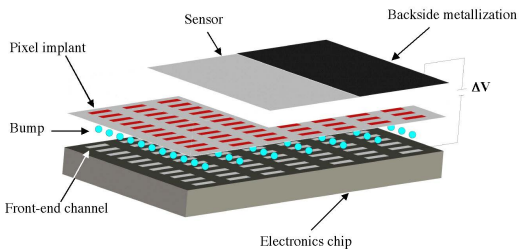
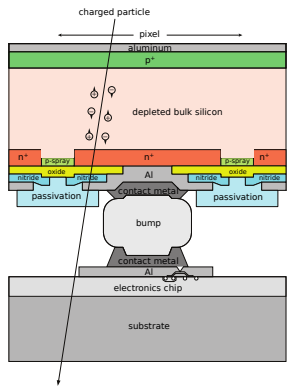


Nuo 2026 m. — ~ 200 p-p ; $\text{—|—} \approx 10$ cm





Sensorius ir nuskaitymo lustas





Iš toli...



Filtras



Viena reakcija $\sim O(1)$ Mb duomenų.

- L1 filtras „karštas“ (online): 100 kHz.
Naudojamos sistemos: miuonų, ECAL, HCAL.
- Aukšto lygio filtras sudėtingesnis (offline): 300 Hz.
Naudojamos visos sistemos. „Pilna“ rekonstrukcija.

- Susiduria 40 MHz, >140 M kanalų.

Anksčiau ir dabar:





Schematiškai

All 25 ns

40 MHz
COLLISION RATE

100 kHz
LEVEL-1 TRIGGER

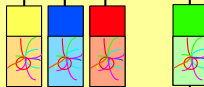
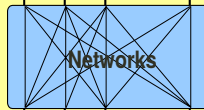
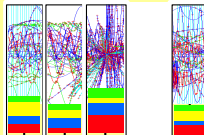
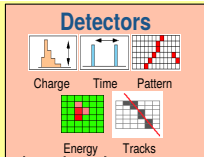
DAQ accepts
Level-1 rate of 100kHz

1 Terabit/s
(50000 DATA CHANNELS)

500 Gigabit/s

HLT (High Level Trigger) designed for
about 100Hz
- Reduction factor 1000
~2000 CPUs

Gigabit/s SERVICE LAN



Computing services

16 Million channels
3 Gigacell buffers

1 Megabyte EVENT DATA

200 Gigabyte BUFFERS
500 Readout memories

EVENT BUILDER. A large switching network (512x512 ports) with a total throughput of approximately 500 Gbit/s forms the interconnection between the sources (Readout Dual Port Memory) and the destinations (switch to Farm Interface). The Event Manager collects the status and request of event buffers and distributes event building commands (read/clear) to RDPMs

5 TeraIPS
EVENT FILTER. It consists of a set of high performance commercial processors organized into many farms convenient for on-line and off-line applications. The farm architecture is such that a single CPU processes one event

Petabyte ARCHIVE



Įdomesni nauji fizikos rezultatai iš didelių energijų režimo



Atradimo metu ir dabar

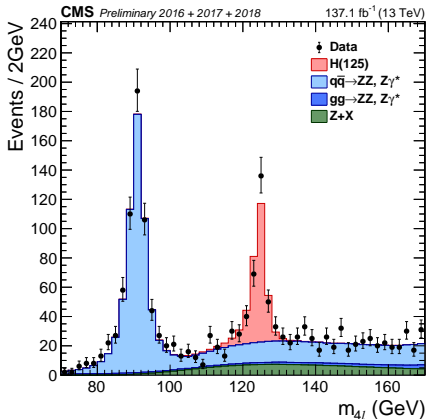
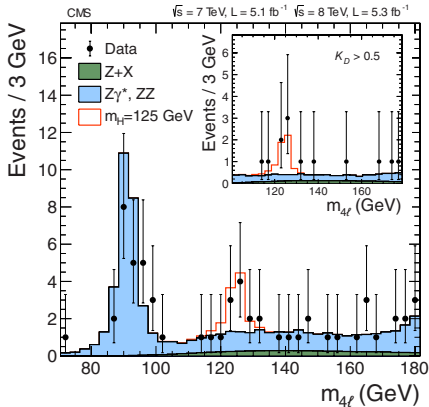


Anksčiau (2012)

Dabar

Phys. Lett. B 716 (2012) 30

CMS-PAS-HIG-19-001

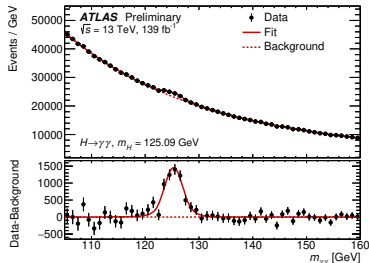
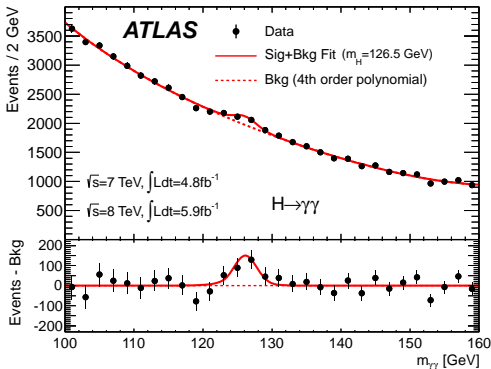




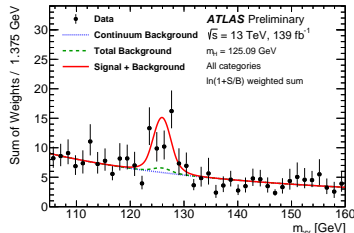
ttH — atrasta



Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29



ATLAS-CONF-2019-004

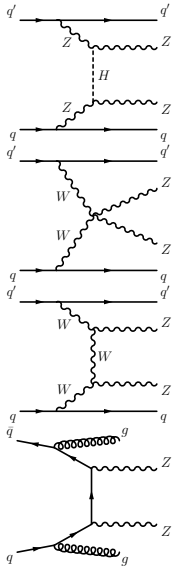


Daugėjant duomenų atskiri procesai ima ryškėti

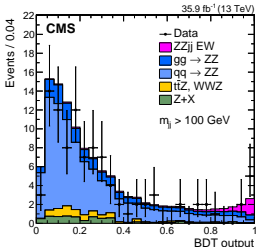
Artėja preciziniai matavimai →



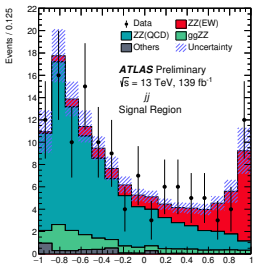
Atrastas paskutinis vektorių sklaidos procesas



Phys. Lett. B 774 (2017) 682



ATLAS-CONF-2019-033



- Paskutinis procesas: **ZZjj**
 - galutinės būsenos: $4l, 2l2\nu$
 - didelėse E: svarbi H įtaka
 - multivariaciniai klasifikatoriai
- LHC atrado visus: **VVjj**

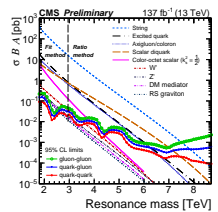
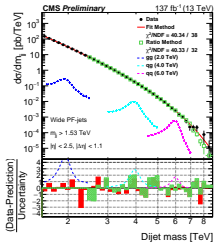
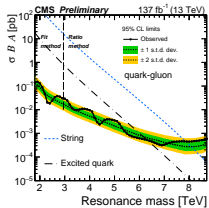
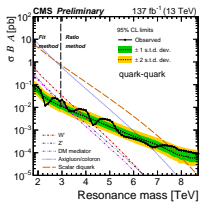
- ← ATLAS paskelbė pilną Run 2
- CMS fokusuojasi į anomalias sąveikas — rezultatai vėliau



Dvejų čiurkšlių rezonansų paieška



CMS-PAS-EXO-19-012



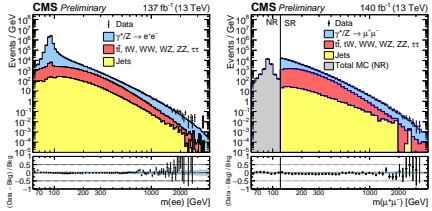
- Klasikinė rezonansų paieška
- BSM skylimai: gg, gq, qq
- Tyrimas tobulinamas:
 - Parametrinis triukšmas dabar įvertinamas iš duomenų
 - Atsižvelgiama į plačius signl.
- Naujos fizikos nematyti



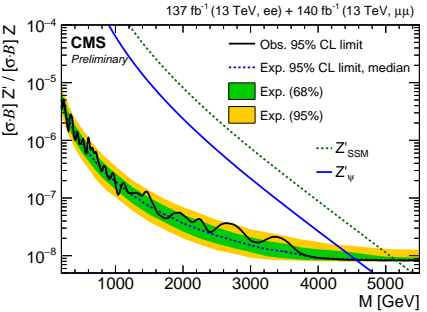
Dviejų leptonų rezonansų paieška



CMS-PAS-EXO-19-019



- Klasikinė rezonansų paieška
- Didelio p_T e ir μ
- Ieškoma naujų vektorinių dalelių (Z'_{SSM}, Z'_{ψ})
- Triukšmai iš
 - SM Drell–Yan
 - Fotoninės kilmės
- Naujos fizikos nematyti





Įdomesni nauji rezultatai iš aromatų bei sunkiųjų jonų fizikos



Dvejų $B_c^+(2S)$ būsenų (lygmenų) atradimas



- Pagrindinė būseną (skyla):

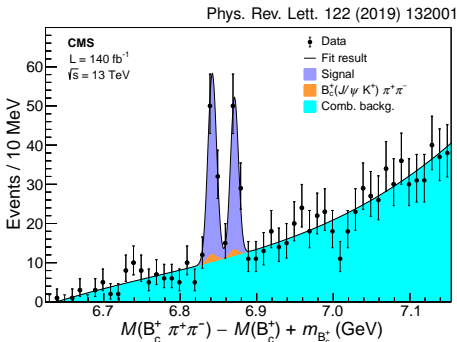
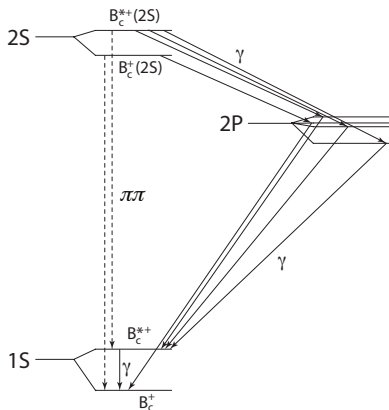
$$B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$$

- Sužadintos būsenos (skyla):

$$B_c^+(2S) \rightarrow B_c^+ \pi^+ \pi^-$$

Panaudoti visi 2 paleidimo duom.
(2016–2018 m.):

$$m[B_c^+(2S)] = 6871.0 \pm 1.2 \pm 0.8 \pm 0.8 \text{ MeV}$$





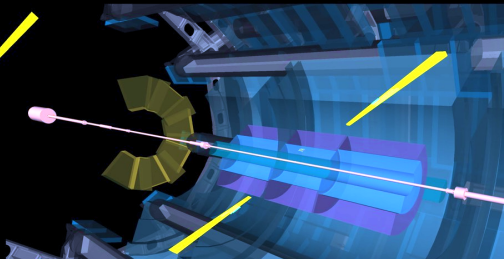
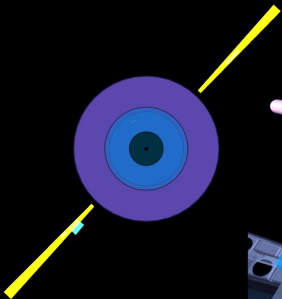
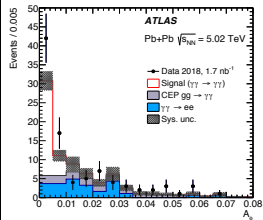
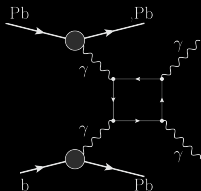
Observation of light-by-light scattering in 5.02 TeV ultraperipheral Pb+Pb collisions taken in 2018

arXiv:1904.03536

Field strength of up to 10^{25} V/m
 $\gamma\gamma$ luminosity $\sim Z^4 \sim 5 \cdot 10^7$

Look for low-energy back-to-back photon pair with no additional activity in detector

59 $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ candidate events observed for 12 ± 3 expected background (8.2σ)

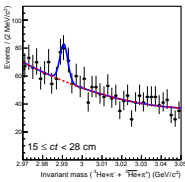
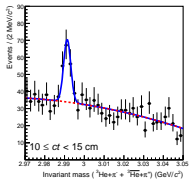
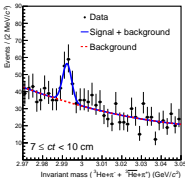
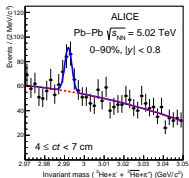


See also results on photo-nuclear interactions, "photo-nuclear ridge" using 2018 data: ATLAS-CONF-2019-022



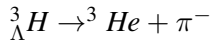
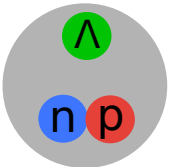
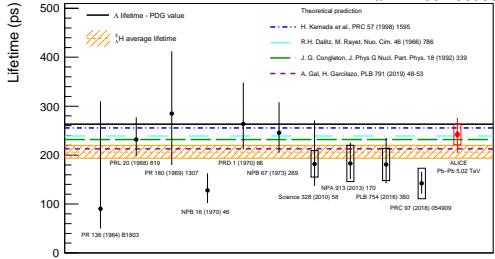


Hypertritono gyvavimo trukmė (ALICE)



Tiksliausias naujas matavimas:

arXiv:1907.06906

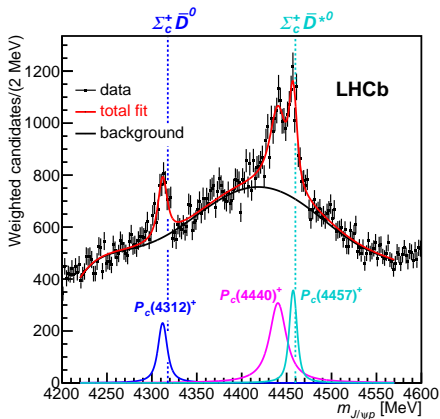




Naujų pentakvarko būseno atradimas (LHCb)



Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 222001



Su visais LHC Run 1 ir Run 2 duomenimis:

- Matomas naujas $P_C(4312)$
- Išaiškėjo dvigubas $P_C(4450)$
- Patvirtino pentakvarko atradimą
- Svabus rezultatas egzotinių būsenų suprantimui



Santrauka



Santrauka



- CERN ir LHC turi turtingą detektorių ir fizikos programą
- Rastos naujos reakcijos standartinio modelio ribose
- Nemaža dalis Run 2 rezultatų dar ruošiama



Overview
○○

Subsystems
○○○

BPIX Pics
○○○

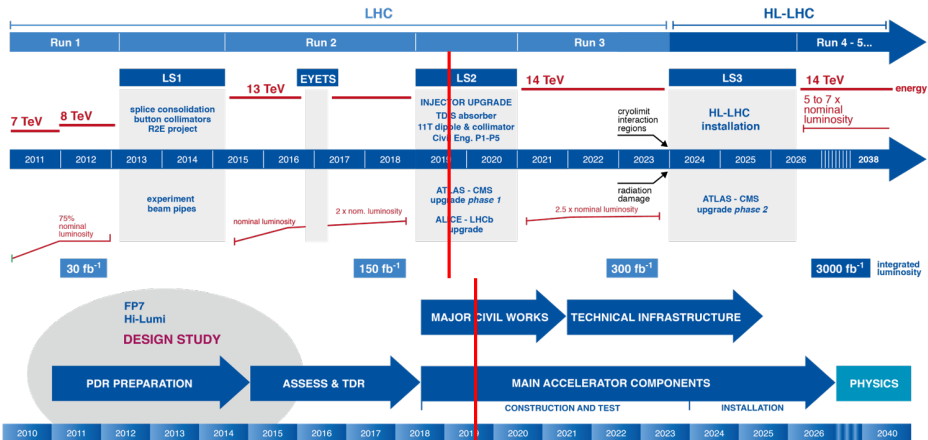
Detectors
○○○

Why Complex?
○○○



Atsarginės skaidrės

LHC / HL-LHC Plan



Akira Yamamoto's Take in Granada



Personal View on Relative Timelines

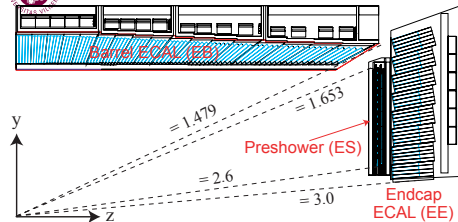
Timeline	~ 5	~ 10	~ 15	~ 20	~ 25	~ 30	~ 35
Lepton Colliders							
SRF-LC/CC	Proto/pre-series	Construction		Operation		Upgrade	
NRF—LC	Proto/pre-series	Construction		Operation		Upgrade	
Hadron Collier (CC)							
8~(11)T NbTi/(Nb3Sn)	Proto/pre-series	Construction		Operation			Upgrade
12~14T Nb ₃ Sn	Short-model R&D	Proto/Pre-series	Construction		Operation		
14~16T Nb ₃ Sn	Short-model R&D		Prototype/Pre-series		Construction		

Note: LHC experience: NbTi (10 T) R&D started in 1980's --> (8.3 T) Production started in late 1990's, in ~ 15 years

[Link to a talk](#)

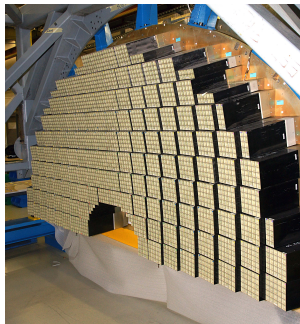
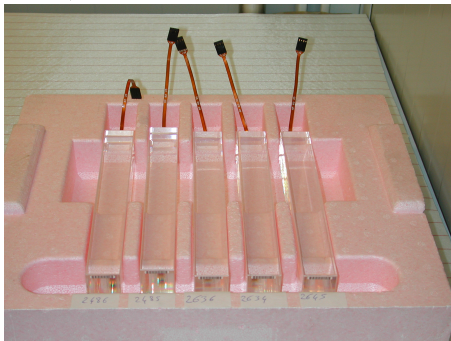


Electromagnetic Calorimeter (ECAL)



Highlights:

- Lead tungstate crystals (PbWO_4).
- Measures energy: e^\pm, γ (radiation length: $25X_0$).

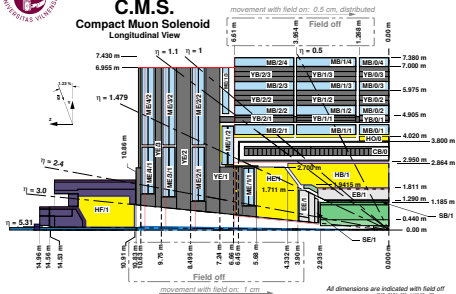




Hadron Calorimeter (HCAL)

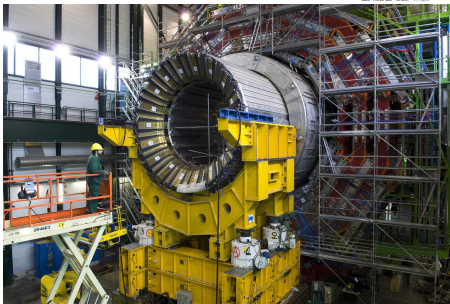


C.M.S. Compact Muon Solenoid Longitudinal View

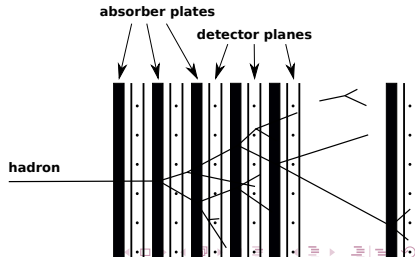


Highlights:

- Plastic scintillators within brass absorber.
- Measures (hadron) energy: p^+ , n^0 , π^\pm , K mesons.

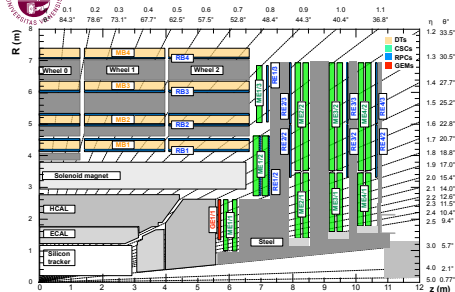


Sampling Calorimeter



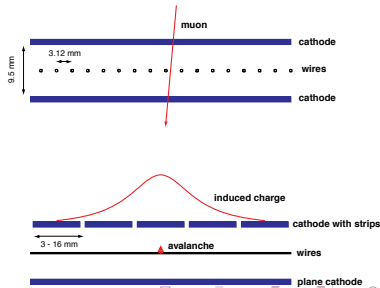
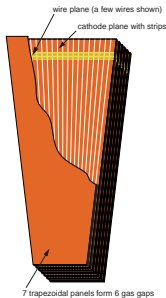
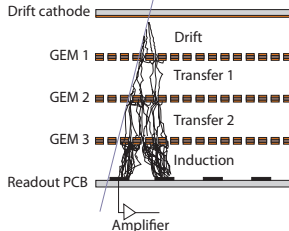


Muon Detector

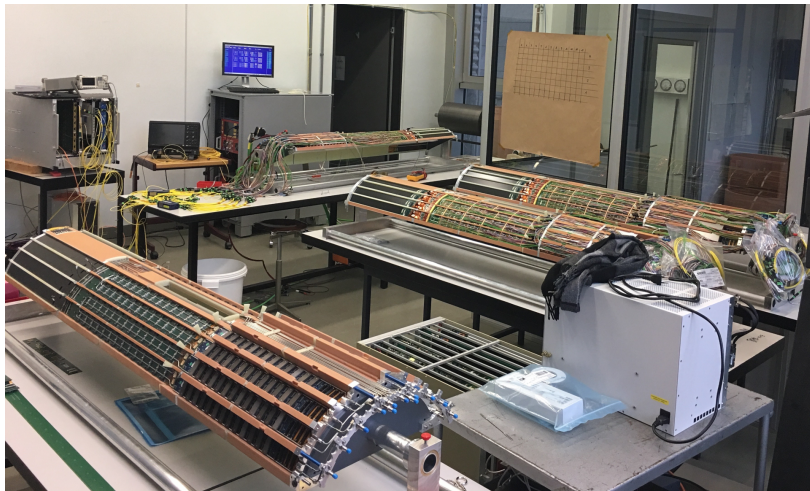


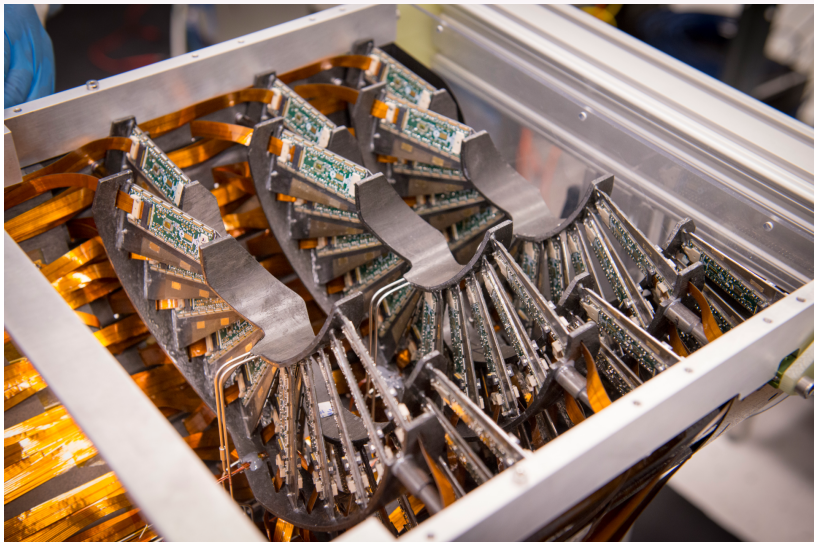
Highlights:

- Gaseous detectors.
- Important for muon identification.
- Used in fast trigger.
- 240 DT, 540 CSC, 610 RPC







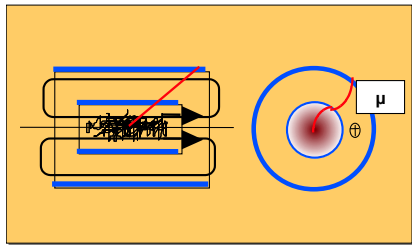
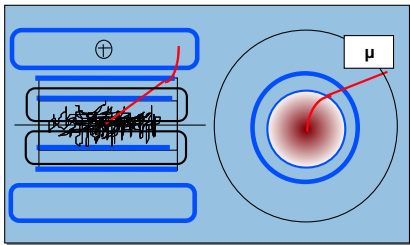
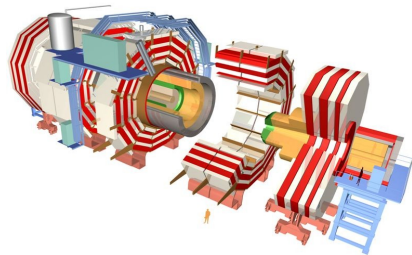
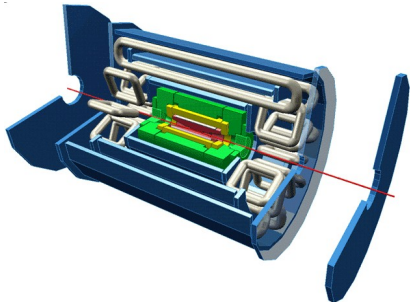




Detector Magnets — Special Ingredient



A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS) Compact Muon Solenoid (CMS)



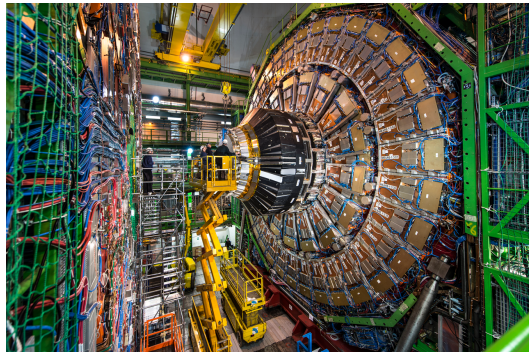
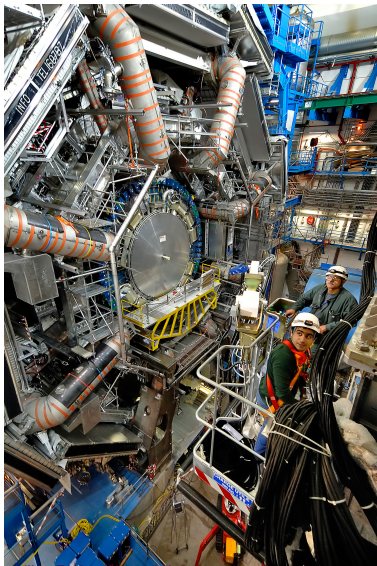


General Purpose Detectors



ATLAS

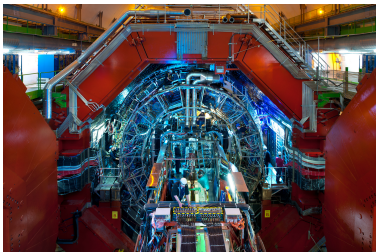
CMS



Specialized Detectors

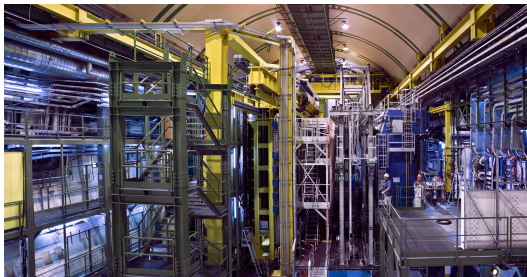


ALICE



- Heavy-ion research

LHCb



- Precision studies

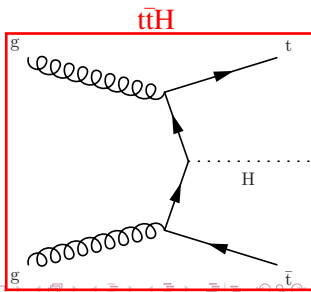
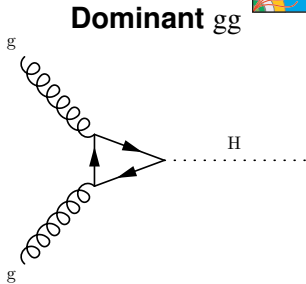


Why such complexity?

Stuff is rare... $t\bar{t}H$



- Single p-p collision ≈ 75 mb.
- With ~ 40 p-p $\times 40$ MHz = **Higgs a second.**



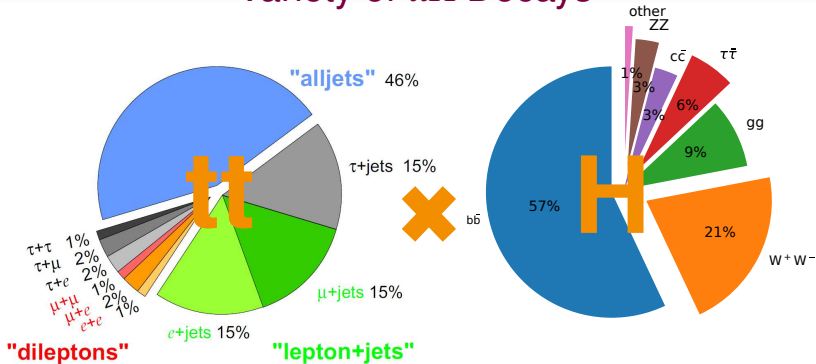
Mode	gg	VBF	VH	$t\bar{t}H$	$b\bar{b}H$
σ , pb	43.9	3.7	2.2	0.5	0.5

\sqrt{s} , TeV	7	8	13
σ , fb	89	133	507

Almost **4x better with 13 TeV!**



Variety of $t\bar{t}H$ Decays



- $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$: dileptonic, $l+jets$ [, hadronic]
- $t\bar{t}H, H \rightarrow \tau\bar{\tau}$: universal ("inclusive") categories
- $t\bar{t}H, H \rightarrow l_i$ (multileptonic): dileptonic, $l+jets$
- $t\bar{t}H, H \rightarrow \gamma\gamma$: leptonic (dileptonic, $l+jets$), hadronic
- $t\bar{t}H, H \xrightarrow{ZZ^*} 4l$: one special category

More events ↑

↓ Fewer backgrounds