

Busca de assimetrias na emissão de partículas em colisões de raios cósmicos na atmosfera terrestre e em detectores de chuveiros extensos

PROJETO DE DOUTORADO

Aluno: André Vieira da Silva*

Orientador: José Augusto Chinellato[†]

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE FÍSICA *Gleb Wataghin*
DEPARTAMENTO DE RAIOS CÓSMICOS E CRONOLOGIA

30 de Março de 2017

Resumo

O objetivo geral deste plano de pesquisa é estudar interações hadrônicas produzidas por partículas da radiação cósmica, com energia de até 10^{17} eV, no referencial do laboratório, e compará-la com os resultados obtidos pelos experimentos em aceleradores e com geradores de Monte Carlo (FPMC, PYTHIA, EPOS LHC). De forma específica, pretende-se estudar os processos elementares produzidos por colisões próton-próton, próton-Carbono e próton-Chumbo pelos geradores na região frontal (ou região de fragmentação) através das distribuições de energia e multiplicidade em pseudo-rapidez (ângulo) para a comparação com os dados coletados pela Colaboração Brasil-Japão de Raios Cósmicos CBJ. Este projeto é uma continuação natural do trabalho realizado no programa de mestrado. Note-se que, este tipo de estudo com os dados da CBJ e sua comparação com dados de aceleradores não foi feito até o momento.

*andsilva@ifi.unicamp.br

[†]chinella@ifi.unicamp.br

Conteúdo

Introdução	2
1 Justificativa	3
2 Objetivos	4
2.1 Gerais	4
2.2 Específicos	4
3 Metodologia	5
4 Avanços até o presente	7
5 Cronograma/Roteiro	7
6 Resultados Esperados	8

Introdução

Os experimentos de raios cósmicos proporcionaram grandes avanços no estudo de física hadrônica. De fato, até a metade do século passado, as colisões de raios cósmicos na atmosfera terrestre proporcionaram uma fonte muito importante de informações sobre as interações fortes. A observação do méson pión [1], na qual o Prof. Lattes participou de modo fundamental é um exemplo notório disso. Foi criada a Colaboração Brasil-Japão de Raios Cósmicos CBJ [2], por sugestão de H. Yukawa com o objetivo de medir espectros de energia e, principalmente, para estudar física hadrônica em colisões de raios cósmicos. Na época, por volta de 1962, a pesquisa em raios cósmicos já era feita em faixas de energias superiores $E_{\text{LAB}} = 10^{12}$ eV (referencial laboratório) e os instrumentos utilizados para a detecção foram as câmaras de foto-emulsões e Chumbo.

Durante o período de operação da CBJ foram registrados nas câmaras de emulsão eventos com energias da ordem de 10^{14} eV, os quais foram analisados nos anos 80 e 90 considerando o conhecimento da física de raios cósmicos daquela época. No presente, uma revisão dessa análise, como a que faremos aqui, seria bem interessante por considerar o panorama atual do conhecimento.

Atualmente, o destaque na área de raios cósmicos são os experimentos que visam as "ultra-altas energias", ou seja, acima de 10^{17} eV. Dois exemplos típicos são: Observatório Auger [3] do qual vários pesquisadores do DRCC¹ fazem parte e o Telescope Array [4].

¹Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia

De modo análogo aos projetos primordiais da física de raios cósmicos, os grandes projetos citados acima, Auger e Telescope Array, justificam o contínuo desenvolvimento desses tipos de detetores pela possibilidade de estudar, além de astrofísica, a física hadrônica em energias acima daquelas dos aceleradores de partículas [5].

Atualmente, na grande parte da literatura em física de partículas são resultados recentes (significando de 2009 até o presente) dos quatro grandes experimentos CMS [6], ATLAS [7], ALICE [8] e LHCb [9] do acelerador LHC/CERN [10]. Assim, várias questões que se colocavam para a física de raios cósmicos em décadas anteriores, relativas às incertezas na cinemática dos eventos detectados, tais como estimativa de energia do primário que não muito precisa, e eventuais falhas na identificação de secundários e entre outras, agora podem ser elucidadas. Nas energias atingidas nas colisões próton-próton (pp), próton-Chumbo (p-Pb), no LHC, presentemente em 13 TeV no centro de massa²(no referencial do laboratório a energia é da ordem de 10^{17} eV) são feitas medidas de distribuições de multiplicidades, de pseudo-rapidez e angulares de partículas (também observadas em raios cósmicos), que são observadas pelos experimentos do LHC com alta precisão.

O aspecto de assimetria na emissão de partículas pode usado para estudar a formação de jatos, através de algoritmos de identificação de jatos, permitem obter previsões da QCD e da física além do Modelo Padrão relacionadas às configurações de quarks e gluons em estruturas hadrônicas, conforme se pode ver no artigo [11].

1 Justificativa

Eventos de raios cósmicos atmosféricos registrados em câmaras de emulsão no topo das montanhas contêm informações sobre características da produção de partículas em interações hadron-hadron de altas energias. Esses experimentos foram realizados ao longo de várias décadas, com o objetivo de buscar novos fenômenos e estudar os mecanismos das colisões nucleares em uma região que só agora, com o advento do LHC, tornou-se acessível nos experimentos em aceleradores.

Eventos com energias observáveis (em gamas, γ) maiores que 100 TeV nos experimentos com emulsões, representam energias de interação primária no intervalo de 10^3 a 10^5 TeV, no referencial do laboratório. É interessante notar que, num passado recente, várias colaborações [12, 13] relatam muitos eventos anormais tais como os chamados eventos Centauros, os eventos núcleo duplo (*double-core*) e eventos concêntricos. A estrutura de núcleo duplo poderia ser, por exemplo, um indício da produção em altas energias, como já estabelecido pelos experimentos [14, 15].

A contribuição dos experimentos de raios cósmicos ainda é fundamental. Embora os experimentos em aceleradores tenham alcançado energias da ordem de 10^{17} eV, no referencial do laboratório, energias superiores só são observadas em experimentos de chuveiros atmosféricos extensos, como por exemplo, o Observatório Pierre Auger [16, 17].

Este trabalho começou a ser realizado no programa de mestrado, quando buscamos identificar a presença de processos difrativos em eventos nesta faixa de energia. Os resultados promissores, embora ainda não conclusivos, motivaram a continuidade do trabalho, buscando um aprimoramento

²Ou seja, no centro de momento.

nos métodos de análise.

2 Objetivos

2.1 Gerais

O objetivo geral deste plano de pesquisa é estudar interações hadrônicas produzidas por partículas da radiação cósmica, com energia de até 10^{17} eV, no referencial do laboratório, e compará-la com os resultados obtidos pelos experimentos em aceleradores e com geradores de Monte Carlo (FPMC, PYTHIA, EPOS LHC).

2.2 Específicos

- Estudar a física que era feita com as câmaras de fotoemulsões-chumbo: trata-se de estudar as colisões hadrônicas atmosféricas cujos secundários chegam à câmara e as colisões locais, internas (que ocorrem dentro da câmara). Estas colisões tem uma característica básica importante, comparados àqueles de colisores: seu fluxo é muito baixo, de modo que a relação sinal/ruído é muito favorável. Nas colisões atmosféricas há algum ruído, mas nas colisões locais, dentro das câmaras de emulsões, praticamente não há ruído frente ao sinal dos secundários, conforme se pode ver na Figura 1 que está apresentada abaixo, na seção do "**Metodologia**". Ela foi montada com os dados brutos, sem nenhum algoritmo de anti-empilhamento.

Através de simulações com os geradores de eventos abaixo citados procuraremos amostras de configurações angulares e de energia que são característicos de fenomenos de produção de jatos ou outras assimetrias, previstos tanto no Modelo Padrão quanto na física além do Modelo Padrão, para a faixa de energia $E_{\text{LAB}} = 10^{12}$ a 10^{17} eV. Muitas vezes essa busca é feita por exclusão: subtraem-se estatisticamente os processos físicos conhecidos, até ver se há assinatura de algum processo não previsto. Essas amostras produzidas por simulação serão comparadas com os dados experimentais. A ponte entre a previsão teórica e as observações é feita via algoritmos de reconhecimento de jatos ou estruturas, os quais possuem poucos parâmetros ajustáveis. O resultado que pretendemos obter é, feita a comparação da previsão teórica com os dados, os parâmetros obtidos possam contribuir para os algoritmos de identificação de jatos usados no LHC, nas condições especiais correspondentes.

- Em seguida estudar os chuviscos extensos de energia ultra-alta, na região de trabalho do Observatório Auger, acima citado. Novamente escolheremos processos físicos específicos, dentre as opções que são oferecidas nos geradores abaixo. A questão importante aqui é verificar se as assinaturas desses processos (produção de 2 ou 3 jatos, por exemplo) aparecem nas distribuições angulares e energéticas dos secundários que chegam ao solo nas condições do Observatório Auger.

Finalmente, faz parte deste projeto a familiarização do bolsista com os geradores de eventos, significando aqui o estudo de processos físicos de interesse. Esse conhecimento será útil, no final do período do doutoramento, em futuras atividades da colaboração CMS na compreensão

das colisões frontais que ocorrem no mais novo instrumento para física frontal, CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer (CT-PPS) [18, 19].

3 Metodologia

Este projeto terá as seguintes fases:

- Coleta de informações sobre processos individuais de física hadrônica através dos geradores de eventos. Escolhe-se no gerador o processo físico elementar, obtendo as distribuições de energia e ângulo produzidos, para posterior uso. Os geradores são:
 - a. **FPMC** ("Forward Physics Monte Carlo) [20, 21], que permite simular processos nos quais um ou ambos os hadrons colidentes permanece(m) intacto(s). OS processos difrativos ou ainda de produção exclusiva central, que são ambos de nosso interesse. Há na literatura diversos modelos teóricos para processos difrativos e os mais significativos estão incluídos no código. Mais detalhadamente, podemos estudar colisões difrativas em que aparecem a partículas líder (versão em português para *leading particle* que levam uma fração significativa da energia da partícula primária, aparece um conjunto pequeno de outras partículas, todas com energia bastante menor que a da partícula líder. Essa configuração interessamos porque temos vários eventos com características semelhantes dentre os dados da CBJ. Analisaremos um conjunto de eventos de colisões hadrônicas em carbono e chumbo, que foram detetados em câmaras de fotoemulsão-chumbo da Colaboração Brasil-Japão acima citada, usando os métodos empregados nas colaborações do CERN.
O FPMC é usado nos grupos do CMS que se dedicam à física frontal ("Forward Physics") [22]: há uma tarefa denominada "Forward and Small-x QCD Physics" [23], para qual contribuímos com a tese de doutoramento de Miguel Medina Jaime (IFGW), com a busca de produção exclusiva de bósons Z. Esses grupos começam a operar um novo instrumento, denominado CT-PPS, dedicado a acoplamentos quárticos de bósons eletrofracos e nova física. Permitirá estudar colisões foton-foton e observar novas partículas com massa entre 300 GeV a 2 TeV. O estudo de processos detalhados no FPMC permitirá ao bolsista passar a atuar no grupo de física frontal do CMS, no futuro.
 - b. **PYTHIA 8** [24], que produz processos tipo "soft" e "hard", distribuições de partons, incluindo estado inicial e final de chuveiros de partons e interações múltiplas. Trata de processos de hadronização, que tem como estados finais os hadrons produzidos a partir de quarks e glúons.
 - c. **CRMC** ("Cosmic Ray Monte Carlo Package")³, que é um conjunto de geradores que os modelos de produção de partículas em colisões hadrônicas mais usados para estudos de chuveiros atmosféricos extensos de altíssimas energias. Esses modelos são baseados na abordagem de Gribov-Regge [25] e incluem principalmente EPOS-1.99 e EPOS-LHC [26], SIBYLL 2.1 e 2.3 e QGSJet 01, II.03 e II.04. Esse conjunto cobre praticamente todos os modelos em uso, atualmente.

³web.ikp.kit.edu/rulrich/crmc.html

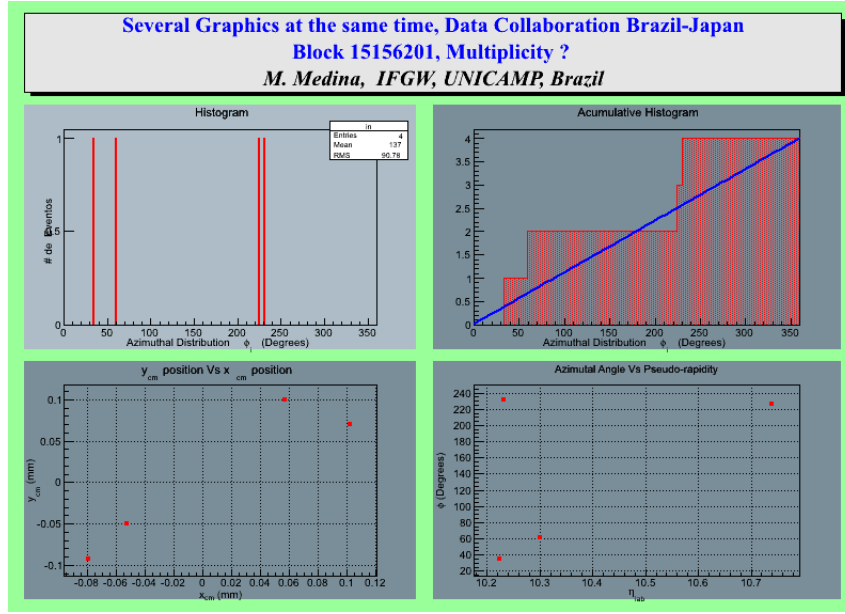


Figura 1:

- Análise de eventos de colisões hadrônicas em núcleos de Carbono (C-jatos, na nomenclatura da época), da CBJ, segundo critérios determinados nos geradores de eventos acima. Trata-se de aplicar os algoritmos atualmente usados na colaboração CMS para identificação de jatos e outras estruturas. Vale notar que, pela própria natureza das câmaras de emulsão, as estruturas angulares que são geradas nas colisões de raio cósmico com alvo de Carbono são preservadas, conforme se pode ver pela Figura 1.

Como descrito acima, as imagens são “cruas” e não há necessidade, praticamente de tratamentos para escolher as partículas que pertencem ao jato - aqui todas pertencem ao mesmo evento, com probabilidade baixíssima de haver outro evento próximo. Nos aceleradores, o empilhamento (superposição)⁴ é uma grande dificuldade. Portanto, um algoritmo de identificação de jatos pode ser aplicado diretamente a esses eventos de câmaras e os parâmetros de controle, a essas energias, podem ser sintonizados facilmente. Uma particularidade desses eventos é que o limiar de detecção por partícula é próximo de 1 TeV, bastante acima do limiar do CMS/LHC. Pode-se assim obter uma nova versão dos algoritmos de identificação de jatos, com esse limiar

- Estudo de assimetrias análogas às do item anterior a energias ultra-altas (na região de trabalho do Observatório Auger) inicialmente via geradores e em seguida investigar a possível assinatura nos espectros de muons a serem detetados com o novo instrumento Auger Prime. Os produtos de processos físicos elementares pelos geradores FPMC ou PYTHIA para um processo específico serão introduzido no gerador de chuveiros extensos CORSIKA [27], o mais usado na área, de modo que nos casos em que ocorre uma forte assimetria de produção de partículas (jatos etc), verificaremos se ela é observável no solo, nos detetores de superfície do Observatório Auger. A adoção do “toolkit” Corsika deve-se ao fato que ele faz a difusão tridimensional de partículas do chuveiro e dá, a cada instante, o espaço de fase e outras informações do chuveiro inteiro. Teremos, portanto, todas as informações das partículas quando elas chegam ao solo.

Escolheremos a componente muônica para esse estudo. As alternativas seriam a componente

⁴Esse conceito em inglês é conhecido como “Pile-up”.

eletromagnética e a muônica. A componente eletromagnética dos chuveiros, pelo processo de multiplicação rápida de partículas, terá perdido a "memória" das assimetrias originais de emissão de partículas. Por outro lado, sabemos que a componente muônica mantém a memória das interações hadrônicas. Vale notar que há um grande esforço, na colaboração Auger, está fazendo investimentos no desenvolvimento de novos detetores, como o Auger Prime - ver na página eletrônica do Observatório - visando principalmente a componente muônica, pelo motivo acima, de ela preservar a memória das colisões do chuveiro.

4 Avanços até o presente

O bolsista teve oportunidade de se familiarizar com aspectos de colisões hadrônicas nas câmaras de fotoemulsões-chumbo durante o seu mestrado no IFGW. Após o mestrado, iniciou seu envolvimento com os geradores de eventos PYTHIA e CRMC citados acima, com vistas à primeira fase deste projeto.

5 Cronograma/Roteiro

- **Primeiro semestre de 2017**

Espera-se que o bolsista tenha completado a disciplina de pós-graduação física de partículas elementares II, o que será de grande valia para a tese.

Espera-se que tenha adquirido alguma proficiência com os geradores de evento acima, produzindo amostras (resultados de simulações) dos processos físicos elementares nos quais estamos interessados. Os modelos teóricos de alguns desses processos não fazem parte dos programas das disciplinas de pós-graduação em física de partículas, portanto será necessário iniciar um estudo teórico para os processos de interesse. Essa atividade já está andamento.

Estudo e codificação do algoritmo anti- k_t [28], usado no CMS, para reconhecimento de jatos. Essa codificação é simples e pode ser feita rapidamente. O objetivo imediato é aplicação do código nos dados experimentais de colisões no Carbone, da CBJ e também nas amostras produzidas pelos geradores.

- **Segundo semestre de 2017**

Aplicação do algoritmo anti- k_t aos dados experimentais da CBJ e nas amostras simuladas. O estudo de processos elementares de interesse contidos nos geradores FPMC e PYTHIA continuará. Nesse ponto espera-se ter material para uma publicação.

- **Durante o ano de 2018**

Estudo do "toolkit" FastJet [29] de identificação de jatos e comparação com os resultados obtidos no algoritmo anti- k_t . Uso da base nas amostras produzidas nos geradores FPMC e PYTHIA nos cálculos de difusão de partículas em chuveiros com energias acima 10^{17} eV, através do aplicativo Corsika.

- **2019 em diante**

Procura de assimetrias nas posições de chegada das partículas de chuva, a partir de amostras produzidas com o aplicativo Corsika. Para isso, uma referencia inicial é a tese de doutoramento de Colin Baus [30].

6 Resultados Esperados

Os resultados estão parcialmente citados na seção ”**Objetivos**” acima. Com relação à identificação de processos físicos elementares, sabemos que alguns deles deixam suas assinaturas em estruturas bastante marcantes nas distribuições angulares energéticas dos secundários gerados, conforme mostramos na Figura 1, que foi um exemplo tomado aleatoriamente. Queremos identificar aqueles processos cujas assinaturas ainda sejam visíveis mesmo quando há ambiguidade na identificação das partículas (encontrar o ”ID”, no PDG [31])⁵, que é uma característica básica de experimentos de raios cósmicos. Começaremos a análise com um conjunto de eventos de colisão (raios cósmicos) → Carbono detetados em câmaras de foto-emulsões da CBJ, procurando as assimetrias. Passaremos depois ao estudo de eventos de chuviros extensos na faixa de operação do Observatório Pierre Auger.

Espera-se publicar um artigo sobre os eventos detetados câmaras de fotoemulsões e pelo menos um artigo sobre o estudo de assimetrias nas amostras simuladas de chuviros na faixa de operação do Observatório Auger. Finalmente, o bolsista terá condições de iniciar sua contribuição à análise de dados do experimento CT-PPS, tendo em vista o conhecimento adquirido nos geradores acima.

Referências

- [1] GPS Occhialini e CF Powell. “Nuclear disintegrations produced by slow charged particles of small mass”. Em: *Nature* 159.4032 (1947), pp. 186–189.
- [2] Cesar MG Lattes et al. “Chacaltaya emulsion chamber experiment”. Em: *Progress of Theoretical Physics Supplement* 47 (1971), pp. 1–125. URL: <http://ptps.oxfordjournals.org/content/47.toc>.
- [3] Alexander Aab et al. “The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory”. Em: *Nucl. Instrum. Meth.* A798 (2015), pp. 172–213. DOI: [10.1016/j.nima.2015.06.058](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.058). arXiv: [1502.01323](https://arxiv.org/abs/1502.01323) [astro-ph.IM].
- [4] T. Abu-Zayyad et al. “The surface detector array of the Telescope Array experiment”. Em: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 689 (2012), pp. 87–97. ISSN: 0168-9002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.079](https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.079). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900212005931>.

⁵O Particle Data Group (ou PDG) é uma colaboração internacional de físicos de partículas que compilam e analisam publicações científicas relacionadas ao estudo de partículas e forças fundamentais. O PDG é responsável pela publicação do periódico bianual Review of Particle Physics.

- [5] L. Cazon. “Hadronic physics with the Pierre Auger Observatory”. Em: *Nucl. Part. Phys. Proc.* 279-281 (2016), pp. 103–110. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2016.10.015](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2016.10.015). arXiv: [1512.02923 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1512.02923).
- [6] S. Chatrchyan et al. “The CMS experiment at the CERN LHC”. Em: *JINST* 3 (2008), S08004. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004).
- [7] G. Aad et al. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. Em: *JINST* 3 (2008), S08003. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003).
- [8] K. Aamodt et al. “The ALICE experiment at the CERN LHC”. Em: *JINST* 3 (2008), S08002. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08002](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08002).
- [9] A. Augusto Alves Jr. et al. “The LHCb Detector at the LHC”. Em: *JINST* 3 (2008), S08005. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08005](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08005).
- [10] Lyndon Evans e Philip Bryant. “LHC Machine”. Em: *JINST* 3 (2008), S08001. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08001](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08001). URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08001/pdf>.
- [11] Sebastian Sapeta. “QCD and Jets at Hadron Colliders”. Em: *Prog. Part. Nucl. Phys.* 89 (2016), pp. 1–55. DOI: [10.1016/j.pnpnp.2016.02.002](https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2016.02.002). arXiv: [1511.09336 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1511.09336).
- [12] AS Borisov et al. “Observation of a high-energy cosmic-ray family caused by a CENTAURO-type nuclear interaction in the joint emulsion chamber experiment at the pamirs”. Em: *Physics Letters B* 190.1-2 (1987), pp. 226–233.
- [13] HT Burnett et al. “Energy Spectra of Cosmic Rays Above 1 TeV per AMU by JACEE”. Em: *International Cosmic Ray Conference*. Vol. 3. 1990, p. 101.
- [14] Malcolm Derrick et al. “Inclusive jet differential cross sections in photoproduction at HERA”. Em: *Physics Letters B* 342.1 (1995), pp. 417–432.
- [15] Serguei Chatrchyan et al. “Observation of a diffractive contribution to dijet production in proton-proton collisions at $s = 7$ TeV”. Em: *Physical Review D* 87.1 (2013), p. 012006.
- [16] Antoine Letessier-Selvon, Pierre Auger Collaboration et al. “Highlights from the Pierre Auger Observatory”. Em: *Brazilian Journal of Physics* 44.5 (2014), pp. 560–570.
- [17] L Cazon, Pierre Auger Collaboration et al. “Hadronic physics with the Pierre Auger Observatory”. Em: *Nuclear and Particle Physics Proceedings* 279 (2016), pp. 103–110.
- [18] Michael G. Albrow. “The CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer: CT-PPS”. Em: *PoS DIS2015* (2015), p. 064.
- [19] M Albrow et al. *CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer*. Rel. téc. CERN-LHCC-2014-021. TOTEM-TDR-003. CMS-TDR-13. Set. de 2014. URL: <https://cds.cern.ch/record/1753795>.
- [20] M. Boonekamp et al. “FPMC: A Generator for forward physics”. Em: (2011). arXiv: [1102.2531 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1102.2531).
- [21] M. Boonekamp et al. “Forward physics Monte Carlo”. Em: *Proceedings, HERA and the LHC Workshop Series on the implications of HERA for LHC physics: 2006-2008*. 2009, pp. 758–762. DOI: [10.3204/DESY-PROC-2009-02/47](https://doi.org/10.3204/DESY-PROC-2009-02/47). URL: <https://inspirehep.net/record/866510/files/materialDisplay.PDF>.
- [22] K. Akiba et al. “LHC Forward Physics”. Em: *J. Phys.* G43 (2016), p. 110201. DOI: [10.1088/0954-3899/43/11/110201](https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/11/110201). arXiv: [1611.05079 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1611.05079).

- [23] A. Grebenyuk. “CMS Forward and Small-x QCD Physics Results”. Em: *Nucl. Part. Phys. Proc.* 270-272 (2016), pp. 13–17. DOI: [10.1016/j.nuclphysbps.2016.02.004](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2016.02.004).
- [24] Torbjörn Sjöstrand et al. “An Introduction to PYTHIA 8.2”. Em: *Comput. Phys. Commun.* 191 (2015), pp. 159–177. DOI: [10.1016/j.cpc.2015.01.024](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024). arXiv: [1410.3012](https://arxiv.org/abs/1410.3012) [[hep-ph](#)].
- [25] H. J. Drescher et al. “Parton based Gribov-Regge theory”. Em: *Phys. Rept.* 350 (2001), pp. 93–289. DOI: [10.1016/S0370-1573\(00\)00122-8](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(00)00122-8). arXiv: [hep-ph/0007198](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0007198) [[hep-ph](#)].
- [26] T. Pierog et al. “EPOS LHC: Test of collective hadronization with data measured at the CERN Large Hadron Collider”. Em: *Phys. Rev. C* 92.3 (2015), p. 034906. DOI: [10.1103/PhysRevC.92.034906](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.034906). arXiv: [1306.0121](https://arxiv.org/abs/1306.0121) [[hep-ph](#)].
- [27] Dieter Heck et al. *CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers*. Rel. téc. 1998.
- [28] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam e Gregory Soyez. “The anti- k_t jet clustering algorithm”. Em: *Journal of High Energy Physics* 2008.04 (2008), p. 063. URL: <http://stacks.iop.org/1126-6708/2008/i=04/a=063>.
- [29] Matteo Cacciari, Gavin P. Salam e Gregory Soyez. “FastJet user manual”. Em: *The European Physical Journal C* 72.3 (mar. de 2012), p. 1896. ISSN: 1434-6052. DOI: [10.1140/epjc/s10052-012-1896-2](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1896-2). URL: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1896-2>.
- [30] Colin Baus. “Measurements in the Forward Phase-Space with the CMS Experiment and their Impact on Physics of Extensive Air Showers”. Tese de doutoramento. Karlsruhe, Germany: KIT, Karlsruhe, 2015-04-17. URL: https://inspirehep.net/record/1429471/files/fulltext_wiYP6r.pdf.
- [31] K. A. Olive et al. “Review of Particle Physics”. Em: *Chin. Phys.* C38 (2014), p. 090001. DOI: [10.1088/1674-1137/38/9/090001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001).