



Relatório de Atividades

Thiago R. F. P. Tomei

— NCC/UNESP —

Período: Março/2016 a Março/2017

Índice

1	Introdução	2
2	Atividades de Pesquisa	3
2.1	Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons	3
2.2	Busca por Matéria Escura	5
2.3	Outras Atividades	7
2.4	Bases de Dados	9
3	Atividades Docentes	10
4	Atividades de Extensão	10

1. Introdução

O Modelo Padrão das interações fundamentais é a teoria que, até o momento, melhor descreve as partículas subatômicas e de suas interações. Historicamente, o desenvolvimento do Modelo Padrão envolveu um intercâmbio constante entre novos resultados experimentais e avanços teóricos, constituindo-se em um excelente exemplo de como o conhecimento científico progride. Nos dias atuais, o Modelo Padrão é uma teoria consolidada; uma revisão do panorama experimental atual [1] revela a excelente concordância entre as previsões teóricas e os dados observados.

Apesar do enorme sucesso experimental, o Modelo Padrão apresenta incompletudes que sugerem a existência de uma estrutura ainda mais profunda na matéria, que seria descrita pelo que chamamos de uma “Física Além do Modelo Padrão” [2]. Embora existam diversas teorias que buscam estender o Modelo Padrão, ainda não existem indícios significativos que favoreçam nenhuma delas. Por outro lado, uma das características do panorama atual da Física de Altas Energias é o contraste entre os resultados obtidos em experimentos com aceleradores de partículas, que seguidamente confirmam as previsões do Modelo Padrão, e os experimentos de astronomia e astrofísica. A natureza da matéria escura, a origem da oscilação dos neutrinos, a assimetria bariônica do universo e a relação da gravitação com as outras interações fundamentais são algumas das questões em aberto no atual paradigma. Esse contraste é o principal problema tratado neste projeto, e a abordagem escolhida será a realização de buscas por Física Além do Modelo Padrão em um experimento de altas energias.

Os objetivos do meu projeto de pesquisa dividem-se naqueles de curto e longo prazo. A continuação de minha participação no experimento *Compact Muon Solenoid* (CMS) [3], um dos experimentos servidos pelo acelerador *Large Hadron Collider* (LHC) [4], é o objetivo mais imediato. O grupo de Física do Núcleo de Computação Científica da UNESP (NCC-UNESP) é integrante do *São Paulo Research and Analysis Center* (SPRACE) e já se encontra envolvido em buscas por Física Além do Modelo Padrão no CMS, o que me proporciona um rápido engajamento nas atividades propostas. O grupo de Física de Partículas do Instituto de Física Teórica da UNESP (IFT-UNESP), por sua vez, apresenta uma grande tradição na área de Fenomenologia de Partículas, e a interação e colaboração com seus integrantes seguramente enriquecerá o meu trabalho experimental. A médio prazo, tendo em vista o calendário de *upgrades* previsto para o LHC [5, 6], existe uma oportunidade única de alavancar o nível científico do grupo através da participação no projeto e construção da próxima fase do experimento CMS [7]. Minha proposta é de contribuir tanto para o cresci-

mento do grupo, através do meu trabalho de pesquisa e da orientação de estudantes de iniciação científica, mestrado e doutorado, como de sua diversificação, atraindo pesquisadores de áreas afins, como engenharia eletrônica e ciência da computação.

O principal resultado esperado da análise dos dados de 13 TeV do CMS é uma visão mais profunda da estrutura fundamental da matéria. Em termos práticos, cada busca realizada gera pelo menos um resultado preliminar, onde os dados são analisados com técnicas otimizadas para alguns modelos de referência, que é publicado como um *Physics Analysis Summary* (PAS). Diversos resultados preliminares são em geral combinados posteriormente para a publicação de um artigo de referência, para o qual os dados são reconstruídos e reanalisados com as versões mais desenvolvidas do software e das técnicas experimentais. No caso em que as observações apontem para indícios significativos de Física Nova, isso em geral leva a uma terceira rodada de otimização e análise dos dados, a fim de viabilizar uma possível descoberta. Resultados negativos são também valiosos, apontando os modelos que deixaram de ser viáveis em vista das observações, *i.e.*, modelos excluídos. Cabe lembrar que todos resultados serão sempre documentados em PAS e artigos, bem como disseminados para a comunidade científica em apresentações nas conferências da área.

Neste relatório, dou uma visão geral dos meus resultados obtidos no período de março/2016 a março/2017. Para uma visão mais detalhada, as bases de dados listadas na Seç. 2.4 apresentam mais informações.

2. Atividades de Pesquisa

Durante o período deste relatório, continuei trabalhando no âmbito da Colaboração CMS do CERN, participando de análises em duas frentes de trabalho: a *Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons* e a *Busca Por Matéria Escura*. Detalho a seguir minhas atividades em cada uma dessas frentes.

2.1 Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons

A busca por novas ressonâncias no canal de dibósons no LHC tem sido tema do meu trabalho por cerca de uma década. A chegada do acelerador a sua luminosidade instantânea nominal, de $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$, marca uma nova etapa na exploração da fronteira do TeV – o “tempo de duplicação”, *i.e.*, o tempo necessário para dobrar a quantidade de dados disponíveis, está começando a ser medido em termos de anos. Desse modo, o refino das técnicas experimentais torna-se cada vez mais importante, e o conjunto de dados do Run 2 é o substrato ideal pra o desenvolvimento das mesmas.

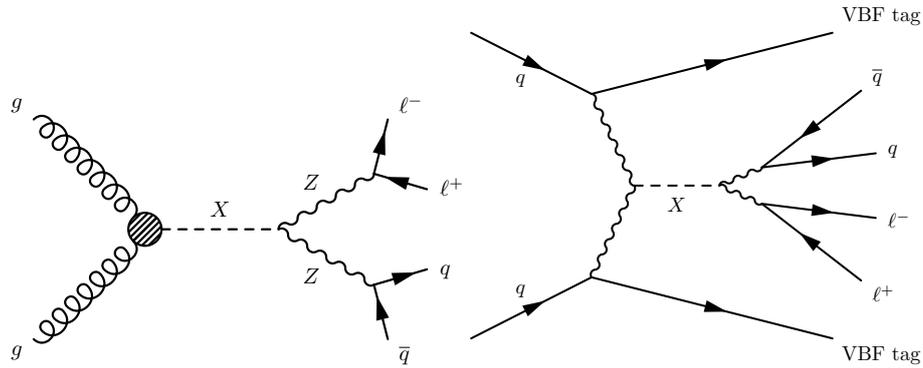


Figura 1: Canais de produção de uma nova ressonância no LHC: produção por fusão de glúons (esquerda) e por fusão de bósons vetoriais (direita).

No início de 2016, dediquei-me à análise dos dados tomados em colisões próton-próton a 13 TeV de energia de centro de massa em 2015, que perfizeram um total de 2.3 fb^{-1} de dados certificados para uso em análises. Juntamente com o Sr. José Ruiz, estudante de Doutorado do Prof. Sergio Novaes, líder do grupo SPRACE, estudamos o espectro de massa invariante de dois léptons e um jato hadrônico ($\ell\ell+J$), identificados como um par de bósons Z, em busca de possíveis excessos localizados que indicassem a produção de uma ressonância $X \rightarrow ZZ$. Foram utilizadas técnicas de subestrutura de jatos [8–10] para a identificação do bóson Z no seu canal de decaimento hadrônico. Os resultados preliminares foram publicados no documento **CMS PAS B2G-16-010** [11], e apresentados pelo Sr. Ruiz na conferência ICHEP 2016.

Ainda com os dados tomados em 2015, trabalhei também na busca por ressonâncias no espectro de massa transversa de jato hadrônico e energia faltante, que foi o objeto da tese do Dr. David Romero Abad, *Search for massive resonances decaying into pairs of boosted bosons in missing energy plus jet final states at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* . O Dr. Abad defendeu sua tese em 31 de janeiro de 2017, comigo sendo parte de sua Banca examinadora.

Finalmente, com os dados tomados em 2016 – 37.8 fb^{-1} de dados certificados de colisões próton-próton a energia de centro de massa de 13 TeV – colaborei com o grupo de $H \rightarrow ZZ$ do experimento CMS para refazer a busca no canal $\ell\ell$ +jatos, desta vez com um enfoque maior em ressonâncias de spin-0, que poderiam ser identificadas como bósons de Higgs adicionais. Para esta análise, realizada em conjunto com a Dra. Sudha Ahuja, pós-doutoranda do SPRACE, foram utilizadas todas as ferramentas providas do grupo de física do bóson de Higgs do experimento como *b-tagging* [12], *VBF-tagging* e *Matrix Element Likelihood Analysis* (MELA) [13, 14]. Os resultados preliminares, contendo a análise de 12.9 fb^{-1} tomados antes de agosto¹,

¹Este foi o conjunto de dados certificados para a ICHEP 2016.

foram publicados no documento **CMS PAS HIG-16-034** [15]; a análise dos dados completos de 2016 está em curso e o plano é que o resultado final seja publicado na conferência de Moriond 2017.

2.2 Busca por Matéria Escura

O indício mais forte de Física Além do Modelo Padrão é a chamada matéria escura (*dark matter* – DM). Uma das principais evidências a favor da existência da DM é a observação de que, para vários tipos de objetos observáveis – estrelas, nuvens de gás, galáxias –, suas velocidades são maiores do que aquelas esperadas apenas devido à atração gravitacional de outros objetos. Outra evidência para a existência da Matéria Escura é o ajuste global dos parâmetros do Modelo Padrão Cosmológico, que implica uma densidade de matéria não-bariônica $\Omega_c h^2 = 0.1196 \pm 0.0031$, *i.e.*, uma densidade física de Matéria Escura de cerca de 23% [16]. As características que definem um candidato a matéria Escura são a estabilidade em escalas de tempo cosmológicas, a interação extremamente fraca com a radiação eletromagnética e a densidade de relíquia correta. Nenhuma das partículas previstas pelo Modelo Padrão atende esses requisitos; várias extensões do Modelo Padrão, por sua vez, apresentam um ou mais candidatos a matéria escura. No LHC, o candidato a matéria escura χ poderia ser produzido em reações do tipo $pp \rightarrow \chi\chi + X$, onde a matéria escura deixa a região de interação sem deixar sinal no detector, aparecendo como energia transversa faltante (E_T^{miss}).

No ano de 2016, trabalhei com o Dr. Chang-Seong Moon, pós doutorando do SPRACE, tanto na busca experimental por matéria escura no experimento CMS, como em um artigo fenomenológico sobre o assunto. Na parte experimental, participamos na busca no canal de E_T^{miss} +jatos, com resultados preliminares publicados nos documentos **CMS PAS EXO-16-013** e **CMS PAS EXO-16-037** [17, 18]. Nossa principal contribuição foi na medida das curvas de eficiência do *trigger*, que determinam quão eficiente é a seleção de eventos realizada online (de modo irreversível) em relação àquela feita offline, em função do valor da energia transversa faltante. Idealmente, essa eficiência deveria ser uma função degrau, mas diferenças na reconstrução online e offline, bem como imperfeições do detector, levam às funções logísticas mostradas na Fig. 3.

Na parte fenomenológica, o Dr. Moon e eu colaboramos com os Profs. Alexander Belyaev e Stefano Moretti da Universidade de Southampton, utilizando os dados públicos da colaboração CMS para tentar compreender as possibilidades de extensão da busca por matéria escura. Estudamos o modelo *Inert Two-Higgs Doublet*

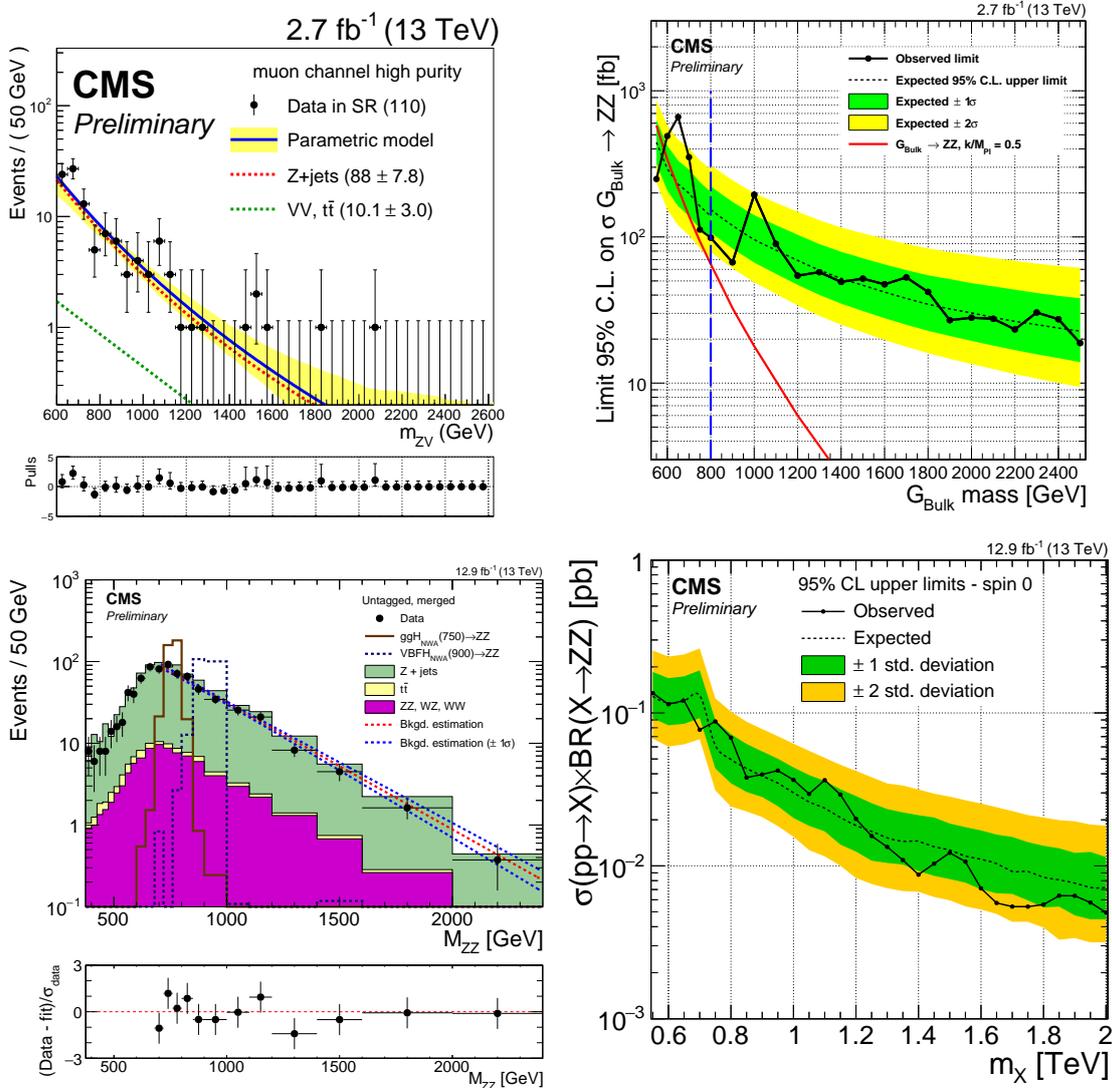


Figura 2: Resultados preliminares das análises de busca por ressonâncias no canal de dibósons, para os dados de 2015 (alto) e 2016 (baixo) [11, 15]. Esquerda: Exemplo de distribuição da variável de interesse, a massa invariante do sistema de dois bósons Z. Direita: limites superiores (com 95% de nível de confiança) para diferentes hipóteses de massa da ressonância sob procura. Enquanto a análise de 2015 baseou-se principalmente no uso de ferramentas de subestrutura de jatos, a análise de 2016 adotou ferramentas providas do grupo de física do bóson de Higgs, como *b-tagging*, *VBF-tagging* e MELA.

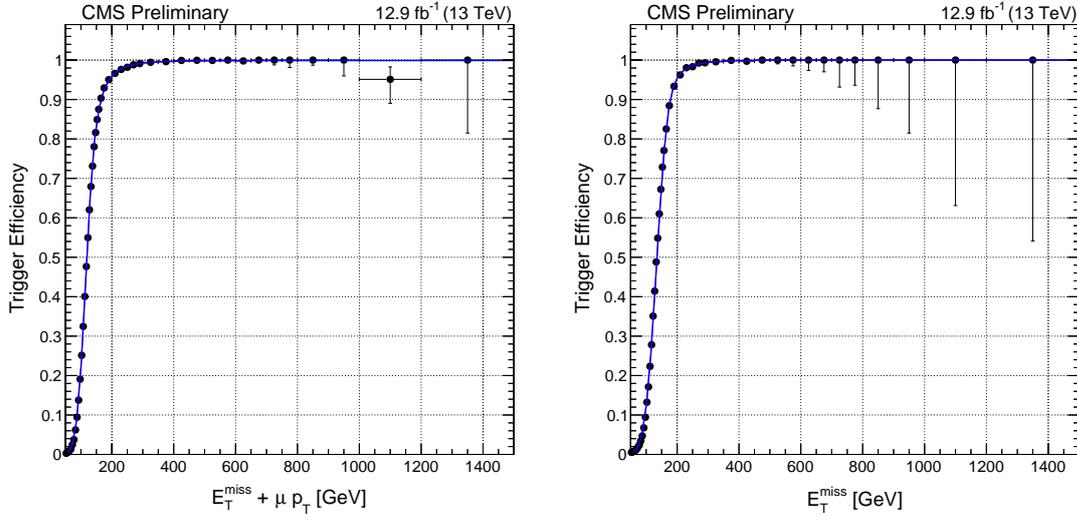


Figura 3: Eficiências do *trigger* de E_T^{miss} medidas em dois conjuntos-teste de dados independentes, obtidos com 12.9 fb^{-1} de colisões próton-próton tomados pelo CMS durante 2016. Esquerda (direita): conjunto de dados-teste onde foi detectada a presença de um múon (elétron) bem reconstruído, indicando a provável presença de um bóson W decaindo no canal leptônico.

Model (i2HDM) [19, 20], e suas possíveis assinaturas experimentais no detector CMS para maiores luminosidades integradas de até 3000 fb^{-1} , como mostrado na Fig. 4. O artigo científico em questão está em fase de finalização e será submetido ao periódico em breve.

2.3 Outras Atividades

2.3.1 Analysis Review Committees

Particpei de três comitês de avaliação interna de análise: as análises **CMS PAS B2G-16-008** [21] / **CMS PAS B2G-16-026**, *Search for HH resonances in the $4b$ final state at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , que se dedicaram à busca de ressonâncias no canal $pp \rightarrow X \rightarrow HH \rightarrow 4b$ com dados de 2015 e 2016, respectivamente, e a análise **CMS PAS SMP-16-005** [22] *Measurement of the differential cross section for the production of a $W(\rightarrow \mu\nu)$ boson in association with jets at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$* , que se dedicou a medidas da seção de choque de produção de bósons W no canal de múons na nova configuração do LHC.

2.3.2 CMS Collaboration Service Work

Como membro da colaboração CMS, é parte do meu trabalho científico contribuir para o bom andamento do experimento. Em 2016 participei das seguintes atividades de serviço para a colaboração:

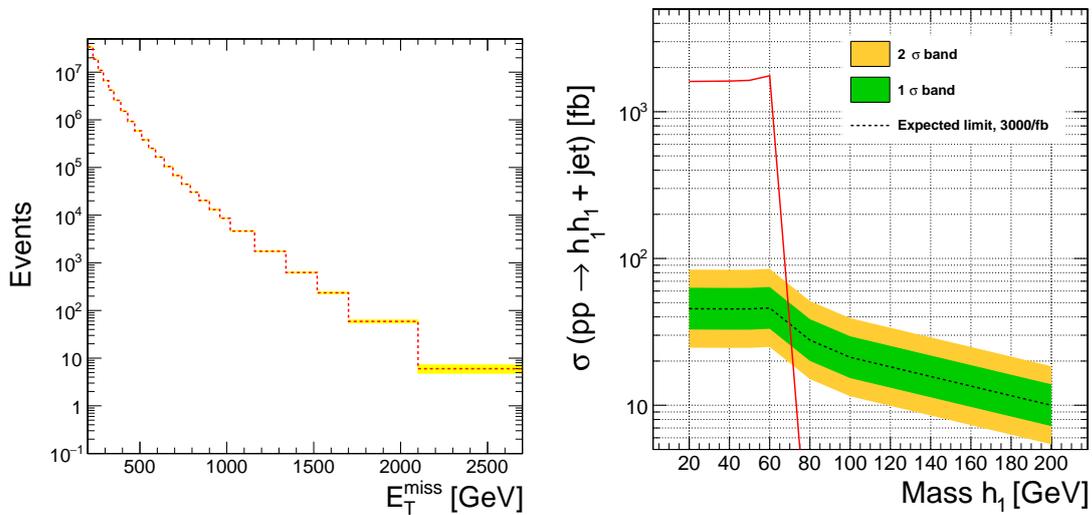


Figura 4: Esquerda: projeção do fundo de Modelo Padrão para a busca por matéria escura no contexto do modelo i2HDM, para um cenário de 3000 fb^{-1} tomados com o detector CMS. Direita: limite esperado para a mesma situação – a linha vermelha representa a seção de choque de uma das possíveis configurações do modelo i2HDM.

- Contato do grupo de Alinhamento e Calibração para o Trigger:** para que todos os subsistemas do experimento estejam corretamente alinhados e calibrados, faz-se necessária a tomada de determinados conjuntos de dados especiais durante a operação do detector. Meu trabalho em 2016 foi agir como ponto de contato entre os grupos de Alinhamento e Calibração e o grupo de *Trigger* para garantir o desenvolvimento, implantação e monitoramento dos algoritmos de *trigger* necessários para a tomada desses dados.
- High-Level Trigger Detector On-Call (HLTDOC):** a tomada de dados no experimento CMS acontece, em geral, de modo contínuo (24/7). A equipe de plantão (*shift crew*), localizada no sítio experimental, conta com uma rede de suporte de experts para garantir a boa operação do experimento. Meu trabalho como HLTDOC era monitorar todos os algoritmos de *trigger* utilizados para a tomada de dados, agindo prontamente para identificar e solucionar qualquer problema nos mesmos, bem como me reportar aos outros integrantes da rede de suporte em reuniões diárias. Em 2016, fiz 2 plantões de uma semana de disponibilidade 24/7, bem como 2 plantões de *backup*.

2.3.3 Participação em Conferências

- **Thiago R. F. P. Tomei**, *Trigger Algorithms for Alignment and Calibration at CMS*, Poster na ICHEP2016: The 38th International Conference on High Energy Physics, Chicago, IL, USA, (2016) [23].

2.3.4 Fontes de Financiamento

Fui outorgado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) com um Auxílio à Pesquisa – Projeto Regular, intitulado *Busca por Nova Física no Experimento CMS do Large Hadron Collider*, sob número de processo 2016/15897-4, com vigência de 01/11/2016 a 31/10/2018, no valor de R\$ 50.465,50.

Fui outorgado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com uma bolsa de Produtividade em Pesquisa – PQ2, *Busca por Nova Física no Experimento CMS do Large Hadron Collider*, sob número de processo 308379/2016-0, com vigência de 01/03/2017 a 01/03/2020.

2.4 Bases de Dados

- **Currículo Lattes:**

<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4713328U4>

- **Researcher ID:**

<http://www.researcherid.com/rid/E-7091-2012>

- **Google Scholar:**

https://scholar.google.com.br/citations?user=Ud_lv6EAAAAJ&hl=en

3. Atividades Docentes

No período deste relatório, fui aceito como orientador no Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física Teórica (IFT-UNESP), e fui selecionado para ministrar a disciplina de *Partículas Elementares II* no segundo semestre de 2017. Além disso, no período de janeiro a fevereiro, orientei um período de estudo dirigido informal com o Sr. Gianni Liveraro, aluno do Instituto de Biocências do Câmpus de Botucatu (IBB-UNESP), no qual ele aprendeu tópicos básicos de Relatividade Especial e Física de Partículas.

4. Atividades de Extensão

O dia 11 de fevereiro foi instituído como o Dia Internacional das Mulheres e Meninas na Ciência pela resolução A/RES/70/212, da Assembléia Geral das Nações Unidas [24]. O objetivo desse ato é chamar a atenção para a desigualdade de gênero e aumentar a participação feminina na área de ciências. De acordo com estudos patrocinados pela ONU, a probabilidade de uma estudante do sexo feminino obter um título de Bacharel, Mestre ou Doutora na área de ciências é de 18%, 8% e 2% respectivamente; as probabilidades correspondentes para estudantes do sexo masculino são de 37%, 18% e 6%.

Tendo em vista a situação supracitada, o grupo SPRACE tomou a iniciativa de realizar uma edição especial do evento Masterclass de Física destinada especialmente a alunas de ensino médio e primeiro ano de licenciatura. Durante o evento, realizado nos dias 10 e 11 de fevereiro de maneira conjunta nas dependências do IFT-UNESP e do NCC-UNESP, ministrei uma palestra sobre aceleradores e detectores de partículas; também auxiliei as alunas na atividade prática do evento - a caracterização de eventos reais tomados pelo detector CMS em termos de sua topologia e sua classificação como eventos advindos de bósons W , Z ou Higgs. O evento foi muito bem sucedido, como atestam os depoimentos das estudantes [25].

Referências

- [1] Particle Data Group Collaboration, “Review of Particle Physics”, *Chin. Phys.* **C38** (2014) 090001, doi:[10.1088/1674-1137/38/9/090001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001).
- [2] J. D. Lykken, “Beyond the Standard Model”, [arXiv:1005.1676](https://arxiv.org/abs/1005.1676).
- [3] CMS Collaboration, “The CMS experiment at the CERN LHC”, *JINST* **3** (2008) S08004, doi:[10.1088/1748-0221/3/08/S08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004).
- [4] e. Evans, Lyndon and e. Bryant, Philip, “LHC Machine”, *JINST* **3** (2008) S08001, doi:[10.1088/1748-0221/3/08/S08001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08001).
- [5] M. Lamont, “Longer term LHC schedule”. <http://lhc-commissioning.web.cern.ch/lhc-commissioning/schedule/LHC-long-term.htm>.
- [6] L. Rossi et al., “2nd Periodic HILUMI LHC Report”. http://hilumilhc.web.cern.ch/sites/hilumilhc.web.cern.ch/files/HiLumi-P2-report_public_version.pdf, 2014.
- [7] J. Butler, D. Contardo, M. Klute, J. Mans, and L. Silvestris, “Technical Proposal for the Phase-II Upgrade of the CMS Detector”. <https://cds.cern.ch/record/2020886>, 2015.
- [8] S. D. Ellis, C. K. Vermilion, and J. R. Walsh, “Techniques for improved heavy particle searches with jet substructure”, *Phys.Rev.* **D80** (2009) 051501, doi:[10.1103/PhysRevD.80.051501](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.80.051501), [arXiv:0903.5081](https://arxiv.org/abs/0903.5081).
- [9] S. D. Ellis, C. K. Vermilion, and J. R. Walsh, “Recombination Algorithms and Jet Substructure: Pruning as a Tool for Heavy Particle Searches”, *Phys.Rev.* **D81** (2010) 094023, doi:[10.1103/PhysRevD.81.094023](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.094023), [arXiv:0912.0033](https://arxiv.org/abs/0912.0033).
- [10] J. Thaler and K. Van Tilburg, “Identifying Boosted Objects with N-subjettiness”, *JHEP* **1103** (2011) 015, doi:[10.1007/JHEP03\(2011\)015](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2011)015), [arXiv:1011.2268](https://arxiv.org/abs/1011.2268).
- [11] CMS Collaboration, “Search for diboson resonances in the semileptonic $X \rightarrow ZV \rightarrow \ell^+ \ell^- q\bar{q}$ final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with CMS”, Technical Report CMS-PAS-B2G-16-010, CERN, Geneva, (2016). <https://cds.cern.ch/record/2199611>.

- [12] CMS Collaboration, “Performance of b-Tagging Algorithms in Proton Collisions at 13 TeV using the 2016 Data”,
<https://cds.cern.ch/record/2202967>.
- [13] Y. Gao, A. V. Gritsan, Z. Guo et al., “Spin determination of single-produced resonances at hadron colliders”, *Phys. Rev.* **D81** (2010) 075022,
[doi:10.1103/PhysRevD.81.075022](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.075022), [arXiv:1001.3396](https://arxiv.org/abs/1001.3396).
- [14] S. Bolognesi, Y. Gao, A. V. Gritsan et al., “On the spin and parity of a single-produced resonance at the LHC”, *Phys. Rev.* **D86** (2012) 095031,
[doi:10.1103/PhysRevD.86.095031](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.095031), [arXiv:1208.4018](https://arxiv.org/abs/1208.4018).
- [15] CMS Collaboration, “Search for new diboson resonances in the dilepton + jets final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with 2016 data”, Technical Report CMS-PAS-HIG-16-034, CERN, Geneva, (2017).
<https://cds.cern.ch/record/2243295>.
- [16] Planck Collaboration, “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters”,
Astron. Astrophys. **571** (2014) A16, [doi:10.1051/0004-6361/201321591](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321591),
[arXiv:1303.5076](https://arxiv.org/abs/1303.5076).
- [17] CMS Collaboration, “Search for dark matter production in association with jets, or hadronically decaying W or Z boson at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Technical Report CMS-PAS-EXO-16-013, CERN, Geneva, (2016).
<https://cds.cern.ch/record/2148032>.
- [18] CMS Collaboration, “Search for dark matter in final states with an energetic jet, or a hadronically decaying W or Z boson using 12.9 fb^{-1} of data at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Technical Report CMS-PAS-EXO-16-037, CERN, Geneva, (2016).
<https://cds.cern.ch/record/2205746>.
- [19] N. G. Deshpande and E. Ma, “Pattern of Symmetry Breaking with Two Higgs Doublets”, *Phys. Rev.* **D18** (1978) 2574, [doi:10.1103/PhysRevD.18.2574](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.18.2574).
- [20] L. Lopez Honorez, E. Nezri, J. F. Oliver et al., “The Inert Doublet Model: An Archetype for Dark Matter”, *JCAP* **0702** (2007) 028,
[doi:10.1088/1475-7516/2007/02/028](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2007/02/028), [arXiv:hep-ph/0612275](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0612275).
- [21] CMS Collaboration, “Search for heavy resonances decaying to a pair of Higgs bosons in four b quark final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV”, Technical Report CMS-PAS-B2G-16-008, CERN, Geneva, (2016).
<https://cds.cern.ch/record/2202811>.

- [22] CMS Collaboration, “Measurement of the differential cross section for the production of a $W (\rightarrow \mu\nu)$ boson in association with jets at $\sqrt{s} = 13$ TeV”, Technical Report CMS-PAS-SMP-16-005, CERN, Geneva, (2016).
<https://cds.cern.ch/record/2204927>.
- [23] T. Tomei, “Trigger Algorithms for Alignment and Calibration at CMS”.
<http://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1072443/>,
2016. Poster presented at ICHEP 2016, Chicago, United States.
- [24] U. Nations, “International Day of Women and Girls in Science”. <http://www.un.org/en/events/women-and-girls-in-science-day/>.
- [25] D. Klebis, “Estudantes participam de Masterclass de física para celebrar Dia das Mulheres e Meninas na Ciência”. <https://goo.gl/2OrQSw>.