



CMS detektoriai

bei kur galime veikti kartu?

Aurelijus Rinkevičius

Vilniaus universitetas

2019-06-27



Trumpai apie pranešėją



Keletas gyvenimo istorijos faktų:

2010 BSc, VU Fizikos fakultetas.

2014 PhD, Floridos universitetas (University of Florida, FL).
“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 Postdoc, Kornelio universitetas (Cornell University, NY).

Co-koordinuoja keturis (Cornell) doktorantus top–Higgs sąveikų tyrimuose.

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

Dalyvauja CMS pikselinio trekerio veikloje.



Įvadas



Kas yra „CERN Centras“?



Branduolių ir elementariųjų dalelių fizikos centras
(Bendradarbiavimo su CERN centras), toliau Centras.

Kodėl įsteigta?

- CERNo pageidavimas bendravimui su Lietuva.

Kokios užduotys?

- Koordinuoti¹ CERN veiklas Lietuvoje ~ **nacionalinis**.
- Komunikuoti CERN–Lietuva, Lietuva–Lietuva.
- Didelių energijų fizikos „kompetencijos“ centras.
- Vienyti CERNo tematikomis dirbančius tyrėjus ir inžinierius.

¹ Iki galo nenuspręstos žodžio galiojimo ribos



Bendradarbiavimas su Centru



Centras ~ (virtualus) *sui generis* VU padalinys Fizikos fakultete

Darbuotojai (~ grupės)

Vadovas: dr. Aurelijus Rinkevičius

Pavaduotojas (savanoriauja): dr. Andrius Juodagalvis

Reikalų tvarkytojas (~0.3 etato): Mindaugas Macijauskas

Afilijuotos grupės (glaudžiai bendradarbiaujančios)

VU dr. Juodagalvis — DEF eksperimentas

VU doc. Gajdosik — DEF teorija

VU prof. Gaubas — medžiagų mokslas

VU prof. Tamulaitis — medžiagų mokslas

VU prof. Vaitkus — medžiagų mokslas

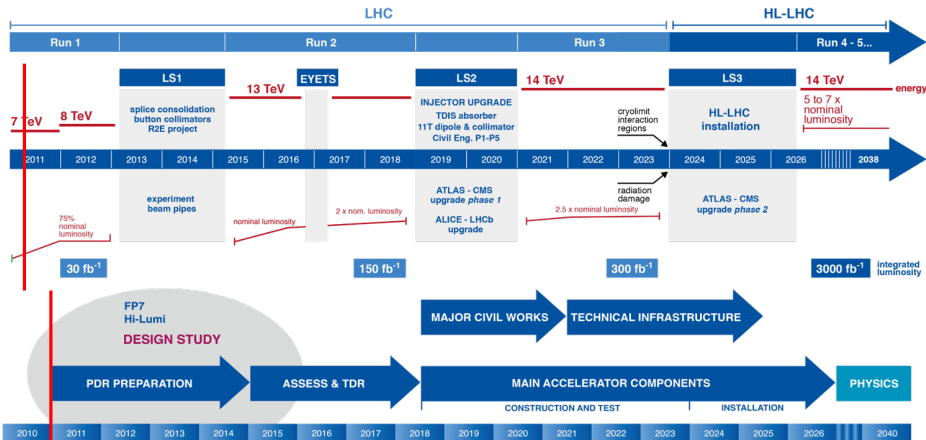
Bendradarbiaujančios grupės

KTU doc. Abakevičienė — medžiagų mokslas

KTU prof. Tamulevičius — medžiagų mokslas

VU doc. Rapševičius — duomenų mokslas, IT

LHC / HL-LHC Plan





Akiros Yamamoto perspektyva pateikta Granadoje



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 Nb3Sn | Short-model R&D | | Proto/Pre-series | Construction | | Operation | |
| 14~16T Nb3Sn | 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

A. Yamamoto, 190513bb

54

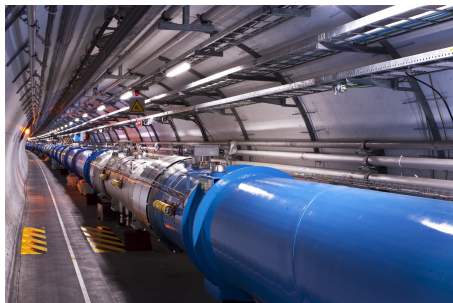
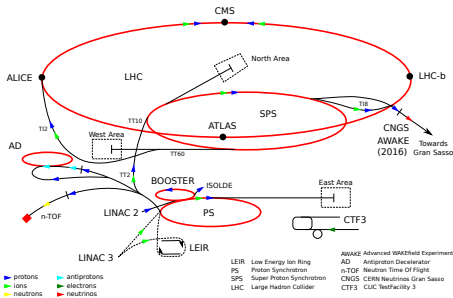
Nuoroda į pranešimą



Šiandien turime...



Greitintuvų kompleksas

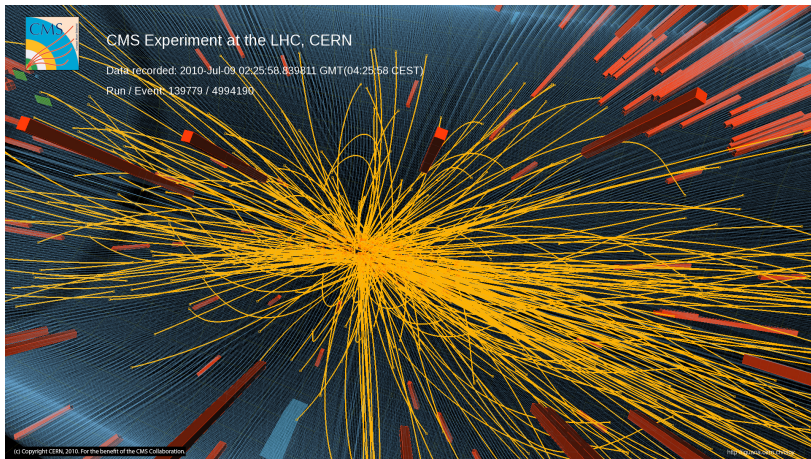


$<7.7 \text{ T @ } 1.9 \text{ K, } \sim 2800 \text{ pluoštelių} \times 10^{11} \text{ protonų} \times 6.5 \text{ TeV}$

Viskas reikalinga tam, kad įvyktų ...



Energingi susidūrimai





Viskas CERNe — pasidaryk pats!





Tipinis „fotoaparatas“ — kompleksinis detektorius



Detektorius: Kompaktiškasis Miunų Solenoidas



CMS detektorius su išpjova (0 fazė)

40 MHz

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

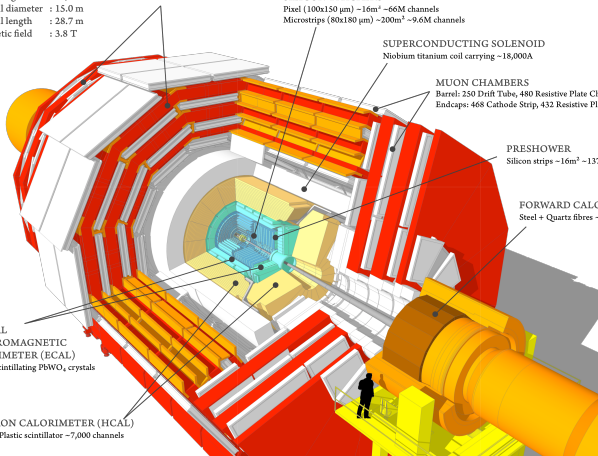
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

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



×

~30–40 p-p
susidūrimų

×

p-p = ~100
skeveldrų

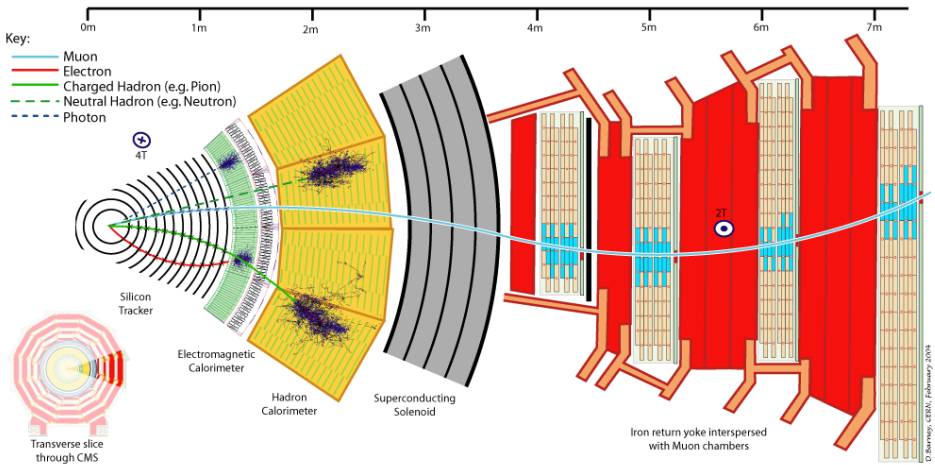
=

~100 Tb/s

| Galutinė dalelė | Rezoliucija |
|-----------------|-----------------|
| γ | 1.5–5% @ 60 GeV |
| e | 2–4% @ 10 GeV |
| μ | 1–1.5% @ 10 GeV |
| j | $\sigma(10)\%$ |



Skeveldrų/dalelių Identifikacija



D. Barney, CERN, February 2018



(Sub)detektorių rūšys



Skirstomi pagal

- **Tipą**
 - Trekinimas (~pėdsakas)
 - Kalorimetrija (vienalytis, mėginėliais)
- **Technologiją**
 - Dujinis
 - Kristalinis
 - Puslaidininkinis
 - Metalinis
 - Scintiliacinis/šviesolaidinis
 - Egzotika
- **Fizikinius objektus/daleles**
 - Elektromagnetinis
 - Hadroninis
 - Muoninis
 - Krūvininkų trekeris
- **Lokaciją**
 - Vidinis
 - Išorinis
 - Bačkos / cilindrinis
 - Dangtinis / antgalinis

Galimos **visos kombinacijos** iš aukščiau **pateiktų elementų**



CMS anatomija



CMS Magnetas



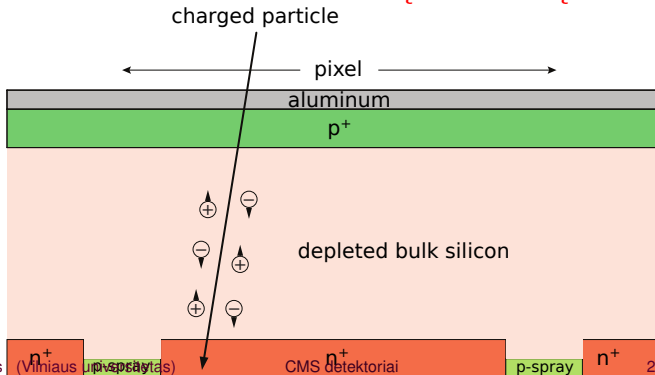
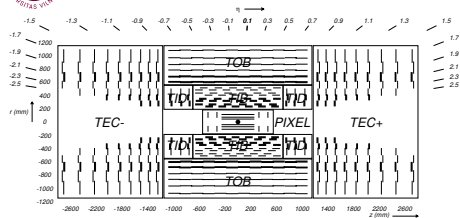
- Superlaidus solenoidinis magnetas, $B = 4 \text{ T}$
- Srovės stipris: 20 kA
- Superlaidininkas: NbTi ($\sim 4 \text{ K}$)
- Matmenys: $13 \times 4 \text{ m}$ — talpiną trekerį ir kalorimetrus
- Kaina $\sim 80 \text{ MCHF}$



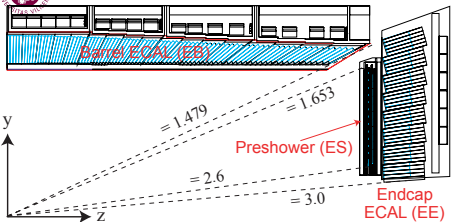
Puslaidininkinis Trekeris

Esminiai faktai:

- Silicio sensoriai (juostos, pikseliai).
- Junta krūvininkus: e^{\pm} , μ^{\pm} , ...
- Impulso matavimas.
- **Sąveikos taškų identifikacija.**

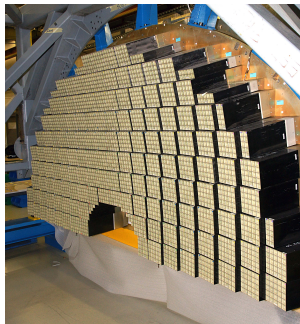
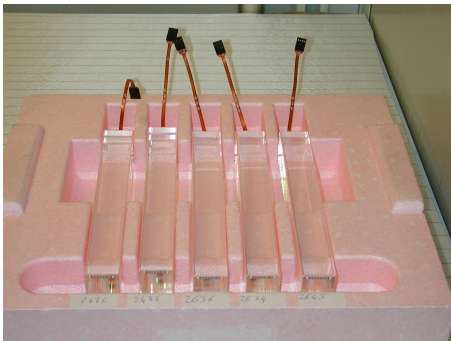


Elektromagnetinis Kalorimetras (ECAL)



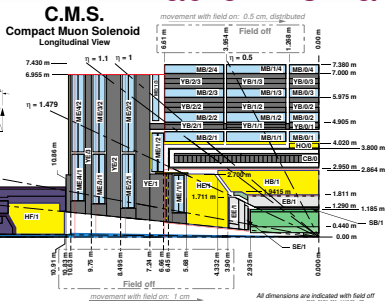
Esminiai faktai:

- Švino wolframato kristalai (PbWO_4).
- Matouoja energiją: e^\pm, γ (radiacinis ilgis: $25X_0$).



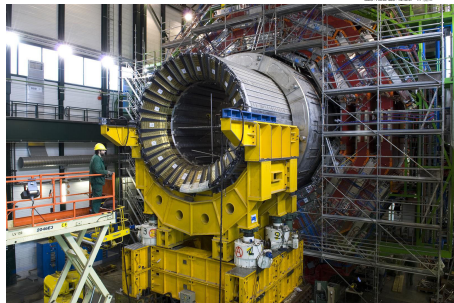


Hadroninis Kalorimetras (HCAL)

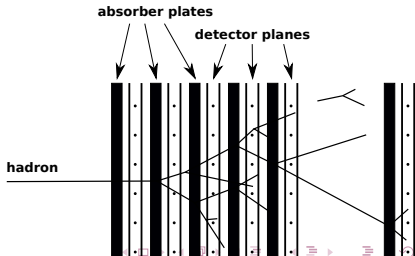


Esminiai faktai:

- Plastikiniai scintiliatoriai suspausti žalvariniais sugertuvais.
- Matuoja (hadronų) energiją: p^+ , n^0 , π^\pm , K mezonai.



Sampling Calorimeter

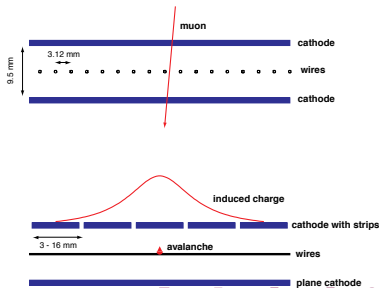
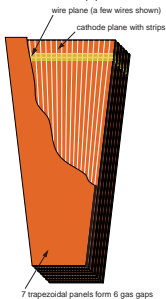
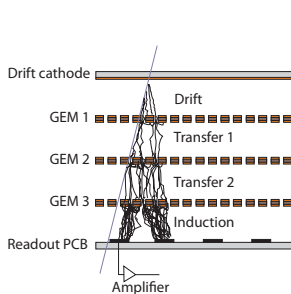
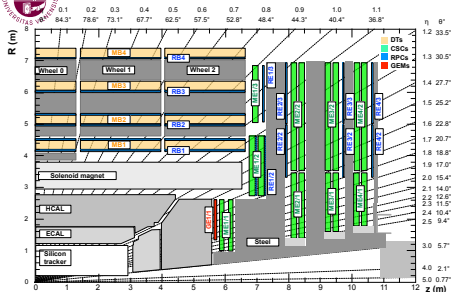




Miuoninis Detektorius

Esminiai faktai:

- Dujiniai detektoriai.
- Svarbūs miuonų identifikacijai.
- Naudojama greitame filtre.
- 240 DT, 540 CSC, 610 RPC





Filtras (Trigger)



Vienas įvykis/susidūrimas $\sim O(1)$ Mb duomenų.

- Susidūrimai vyksta 40 MHz dažniu, >140 M kanalų.
- Pirmos pakopos filtras „karštas“ (online): 100 kHz.
Naudojamos sistemos: miuoninė, ECAL, HCAL.
- Aukšto lygio filtras labiau sofistikuotas (offline): 300 Hz.
Panaudojamos visos sistemos. Apytikslė „pilna“ rekonstrukcija.

Anksčiau ir dabar:





Schematiškai

All 25 ns



40 MHz
COLLISION RATE

100 kHz
LEVEL-1 TRIGGER

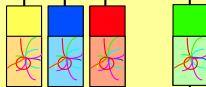
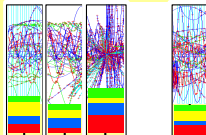
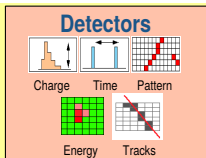
DAQ accepts
Level-1 rate of 100kHz

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 filters 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

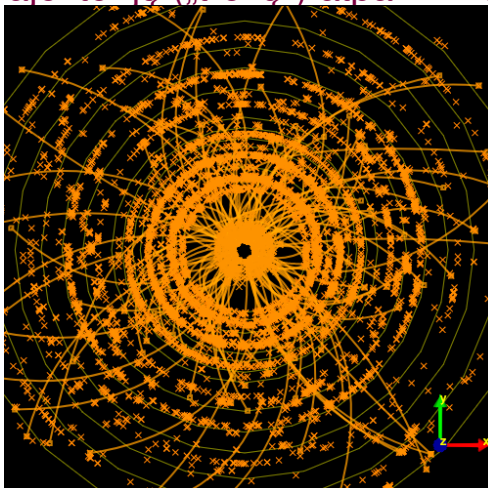


Pikseliniai detektoriai

dabar, ateityje ir kam to reikia?



Trajektorijų („trekų“) atpažinimas



- >1000 krūvininkų per susidūrimą.
- Juos reikia suvesti į reakcijas.



Supaprastinta detektoriaus schema

Modulis

Aktyvi terpė

Pralekiančios dalelės palieka „pėdsaką“

Terpės aptarnavimas

Aptarnaujanti elektronika

Modulių aptarnavimas

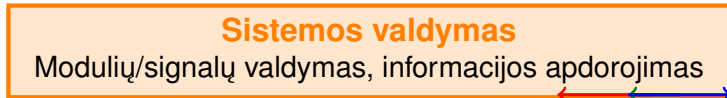
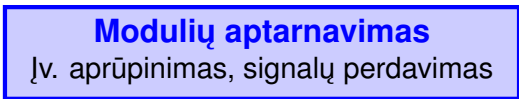
Įv. aprūpinimas, signalų perdavimas

Sistemos valdymas

Modulių/signalų valdymas, informacijos apdorojimas

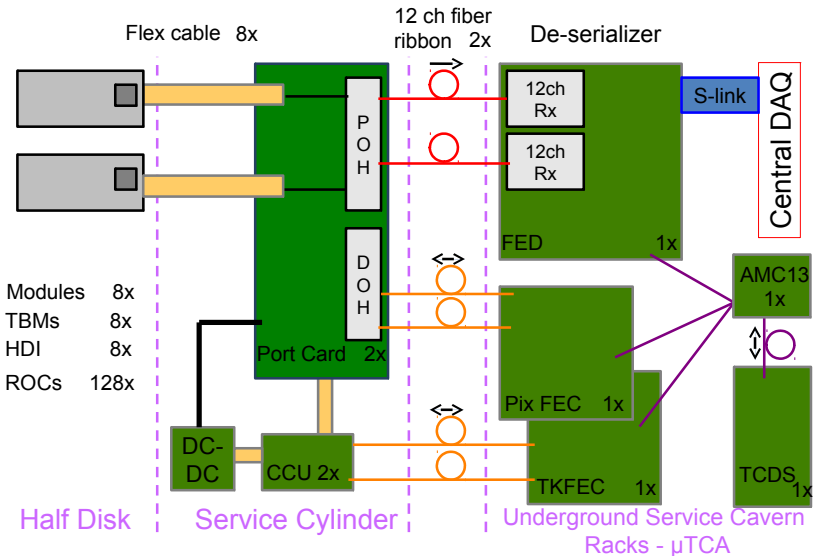


Supaprastinta detektoriaus schema





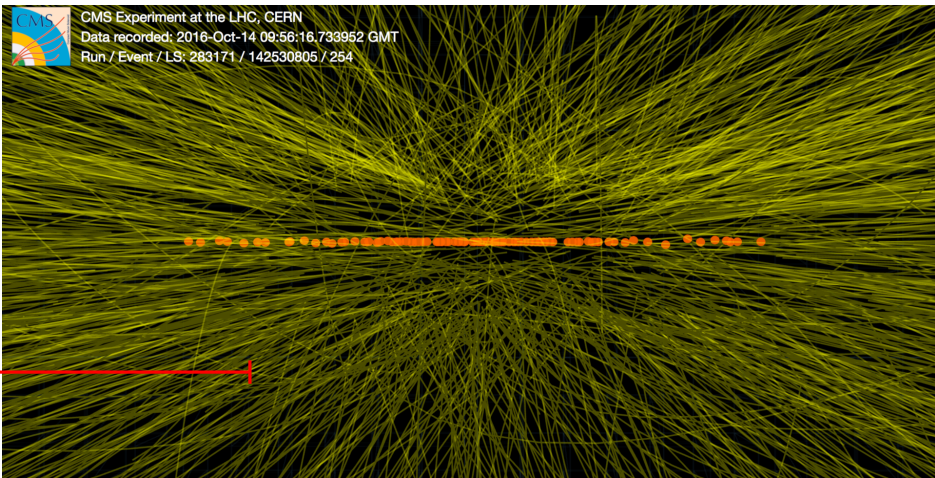
Pilna pirmos fazės Pixel detektoriaus schema





Ateityje vienu metu susidurs daugiau

Taip atrodo 100 susidūrimų (spec. paleidimas)

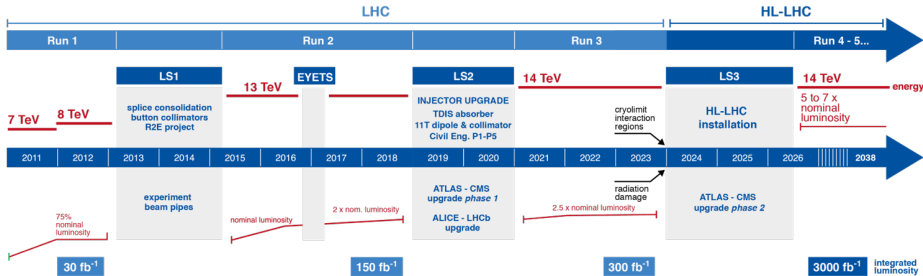


Nuo 2026 m. — ~ 200 p-p ; |—| ≈ 10 cm





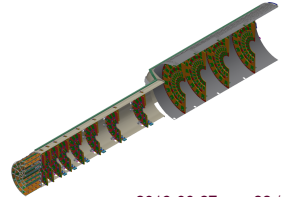
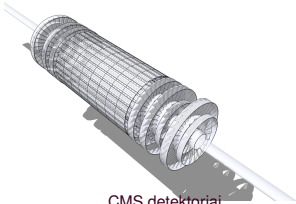
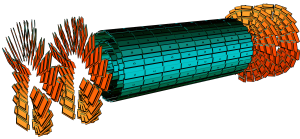
Pikseliniai detektoriai ir HL-LHC



0 fazė

1 fazė

2 fazė

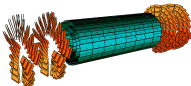
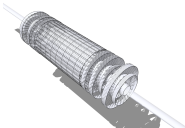
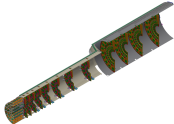




CMS pikseliniai detektoriai



Atnaujinimai padeda susitvarkyti su didėjančiu šviesiu

| | 0 fazė | 1 fazė | 2 fazė |
|--|---|---|---|
| |  |  |  |
| Šviesis, $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{34}$ | $2 \cdot 10^{34}$ | $5 \cdot 10^{34}$ |
| Susidūrimų | 20 | 40 | 200 |
| Mechanika | 3 sl. 4 diskai | 4 sl. 6 diskai | 4 sl. 24 diskai |
| r_1 , cm | 4 | 3 | 3 |
| Si plotas, m^2 | 1 | 1 | 5 |
| Kanalų, M | 66 | 124 | 2000 |
| Px dydis, μm | 100×150 | 100×150 | $25 \times 100 / 50 \times 50$ |
| Apšvita, Mrad | 100 | 300 | 1000 |

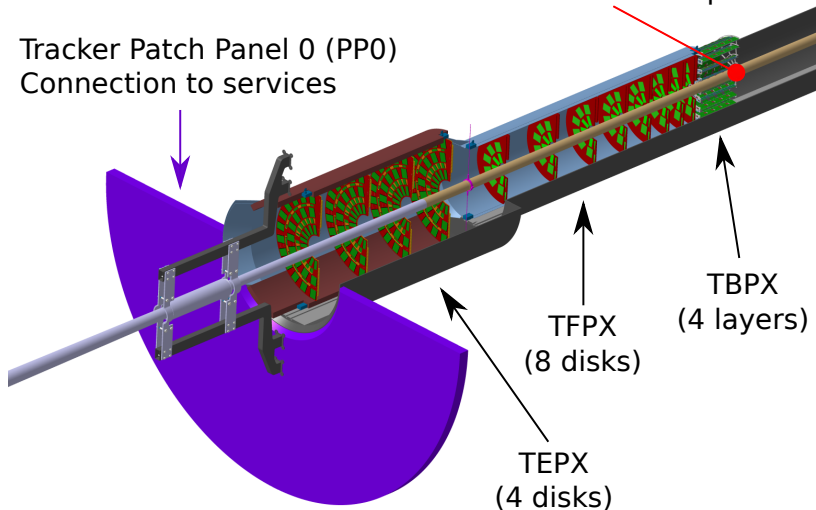


CMS antros fazės vidaus trekerio 1/4



Beam interaction point

Tracker Patch Panel 0 (PP0)
Connection to services



CMS phase 2 tracker TDR: <https://cds.cern.ch/record/2272264>



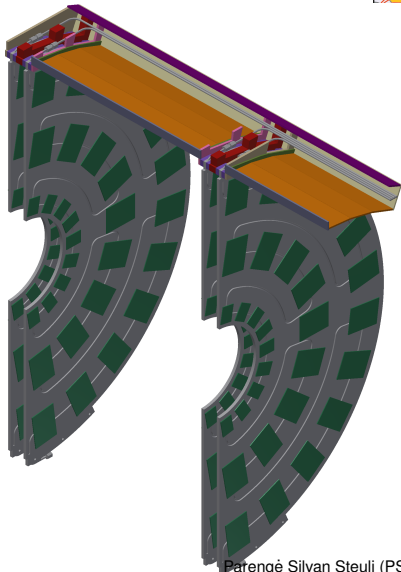
TEPX detektorius



- Pilnas diskas = du dvigubi (+dvipusiai) diskai ($2 \cdot 2 = 4$ 'D')
- $2 \cdot 'D' = 5$ žiedai su moduliais
- Servisai — įpjovose (komunikacijos, maitinimas, aušinimas)

Piešinyje:

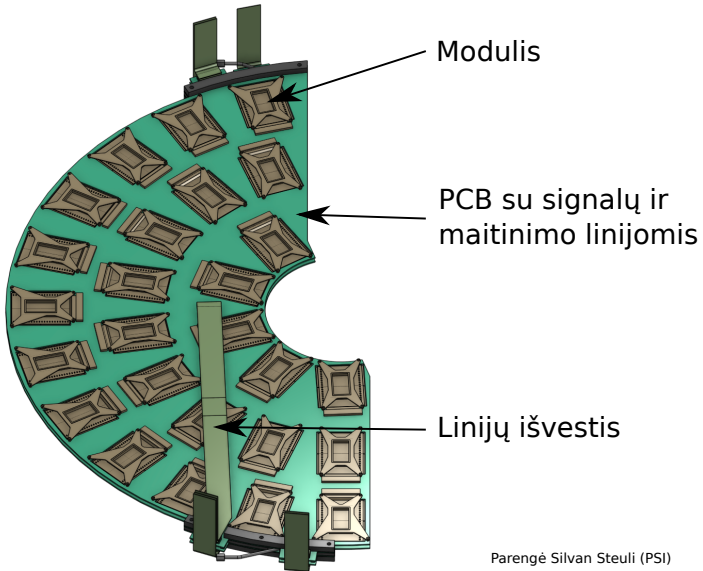
- 1/8 viso detektoriaus
- $2R = 50$ cm



Parengė Silvan Steuli (PSI)



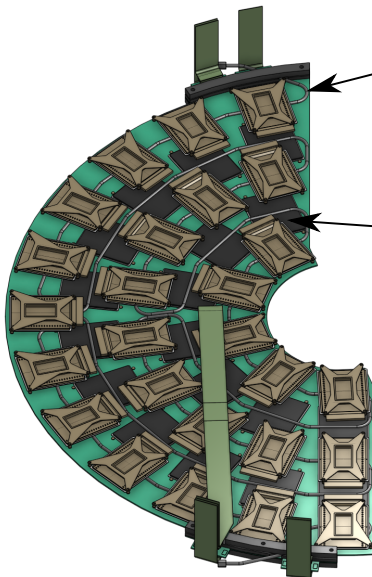
TEPX disko sandara (1/2)



Parengė Silvan Steuli (PSI)



TEPX disko sandara (2/2)



Aušinimo vamzdeliai (kilpos)

Aušinimo plokštelės

Parengė Silvan Steuli (PSI)

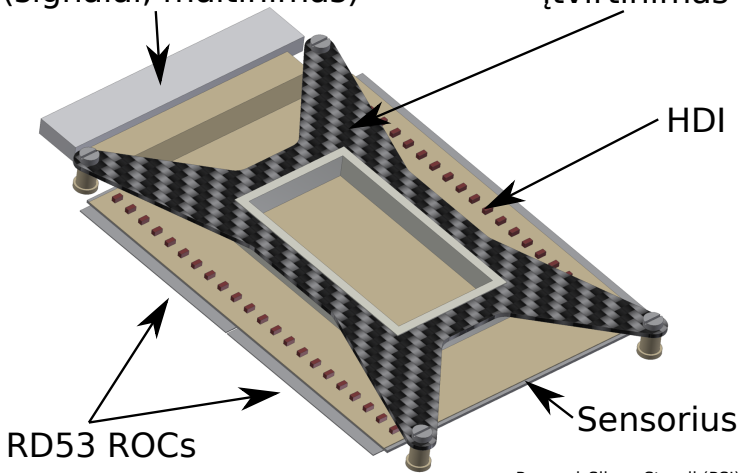




TEPX modulis (2x2 ROCai per sensorių)

Modulio jungtis
(signalai, maitinimas)

Modulio
įtvirtinimas



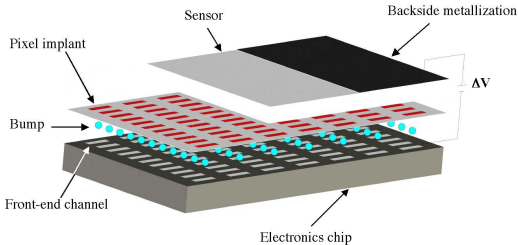
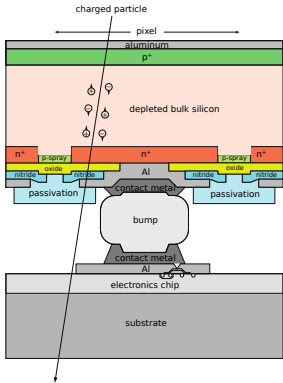
Parengė Silvan Streuli (PSI)



Sensorius ir nuskaitymo lustas



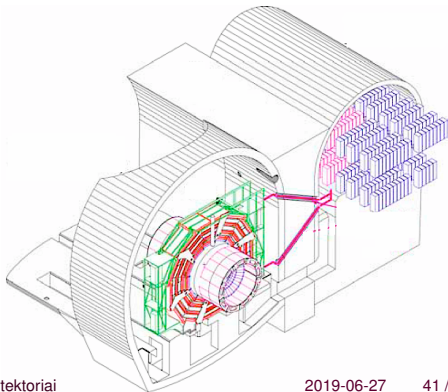
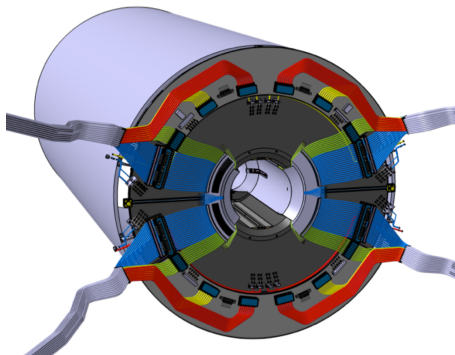
- Sensoriai ir nuskaitymo lustai kuriami bendradarbiaujant:
 - TBPX, TFPX, TEPX (CMS)
 - ATLAS su CMS per RD53
<http://rd53.web.cern.ch/rd53/>
 - Galutinė architektūra nenuspręsta (planarinė, 3D)





Trekeris CMS infrastruktūroje

- Didelė užpilda ⇒ didelio pralaidumo optinės jungtys
 - CERN kuria IpGBT/VL+ su 10 Gbps
- Daugiau pikselių/modulių ⇒ padidėjusios energijos sąnaudos
 - 4 → 40 kW
 - Planuojamas serijinis maitinimas
- Mažo tankio dvifazis CO₂ aušinimas <-20°C





Modulių gamyba



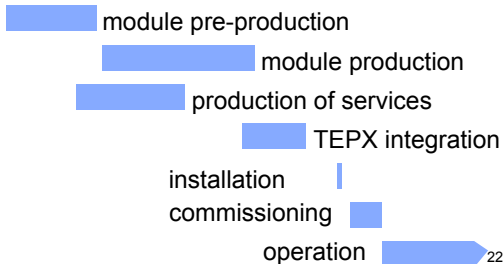
Timeline

| 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 |
|-------|------|------|-------|------|------|------|------|--------|------|
| Run 2 | LS 2 | | Run 3 | | | LS 3 | | HL-LHC | |



R&D of

- readout chip
- sensor
- module concept
- optical links
- serial powering
- mechanical design

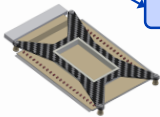
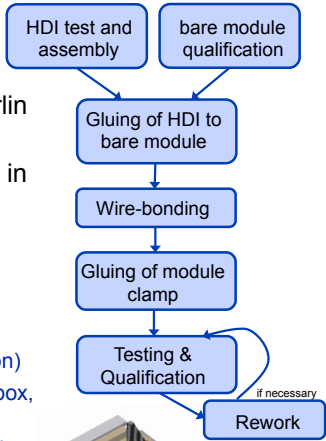




Module Production

- Need to produce $O(2000)$ modules for TEPX
- Bare modules (sensors bump bonded to readout chips) produced @ IZM Berlin
- Manual and semi-automated (gantry) procedures used for module assembly in the past
- Needed infrastructure and skills:
 - production line for module & clamp gluing (tools, jigs, alignment)
 - Wire-bonding machine with operator
 - Setup for bare module testing (probe station)
 - Setup for module testing (test board, cold box, x-ray box)
 - Person power manual procedures and testing
- Option of having distributed system with competence centers

Assembly Steps

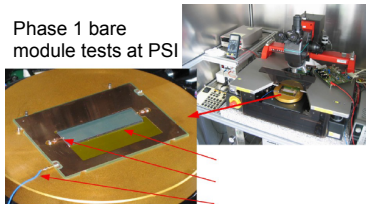




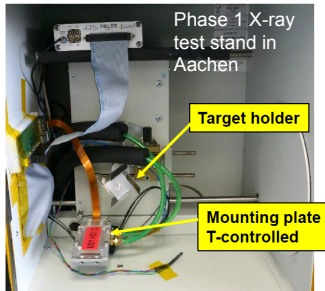
Module Testing

- Bare-module tests to test sensors and ROCs right after bump-bonding
 - IV curves, ID/IA, basic functionality, bump-bonds
- Full module tests and qualification according to well-defined procedure
 - IV curves
 - ROC and pixel functionality
 - Thermal cycling ($\pm 30^{\circ}\text{C}$)
 - High-rate x-ray tests
 - x-ray calibration
- Module grading, maintenance of data base, module storage, logistics,...

Phase 1 bare module tests at PSI



Phase 1 X-ray test stand in Aachen





Ką galime veikti kartu? (1)



- Mechanika, aušinimas?
- Modulių konstravimas
 - mikrolitavimas
 - „sumuštinio lipdymas”
- Modulių testavimas
- Modulių/detektoriaus valdymo sistema (DAQ)
 - sistemos kūrimas, vystymas
 - kalibravimo funkcijos
- Modulių integravimas → PSI

CMS antra fazė ar ateities greitintuvo detektorius?



Ką galime veikti kartu? (2) Kitos veiklos



- Duomenų tyrimai / duomenų mokslas
- Duomenų tyrimų platforma
- Greitintuvai + detektoriai
- Laikinės skyros detektoriai (MTD)
- Kita



Nuorodos



- Lea Caminada (PSI) prist. apie TEPX [čia](#)
- Malte Backhaus (ETHZ) prist. apie 2 fazės pikselinį detektorių [čia](#)
- 1 fazės pikselinio detektoriaus TDR [čia](#)
- 2 fazės trekerio (pikselinis detektorius viduje) TDR [čia](#)



Papildoma medžiaga



