



Núcleo de  
Computação  
Científica



**unesp**

---

## Relatório de Atividades

Thiago R. F. P. Tomei

— NCC/UNESP —

---

Relatório Trienal  
Período: Março/2016 a Março/2019

## Índice

---

1	Introdução . . . . .	2
2	Atividades de Pesquisa . . . . .	4
2.1	Busca por Novas Ressonâncias no Canal de Dibósons . . . . .	4
2.2	Busca por Matéria Escura . . . . .	8
2.3	Estudos em Aprendizado de Máquina . . . . .	14
2.4	Outras Atividades . . . . .	17
2.5	Bases de Dados . . . . .	20
3	Atividades Docentes . . . . .	21
3.1	Disciplinas Ministradas . . . . .	21
3.2	Orientações Acadêmicas . . . . .	21
4	Atividades de Extensão . . . . .	22
4.1	MasterClass de Física de Altas Energias . . . . .	22
4.2	Divulgação Científica na Internet . . . . .	22

# 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 e seu upgrade, o *High-Luminosity Large Hadron Collider* [5, 6], existe uma oportunidade única de alavancar o nível científico do grupo através da participação no projeto e construção da próxima fase do experi-

mento CMS [7]. Minha proposta é de contribuir tanto para o crescimento 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)<sup>1</sup>. 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/2019. Para uma visão mais detalhada, as bases de dados listadas na Seção 2.5 apresentam mais informações.

---

<sup>1</sup><https://cds.cern.ch/collection/CMS%20Physics%20Analysis%20Summaries>

## 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*. Também dediquei algum tempo a estudos iniciais de *Aprendizado de Máquina*, tendo em vista a imensa revolução que essa área promete trazer a todas as áreas da ciência, inclusive a física de altas energias. 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.

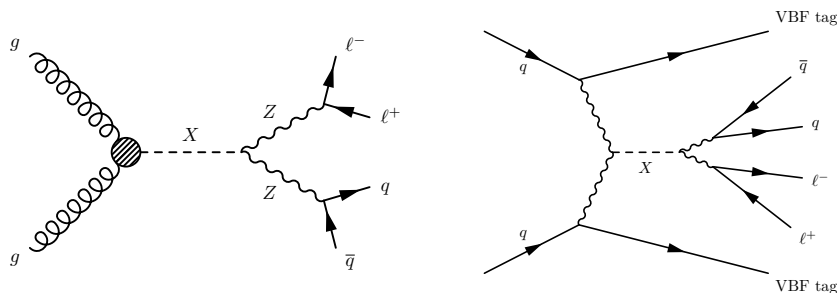


Figura 1: Canais de produção de uma nova ressonância no LHC: produção por fusão de glúons (esquerda) e por fusão de bósons vetoriais (direita).

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  $2.3 \text{ fb}^{-1}$  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 [12]. Alguns resultados são mostrados na Fig. 2.

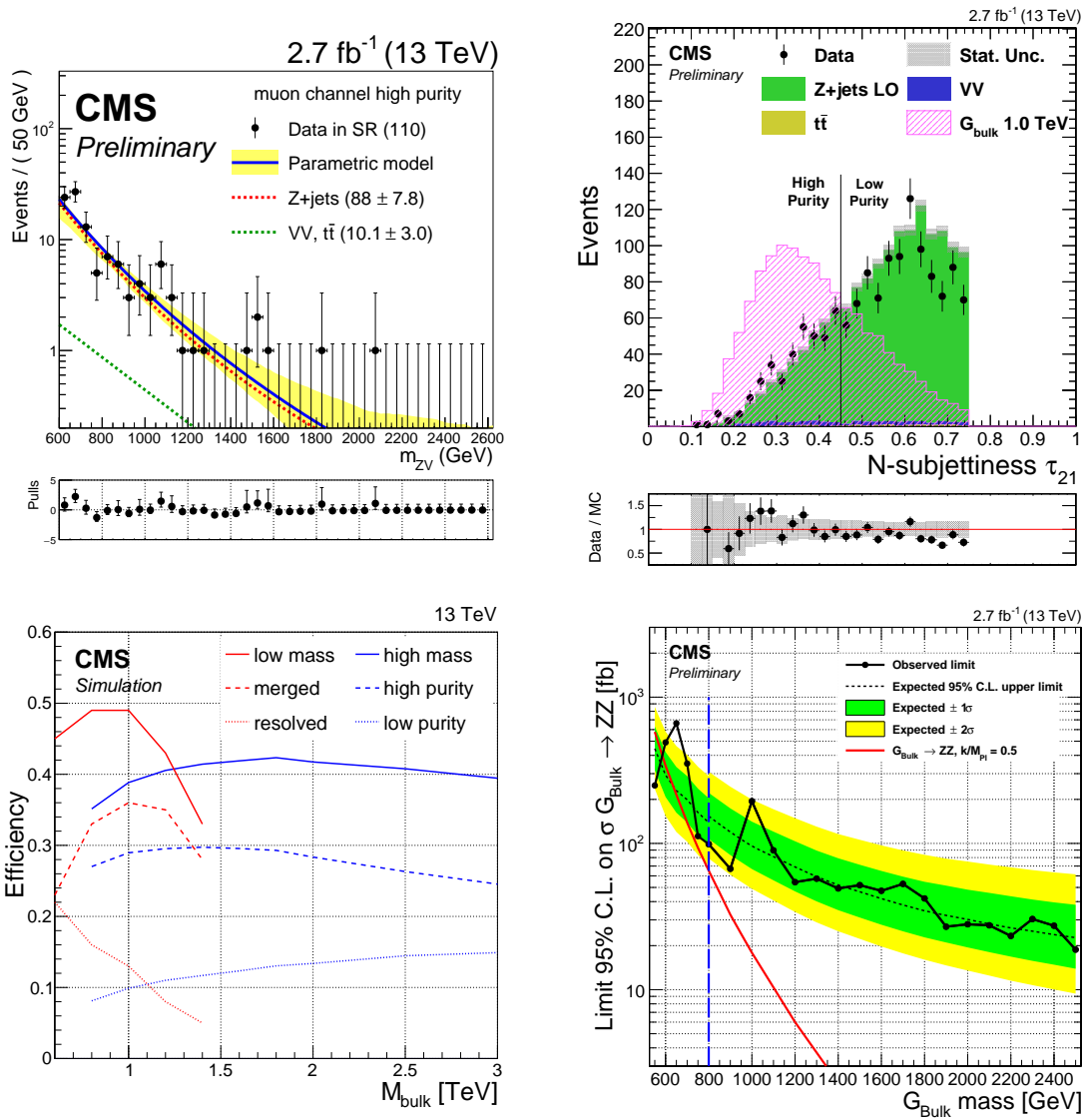


Figura 2: Resultados das análises de busca por ressonâncias no canal de dibósons para o conjunto completo de dados de 2015 [11]. Alto: exemplos de distribuição de variáveis de interesse, a massa invariante do sistema de dois bósons Z (esquerda) e o discriminante de subestrutura de jato  $\tau_{21}$  (direita). Baixo: alguns resultados da análise de dados, eficiência da seleção de eventos para o processo  $gg \rightarrow G_{\text{bulk}}$  para diferentes critérios de seleção – baixa e alta massa (esquerda), limites superiores (com 95% de nível de confiança) para diferentes hipóteses de massa da ressonância sob procura – seleções de baixa e alta massa separadas pela linha azul tracejada (direita).

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  $\sqrt{s} = 13$  TeV* [13]. O Dr. Abad defendeu sua tese em 31 de janeiro de 2017, comigo sendo parte de sua banca examinadora.

Durante o ano de 2017, passei a trabalhar na análise dos dados tomados em 2016 –  $35.9 \text{ fb}^{-1}$  de dados certificados de colisões próton-próton a energia de centro de massa de 13 TeV – e 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 provindas do grupo de física do bóson de Higgs do experimento como *b-tagging* [14], *VBF-tagging* e *Matrix Element Likelihood Analysis* (MELA) [15, 16], bem como as já mencionadas técnicas de sub-estrutura. Neste ano, trabalhamos na extensão do trabalho para ressonâncias de grande largura (até  $\Gamma = 1$  TeV) e mais estados finais do canal ZZ:  $2\ell 2q$ ,  $2\ell 2\nu$  e  $4\ell$ . O trabalho foi finalizado no começo de 2018, com os resultados publicados no *Journal of High Energy Physics* [17]. Alguns resultados são mostrados na Fig. 3.

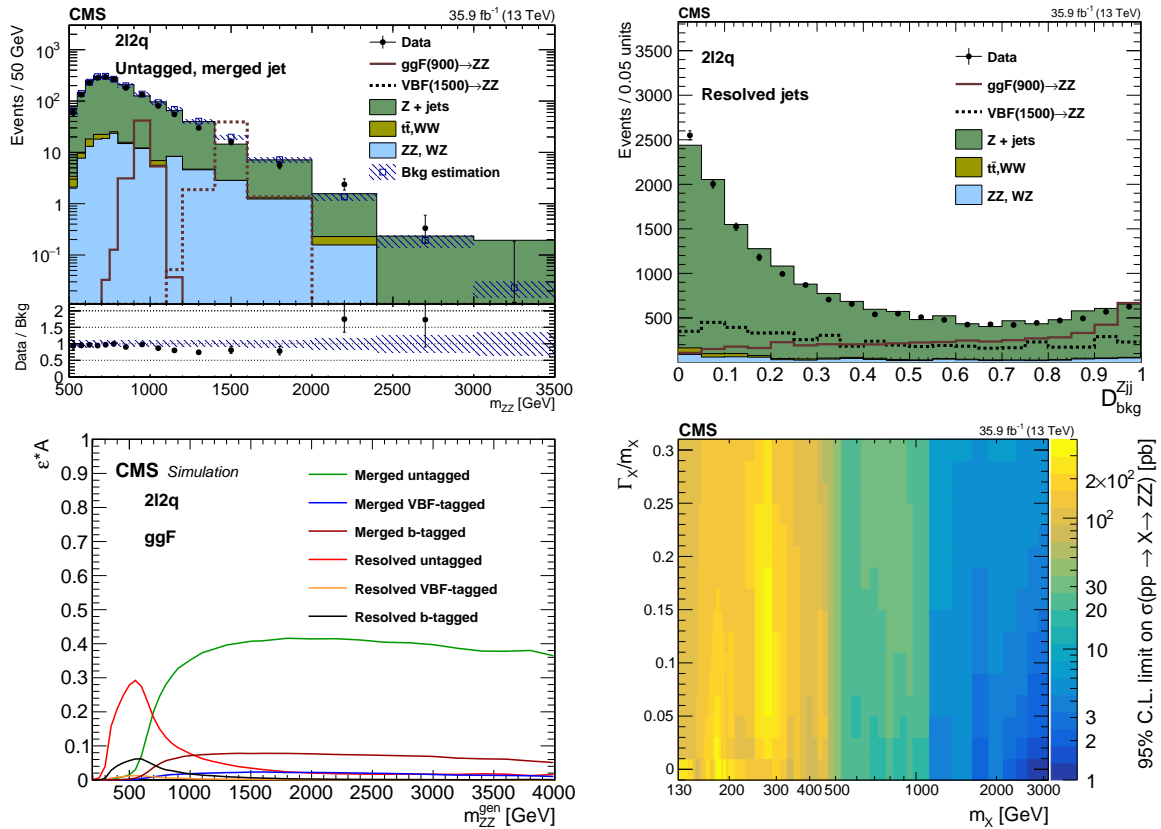


Figura 3: Resultados das análises de busca por ressonâncias no canal de dibósons para o conjunto completo de dados de 2016 [17]. Alto: exemplos de distribuição de variáveis de interesse, a massa invariante do sistema de dois bósons Z (esquerda) e o discriminante cinemático MELA (direita). Baixo: alguns resultados da análise de dados, eficiência da seleção de eventos para o processo  $gg \rightarrow H$  nos diferentes canais (esquerda), limites superiores (com 95% de nível de confiança) para diferentes hipóteses de massa e largura da ressonância sob procura (direita).



## 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% [18]. 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  $\chi$  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 ( $E_T^{\text{miss}}$ ).

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  $E_T^{\text{miss}}$ +jatos, com resultados preliminares publicados no documento **CMS PAS EXO-16-013** [19]. 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. 4. O resultado final dessa análise foi publicado no começo de 2017 no *Journal of High Energy Physics* [20].

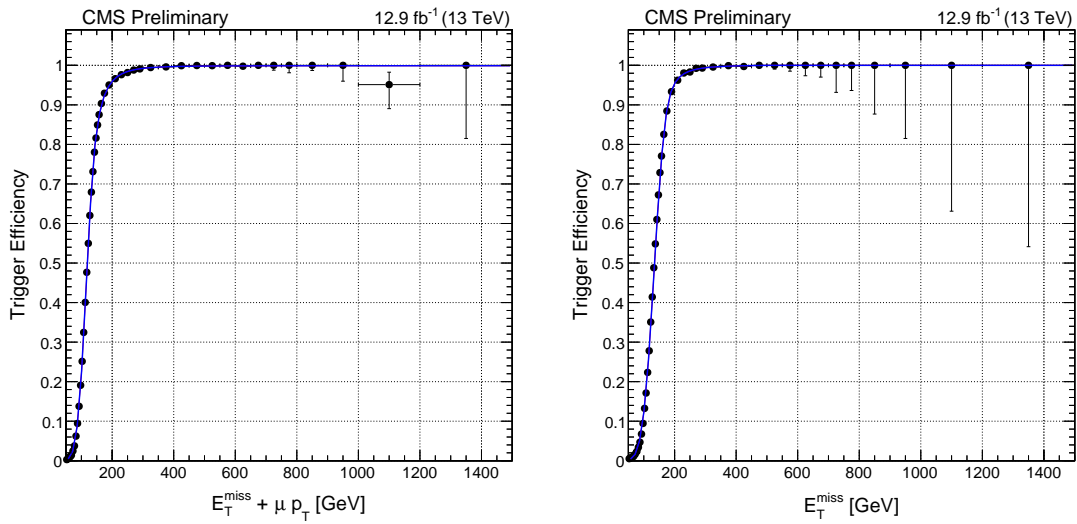


Figura 4: Eficiências do *trigger* de  $E_T^{\text{miss}}$  medidas em dois conjuntos-teste de dados independentes, obtidos com  $12.9 \text{ fb}^{-1}$  de colisões próton-próton tomados pelo CMS durante 2016. Esquerda (direita): conjunto de dados-teste onde foi detectada a presença de um múon (elétron) bem reconstruído, indicando a provável presença de um bóson  $W$  decaindo no canal leptônico.

## 2.2.1 Inert Two-Higgs Doublet Model

Em 2017 e 2018, trabalhei com os Profs. Alexander Belyaev e Stefano Moretti da Universidade de Southampton, com o Prof. Pedro Mercadante da UFABC e com o Dr. Chang-Seong Moon 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 Model* (i2HDM) [21, 22], no qual uma segunda partícula de Higgs  $h_1$  assume o papel de matéria escura, e suas possíveis assinaturas experimentais no detector CMS para maiores luminosidades integradas de até  $3000 \text{ fb}^{-1}$ . Tivemos que reorganizar o nosso artigo científico para levar em conta os últimos resultados dos cálculos teóricos para o processo  $pp \rightarrow h_1 h_1 + \text{jatos}$ , particularmente na resolução do *loop* do quark top, como mostrado na Fig. 5. Isso levou a grandes diferenças nos resultados esperados, alguns dos quais podem ser vistos na Fig. 6. Optamos também por aperfeiçoar o artigo com a inclusão dos resultados publicados pelo experimento XENON 1T [23], que alteraram significativamente o panorama da busca por Matéria Escura. O artigo foi finalizado no final de 2018, sendo publicado no *Physical Review D* [24].

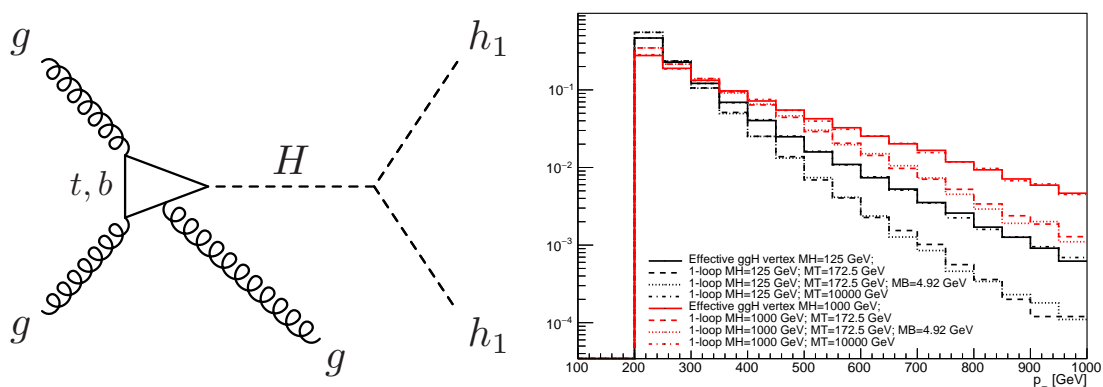


Figura 5: Esquerda: expansão do *loop* do quark top, relevante para o processo  $pp \rightarrow h_1 h_1 + \text{jatos}$  do modelo i2HDM, onde  $h_1$  é uma nova partícula de Higgs que assume o papel de matéria escura. Direita: modificação do espectro de  $p_T$  do bóson de Higgs com as correções da expansão supracitada. O efeito das correções é tornar o espectro muito mais suave, o que diminui fortemente as chances de detecção do processo.

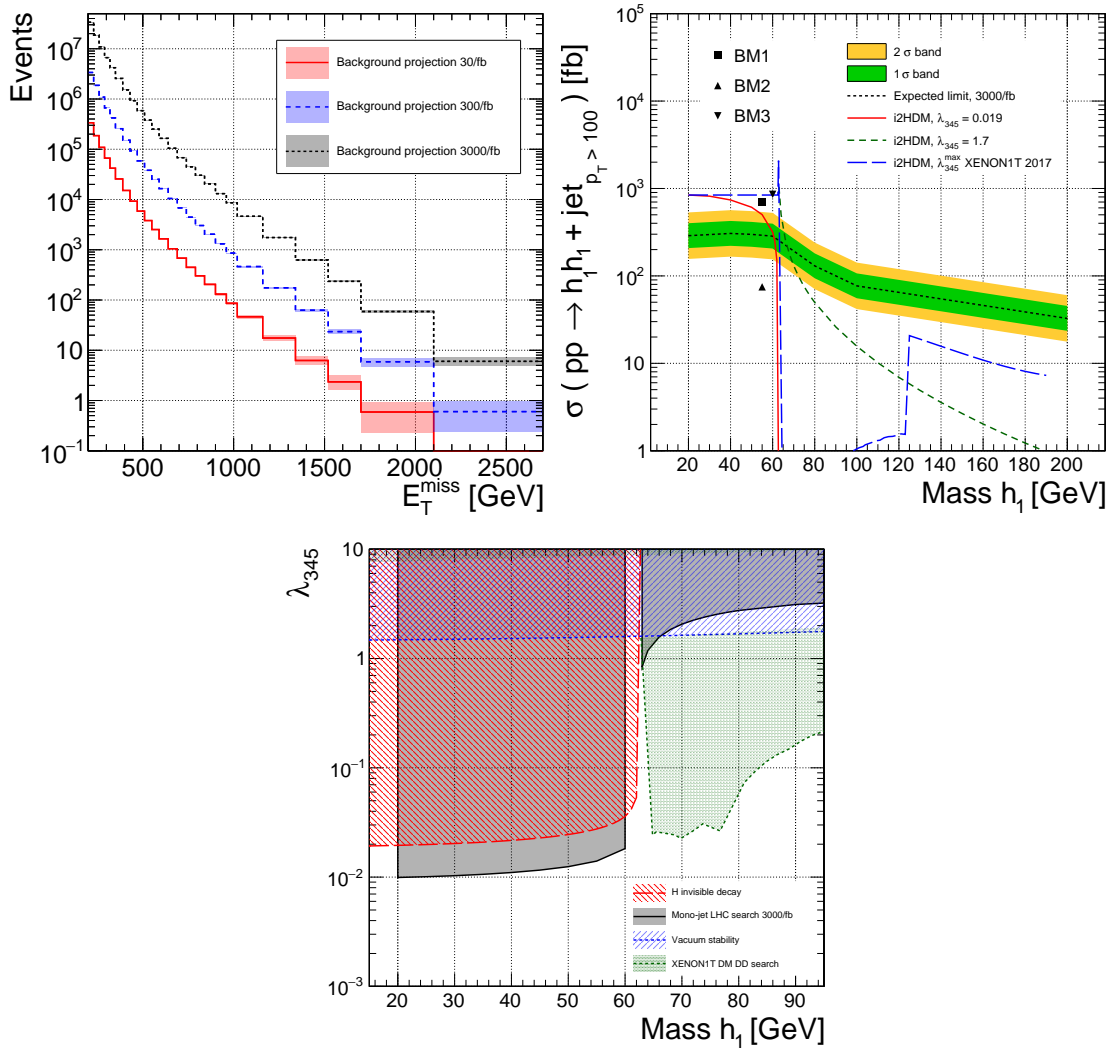


Figura 6: Alto, esquerda: projeção do fundo de Modelo Padrão para a busca por matéria escura no contexto do modelo i2HDM, para os cenários de 30, 300 e 3000 fb $^{-1}$  tomados com o detector CMS. Alto, direita: limite esperado para a mesma situação – as linhas vermelha cheia e verde pontilhada representam a seção de choque de diferentes possíveis configurações do modelo i2HDM; a linha azul tracejada representa a máxima seção de choque possível para o modelo, em conjunto com os resultados do experimento XENON 1T [23]. Baixo: reinterpretação dos limites no espaço de parâmetros do modelo i2DHM,  $m_{h_1} \times \lambda_{345}$ .

## 2.2.2 Dark Higgs Model

Em 2018, iniciei um novo esforço na busca por matéria escura, focando no chamado modelo de “Higgs escuro” [25, 26] que descreverei brevemente. Consideramos um “setor escuro”, equipado com uma simetria de calibre  $U(1)'$ . O modelo contém uma partícula de matéria escura  $\chi$ , um novo campo escalar complexo  $S$  que sofre quebra de simetria espontânea (SSB) e dá origem a um novo bóson escalar  $s$  (o Higgs escuro) e um bóson de calibre  $Z'$ . A lagrangeana do modelo após a SSB é

$$\mathcal{L}_\chi = -\frac{1}{2}g_\chi Z'^\mu \bar{\chi} \gamma^5 \gamma_\mu \chi - g_\chi \frac{m_\chi}{m_{Z'}} s \chi + 2g_\chi Z'^\mu Z'_\mu (g_\chi s^2 + m_{Z'} s)$$

e tomamos como parâmetros independentes as três massas físicas das partículas ( $m_\chi$ ,  $m_{Z'}$ ,  $m_s$ ). O Higgs escuro  $s$  se mistura com o bóson de Higgs do modelo padrão  $H$ , permitindo que  $s$  decaia mesmo que ele seja a partícula mais leve do setor escuro; por outro lado, o ângulo de mistura pode ser tomado arbitrariamente pequeno de modo a prevenir desvios mensuráveis nas propriedades de  $H$ .

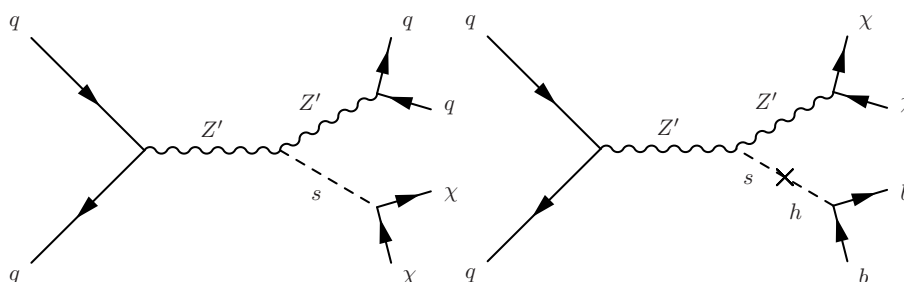


Figura 7: Diagramas de interesse para produção do Higgs escuro no LHC.

Os diagramas de interesse para uma busca no LHC são mostrados na Fig. 7. Esses processos dão origem à assinatura de hádrons +  $E_T^{\text{miss}}$ , onde os hádrons podem aparecer como um par de jatos regulares ou como um único jato gordo com subestrutura; para o segundo diagrama, a ocorrência de hádrons B aumenta a possibilidade de detecção através do *b-tagging* dos jatos. Juntamente com a Dra. Ahuja e o grupo do Fermilab, liderado pelos Drs. Boditha Jayatilaka e Matteo Cremonesi, começamos a analisar o conjunto de dados de colisões pp de 2016–2017 ( $82.74 \text{ fb}^{-1}$ ). Os resultados iniciais (apenas com dados de 2016) são mostrados no painel esquerdo da Fig. 8; claramente ainda há uma discordância residual a ser compreendida. Por outro lado, juntamente com a adição dos dados de 2017, estamos trabalhando em aperfeiçoar a própria análise, como uma identificação melhorada de jatos gordos baseada em algoritmos de jato de área ampla e aprendizado profundo (DeepAK15)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Mais detalhes podem ser vistos em <https://indico.cern.ch/event/761077/contributions/3160541/attachments/1747402/2829721/higworkshop-h2cc-20181106-LG.pdf>.

Esse assunto tem sinergia com meus interesses em aprendizado de máquina, mas ainda estamos nos estágios preliminares deste trabalho. Em paralelo, comecei a supervisionar um aluno de mestrado, o Sr. Breno Orzari, sobre este mesmo assunto. O Sr. Orzari começou a reproduzir as seções de choque do modelo e alguns resultados preliminares da seleção de eventos, baseado em um trabalho de referência [26]. Seus resultados preliminares são mostrados na Fig. 9.

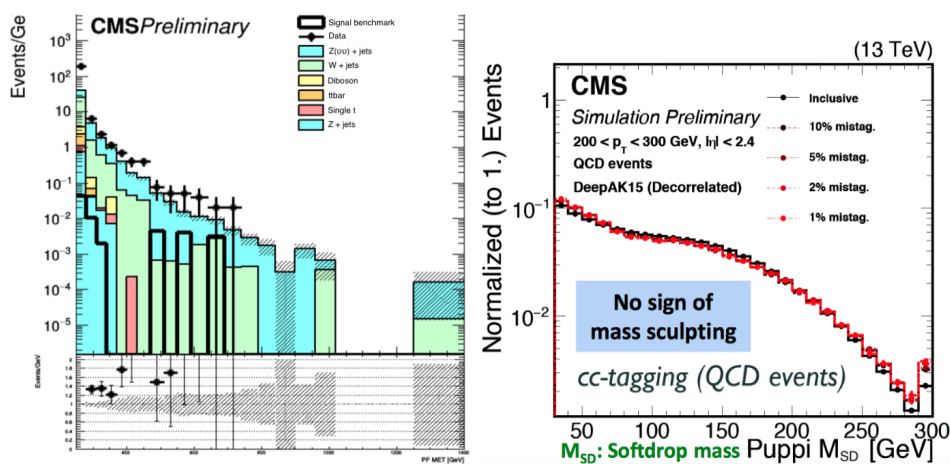


Figura 8: Esquerda: distribuição da  $E_T^{\text{miss}}$  em uma região de controle ("0 b-tagged signal region") do conjunto de dados de 2016 para dados reais e simulação. Direita: distribuição da massa "Puppi SoftDrop" (uma medida da massa do jato hadrônico) tanto de modo inclusivo (preto) como com diferentes pontos de operação do algoritmo identificador de jatos (tons de vermelho).

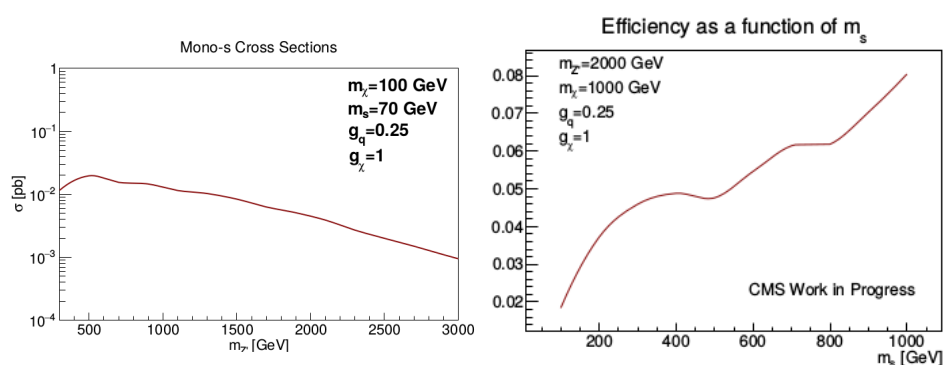


Figura 9: Esquerda: seção de choque para o processo  $pp \rightarrow \chi\chi s$ , calculada para os parâmetros do modelo de Dark Higgs mostrados no gráfico, para colisões pp com  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Direita: eficiência de seleção de eventos de sinal, seguindo proposta de critérios de seleção sugerida em [26].

## 2.3 Estudos em Aprendizado de Máquina

Em 2017, comecei a me dedicar a estudos em aprendizado de máquina (*machine learning* – ML), haja vista a aceleração do uso dessas técnicas em praticamente todas as áreas da ciência, e particularmente em física de altas energias. Juntamente com o Dr. Vargas, membro integrante do *Center of Excellence in Machine Learning* da UNESP (CoE-ML) [27], trabalhei na identificação de jatos *boosted*, provenientes de decaimentos de bósons vetoriais ( $V \rightarrow qq$ , onde  $V = W, Z$ ), com redes neurais convolucionais – uma das ferramentas padrão da análise de imagens com *machine learning*. Fizemos a comparação com as técnicas tradicionais de físicas altas energias, com as quais eu trabalhei na frente de Novas Ressonâncias, e os resultados se mostraram bastante promissores, conforme pode ser visto na Fig. 10. Os resultados foram apresentados pelo Dr. Vargas em um poster no ENFPC2017: XXXVIII Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Passa Quatro, MG, Brasil (2017) [28].

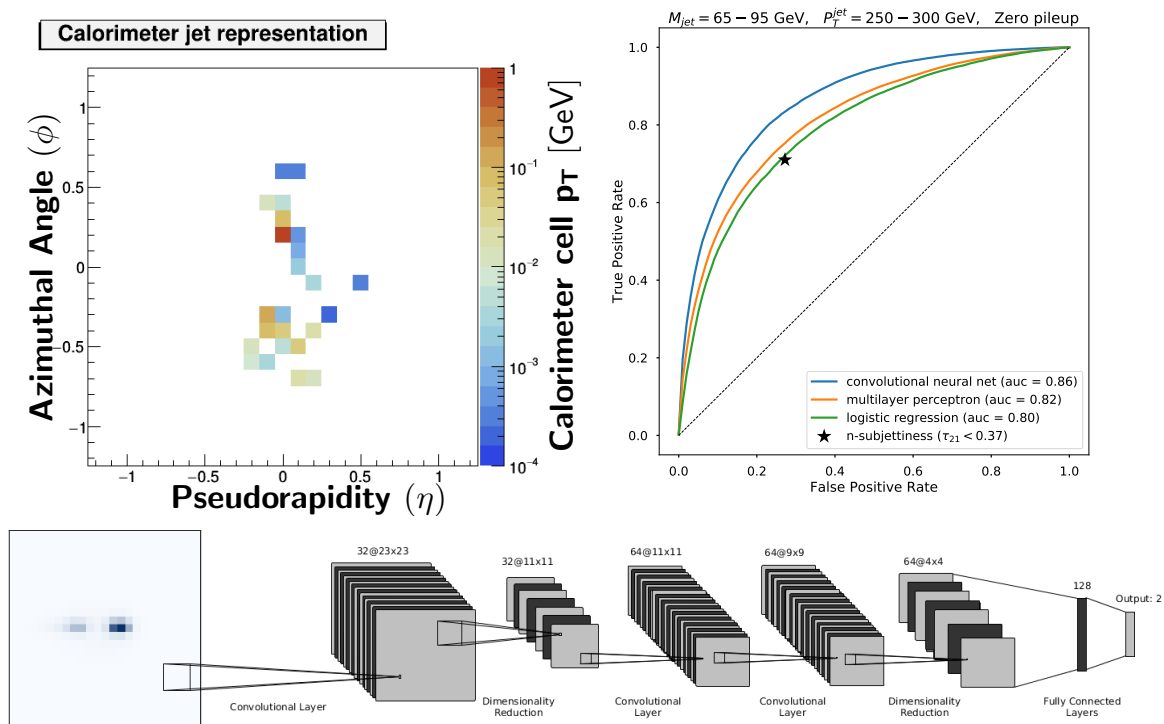


Figura 10: Alto, esquerda: exemplo simplificado de imagem de calorímetro de um process  $W \rightarrow qq$  *boosted*. Alto, esquerda: comparação o uso de uma rede neural convolucional, um *perceptron* de múltiplas camadas e uma regressão logística para a identificação do sinal. Baixo: arquitetura da rede neural utilizada.

Com relação ao ano anterior, em 2018 decidi explorar outras direções para o meu envolvimento com aprendizado de máquina, estudando os chamados *modelos*

*generativos*. O objetivo foi a investigação de métodos de aceleração para a simulação de eventos de colisão de partículas, uma tarefa fundamental para o trabalho da comunidade de HEP. A simulação dos efeitos do detector em eventos de HEP geralmente é feita com o software GEANT4 [29], e pode levar mais de um minuto por evento para interações complexas como produção de  $t\bar{t}$  no LHC na presença de pileup. Trabalhos anteriores nessa área resultaram em abordagens como o ATLAS FastCaloSim [30] e o CMS FastSim [31], no qual os autores relatam grandes acelerações na simulação do calorímetro, mas à custa de algum sacrifício na precisão.

Os modelos geradores, por outro lado, são uma classe de modelos de ML que podem alcançar altas velocidades, mantendo alta precisão. Juntamente com a equipe de computação do SPRACE – Dr. Raphael Cobe, Jefferson Fialho e Julio Amaral – fiz uma investigação preliminar sobre dois tipos de modelos generativos: Redes Generativas Adversariais (*Generative Adversarial Networks – GANs*) e AutoCodificadores Variacionais (*Variational AutoEncoders – VAEs*). Para nossa investigação, utilizamos amostras de partículas únicas incidentes na parte do cilindro do Calorímetro Eletromagnético do CMS (ECAL), simuladas com GEANT4. As unidades básicas da ECAL são cristais de tungstato de chumbo ( $\text{PbWO}_4$ ) que cobrem individualmente uma região  $(0,017 \times 0,017)$  no plano  $(\eta, \phi)$ . O problema pode ser transformado em um problema de visão computacional, identificando essas unidades básicas como “pixels” e todo o calorímetro como uma “imagem”. Na Fig. 11 temos alguns resultados preliminares; infelizmente, essa linha de trabalho teve que ser abandonada temporariamente devido ao fim das bolsas de apoio que sustentavam parte importante da equipe.



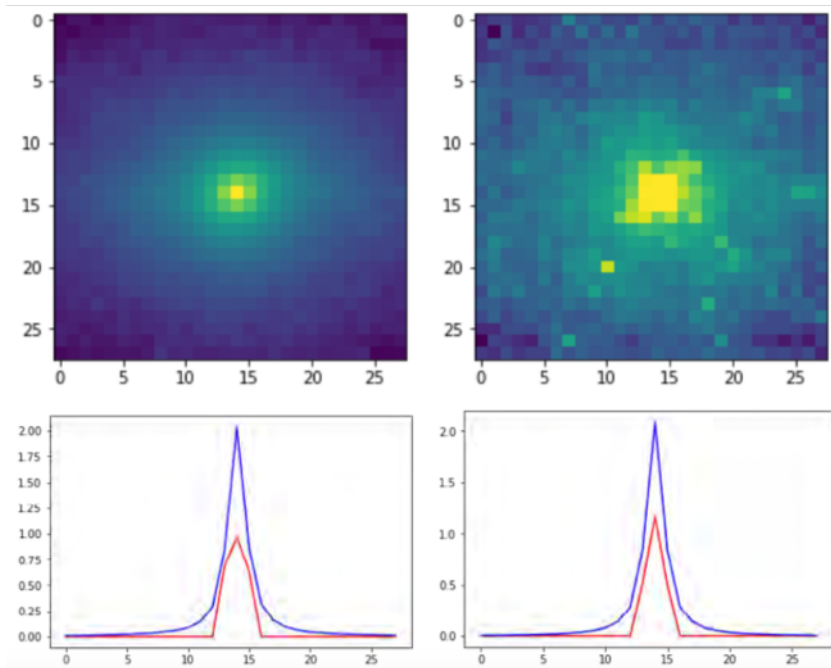


Figura 11: Interaction of a 50 GeV negative pion with the CMS ECAL barrel. Top: true (left) and synthetic (right) signals. Bottom: signal dispersion in  $\eta$  and  $\phi$  directions, for real (blue) and synthetic (red) signals.

## 2.4 Outras Atividades

### 2.4.1 Analysis Review Committees

Participei de quatro comitês de avaliação interna de análise de 2016 a 2018, que resultaram em três artigos científicos.

- Análises **CMS PAS B2G-16-008** [32] / **CMS PAS B2G-16-026** [33], *Search for a massive resonance decaying to a pair of Higgs bosons in the four  $b$  quark final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, que se dedicaram à busca de ressonâncias no canal  $pp \rightarrow X \rightarrow HH \rightarrow 4b$  com dados de 2015 e 2016, respectivamente.
- Análise **CMS PAS SMP-16-005** [34], *Measurement of the differential cross sections for the associated production of a  $W$  boson and jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, que se dedicou a medidas da seção de choque de produção de bósons  $W$  no canal de múons na nova configuração do LHC.
- Análise **CMS PAS B2G-17-019** [35], *Search for production of Higgs boson pairs in the four  $b$  quark final state using large-area jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV*, se dedica à busca de nova física no canal  $pp \rightarrow X \rightarrow HH \rightarrow 4b$ , tanto através de fenômenos ressonantes como não-ressonantes com o conjunto completo de dados de 2016 –  $35.9 \text{ fb}^{-1}$  de colisões  $pp$  a 13 TeV de centro de massa.

### 2.4.2 CMS Collaboration Service Work

Como membro da colaboração CMS, é parte do meu trabalho científico contribuir para o bom andamento do experimento. De 2016 a 2018 participei das seguintes atividades de serviço para a colaboração:

- **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 de 2016 a 2018 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. De 2016 a 2018, fiz 5 plantões de uma semana de disponibilidade 24/7, bem como 5 plantões de *backup*.

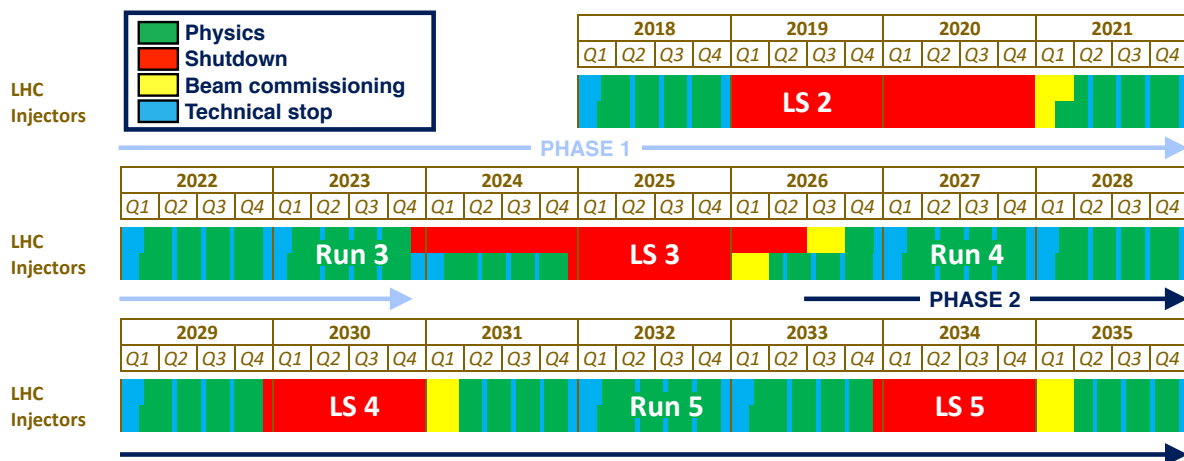
- **Coordenador do High-Level Trigger para a Fase II:** a partir de 2026, o LHC entrará em sua fase de alta luminosidade (HL-LHC), com luminosidade instantânea de até  $7.5 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$ , condições essas que levarão a um *pileup*<sup>3</sup> médio  $\langle \text{PU} \rangle = 200$  e uma luminosidade integrada final de  $3000 \text{ fb}^{-1}$  em 2035. O experimento CMS vai passar por uma série de aprimoramentos para fazer frente a essas novas condições na chamada *Fase 2* [7]. Um aspecto crítico da Fase 2 é o sistema de trigger e aquisição de dados [36]. Desde setembro de 2018, em conjunto com o Dr. Andrea Bocci (CERN), estou coordenando a preparação do *Technical Design Report* (TDR) que documentará o trabalho de *upgrade* desse sistema. A Fig. 12 mostra os cronogramas previstos para o HL-LHC e para o TDR. Este trabalho será meu principal serviço para a colaboração até 2021, e será foco do meu Projeto de Pesquisa para o próximo triênio.

#### 2.4.3 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) [37].
- **Thiago R. F. P. Tomei**, *Search for Dark Matter at CMS*, Apresentação na PPC2016: X<sup>th</sup> International Conference on the Interconnection between Particle Physics and Cosmology, ICTP-SAIFR, São Paulo, Brasil (2016) [38].
- **Thiago R. F. P. Tomei**, *Evolution of online algorithms in ATLAS and CMS in Run2*, Apresentação Paralela na LHCP2017: The Fifth Annual Large Hadron Collider Physics Conference, Shanghai, China, (2017) [39, 40].
- **Thiago R. F. P. Tomei**, *Searches for a Diboson Resonance with the CMS Experiment*, Comunicação oral no ENFPC2017: XXXVIII Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos, Passa Quatro, MG, Brasil (2017) [41].

---

<sup>3</sup>Ocorrência de múltiplas colisões nos cruzamentos de grupos de prótons do acelerador.



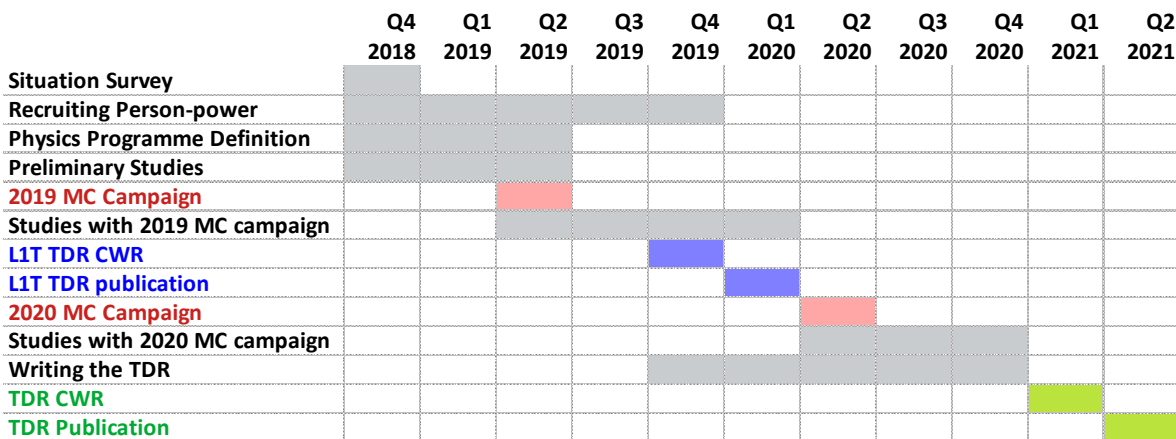
### Preliminary Gantt-Chart for CMS-HLT-Phase2-TDR

Owners:

A. Bocci (CERN), T. Tomei (SPRACE-Unesp)

Last Revision:

2018-11-06



\*As of the time of this writing, "Preliminary Studies" means "taking the latest MC, CMSSW and getting HLT to work"

Figura 12: Alto: Agenda preliminar de operações do LHC de 2018 a 2035. O período do HL-LHC é indicado pela seta azul-marinho (Phase 2). Baixo: Diagrama de Gantt preliminar para a preparação do TDR do sistema de aquisição de dados e trigger da Fase 2 do CMS. A data alvo para publicação é o segundo quadrimestre de 2021.

#### 2.4.4 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.

Sigo sendo 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.

Fui outorgado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) com um Projeto Universal (Faixa A), intitulado *Aplicações de Inteligência Artificial em Física de Altas Energias*, para implementação de uma bolsa de Desenvolvimento Tecnológico Industrial (DTI) durante cinco meses.

#### 2.4.5 Artigos Completos Publicados em Periódicos

- **Artigos publicados com a Colaboração CMS:** 373 artigos publicados de março de 2016 a março de 2019, de acordo com a lista anexa.
- “Advancing LHC probes of dark matter from the inert two-Higgs-doublet model with the monojet signal”, *Phys. Rev. D* **99** (2019), no. 1, 015011.

### 2.5 Bases de Dados

- **Currículo Lattes:**  
<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4713328U4>
- **ORCID:**  
<https://orcid.org/0000-0002-1809-5226>
- **Researcher ID:**  
<http://www.researcherid.com/rid/E-7091-2012>
- **Google Scholar:**  
[https://scholar.google.com.br/citations?user=Ud\\_lv6EAAAAJ&hl=en](https://scholar.google.com.br/citations?user=Ud_lv6EAAAAJ&hl=en)

Envio em anexo o Currículo Lattes **apenas com os dados relativos ao período deste relatório, 2016–2018**. Adicionalmente, os artigos completos publicados no período 2016–2018 estão listados em um documento à parte – **devido à inadequação do sistema eletrônico do CNPq, a lista de artigos da colaboração CMS não pode ser publicada, pois é muito extensa**.

## 3. Atividades Docentes

---

### 3.1 Disciplinas Ministradas

- *Partículas Elementares II*: Instituto de Física Teórica (IFT-UNESP), segundo semestre de 2017.
- *Mecânica Quântica II*: Instituto de Física Teórica (IFT-UNESP), segundo semestre de 2018.
- *Mecânica Quântica II*: Instituto de Física Teórica (IFT-UNESP), primeiro semestre de 2019 (atual).

### 3.2 Orientações Acadêmicas

- *Sr. Gianni Liveraro*, aluno de Iniciação Científica (2017–presente). Discente do Instituto de Biociências do Câmpus de Botucatu (IBB-UNESP). Projeto: *Introdução à Física de Altas Energias*. Bolsista PIBIC (processo 48159). O Sr. Liveraro tem estudado a simulação de colisões de partículas em colisores hadrônicos a altas energias, e é um forte candidato a um posterior mestrado.
- *Sr. Breno Orzari*, aluno de Mestrado (2018–presente). Discente do Instituto de Física Teórica (IFT-UNESP). Egresso do Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro (IGCE-UNESP). Projeto: *Busca por Nova Física no Experimento CMS do Large Hadron Collider*. Bolsista FAPESP (processo 2018/01398-1). O Sr. Orzari tem estudado as bases teóricas da física de partículas, a simulação de colisões de partículas em colisores hadrônicos a altas energias, e técnicas de análise experimental. Seu mestrado caminha para uma excelente conclusão e ele é um forte candidato a um posterior doutorado.

## 4. Atividades de Extensão

---

### 4.1 MasterClass de Física de Altas Energias

Todos os anos, participo do *International MasterClass de Física de Altas Energias* [42], com participação de centenas de estudantes de ensino médio. Apresento o seminário *A Estrutura Elementar da Matéria*, que dá aos estudantes uma visão geral sobre o tema, e auxilio os estudantes 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. No período deste relatório, participei das edições de 2017, 2018 e 2019.

Gostaria de fazer aqui um aparte sobre o MasterClass Feminino. 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 [43]. 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 tem tomado a iniciativa de realizar essa edição especial do evento destinada especialmente a alunas de ensino médio e primeiro ano de licenciatura.

### 4.2 Divulgação Científica na Internet

Em colaboração com o Prof. Ethan Siegel, do blog *Starts With A Bang* [44], a equipe do SPRACE começou a publicar traduções de textos de divulgação através de redes sociais. Participei da tradução dos seguintes textos:

- <https://www.sprace.org.br/divulgacao/noticias/seis-anos-apos-o-higgs-o-que-mais-o-lhc-descobriu>
- <https://www.sprace.org.br/divulgacao/noticias/como-um-experimento-nuclear-que-falhou-acidentalmente-deu-origem-a-astronomia-de-neutrinos>
- <https://sprace.org.br/index.php/esse-e-o-verdadeiro-motivo-pelo-qual-ainda-nao-detectamos-materia-escura-diretamente/>

Também participei dos vídeos da série *Destaque em Física*, da Sociedade Brasileira de Física:

- Estudo tenta confirmar predição para o bóson de Higgs:  
[https://www.youtube.com/watch?v=vqo0Z\\_ksSrM](https://www.youtube.com/watch?v=vqo0Z_ksSrM)
- Brasileiros colaboram na confirmação de propriedades do bóson de Higgs:  
<https://www.youtube.com/watch?v=Zd02IYoy45I>



## 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] G. Apollinari, I. Béjar Alonso, O. Brüning et al., “High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) : Preliminary Design Report”, 2015. doi:[10.5170/CERN-2015-005](https://doi.org/10.5170/CERN-2015-005).
- [7] CMS Collaboration, “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] J. C. Ruiz Vargas, “Search for new resonances in the merged jet + dilepton final state in CMS”. <https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1072210/>, 2016. Poster presented at ICHEP 2016, Chicago, United States.
- [13] D. Romero Abad, “Search for massive resonances decaying into pairs of boosted bosons in missing energy plus jet final state  $\sqrt{s} = 13$  TeV”. [http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo\\_sophia=109191](http://biblioteca.ufabc.edu.br/index.php?codigo_sophia=109191), 2017.

- [14] CMS Collaboration, “Performance of b-Tagging Algorithms in Proton Collisions at 13 TeV using the 2016 Data”, technical report, (Jul, 2016).  
<https://cds.cern.ch/record/2202967>.
- [15] 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).
- [16] 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).
- [17] CMS Collaboration, “Search for a new scalar resonance decaying to a pair of Z bosons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, *JHEP* **06** (2018) 127,  
[doi:10.1007/JHEP06\(2018\)127](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2018)127), [arXiv:1804.01939](https://arxiv.org/abs/1804.01939).
- [18] 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).
- [19] 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>.
- [20] CMS Collaboration, “Search for dark matter produced with an energetic jet or a hadronically decaying W or Z boson at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, *JHEP* **07** (2017) 014,  
[doi:10.1007/JHEP07\(2017\)014](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2017)014), [arXiv:1703.01651](https://arxiv.org/abs/1703.01651).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] XENON Collaboration, “First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment”, *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017), no. 18, 181301,  
[doi:10.1103/PhysRevLett.119.181301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.181301), [arXiv:1705.06655](https://arxiv.org/abs/1705.06655).
- [24] A. Belyaev, T. R. Fernandez Perez Tomei, P. G. Mercadante et al., “Advancing LHC probes of dark matter from the inert two-Higgs-doublet model with the monojet signal”, *Phys. Rev.* **D99** (2019), no. 1, 015011, [doi:10.1103/PhysRevD.99.015011](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.015011),  
[arXiv:1809.00933](https://arxiv.org/abs/1809.00933).

- [25] M. Autran, K. Bauer, T. Lin et al., “Searches for dark matter in events with a resonance and missing transverse energy”, *Phys. Rev.* **D92** (2015), no. 3, 035007, doi:10.1103/PhysRevD.92.035007, arXiv:1504.01386.
- [26] M. Duerr, A. Grohsjean, F. Kahlhoefer et al., “Hunting the dark Higgs”, *JHEP* **04** (2017) 143, doi:10.1007/JHEP04(2017)143, arXiv:1701.08780.
- [27] Center for Scientific Computing at UNESP, “Center of Excellence in Machine Learning”. <https://coe-ml.ncc.unesp.br/>.
- [28] R. M. Cobe, S. F. Novaes, J. C. Ruiz Vargas, T. R. Tomei, “Boosted jet identification using Machine Learning techniques”. <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/enfpc/xxxviii/sys/resumos/R0181-1.pdf>, 2017. Poster presented at ENFPC 2017, Passa Quatro, MG, Brazil.
- [29] GEANT4 Collaboration, “GEANT4: A Simulation toolkit”, *Nucl. Instrum. Meth.* **A506** (2003) 250–303, doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [30] ATLAS Collaboration, “The simulation principle and performance of the ATLAS fast calorimeter simulation FastCaloSim”. <https://cds.cern.ch/record/1300517>, 2010.
- [31] CMS Collaboration, “The fast simulation of the CMS detector at LHC”, *J. Phys. Conf. Ser.* **331** (2011) 032049, doi:10.1088/1742-6596/331/3/032049.
- [32] 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>.
- [33] CMS Collaboration, “Search for a massive resonance decaying to a pair of Higgs bosons in the four b quark final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, *Phys. Lett.* **B781** (2018) 244–269, doi:10.1016/j.physletb.2018.03.084, arXiv:1710.04960.
- [34] CMS Collaboration, “Measurement of the differential cross sections for the associated production of a W boson and jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, *Phys. Rev.* **D96** (2017), no. 7, 072005, doi:10.1103/PhysRevD.96.072005, arXiv:1707.05979.
- [35] CMS Collaboration, “Search for production of Higgs boson pairs in the four b quark final state using large-area jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, *JHEP* **01** (2019) 040, doi:10.1007/JHEP01(2019)040, arXiv:1808.01473.
- [36] CMS Collaboration, “The Phase-2 Upgrade of the CMS DAQ Interim Technical Design Report”. <https://cds.cern.ch/record/2283193>, 2017.

- [37] 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.
- [38] T. Tomei, "Search for Dark Matter at CMS". [http://200.145.112.249/webcast/files/ThiagoTomei\\_PPC\\_2016-07-15.pdf](http://200.145.112.249/webcast/files/ThiagoTomei_PPC_2016-07-15.pdf),  
2016. Talk presented at PPC2016, ICTP-SAIFR, São Paulo, Brazil.
- [39] T. Tomei Fernandez, "Evolution of online algorithms in ATLAS and CMS in Run 2".  
<https://indico.cern.ch/event/517784/contributions/2496897/>, 2017.  
Talk presented at LHCP 2017, Shanghai, China.
- [40] ATLAS, CMS Collaboration, T. R. F. P. Tomei, "Evolution of online algorithms in ATLAS and CMS in Run 2", in *5th Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2017) Shanghai, China, May 15-20, 2017*. 2017. [arXiv:1711.02946](https://arxiv.org/abs/1711.02946).
- [41] T. R. F. P. Tomei, "Searches for a Diboson Resonance with the CMS Experiment".  
<https://sec.sbfisica.org.br/eventos/enfpc/xxxviii/sys/resumos/R0128-1.pdf>, 2017. Talk presented at ENFPC 2017, Passa Quatro, MG, Brazil.
- [42] "International Masterclasses – Hands on Particle Physics".  
<http://www.physicsmasterclasses.org/>.
- [43] U. Nations, "International Day of Women and Girls in Science".  
<http://www.un.org/en/events/women-and-girls-in-science-day/>.
- [44] "Starts With A Bang – The Universe is out there, waiting for you to discover it".  
<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/>.