

Como é trabalhar nos grandes experimentos da física de Altas Energias

J. Takahashi*

Instituto de Física “Gleb Wataghin”
 Universidade Estadual de Campinas, Unicamp
 13083-859, Campinas, São Paulo, Brasil

Aceitei o convite para escrever este artigo como uma oportunidade para falar um pouco sobre a experiência de trabalhar nas grandes colaborações que hoje formam a área de Física Experimental de altas energias. Começo este artigo com um *disclaimer*, para avisá-los de que as opiniões e experiências aqui relatadas são muito particulares, e que em alguns casos podem ser diferentes do consenso geral da comunidade. Também cada colaboração experimental tem suas peculiaridades e formas de trabalho que podem ser diferentes das quais participei. Mas espero que as opiniões que expresse aqui ajudem a dar uma ideia da dinâmica e de como é motivante e instigante trabalhar nestas grandes colaborações.

Para contextualizar os relatos e as descrições da área, me permitam um parêntese para contar um pouco da minha história. Não trabalhei sempre na área de física experimental de altas energias. Na verdade, comecei esta jornada com iniciação científica na área de “lasers” e aplicação dos mesmos em telecomunicações. Ainda me lembro de quando tive de subir no telhado do velho prédio da reitoria da USP para medir as transmissões que fazia via laser do telhado do Instituto de Física (IF) até ali. Sempre achei que iria trabalhar na área de física aplicada, mas acabei seguindo para a área de física nuclear experimental, com foco em pesquisa básica. Às vezes, como aluno, mudamos de área porque algum professor teve um grande impacto e com entusiasmo nos mostrou as novidades de sua área. No meu caso mudei porque na USP, o IF tinha um bom programa de Física Nuclear com um acelerador operando, e portanto, achei que seria uma boa oportunidade para iniciar a pós-graduação [1]. No doutorado, mudei novamente de área e voltei para a física aplicada, trabalhando com detectores de silício. Surgiu uma oportunidade de ir para os Estados Unidos trabalhar em um laboratório de referência que desenvolvia detectores de silício, desde o *design* até a fabricação final. A proposta era muito interessante porque teria a oportunidade de aprender sobre a área de silício e projetar um detector do começo ao fim. Apesar do desenvolvimento de detectores ser uma área aplicada, começava aí a minha jornada na área de física de altas energias. Afinal, os detectores que eu desenhava, não só serviram para conseguir o meu título de doutor, mas também para medir partículas em um novo experimento no acelerador que ainda estava em construção, o acelerador RHIC. Foi só após o meu doutorado que realmente mergulhei na física de altas energias. Desde então participei das colaborações do experimento E896 [2] do acelerador AGS, experimento STAR [3] do acelerador RHIC, tive uma rápida passagem pela colaboração do observatório

Pierre Auger na área de física de raios cósmicos [4], e hoje faço parte da colaboração do experimento ALICE do LHC [5]. Devo dizer que tive o privilégio de ver o início das operações de dois grandes aceleradores, o RHIC e o LHC, que são momentos únicos na vida de um físico de altas energias.



Figura 1: Foto da colaboração internacional do experimento ALICE do LHC, da qual a UNICAMP faz parte.

Voltando ao tópico deste artigo, o ano de 2010 ficará marcado na história da ciência moderna com o início das operações do LHC, o grande colisor de hádrons. Depois de uma primeira tentativa frustrada em 2008 que causou um atraso de quase um ano devido a problemas em alguns dos dipolos do acelerador, o LHC finalmente colidiu prótons pela primeira vez em 23 de Novembro de 2009. A energia da primeira colisão, que foi de 900 GeV, ainda estava muito aquém da energia que se pretendia alcançar, mas depois de tanto tempo e de tantos detalhes que tiveram de ser acertados, a primeira colisão foi muito festejada. Afinal de contas, fazer núcleos de hidrogênio, que tem o tamanho de um trilhonésimo de milímetro e viajam a uma velocidade quase igual à velocidade da luz, colidirem após circularem por um anel de 27 quilômetros de circunferência tem que ser realmente considerado um grande feito. Era a prova de que o acelerador funcionava, com seus mil e duzentos e trinta e dois dipolos supercondutores, mantidos a três graus Kelvins e alinhados milimetricamente com o restante dos mais de oito mil quadrupolos e dipolos que compõem a ótica do feixe. Até efeitos da maré causados pela lua nos componentes do anel do LHC precisam ser levados em conta e corrigidos para que estas colisões possam ocorrer com precisão.

A primeira colisão de prótons foi seguida por uma série de conquistas. A energia dos feixes foi aumentada para 3.5 TeV gerando colisões de 7 TeV (1 TeV equivale a 10^{12} eV). Ape-

*jun@ifi.unicamp.br

sar de ainda ser metade da energia total que se pretende alcançar no LHC, as colisões de 7 TeV já nos levam para uma região de energia nunca explorada. Além do aumento da energia, o acelerador também vem operando com uma estabilidade assombrosa que tem permitido o aumento do número de colisões, muito importante para aumentar a luminosidade do feixe e poder detectar os eventos raros que tanto buscamos para comprovar nossos modelos. Mais recentemente, no início de Novembro de 2010, uma nova fronteira foi quebrada quando o LHC foi capaz de colidir núcleos de chumbo a uma energia de 2,76 TeV, criando colisões muito mais violentas e com uma enorme quantidade de partículas geradas. A energia somada nestas colisões é de 2,76 TeV vezes o número de nucleons (208), o que corresponde a uma energia total de

até 574 TeV depositada em cada colisão. Talvez por alguns instantes nestas colisões de chumbo, devido à grande quantidade de energia depositada em um volume tão pequeno, seja possível derreter a matéria hadrônica (passar por uma transição de fases) e formar um estado da matéria conhecido como o Quark-Gluon Plasma. Este estado da matéria teria sido a condição do nosso universo logo após o Big-Bang, onde Quarks e Glúons estariam desconfinados (livres) dos hádrons e portanto teriam graus de liberdade de cor [6]. Com isso, podemos estudar as propriedades da matéria nestas condições extremas e tentar entender as leis de interação entre os elementos mais fundamentais da matéria. Assim, ousamos acreditar que com estes “Mini-Bangs” podemos estudar as condições primordiais de nosso universo logo após o Big-Bang.

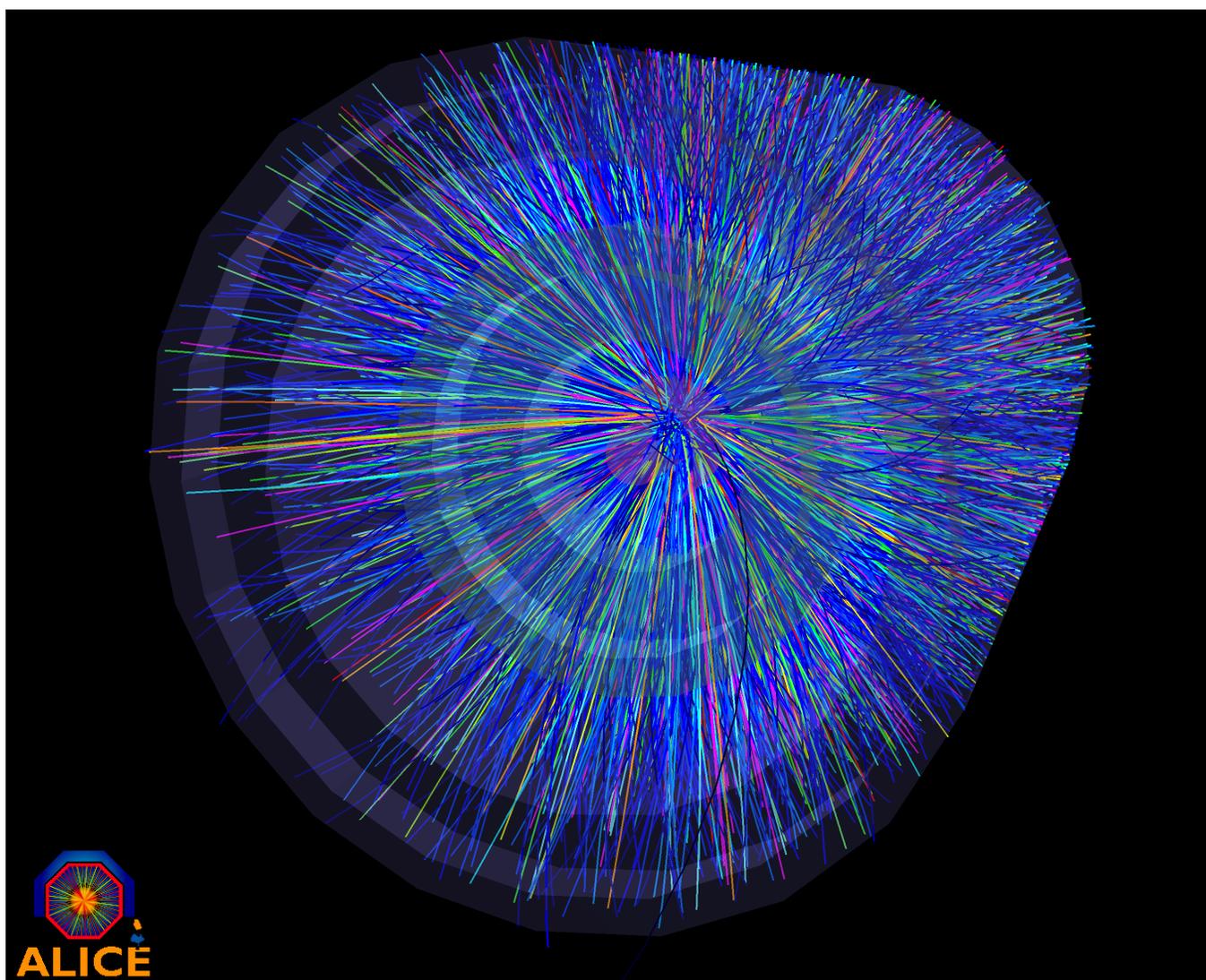


Figura 2: Medida da colisão de núcleos de Chumbo na energia de 2,76 TeV medida pelo detector do experimento ALICE no LHC. Cada traço equivale a uma trajetória de uma partícula carregada que foi criada na colisão.

Além da excelente performance do acelerador, os detectores dos experimentos construídos para medir estas colisões também têm funcionado de forma excepcional. O tempo extra que os experimentos ganharam com o atraso do LHC, combinado com a ansiedade de poder estudar dados verdadeiros no lugar de simulações, fizeram com que todos estivessem prontos e calibrados para medir e analisar os dados em tempo recorde. Nunca se viu na história da física de altas energias a publicação de resultados científicos em tão pouco tempo após a tomada dos dados. Cinco dias depois de medir a primeira colisão no LHC, o experimento ALICE submeteu seu primeiro artigo [7], com valores de multiplicidades (número de partículas produzidas na colisão) em colisões entre prótons na energia de 900 GeV. Para alguém de outra área pode parecer que é um feito fácil, afinal somente após cinco dias o artigo foi submetido para publicação. No entanto, é necessário considerar as dezenas de anos que milhares de pesquisadores vêm trabalhando para se chegar a este ponto. Também é necessário considerar que existe um exército de pesquisadores e alunos do mundo inteiro trabalhando em colaboração e exaustivamente para que isso fosse possível. Para se ter uma ideia de como se chegou nesta multiplicidade, os pontos medidos nos detectores tiveram de ser transformados em trajetórias tridimensionais que corresponderiam às trajetórias das partículas carregadas que atravessaram os diversos detectores. Para cada partícula medida, é necessário calcular e corrigir pelas diversas ineficiências do detector e do *software* utilizado. Os códigos de reconstrução de trajetórias e cálculos de eficiência já vêm sendo desenvolvidos e otimizados a mais de cinco anos. Testes com eventos de raios cósmicos permitiram efetuar calibrações e alinhamentos antes mesmo de termos o LHC operando. Uma vez obtido o número de partículas, ainda é necessário calcular as incertezas e ineficiências globais do evento como a posição onde a colisão ocorreu, a ineficiência de detectar o evento como um todo, o ângulo sólido equivalente do detector e por aí vai. Tudo isso foi minuciosamente estudado e simulado para que todos os efeitos que pudessem afetar os dados fossem considerados. Para ter certeza de que todas estas correções e medidas foram efetuadas, os dados medidos em 900 GeV foram comparados com valores de outros experimentos para verificar se os resultados estão em concordância. Fica claro a importância de poder repetir as colisões na mesma faixa de energia já medidas anteriormente. O resultado final é que os dados de 900 GeV concordam muito bem com a sistemática de valores já medidos por outros experimentos em outros aceleradores, o que nos dá a confiança de que estamos no caminho certo.

Uma vez comprovado que sabemos efetuar as correções, os dados inéditos de colisões entre prótons a uma energia de 7 TeV e colisões de Chumbo em 2,76 TeV foram analisados. Os primeiros resultados já foram submetidos para publicação [8]. Estudos mais complexos e detalhados ainda estão a todo vapor e sem dúvida alguma novos resultados devem ser anunciados em breve. Sem dúvida alguma, este é só o início de uma série de resultados que devemos esperar do LHC. Os primeiros artigos já serviram para comprovar ou excluir alguns modelos mas isto é só o começo. Com o avanço das análises mais complexas e do acúmulo de mais eventos, devemos aguardar

por resultados inesperados.

Novamente me desviei do tópico principal deste artigo sobre a participação em experimentos com colaborações gigantes. O primeiro experimento de física nuclear do qual fiz parte foi no acelerador Pelletron do IFUSP, éramos alguns alunos sob a coordenação de três professores. O experimento E896 do acelerador AGS, tinha por volta de cinquenta colaboradores, entre pesquisadores, professores e alunos. A colaboração do experimento STAR no RHIC tem hoje aproximadamente 400 nomes na sua lista de autores, e o ALICE passa de mil. Como podemos fazer algo de útil, ou competitivo dentro de uma colaboração com tantas pessoas? Para que os experimentos tenham sucesso em obter resultados de forma eficiente e correta, é necessário que haja uma boa divisão e coordenação das tarefas. Ao longo dos anos, a área de física de altas energias vem aprimorando a arte de trabalhar em grandes colaborações. É possível trabalhar dentro de uma equipe internacional encaixado como uma engrenagem, mantendo a individualidade e interesse de cada membro de forma a não inibir a criatividade e motivação. Em geral, em todas as colaborações das quais participei, as tarefas são divididas em três partes relativamente distintas: a parte de serviços, a parte de operação do experimento e a parte de análise e discussão dos resultados. Na parte de serviços, entram o desenvolvimento, construção e implantação e *upgrades* dos detectores, o desenvolvimento de toda a eletrônica associada ao experimento, o desenvolvimento de algoritmos de aquisição e análise de dados, calibração, alinhamento e tudo que for necessário para se obter os dados na sua forma final.

A parte de operação se refere à participação da tomada de dados do experimento, onde geralmente cada membro participante é treinado e torna-se especialista em uma parte do sistema. Por exemplo, um aluno da UNICAMP vai para o CERN participar da tomada de dados do experimento ALICE, e chegando lá pode escolher integrar-se em uma ou mais das diversas equipes responsáveis pela sua operação: a equipe de controle dos detectores, a equipe que cuida e monitora o sistema de *trigger*, a equipe que cuida do sistema de aquisição de dados e/ou a equipe que monitora a qualidade dos dados através de análises rápidas (*online*). A escolha de qual equipe integrar depende um pouco da afinidade de cada um e das responsabilidades prévias assumidas pela instituição. Em todas as colaborações das quais fiz parte, a participação direta na tomada de dados é obrigatória para todos os membros e todas as instituições.

A parte de análise e discussão dos resultados é a parte que mais interessa aos alunos. Geralmente os diferentes tópicos de estudos estão subdivididos em grupos de interesse, onde algoritmos e simulações comuns às diversas análises são desenvolvidas. Por exemplo, no experimento ALICE, todas as análises relacionadas aos estudos de partículas envolvendo quarks pesados como os mésons J/Ψ , ou Upsilon, são desenvolvidas dentro de um grupo denominado “Heavy-Flavor”. As análises de espectro e partículas mais leves, como os píons ficam sob responsabilidade do grupo “Soft Physics”. Cada grupo de interesse tem reuniões semanais onde são apresentados e discutidos os resultados e problemas de cada análise. São destes grupos que surgem os tópicos que serão desen-

volvidos até sua forma final para publicação e apresentação para a comunidade externa. Claro que estas reuniões são realizadas hoje por videoconferência, pois temos colaboradores em diversos continentes e que nem sempre podem estar presentes no laboratório. Uma das vantagens de se ter estas reuniões semanais é que se mantêm o ritmo contínuo das análises e a motivação de obter resultados. Como os resultados são sempre apresentados para os demais colaboradores, existe sempre o cuidado de manter um padrão de qualidade elevado e quando se tem um problema, surgem várias sugestões e ajudas que evitam que qualquer análise fique parada por muito tempo. Todos entendem que toda análise é de interesse de toda a colaboração, portanto existe um espírito de cooperação e de cordialidade que incentiva os alunos a participarem mais das diversas análises e obter uma visão mais global da física desenvolvida no experimento. Além das reuniões semanais específicas dos grupos de interesses de física, as colaborações efetuam reuniões gerais de toda colaboração com frequência trimestral ou até mesmo bimestral. Nestas grandes reuniões de colaboração, é feita uma avaliação geral dos tópicos de física em andamento e do rumo das análises como um todo. Geralmente, estas reuniões são feitas com a participação direta dos membros, portanto é possível conhecer em pessoa os colegas de trabalho com quem se tem reuniões semanais via internet.

Para manter o controle de qualidade dos resultados e a coerência das conclusões físicas defendidas pela colaboração, existe uma série de procedimentos que devem ser obedecidos antes que os resultados se tornem públicos. Em geral, uma análise passa pela aprovação interna de cada sub-grupo de interesse, depois passa pela aprovação de uma comissão externa ao sub-grupo que ainda pertence à colaboração. Estas comissões fazem papel similar aos dos referees de artigos, onde a validade dos resultados e das conclusões científicas é questionada e testada. Também em geral, estas comissões ficam responsáveis em reproduzir a análise para garantir que os resultados são de fato sólidos e corretos. Uma vez aprovado, o artigo passa para toda colaboração onde todos os seus membros podem opinar, fazer sugestões e até mesmo discordar do artigo, ou de partes dele. Depois de todas as etapas e modificações serem efetuadas o artigo final só é submetido com a aprovação da equipe de coordenação que tem como função principal garantir que todas as etapas exigidas pelos estatutos da colaboração foram de fato cumpridas. A apresentação

de resultados em conferências também passa por um processo similar, onde a aprovação nos diversos níveis da colaboração é necessária antes que o palestrante apresente seus resultados. Este processo é muitas vezes complicado e demorado, mas permite que todos da colaboração contribuam para os resultados e também sejam responsáveis pelos mesmos. Ao mesmo tempo, quando submetemos um artigo temos uma segurança maior, porque sabemos que já foi submetido a uma série de questionamentos e melhorias com a ajuda de várias pessoas. Existem artigos que levam cinco dias para serem submetidos, e outros artigos que levam cinco anos, mas em todos os casos, existe a preocupação principal de manter a qualidade dos resultados e a consistência das conclusões apresentadas. É importante aqui ressaltar que mesmo que o artigo seja assinado por uma colaboração de mais de mil autores, as revistas científicas mantêm seus critérios de controle de qualidade e submissão a avaliadores externos. A colaboração ALICE tem mais de mil autores, mas a comunidade de altas energias e os especialistas na área de íons pesados relativísticos são em número muito maior. Também existem casos de artigos submetidos pela colaboração STAR que foram recusados ou drasticamente alterados em decorrência do processo de avaliação da revista, portanto não se deve achar que todo artigo submetido por uma grande colaboração será automaticamente publicado. Sem dúvida, a contribuição de vários pesquisadores e o rigoroso processo de avaliação interna aumentam a qualidade dos manuscritos e conseqüentemente as chances destes serem aprovados para publicação.

Por fim, gostaria de terminar dizendo que na área de física de altas energias é necessário chegar nos limites extremos da nossa tecnologia para testar os limites de nossos modelos atuais e possivelmente ampliar nosso conhecimento sobre a natureza. Para isso, é necessário que haja a colaboração de pesquisadores do mundo inteiro, trabalhando de forma conjunta e coordenada. Isto hoje é uma realidade dentro das grandes colaborações dos experimentos de altas energias, e poder fazer parte desta área é para mim um grande privilégio. O início das operações do LHC é um importante marco, mas é só o começo. Devemos esperar para os próximos anos, grandes descobertas, mudanças de paradigmas, e quem sabe novos problemas. Assim espero. Mas para que tudo isso aconteça, é preciso a participação de novos pesquisadores, com criatividade e novas formas de abordar os problemas.

-
- [1] J. Takahashi, M. Munhoz, E.M. Szanto, N. Carlin, N. Added, A.A.P. Suaide, M.M. de Moura, R. Liguori Neto, A. Szanto de Toledo, *Physical Review Letters*, **78**, 30 (1997).
 - [2] S. Albergo *et al.*, [E896 Collaboration], *Physical Review C*, **65**, 034907 (2002).
 - [3] K. H. Ackermann *et al.*, [STAR Collaboration], *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, **499**, 624 (2003); B. I. Abelev *et al.*, [STAR Collaboration], *SCIENCE* **328** (5974): 58-62.
 - [4] J. Abraham *et al.*, [Pierre Auger Collaboration], *SCIENCE* **318** (5852): 938-943.
 - [5] K. Aamodt *et al.*, [ALICE Collaboration], *The European Physical Journal C*, **68** (1-2), 89 (2010).
 - [6] J. Adams *et al.*, [STAR Collaboration], *NUCLEAR PHYSICS A*, **757** (1-2), 102 (2005).
 - [7] D. Adamova *et al.*, [ALICE Collaboration], *The European Physical Journal C*, **65** (1-2), 111 (2010).
 - [8] K. Aamodt *et al.*, [ALICE Collaboration], *The European Physical Journal C*, **68** (3-4), 345 (2010).