

CMS-Rio

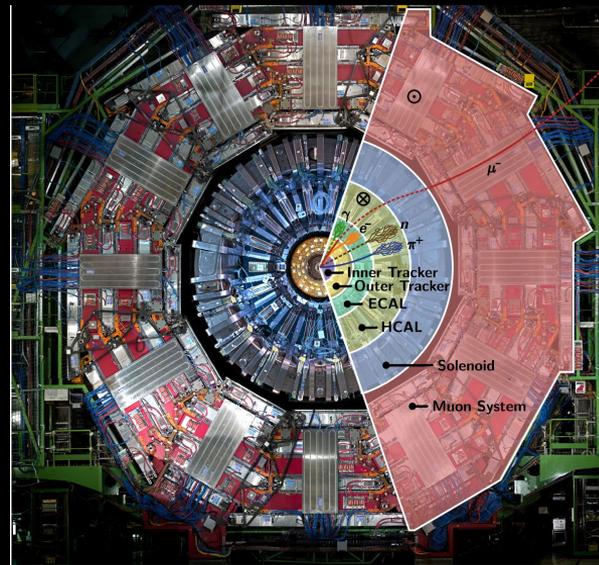
Dilson de Jesus Damião
dilson@uerj.br

Física de Altas Energias, uma área multidisciplinar de ciência fundamental e aplicada, a serviço do desenvolvimento social e tecnológico do Brasil

A colaboração CMS

“opera e coleta dados do Compact Muon Solenoid, um dos detectores de partículas de uso geral do Large Hadron Collider do CERN. Colaboradores de todo o mundo ajudaram a projetar e fabricar componentes do detector. Os dados coletados pelo CMS são compartilhados com diversos centros de computação por meio do Worldwide LHC Computing Grid, que ao serem analisados promovem o conhecimento da humanidade sobre as leis básicas do nosso Universo.”

<https://cms-info.web.cern.ch/cms-collaboration/about/>



CMS Overview in 2024

The CMS experiment has **5873** active members from **257** institutes coming from **58** countries.



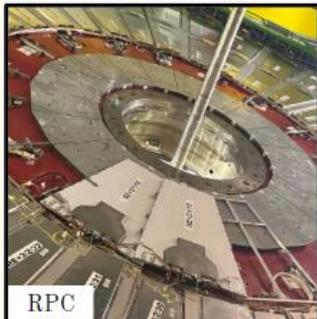
2062 Phd Physicists (396 women 1666 men)
1171 Physics Doctoral Students (319 women 852 men)
1297 Non Doctoral Students (364 women 933 men)
978 Engineers (147 women 831 men)
252 Technicians (22 women 230 men)
108 Administratives (69 women 39 men)

Projetos realizados

Potencial de envolvimento da indústria nacional

Infraestrutura

1. Laboratórios de instrumentação, pesquisa e desenvolvimento
2. HEPGrid
 - a. T2-UERJ - processamento de dados para o experimento CMS
 - b. UCCAD - unidade multiusuário a serviço da comunidade acadêmica



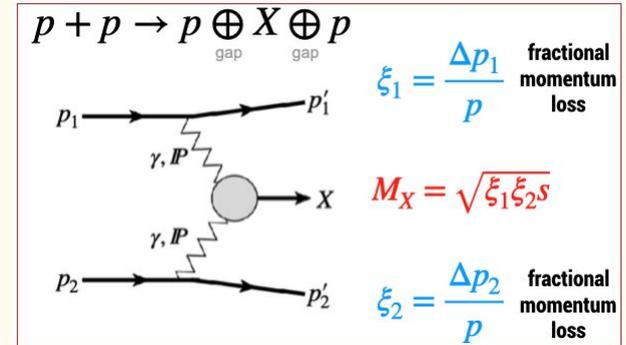
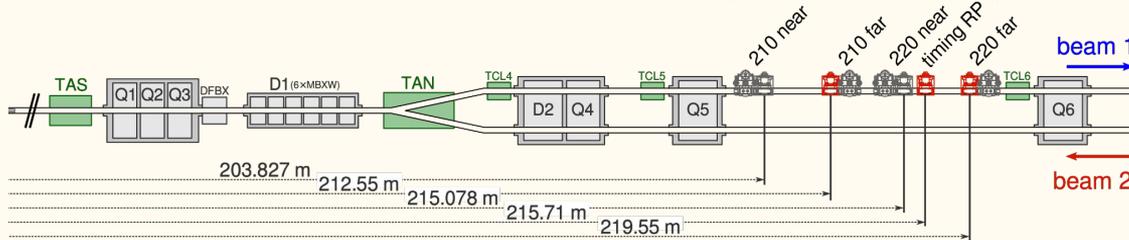
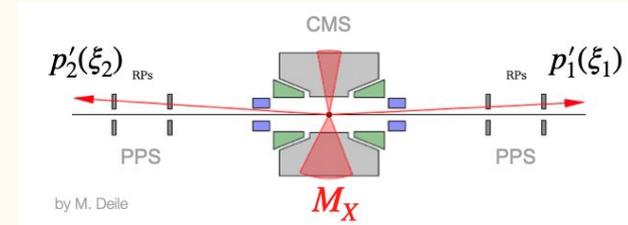
Projetos presentes e futuros

(a falta de previsibilidade financeira dificultou o grupo de assumir compromissos mais sólidos com o programa de Upgrade do CMS, com grande potencial de envolvimento da indústria nacional.)

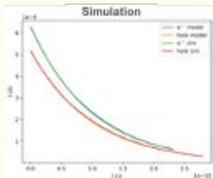
Precision Proton Spectrometer



- O PPS consiste em dois braços de detecção frontal em ambos os lados do experimento CMS para detectar prótons de alta energia advindos de colisões no CMS.
- As medidas entre CMS e PPS são efetuadas por correlação da cinemática das partículas envolvidas.
- Seu objetivo é estudar interações difrativas e eletromagnéticas, além de buscar evidência de Nova Física no setor eletrofraco.
- Composto por estações para medida de traçamento com sensores de silício e tempo de voo com sensores de diamante.



PPS/PPS2: Sensores semicondutores ultra rápidos

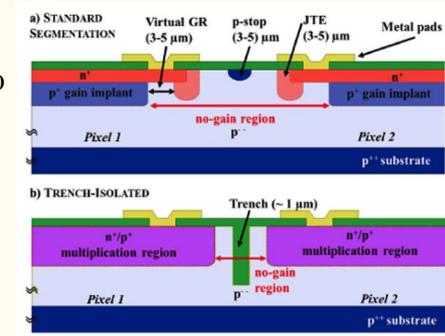


1. A aquisição de diamantes artificiais monocristalinos fabricados no Brasil
2. Investigação de outros materiais semicondutores, eg., SiC, e deposição de filmes, e.g. TiW
3. **Metalização e caracterização de bancada feitas no Brasil** com testes adicionais no CERN
4. Simulação desenvolvida e testes de bancada sendo feitos para possível uso de diamantes policristais vs monocristais
5. Potencial de uso em outros experimentos e potencial para exportação desta tecnologia
6. Expectativa de continuidade de emprego de sensores no HL-LHC a partir de 2029 (projeto PPS2)

DRD3 (UFRGS): R&D de sensores semicondutores: detectores a base de diamante e SiC em parceria com a indústria nacional

Sensores LGAD para PPS2:

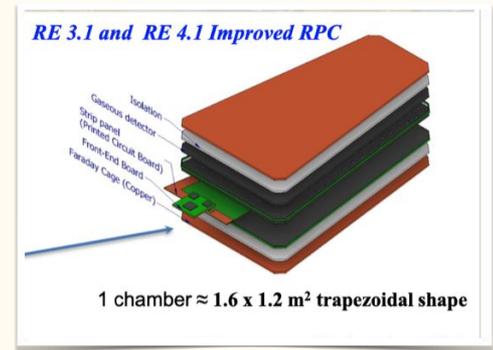
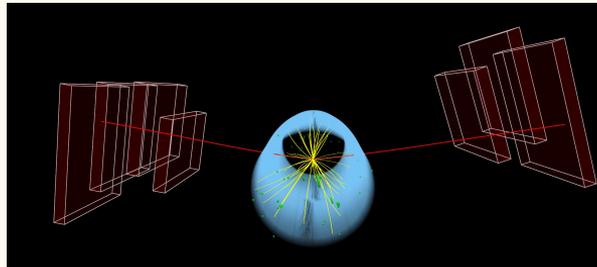
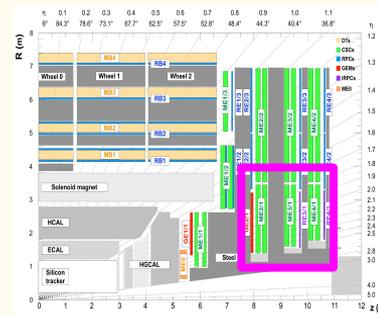
1. Qualificação dos sensores da produção TI-LGAD (FBK-Itália) em laboratório multiusuário HEPIC/USP (Probe station automatizada).
2. Projeto de PCBs e montagem usando micro-soldadora (Instituto Eldorado e Lab. UERJ).
3. Caracterização com fontes radioativas e bancada óptica com LASER ultra-rápido.
4. Caracterização sob resfriamento e a vácuo (em colaboração com LAPE/UFRJ).
5. Caracterização em linha de luz SIRIUS (CNPEM).
6. Campanha de irradiação e caracterização pós-irradiação.
7. Projeto de protótipo do detector LGAD/PPS e cadeia de front-end.
8. Demonstração da solução de DAQ (back-end -- Serenity/CMS).
9. Testes de solução de transmissão de dados (estações PPS/Túnel LHC --> CMS).



Trench-Isolated Low Gain Avalanche Diodes (TI-LGADs)

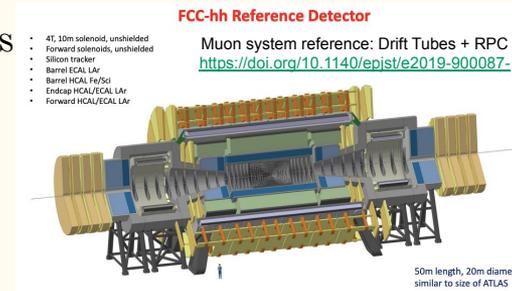
Detectores a gás

1. RPC - Resistive Plate Chamber
2. Consiste em duas placas paralelas de alta resistividade, que são separadas por estreitas lacunas de gás
3. Tecnologia presente em grandes experimentos (CMS, ATLAS e ALICE) e em experimentos de menor porte, devido à **facilidade de construção e alta resolução temporal**
4. CMS conta com 1056 câmaras e está em processo de atualização com construção em andamento de mais 72 câmaras de uma tecnologia mais avançada, **improved RPC (iRPC)**

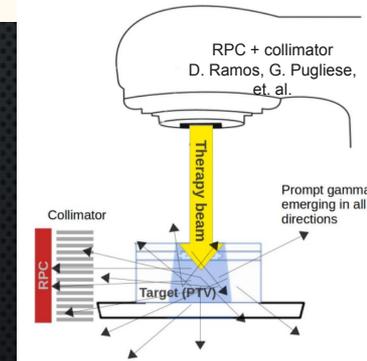
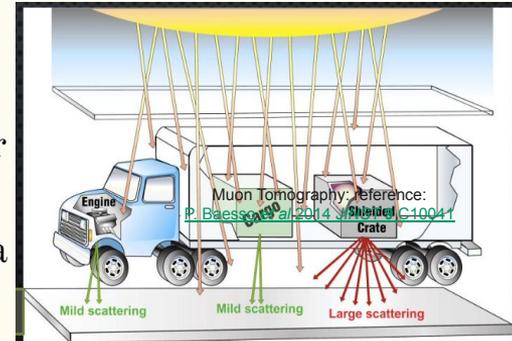


Detectores a gás

1. DRD1(USP, CBPF, UERJ): nova colaboração do CERN
direcionada ao desenvolvimento de tecnologias de detectores a gás
 - a. Detectores para os novos colisores
 - b. Aplicações na medicina
 - c. Aplicações na indústria
 - d. Aplicações na inspeção de estruturas

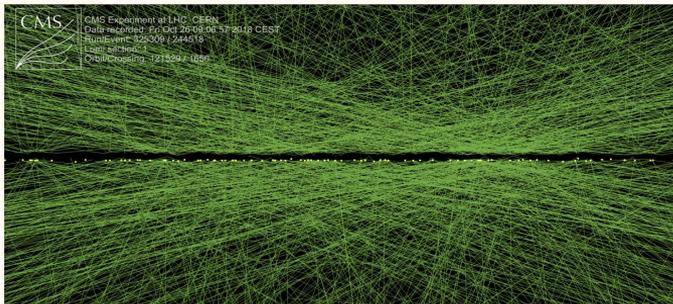


2. Laboratórios em construção na UERJ e no CBPF
 - a. Propriedades dos sinais de descarga elétrica
 - b. Estudos de misturas de gás alternativas de menor impacto ambiental
 - c. Estudo do desempenho de RPCs em função da mistura de gás
 - d. Construção de protótipos para exploração da tecnologia de RPCs e thickGEM (Thick-Gas Electron Multiplier)



Identificação de Jatos no Trigger de L1 com Inteligência Artificial

HL-LHC
(~200 pileup)

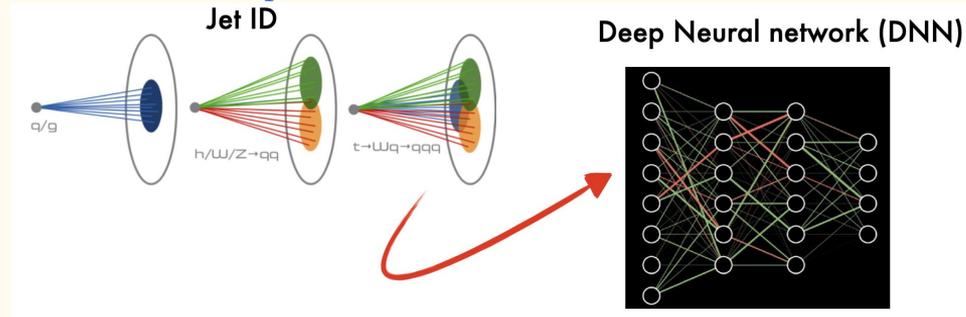


Durante o HL-LHC teremos que fazer mais no trigger (L1T) para preservar a física, pois **o que não é selecionado se perde para sempre**:

1. L1T absorve $O(100 \text{ TB/s})$
2. L1T rejeita 99% dos eventos
3. L1T tem que tomar decisões em $O(\mu\text{s})$

Latências impõem um design baseado em FPGA para o L1T

Proposta: implementar Jet ID a partir de uma Rede Neural Profunda sintetizada em FPGA para atender as demandas do L1T



Aplicações na sociedade

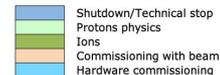
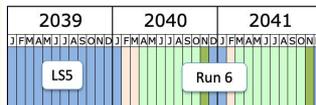
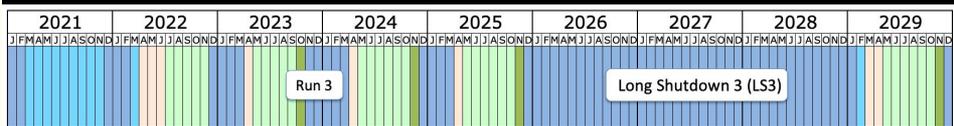
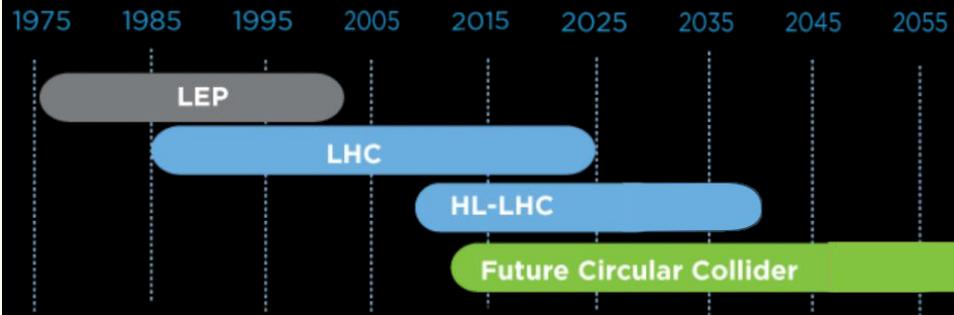
1. Detectores a gás
2. Desenvolvimento de sensores ultra rápidos com aplicação na indústria bem como em Ciências Médicas, sobretudo para detecção de radiação.
3. Machine Learning e inferência ultra-rápida baseada em FPGA com diversas aplicações na engenharia, medicina e indústria.

Benefícios à sociedade

1. Formação de recursos humanos de alto nível na área técnico-científica
2. Recursos de processamento de dados usados para pesquisas sobre a Covid-19
3. Divulgação científica e tutoriais de programação



Escala de tempo de projetos em HEP



Last update: April 2023

Demandas

- Estruturantes
 - a. Editais de longo prazo (5 a 10 anos)
 - b. Recursos em rubricas adequadas
 - i. previsão de envio de recursos ao CERN (edital)
 - ii. pagamento de contribuições (M&O B)
 - iii. Verbas para missões
 - c. Bolsas de doutorado sanduíche de maior duração (pelo menos 12 meses)
 - d. Possibilidade de bolsas pós-doc de longa duração no CERN (conectados a instituições brasileiras)
 - e. Bolsas de visitante, para pesquisadores estrangeiros
 - f. Bolsas de capacitação para estudantes (cursos de verão/treinamento)
- Laboratórios de instrumentação, pesquisa e desenvolvimento
 - a. Financiamento para sua adequação a projetos de P&D de média/alta complexidade
- Unidades de computação de alto desempenho
 - a. Investimento inicial substancial para atualização e redimensionamento das unidades
 - i. Aquisição de unidades com GPU e FPGA para computação heterogênea e aprendizado de máquina
 - b. Redes de alta velocidade: estratégia junto à RNP, à Rede-Rio/FAPERJ e outros atores para seu financiamento de longo prazo, desenvolvimento e estabilidade.



A screenshot of the FAPERJ website. The top navigation bar includes links for "Transparência", "Bolsas", "Avaliação", "Programas", "Comunicação", "Seleção", "Questões", and "SOFAPERJ". The main banner reads "Ajuda a Ciência, Tecnologia e Inovação no Estado do Rio de Janeiro". Below the banner is a search bar and a "Ajuda" button. The left sidebar contains a "Ajuda" menu with links for "Avaliação e Bolsas", "Comunicação", "Seleção", "Questões", "SOFAPERJ", "Ajuda", "Ajuda a Bolsas", "Ajuda a Avaliações", "Ajuda a Seleção", "Ajuda a Questões", "Ajuda a SOfAPERJ", "Ajuda a Inovação", "Ajuda a Pesquisa", "Ajuda a Formação", "Ajuda a Capacitação", "Ajuda a Colaboração", "Ajuda a Internacionalização". The main content area displays a notice about the "Edital FAPERJ N.º 27/2013" regarding international collaborations in high-energy physics, with a yellow warning box stating "ATENÇÃO: Você está acessando o site antigo da FAPERJ, as informações podem não estar atualizadas. Clique aqui para acessar o novo site." The footer contains the text "Ajuda a Colaborações Internacionais em Física de Altas Energias no Estado do Rio de Janeiro © 2013".

Demandas

Financeiras

1. Upgrade

- a. RPC (Link System): 3 MCHF (até 2028) R\$ 15 milhões
 - b. PPS: diamantes e infraestrutura local R\$ 200.000,00
 - c. PPS2 (HL-LHC): 150-200 kCHF R\$ 1.000.000,00
- SUBTOTAL: R\$ 16.200.000,00**

2. Manutenção e Operação (M&O): 318.1 kCHF/ano

R\$ 1.765.455,00

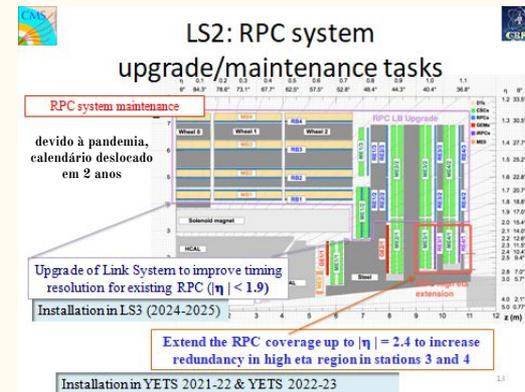
3. Mobilidade (por ano, 22 pesquisadores)

- i. Missões: 11x20 dias R\$ 460.000,00
- ii. Bolsas Doutorado sanduíche/Capacitação:
2 bolsas - 12 meses R\$ 248.000,00
- iii. Bolsas de Pós doutorado:
2x12 meses R\$ 464.000,00
- iv. Bolsa para pesquisador visitante PVE:
1 bolsa - 3 meses R\$ 42.000,00

SUBTOTAL (em 5 anos): R\$ 8.015.000,00

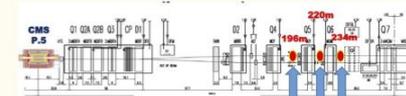
4. Laboratórios locais (multiusuário):

- a. De instrumentação (entre 5 e 10 anos) R\$ 3.000.000,00
- b. De computação (em 5 anos): R\$ 14.000.000,00



PPS2 for HL-LHC

- Re-install the PPS Roman Pots at locations 196m, 220m, and 234m from the CMS interaction point



- Challenges: impedance heating, order of magnitude higher pileup ($\mu \sim 200$), new emittance profile with thinner beams, increased showers
- => upgrade 3D pixel sensors for tracking, new Low Gain Avalanche Detectors for timing
- The only forward proton detector @ HL-LHC (ATLAS AFP not continued)

Comentários Finais

- Ao longo de mais de duas décadas, nossos laboratórios têm mantido uma sólida tradição no desenvolvimento de detectores. Nesse período, buscamos ativamente envolver a indústria nacional sempre que possível
- A falta de apoio financeiro no tempo devido e estabilidade financeira de longo prazo têm impactado nosso potencial de participação em projetos de construção e, conseqüentemente, têm dificultado o engajamento da indústria brasileira e a transferência de tecnologia
- As atividades realizadas e propostas têm grande potencial de impacto para a sociedade como um todo. Por meio de contratos e transferência de tecnologia para a indústria, e com a formação de recursos humanos em várias áreas.
- As mudanças sugeridas poderão potencializar a associação do Brasil ao Cern e elevando nossa contribuição para a ciência, bem como para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, a um novo patamar.

Muito obrigado pela atenção!

Contatos:

Gilvan Alves - gilvan.augusto.alves@cern.ch

Luiz Mundim - luiz.mundim@cern.ch

Sumário

Projetos realizados

- FPD - construção das estruturas do detector realizada no Brasil (LNLS)
- CASTOR - troca de 50% das PMTs resistentes à radiação (FAPERJ): possibilidade de participação de empresas brasileiras perdida
- HCAL - montagem de placas da eletrônica FEB no Brasil (recursos FAPERJ)
- PPS - participação no desenvolvimento e montagem: grande potencial de participação da indústria brasileira
- RPC: participação na operação, recuperação de câmaras, testes de longevidade, etc.

Projetos atuais e de médio prazo

- RPC (iRPC): potencial de participação de empresas brasileiras (procurando recursos) na fabricação de placas, fibras ópticas, etc.
- Detector GEM: prospecção de oportunidades (financiamento?)
- PPS: Preparação de diamantes artificiais para caracterização no Brasil
- PPS2: Fabricação de sensores (TI-)LGAD e diamantes artificiais monocristalinos, qualificação, caracterização, protótipos, montagem, testes de sistemas. Ação em rede multiusuária e multidisciplinar.
- L1 Trigger-CMS: aplicação intensiva de aprendizado de máquina → formação de recursos humanos estratégicos

Demandas (resumo)

Financeiras

1. Upgrade
 - a. RPC (Link System): 3 MCHF (até 2028) R\$ 15 milhões
 - b. PPS: diamantes e infraestrutura local R\$ 200.000,00
 - c. PPS2 (HL-LHC): 150-200 kCHF R\$ 1.000.000,00

SUBTOTAL: R\$ 16.200.000,00
2. Manutenção e Operação (M&O B): 80 kCHF/ano **R\$ 444.000,00**
3. Mobilidade (por ano, 22 pesquisadores)
 - i. Missões: 11x20 dias R\$ 460.000,00
 - ii. Bolsas Doutorado sanduíche/Capacitação:
2 bolsas - 12 meses R\$ 248.000,00
 - iii. Bolsas de Pós doutorado:
2x12 meses R\$ 464.000,00
 - iv. Bolsa para pesquisador visitante PVE:
1 bolsa - 3 meses R\$ 42.000,00

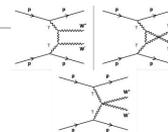
SUBTOTAL (em 5 anos): R\$ 8.015.000,00
4. Laboratórios locais (multiusuário):
 - a. De instrumentação (entre 5 e 10 anos) **R\$ 3.000.000,00**
 - b. De computação (em 5 anos): **R\$ 14.000.000,00**

- Estruturantes:
 - Inclusão de FAE nas linhas estratégicas das agências
 - Estabelecer um programa de melhoria da infraestrutura de laboratório das instituições brasileiras
 - Legislação mais clara para evitar tributação em remessa de recursos com finalidade científica
 - Editais de longo prazo (5 a 10 anos)
 - recursos em rubricas adequadas
 - possibilidade de envio de recursos ao CERN, para pagamento de contribuições específicas para operação dos subsistemas (M&O B)
 - verbas para missões/trabalho de campo compatíveis com as atividades
 - Bolsas de doutorado sanduíche de maior duração
 - Possibilidade de bolsas pós-doc de longa duração no CERN, ligados a instituições brasileiras, para pesquisadores com ou sem vínculo
 - Bolsas de visitante, para pesquisadores estrangeiros
 - Bolsas de capacitação para estudantes (cursos de verão/treinamento)

PPS: Paper de desempenho + 6 análises desde 2016



CERN-EP-2022-177
2023/08/23



Search for high-mass exclusive $\gamma\gamma \rightarrow WW$ and $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

The CMS and TOTEM Collaborations*



CERN-EP-2022-139
2023/09/12

CMS-PRO-21-001
TOTEM-2022-001

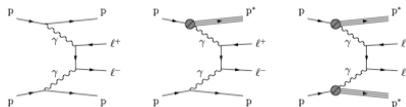
Proton reconstruction with the CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer

The CMS and TOTEM Collaborations*



CERN-EP-2018-014
2018/08/14

CMS-PPS-17-001
TOTEM 2018-001



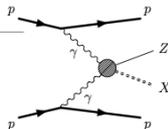
Observation of proton-tagged, central (semi)exclusive production of high-mass lepton pairs in pp collisions at 13 TeV with the CMS-TOTEM precision proton spectrometer

The CMS and TOTEM Collaborations*



CERN-EP-2023-003
2023/09/22

CMS-EXO-19-009
TOTEM-2023-001



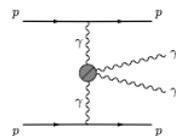
A search for new physics in central exclusive production using the missing mass technique with the CMS detector and the CMS-TOTEM precision proton spectrometer

The CMS and TOTEM Collaborations*



CERN-EP-2021-191
2022/06/30

CMS-EXO-18-014
TOTEM-2021-002



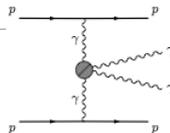
First search for exclusive diphoton production at high mass with tagged protons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

The CMS and TOTEM Collaborations*



CERN-EP-2023-143
2023/11/07

CMS-EXO-21-007
TOTEM 2023-003



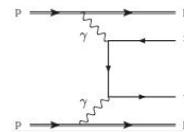
Search for high-mass exclusive diphoton production with tagged protons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

The CMS and TOTEM Collaborations*



CMS-TOP-21-007
TOTEM 2023-002

CERN-EP-2023-113
2023/10/18



Search for central exclusive production of top quark pairs in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with tagged protons

The CMS and TOTEM Collaborations*

Measurement of Higgs Production via Vector Boson Fusion in $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ final state using Deep Neural Networks

Available on the CMS information server

CMS AN-20-238

CMS Draft Analysis Note

The content of this note is intended for CMS internal use and distribution only

2021/07/13
 Archive Hash: f2af075-D
 Archive Date: 2021/03/22

Measurement of Higgs Production Cross Section via Vector Boson Fusion in $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ final state at 13 TeV using Artificial Neural Networks

Walaa Elmetenawee¹, Nicola De Filippis², Andre Sznajder³, Pushpalatha Bhat⁴, and Harrison Prosper⁵

¹ Università and INFN Bari, Italy

² Politecnico and INFN Bari, Italy

³ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brazil

⁴ Fermilab, USA

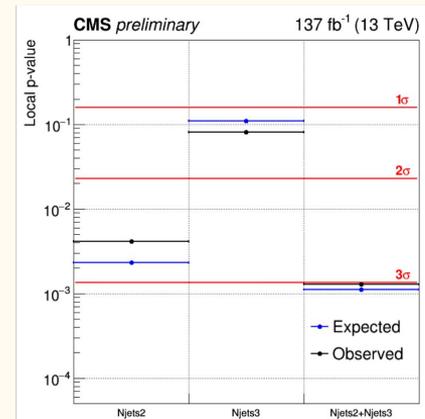
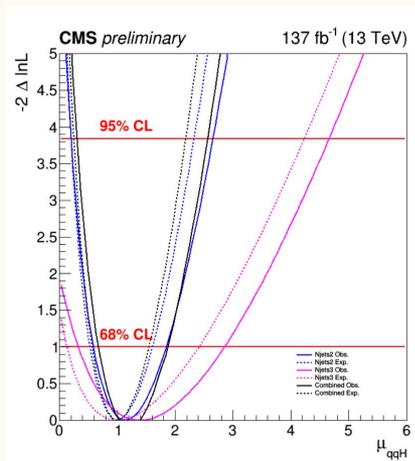
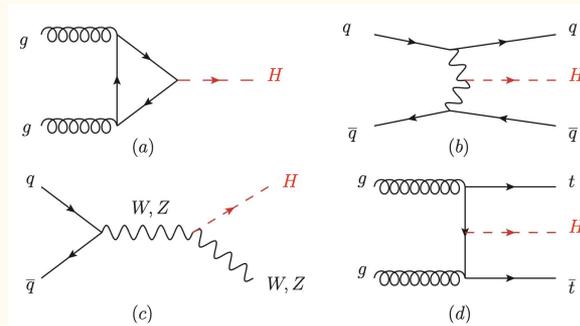
⁵ University of Florida, USA

Abstract

A dedicated measurement of the Higgs boson production cross section in the Vector Boson Fusion (VBF) production mode is performed in the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l = e, \mu$) channel. The dataset used corresponds to proton-proton collision data produced at the LHC at a center-of-mass energy of 13 TeV and collected by the CMS detector equivalent to an integrated luminosity of 137 fb^{-1} . A multivariate analysis is performed through the usage of Artificial Neural Networks (ANNs). Statistical shape analysis of ANNs developed for two orthogonal jet-based categories is done by combining the discriminants distribution from each category.

This box is only visible in draft mode. Please make sure the values below make sense.

PDFAuthor: Walaa Elmetenawee
 PDFTitle: Measurement of Higgs Production Cross Section via Vector Boson Fusion in $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ final state at 13 TeV using Artificial Neural Networks



Search for Vector Boson Scattering via $ZZ \rightarrow 2l2\nu_{jj}$ channel using Graph Neural Networks

Available on the CMS information server

CMS AN-20-067

CMS Draft Analysis Note

The content of this note is intended for CMS internal use and distribution only

2024/01/23
 Archive Hash: 8b81ec7
 Archive Date: 2020/10/19

Search for ZZ vector boson scattering in pp collisions at 13 TeV in the $ll\nu\nu_{jj}$ channel

The CMS Collaboration

Abstract

A search for electroweak production of two jets in association with two Z bosons at $\sqrt{s} = 13$ TeV is presented. The decay channel with two leptons (electrons or muons) and two neutrinos is considered. The search uses the entire Run II dataset corresponding to an integrated luminosity of 137.1 fb^{-1} .

This box is only visible in draft mode. Please make sure the values below make sense.

PDFAuthor: Yacine Haddad, Yixiao Han, Monika Mittal, Vitor dos Santos Sousa, Andre Sznajder, Bingran Wang, Darien Wood, Li Yuan, Hong Gao, Yunyang Liu, Hanwen Wang, Israr Israr

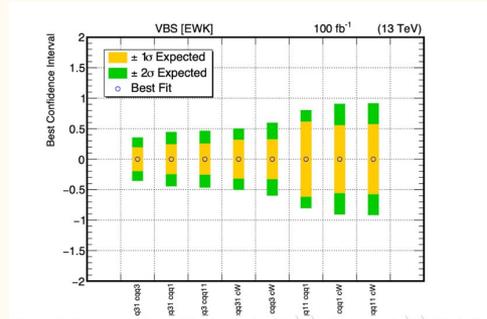
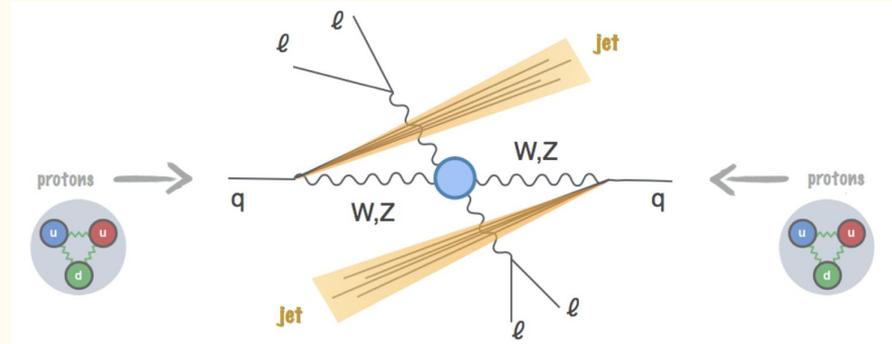


Figure 66: Summary of $1\text{-}\sigma$ and $2\text{-}\sigma$ bounds for dimension-6 operators in 2D with the best variable from Table 24

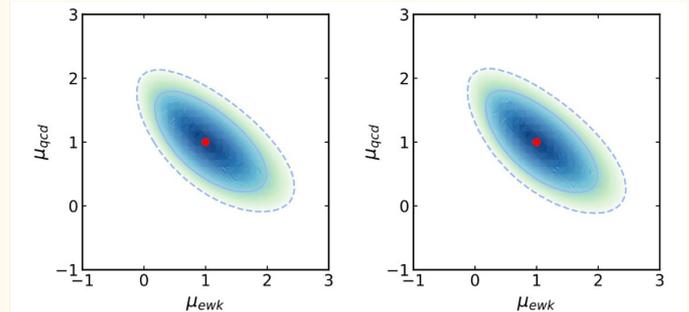


Figure 69: Confidence region at 68 (solid) and 95% (dashed) CL for the simultaneous determination of $\sigma_{\text{obs}}^{\text{EWVBS}}$ and $\sigma_{\text{obs}}^{\text{QCDDZZ}ij}$. Fit using MC-based DY estimate (left) and Data-driven DY estimate (right).

Publicações

CMS HCAL Collaboration, **CMS Technical Design Report for the Phase 1 Upgrade of the Hadron Calorimeter**; CERN-LHCC-2012-015, CMS-TDR-10 (2012), cds.cern.ch/record/1481837.

CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer Collaboration, **CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer**; CERN-LHCC-2014-021, TOTEM-TDR-003; CMS-TDR-13 (2014), cds.cern.ch/record/1753795.

CMS Collaboration, **Measurement of diffraction dissociation cross sections in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV**; CMS PAPER FSQ-12-005, Phys. Rev. D 92, no. 1, 012003 (2015), doi:10.1103/PhysRevD.92.012003, arXiv:1503.08689 [hep-ex].

CMS Collaboration, **Evidence for exclusive $\gamma\gamma \rightarrow WW$ production and constraints on anomalous quartic gauge couplings in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV**, JHEP 08, 119 (2016), doi:10.1007/JHEP08(2016)119, arXiv:1604.04464 [hep-ex].

LHC Forward Physics Working Group; **LHC Forward Physics**; (Yellow report) CERN-PH-LPCC-2015-001; J. Phys. G 43, 110201 (2016), doi:10.1088/0954-3899/43/11/110201, arXiv:1611.05079 [hep-ph].

CMS and TOTEM Collaborations, **Observation of proton-tagged, central (semi)exclusive production of high-mass lepton pairs in pp collisions at 13 TeV with the CMS-TOTEM precision proton spectrometer**; JHEP 1807 (2018) 153, doi:10.1007/JHEP07(2018)153, arXiv:1803.04496 [hep-ex].

CMS and TOTEM Collaborations, **Measurement of single-diffractive dijet production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the CMS and TOTEM experiments**, Eur. Phys. J. C 80, no.12, 1164 (2020) [erratum: Eur. Phys. J. C 81, no.5, 383 (2021)], doi:10.1140/epjc/s10052-020-08562-y, arXiv:2002.12146 [hep-ex].

CMS and TOTEM Collaborations, **Proton reconstruction with the CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer**, JINST 18, no.09, P09009 (2023), doi:10.1088/1748-0221/18/09/P09009, arXiv:2210.05854 [hep-ex].

CMS and TOTEM Collaborations, **Search for high-mass exclusive $\gamma\gamma \rightarrow WW$ and $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV**, JHEP 07 (2023) 229, doi:10.1007/JHEP07(2023)229, arXiv:2211.16320 [hep-ex].

The CMS Collaboration, **A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery**, Nature 607, 60–68 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04892-x>.

The CMS Collaboration, **Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC**, Phys. Lett. B 716 (2012), <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>, arXiv:1207.7235 [hep-ex].

The CMS Collaboration, **Measurement of the Higgs boson width and evidence of its off-shell contributions to ZZ production**, Nat. Phys. 18, 1329–1334 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01682-0>.

The CMS Collaboration, **Measurement of vector boson scattering and constraints on anomalous quartic couplings from events with four leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV**, Phys. Lett. B 774 (2017), <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.10.020>, arXiv:1708.02812 [hep-ex].

The CMS Collaboration, **Observation of Electroweak Production of Same-Sign W Boson Pairs in the Two Jet and Two Same-Sign Lepton Final State in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV**, Phys. Rev. Lett. 120, 081801 (2018), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.081801>, arXiv:1709.05822 [hep-ex]