

# Dos primórdios ao Observatório Pierre Auger

Carola Dobrigkeit Chinellato (IFGW/Unicamp)

Graças ao entusiasmo contagiante e à excelência dos físicos que introduziram aqui a pesquisa em raios cósmicos na década de 1930, construiu-se uma tradição nessa área no país. Ao longo das últimas oito décadas, sempre houve ao menos um grupo de pesquisadores dedicados ao desenvolvimento de detectores, à montagem de experimentos ou realizando medidas com resultados na fronteira do conhecimento nessa área. É necessário reconhecer que, através dessa pesquisa, Gleb Wataghin e César Lattes contribuíram também para o desenvolvimento da física moderna no Brasil. Atualmente é digna de nota a participação brasileira no Observatório Pierre Auger, na Argentina, desde o seu início na década de 1990. Resultado de colaboração internacional de físicos de 18 países, hoje nesse Observatório novas gerações de pesquisadores são formadas seguindo os passos dos pioneiros.

## Introdução

A história da pesquisa em física de **raios cósmicos** no Brasil ao longo de oitenta anos é melhor acompanhada, se contada ao longo de quatro períodos sucessivos. Muito embora esses períodos não sejam por vezes nitidamente delimitados ou até mesmo possam ocorrer sobreposições no tempo, cada um deles tem suas próprias características e peculiaridades.

As sementes da pesquisa em **raios cósmicos** foram lançadas praticamente ao mesmo tempo pelo alemão Bernhard Gross (1905-2002), no Rio de Janeiro, e pelo ucraniano-italiano Gleb Wataghin (1899-1986), em São Paulo. Essas sementes germinaram em torno desses dois pioneiros, cresceram e se tornaram particularmente fortes em São Paulo, onde um grupo de jovens e dedicados cientistas construíram detectores e efetuaram medições de **chuveiros de raios cósmicos** no solo, em uma mina, em um túnel, numa montanha e até mesmo em pleno voo de avião. Um desses cientistas foi César Lattes (1924-2005).

Com ele e seu trabalho inicia-se o segundo período dessa história, com os primeiros resultados importantes da pesquisa e com a descoberta dos **píons** em emulsões nucleares expostas aos **raios cósmicos**. Muito embora esta descoberta tenha sido feita enquanto Lattes se encontrava no exterior, ela influenciou fortemente o futuro desenvolvimento da pesquisa em física e também, em particular, da pesquisa em **raios cósmicos** no país. Retornando ao Brasil após ter participado da primeira observação da produção artificial de **píons** em um acelerador, Lattes teve papel relevante na criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) em 1949 e na do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) em 1951. Ele também contribuiu para a criação do *Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya*, na Bolívia, onde físicos de vários países viriam a desenvolver as suas pesquisas em **raios cósmicos**.

O terceiro período é caracterizado pela pesquisa desenvolvida no âmbito da Colaboração Brasil-Japão. Por mais de trinta anos, membros dessa colaboração expuseram **câmaras de emulsões** nucleares no monte Chacaltaya e, assim, estudaram interações de partículas a **altas energias** induzidas por **raios cósmicos** de energias entre  $10^{13}$  e  $10^{17}$  eV (eV, abreviação de “elétron-Volt”, é uma unidade física equivalente à energia cinética ganha por um elétron acelerado por uma diferença de potencial de 1 V).

O quarto período é o contemporâneo, em que a maioria dos físicos brasileiros que realizam pesquisas nessa área está envolvida na Colaboração Pierre Auger para estudar os **raios cósmicos** de mais **altas energias** já observados. A história da física de **raios cósmicos** no Brasil será contada com foco nos

quatro períodos acima e nos principais desenvolvimentos que possibilitaram o progresso, bem como o sucesso nos anos mais recentes.

## Os pioneiros (1934-1949)

A história da física de **raios cósmicos** no Brasil inicia em 1933-34 e guarda um paralelo interessante com a história do desenvolvimento da pesquisa sistemática e estruturada em física, e com a criação de uma universidade e de instituições de pesquisa no Brasil. Embora a ciência moderna no Brasil tenha-se iniciado antes, com o apoio da Sociedade Brasileira de Ciências (atual Academia Brasileira de Ciências, ABC) a partir de 1916, foi a criação de universidades na década de 1930 e de instituições de pesquisa e agências de fomento na década de 1950, que proporcionou condições e deu impulso para o desenvolvimento da ciência no Brasil. Em todos esses passos pode-se notar a importância da contribuição de cientistas envolvidos com a física de **raios cósmicos**.

Dois físicos europeus, chegando quase que simultaneamente ao Brasil, foram responsáveis pela introdução da física de **raios cósmicos** trabalhando, respectivamente, no Rio de Janeiro e em São Paulo. Assim sucedeu que a pesquisa nesse tópico se desenvolveu em paralelo nas duas cidades, formando duas escolas com grupos de jovens estudantes se aglutinando em torno de duas figuras inspiradoras.

O primeiro físico de **raios cósmicos** a chegar ao Brasil foi Bernhard Gross, aportando no Rio de Janeiro em 1933, logo após terminar o seu doutorado na Alemanha. Gross trouxe consigo resultados de experimentos que ele havia realizado lá com o grupo de Erich Regener (1881-1955), medindo a intensidade dos **raios cósmicos** na estratosfera e sob a água. Essas medidas tinham sido feitas com sondas em voos de balão até altitudes de 20 mil m e a 250 m de profundidade no lago Constança, na Alemanha. Gross deu seminários e palestras na Escola Politécnica (EP) e no Instituto de Tecnologia, mais tarde chamado Instituto Nacional de Tecnologia (INT), apresentando aspectos interessantes dessas medidas. Uma versão resumida dessas apresentações foi publicada em 1934 (Gross, 1934) e, assim, Gross se tornou o autor da primeira publicação sobre **raios cósmicos** no Brasil.

Gross é mais bem conhecido na comunidade de **raios cósmicos** por seu trabalho sobre a transformação de Gross (Gross, 1933), que relaciona a absorção de feixes **isotrópicos** e unidirecionais de radiação. Usando essa transformação, pode-se obter a intensidade vertical de uma certa radiação por unidade

de ângulo sólido<sup>1</sup> em uma certa profundidade atmosférica em termos do fluxo integral (em todas as direções) dessa radiação naquela profundidade. Gross aplicou essa relação aos **raios cósmicos**. Esse trabalho foi desenvolvido antes de sua chegada ao Brasil, assim como um estudo da variação da ionização<sup>2</sup> causada pelos **raios cósmicos** com a pressão (Gross, 1932).

Nos anos seguintes, Gross trabalhou no INT e se dedicou à pesquisa em **raios cósmicos** e em metrologia. Ele publicou os resultados de seu trabalho em **raios cósmicos** em revistas internacionais e também nos Anais da ABC (Gross, 1935, 1936a, 1936b, 1937, 1938, 1939a, 1939b). Seu interesse na interação dos **raios cósmicos** com a matéria, que havia iniciado ainda na Europa com seus estudos da ionização causada pelos **raios cósmicos**, levou-o a gradualmente diversificar os temas de suas pesquisas. Ele veio a estudar e publicar as propriedades dielétricas de vários materiais, como a cera de carnaúba (Gross and Denard, 1945; Gross, 1949). Após 1940, motivado por seus múltiplos interesses, Gross trabalhou principalmente em tópicos tais como teoria de dielétricos, o efeito termodielétrico, viscoelasticidade e reologia. Ele também foi responsável pela descoberta de efeitos importantes de armazenamento de cargas em vidros e polímeros. Suas contribuições foram muito importantes para o progresso da pesquisa sobre eletretos<sup>3</sup>.

Gross foi cientista completo, analisando fenômenos tanto sob a perspectiva teórica, quanto experimental. Ele foi um dos protagonistas no desenvolvimento da física no Brasil. Seus estudantes e colaboradores frequentemente reconheceram a importância da influência de Gross e sua contribuição para o desenvolvimento da física, como pode ser lido nas palavras de alguns de seus muitos estudantes e colegas, Sérgio Mascarenhas (Mascarenhas, 1999) e o também alemão Gerhard M. Sessler (Sessler, 1999). É também interessante acompanhar o testemunho do próprio Gross em entrevista para um projeto sobre a História das Ciências no Brasil (Gross, 1976).

O segundo cientista a chegar ao Brasil foi Gleb Wataghin, que veio a São Paulo em 1934. O governador do Estado de São Paulo à época, Armando de Salles Oliveira, havia criado a Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras (FFCL), que foi um dos pontos de partida para o posterior desenvolvimento da Universidade de São Paulo (USP). Ele deu a Teodoro Ramos, então professor da EP

<sup>1</sup> Enquanto o ângulo plano mede a abertura de um arco numa circunferência, o ângulo sólido mede o tamanho angular de um objeto bidimensional na superfície de uma esfera. O ângulo sólido é dado pela área que subtende esse objeto na esfera, quando visto do seu centro, dividida pelo quadrado do seu raio.

<sup>2</sup> Ionização é o processo físico de produção de **íons**.

<sup>3</sup> Eletreto é um material dielétrico que se mantém eletricamente polarizado. É o equivalente eletrostático do ímã permanente.

de São Paulo, a missão de convidar eminentes matemáticos e físicos na Europa, atraí-los para se fixarem em São Paulo e contribuírem para o desenvolvimento dos novos Departamentos de Física e Matemática da FFCL. O matemático italiano Luigi Fantappiè (1901-1956) e Gleb Wataghin aceitaram o convite e, já em 1935, davam aulas em São Paulo. A sugestão de convidar Wataghin para São Paulo tinha partido do italiano Enrico Fermi (1901-1954), prêmio Nobel de Física em 1938. Uma foto de Wataghin na década de 1930 quando veio se juntar à FFCL é mostrada na Figura 1.



**Figura 1.** Uma das raras fotos de Gleb Wataghin jovem, na década de 1930, na FFCL/USP (Acervo IF/USP)

Com a criação da USP, a EP, a Faculdade de Medicina e a Faculdade de Direito foram incorporadas à nova universidade. Estudantes de engenharia assistiam às aulas com aqueles da FFCL. No início, Wataghin lecionava em italiano e alguns de seus estudantes começaram a aprender a língua apenas para poderem acompanhar as suas aulas. Mas o seu pendor para as línguas logo o levou a se expressar em português. Foi Wataghin quem apresentou

a física moderna aos estudantes, falando com seu entusiasmo característico sobre o nascimento da mecânica quântica e sobre a teoria da relatividade. Ele também falava sobre os grandes físicos responsáveis pelos grandes avanços na física moderna que ele havia conhecido na Europa e que haviam se tornado seus amigos.

Embora fosse ele próprio um teórico, Wataghin iniciou aqui atividades de pesquisa tanto em física teórica, quanto experimental. Em 1938, ele convidou o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993) para vir a São Paulo e se juntar ao departamento. Wataghin e Occhialini haviam trabalhado juntos no grupo de Fermi, em Roma. Occhialini também havia trabalhado com Patrick Blackett (prêmio Nobel de Física em 1948) no Laboratório Cavendish, em Cambridge, entre 1931 e 1934, aplicando a técnica de contadores em coincidência a uma **câmara de nuvens** e confirmando a descoberta do pósitron<sup>4</sup> em **raios cósmicos**. A extraordinária habilidade experimental, a intuição apurada, a profunda perspicácia e criatividade de Occhialini muito contribuíram para impulsionar o grupo experimental em São Paulo.

Mário Schenberg (1914-1990) foi um dos primeiros estudantes de Wataghin e logo começou a trabalhar com ele em problemas teóricos. Embora ele seja mais lembrado por suas contribuições na **astrofísica** (ver “Mario Schenberg, pioneiro da astrofísica teórica no Brasil”, no Capítulo “Astrofísica” no Volume I), ele também trabalhou em física de **raios cósmicos**, particularmente na teoria dos **chuveiros** multiplicativos e nas componentes dura e ultramole da **radiação cósmica** (Schenberg, 1939, 1940a, 1940b; Schenberg and Occhialini, 1939, 1940).

Entre os estudantes de engenharia daquela época estava Marcello Damy de Souza Santos (1914-2009) que, inspirado pelo entusiasmo de Wataghin, veio a se tornar um de seus assistentes. Posteriormente, veio se juntar a ele Paulus Aulus Pompéia (1911-1993). Ambos tinham grande habilidade em eletrônica, e foram responsáveis pela construção dos circuitos de coincidência usados nos primeiros experimentos em **raios cósmicos** realizados pelo grupo de Wataghin. A instrumentação e a eletrônica desenvolvida pelo grupo eram competitivas na época com aquelas usadas na Europa e nos Estados Unidos, assim como os resultados das suas pesquisas. Os circuitos de coincidência que eram construídos pelo grupo eram dez vezes mais rápidos do que outros existentes à época e possibilitaram a medida dos **chuveiros** penetrantes, experimentos que estavam então na vanguarda da física de **raios cósmicos**.

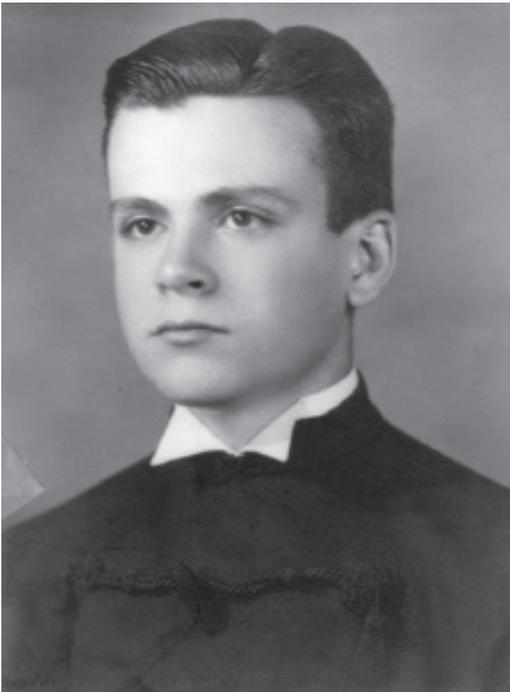
<sup>4</sup> O pósitron é a antipartícula do elétron. Um pósitron tem massa igual à de um elétron, e carga elétrica igual em módulo, porém de sinal contrário.

Medidas sistemáticas da **radiação cósmica** começaram em São Paulo, em 1937. Foi nesta época que Damy e Wataghin, ao prepararem experimento para medir **raios cósmicos**, publicaram seus progressos experimentais na construção de novos tipos de contadores (Souza Santos e Wataghin, 1937). Na década seguinte, muitos experimentos para detectar **chuveiros** penetrantes de partículas na **radiação cósmica** foram realizados por Wataghin e seus colaboradores no nível do solo, em túnel ou em altitudes de montanha. Em 1938, Wataghin e Damy publicaram os resultados preliminares de uma série de medidas da intensidade de **chuveiros** na mina de ouro de Morro Velho, MG, a uma profundidade equivalente de água de 200 e 400 m (Wataghin e Souza Santos, 1938; Wataghin e Souza Santos, 1939). No ano seguinte, já com a participação de Paulus Pompéia, eles publicaram na revista *Physical Review* os resultados de observações de grupos de partículas penetrantes em **chuveiros de raios cósmicos** que chegavam aos detectores simultaneamente (Wataghin *et al.*, 1940a). Essas medidas foram realizadas em São Paulo, a 750 m acima do nível do mar. Os contadores registraram grupos de partículas que tinham produzido coincidências quádruplas atravessando camada de 16 cm de chumbo. Resultados de outras medições foram relatados na ABC em 1940 (Pompéia *et al.*, 1940) e também publicados no ano seguinte na *Physical Review* (Souza Santos *et al.*, 1941). Em 1940 (Pompéia *et al.*, 1940), foram apresentados os resultados das medidas feitas no túnel em construção na Avenida Nove de Julho, em São Paulo. Medidas realizadas no túnel sob 30 m de solo argiloso (cerca de 50 m de equivalente em água) confirmaram a existência de **chuveiros** com ao menos duas partículas associadas, penetrando 20 cm de chumbo, correspondente à espessura da blindagem dos contadores subterrâneos. Na publicação seguinte dessa série de medidas, o grupo relatou a existência de **chuveiros** com ao menos duas partículas tendo um alcance maior do que 17 cm em chumbo e com uma extensão da parte central do **chuveiro** penetrante, da ordem de 0,2 m<sup>2</sup> (Souza Santos *et al.*, 1941). Posteriormente, um quinto contador foi adicionado, permitindo-lhes estimar a área da parte central do **chuveiro** penetrante em 1 m<sup>2</sup> (Wataghin *et al.*, 1940b).

O ano de 1942 foi excepcional para a física de **raios cósmicos** no Brasil. Um grupo de físicos americanos liderado por Arthur Compton (1892-1962), prêmio Nobel de Física em 1927, visitou o país em missão com o propósito de medir a intensidade de **raios cósmicos** no hemisfério sul. Nessa ocasião, foi realizado simpósio sobre **raios cósmicos** no Rio de Janeiro, sob os auspícios da ABC. As contribuições dos físicos de **raios cósmicos** brasileiros sobressaíram nesse simpósio. A lista de autores inclui Bernhard Gross, seu ex-aluno Joaquim da Costa Ribeiro, Yolande Monteux, Giuseppe Occhiali-

ni, Gleb Wataghin, Marcello Damy, Adalberto Menezes, Mário Schenberg, padre jesuíta Francisco Xavier Roser, J. A. Ribeiro Saboya e Paulus Aulus Pompéia. A maior parte dos resultados apresentados nesse simpósio também foi publicada em revistas internacionais e somente a referência aos anais do simpósio é dada aqui (ABC, 1943). Também nesse simpósio, Wataghin apresentou sua hipótese sobre a produção múltipla de **mésosns** (Wataghin, 1943). Apenas alguns anos mais tarde ele viria a publicar um tratamento mais completo sobre esse tema (Wataghin, 1946).

Em 1941, César Lattes iniciou seus estudos na USP, também como estudante de Wataghin. Este imediatamente reconheceu o seu potencial e o convidou para se tornar seu assistente. Após graduar-se em 1943, Lattes começou a trabalhar com Mário Schenberg e Wataghin em física teórica. Uma foto de Lattes por ocasião de sua formatura na FFCL em 1943 é mostrada na Figura 2. Em 1944, foi designado terceiro assistente em física teórica e matemática na FFCL/USP. Em seu primeiro trabalho, estudou a influência de condições termodinâmicas extremas sobre a abundância dos núcleos no universo. Isso resultou em sua primeira publicação em uma revista internacional (Lattes and Wataghin, 1946).



**Figura 2.** Cesar Lattes em 1943, por ocasião de sua formatura na FFCL da USP (Acervo Família Lattes)

Em 1945, Lattes interessou-se muito pelas atividades de Occhialini e de seu grupo experimental. Occhialini estava tentando instalar uma **câmara de nuvens**, mas sem ter êxito. Lattes gostava muito de contar uma de suas primeiras experiências em física teórica e que acabou lhe dando motivo para mudar para a física experimental (Lattes, 1999). Dizia que a sua inabilidade para manipular longos cálculos havia feito com que mudasse para a física experimental. Costumava acrescentar, não sem um largo sorriso, que a Lagrangiana<sup>5</sup> que ele tinha que calcular consistia de 99 termos. No entanto, os resultados dos cálculos que ele havia feito com Schenberg, em colaboração também com Walter Schützer<sup>6</sup> (1911-1954), envolvendo a teoria clássica de partículas carregadas e com momentos de dipolo, resultaram na publicação de um artigo (Lattes *et al.*, 1947f).

Outro estudante iniciou seus estudos praticamente ao mesmo tempo que Lattes: Oscar Sala (1922-2010). Durante a mencionada missão de Arthur Compton ao Brasil em 1942, medidas da intensidade de **raios cósmicos** foram realizadas com detectores lançados em balões a partir de várias cidades do Estado de São Paulo. Esse tipo de balão era usualmente empregado em medidas meteorológicas e alcançava 20 a 30 km de altitude na estratosfera. Em Bauru, um jovem estudante cuja família vivia na cidade assistiu aos cientistas fazendo seus experimentos e sentiu-se inspirado e excitado: este era Oscar Sala. Decidiu então estudar física em São Paulo e logo começou a trabalhar com Wataghin e a medir **chuveiros de raios cósmicos**. Ver a nota de rodapé 11 em “Imigrantes japoneses no menor observatório do mundo” no Capítulo “Astrônomos amadores” neste Volume.

Um estudo cuidadoso da frequência de **chuveiros** penetrantes foi realizado por Sala e Wataghin (Sala and Wataghin, 1945). Nesse trabalho, os autores apresentaram resultados de estudos comparativos de **chuveiros** de partículas penetrantes em várias altitudes com diferentes materiais em altitudes de 1.750 m e 750 m, em Campos de Jordão, SP, e em São Paulo, respectivamente. O aparato experimental era similar àquele utilizado em experimentos anteriores de Wataghin e seu grupo. Coincidências quádruplas foram observadas entre contadores totalmente blindados por camadas de chumbo com espessura mínima de 10 cm, e também separados lateralmente por placas de chumbo de 10 cm de espessura. Posteriormente, novas medidas foram realizadas, adicionando uma camada absorvedora de 80 cm de água. Dessas medidas, os autores concluíram que

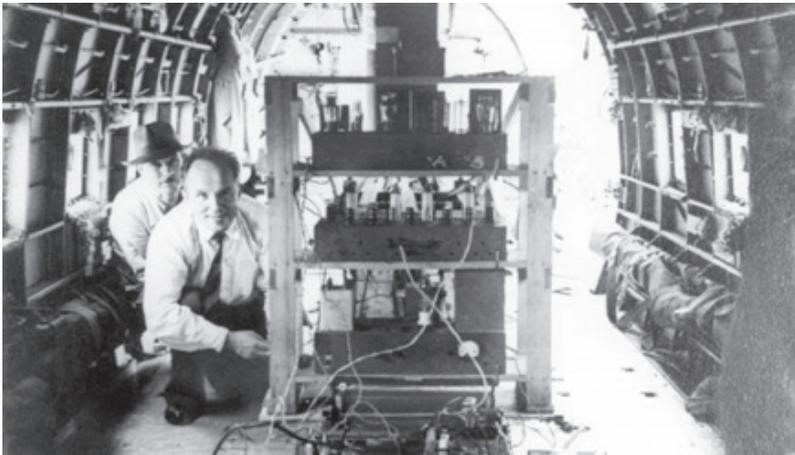
---

<sup>5</sup> Lagrangiana é uma função da mecânica clássica que, usando apenas o formalismo escalar, sem usar vetores, contém e permite obter todas as informações sobre um sistema dinâmico.

<sup>6</sup> Walter Schützer (1922-1963), físico teórico, trabalhou com Mário Schenberg na USP e com ele publicou vários trabalhos. Também colaborou com o americano John Archibald Wheeler e com o argentino Guido Beck.

esta camada funciona com um absorvedor e como uma fonte de radiação secundária. Nossas observações parecem indicar que grupos de partículas penetrando mais do que 30 cm de Pb são produzidas em uma camada de água de apenas 80 cm (trecho traduzido de Sala and Wataghin, 1945).

Um segundo trabalho de Sala e Wataghin (Sala and Wataghin, 1946) também relata medidas comparativas em diferentes altitudes: em São Paulo (750 m), Campos do Jordão (1.750 m) e, em torno de 7 mil m, com medidas realizadas durante três voos em avião. Os resultados mostraram que a intensidade de partículas geradoras dos **chuveiros** de **raios cósmicos** penetrantes decrescia muito rapidamente com a profundidade atmosférica, provavelmente seguindo uma lei exponencial. Para esse experimento, Wataghin recebeu assistência da Força Aérea Brasileira (FAB). Uma foto histórica tirada em um desses voos é mostrada na Figura 3, com Wataghin e seu braço direito no laboratório, o técnico Guidolino Bentivoglio.



**Figura 3.** Gleb Wataghin (em primeiro plano) e seu braço direito no laboratório, o técnico Guidolino Bentivoglio (ao fundo), no interior de um avião da FAB com seu equipamento para medir **raios cósmicos** em grandes altitudes na década de 1940 (Acervo IF/USP)

No ano seguinte, Wataghin viria a publicar mais resultados de medidas da variação da frequência de **chuveiros** durante voos em avião em altitudes de 6.700 e 7.900 m. Com a adição dos dados obtidos a essas duas altitudes, aos valores anteriormente obtidos, ele pôde concluir que a variação observada com a altitude concordava com a hipótese de uma absorção exponencial para a radiação primária geradora de **chuveiros**, estimando o comprimento médio de absorção em 101 g/cm<sup>2</sup>. Wataghin chegou até mesmo a dar uma estimativa para os valores

das seções de choque<sup>7</sup> das partículas penetrantes com núcleos de oxigênio ou nitrogênio do ar de aproximadamente  $2,5 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup> por núcleo (Wataghin, 1947).

Outros experimentos foram feitos pelo grupo para estudar a seção de choque para produção de **chuveiros** penetrantes em vários materiais. Os resultados das primeiras séries de medidas usando água e ferro como materiais em que os **chuveiros** eram produzidos foram publicados por Meyer<sup>8</sup> *et al.* (1948). Os dados revelaram que a seção de choque por núcleon<sup>9</sup> era maior na água do que no ferro, indicando que, ou o coeficiente de absorção dos **raios cósmicos**, ou a constituição e multiplicidade dos **chuveiros** resultantes dependia da estrutura nuclear. Um dos autores deste trabalho foi Andrea, filho de Gleb Wataghin. Posteriormente, Meyer e Georges Schwachheim<sup>10</sup> também publicaram uma interpretação das medidas realizadas por Cocconi<sup>11</sup> (1949), considerando a possibilidade de possíveis fenômenos de troca de núcleons gerando **chuveiros** penetrantes (Meyer and Schwachheim, 1949).

Anos mais tarde, dois trabalhos foram publicados investigando a natureza das partículas primárias geradoras de **chuveiros** penetrantes, a partir de medidas obtidas a uma altitude de 1.750 m acima do nível do mar, em Campos do Jordão. No primeiro trabalho (Meyer *et al.*, 1949a), os autores explicaram seus resultados experimentais considerando dois tipos diferentes de **mésons**, referindo-se à publicação de Lattes, Occhialini e Powell em 1947 (Lattes *et al.*, 1947d e 1947e), e identificando as partículas penetrantes nos **chuveiros** como “mésons  $\mu$  (mu)” ou múons, como eram chamados naquela época. No segundo trabalho (Meyer *et al.*, 1949b), o alcance médio da radiação que gera **chuveiros** penetrantes foi determinado na atmosfera e na água, resultando, respectivamente, em  $\sim 120$  g/cm<sup>2</sup> e  $\sim 55$  g/cm<sup>2</sup>. Nenhuma assimetria leste-oeste foi observada para essa radiação, dentro das

---

<sup>7</sup> Seção de choque é a área efetiva de um núcleo atômico, que quantifica a probabilidade de ocorrência de um processo de interação com partículas da **radiação cósmica**.

<sup>8</sup> O físico Hans Albert Meyer (1925-2010) chegou ao Brasil em 1940, tendo sido aluno de Wataghin em São Paulo. Retornou à Europa em 1949 e lá desenvolveu sua carreira como físico nuclear. De volta ao Brasil, em 1975, Jean Meyer, como ficou conhecido, dedicou-se à pesquisa sobre fontes de energias alternativas e trabalhou no Instituto de Física Gleb Wataghin, IFGW/Unicamp. Ver a Figura 9.

<sup>9</sup> Núcleon é o nome dado às partículas constituintes dos núcleos atômicos, os prótons e nêutrons.

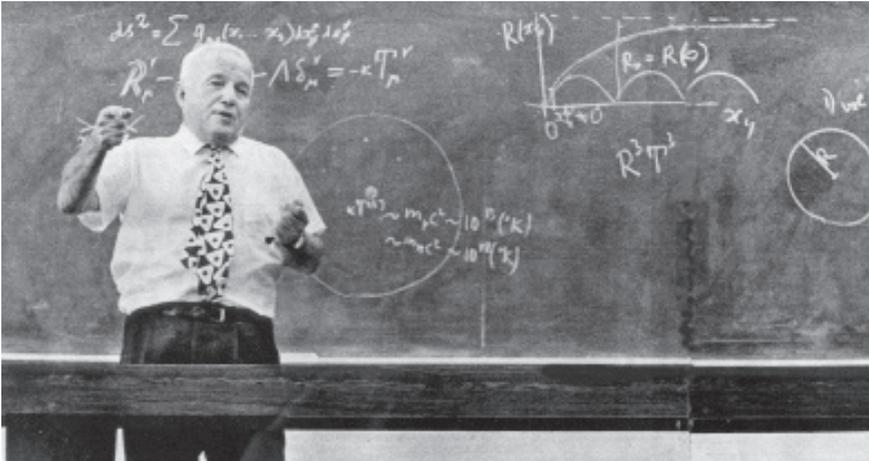
<sup>10</sup> Georges Schwachheim (1925-2012) fez parte da primeira geração de físicos do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), onde atuou como pesquisador na área de algoritmos numéricos e computacionais.

<sup>11</sup> O físico italiano Giuseppe Cocconi (1914-2008) exerceu notável liderança no CERN (*European Organization for Nuclear Research*) e se tornou conhecido por propor a busca de vida inteligente fora da Terra através da **radioastronomia**.

incertezas experimentais. Como curiosidade, neste trabalho foi utilizada a transformação proposta por Bernhard Gross (Gross, 1933) para o estudo da absorção da radiação produzindo os **chuveiros** penetrantes.

Wataghin retornou à Itália em 1949 e continuou trabalhando na física de **raios cósmicos**. Ele não rompeu seus laços com o Brasil e com os seus estudantes, colaboradores e amigos que havia feito nos anos vividos aqui. Ele ainda retornou ao Brasil na década de 1970, indo então para a recém-fundada Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), onde Marcello Damy era diretor do Instituto de Física, e para onde César Lattes e seu grupo de física de **raios cósmicos** haviam se transferido. Em reconhecimento à extraordinária contribuição para o desenvolvimento da física no Brasil, foi dado o nome de Gleb Wataghin ao Instituto de Física da nova universidade (IFGW/Unicamp). Wataghin também chegou a dar aulas e palestras em Campinas e nova geração de estudantes pôde aprender com ele e ser influenciada pelo seu entusiasmo enquanto contava o nascimento da mecânica quântica ou da relatividade geral e falava da produção de bolas-de-fogo (ver adiante) em interações de **raios cósmicos** de **altas energias**, que lhe eram tão caras. Nessas oportunidades, ele sempre acrescentava o comentário que os seus amigos na época faziam sobre essa ideia, imitando-os, com os braços bem abertos: *Wataghin, you are dreaming...*

A Figura 4 mostra Wataghin em aula sobre relatividade geral no anfiteatro do IFGW na década de 1970. A Figura 5 foi tirada em 1975, durante uma das várias visitas de Wataghin ao IFGW, e o retrata ladeado pela autora deste texto e José Augusto Chinellato.



**Figura 4.** Gleb Wataghin dando aula de Relatividade Geral no IFGW/Unicamp na década de 1970 (Jornal da Unicamp 334, 2006)



**Figura 5.** Wataghin entre os professores do IFGW, a autora deste texto e José Augusto Chinellato, em 1975, no corredor central do IFGW/Unicamp (Acervo Família Chinellato)

## Descoberta do pión e suas consequências (1946-1959)

Após o término da II Guerra Mundial, Occhialini transferiu-se para Bristol a fim de trabalhar com Cecil Powell (1903-1969). Naquela época, Powell e seu grupo estudavam reações nucleares utilizando como detectores emulsões nucleares produzidas pela firma britânica *Ilford Ltd.* O grupo também já tinha exposto emulsões à **radiação cósmica** nos Alpes, a 3.500 m de altitude, a fim de procurar por produtos de desintegrações nucleares. Occhialini logo começou a trabalhar com essas emulsões, inclusive com algumas novas, com maior concentração de brometo de prata, produzidas em caráter experimental pela *Ilford Ltd.*

Nesse mesmo tempo, Lattes estava trabalhando na USP com uma **câmara de nuvens** e tentava colocá-la para funcionar, em colaboração com Ugo Camerini<sup>12</sup> e Andrea Wataghin. Quando eles finalmente foram bem-sucedidos,

---

<sup>12</sup> O italiano Ugo Camerini (1925- ) estudou na USP e trabalhou em **raios cósmicos** com Wataghin. Na década de 1950 retornou ao Brasil e trabalhou no CBPF como técnico especialista da UNESCO. Vive atualmente em Madison, WI, EUA.

Lattes enviou algumas fotografias obtidas com a câmara para Occhialini em Bristol. Em retribuição, Occhialini mandou algumas impressões de fotomicrografias<sup>13</sup> de traços de prótons e partículas  $\alpha$  (alfa)<sup>14</sup> observados nas emulsões concentradas. Imediatamente, Lattes reconheceu o potencial deste tipo de detector e demonstrou seu interesse em se juntar ao grupo de Bristol a fim de trabalhar com essas novas placas. Powell e Occhialini convidaram-no para vir a Bristol, e Lattes lá chegou em 1946. Pouco tempo depois, Camerini atendeu ao chamado de Lattes e juntou-se ao grupo.

Uma das primeiras tarefas dadas a Lattes em Bristol foi estudar o decaimento  $\alpha$  do elemento químico samário. Utilizando as novas emulsões concentradas e a relação alcance-energia<sup>15</sup> obtida no estudo de reações deutério<sup>16</sup>-próton e deutério- $\alpha$ , Lattes e Peter Cser conseguiu determinar o tempo de decaimento do samário (Cser and Lattes, 1946).

Lattes também foi incumbido de medir o fator de encolhimento das novas emulsões concentradas e calibrá-las, já que as emulsões encolhem após a revelação. Tendo esses objetivos em mente, Lattes decidiu investigar a relação entre a energia de prótons, partículas  $\alpha$  e outros núcleos leves com seus alcances nessas novas emulsões. Os prótons que ele usava para tal provinham de reações nucleares induzidas por feixes homogêneos de dêuterons<sup>17</sup> primários de 900 keV<sup>18</sup>, produzidos pelo acelerador de Cockcroft-Walton em Cambridge, incidindo sobre cinco alvos de elementos leves. Conhecendo as massas nucleares envolvidas, era possível calcular as energias dos prótons. As partículas  $\alpha$  utilizadas no experimento provinham do decaimento natural de elementos radioativos. Medindo o alcance médio de grupos homogêneos de prótons e partículas  $\alpha$ , Lattes, Peter Fowler e Peter Cser foram capazes de obter uma relação alcance-energia para prótons de até 10 MeV<sup>19</sup>, que posteriormente foi muito útil em pesquisas de partículas carregadas (Lattes *et al.*, 1947a, 1947b). Ao estudar esses processos, Lattes solicitou à *Ilford Ltd.* que adicionasse bórax<sup>20</sup> às emulsões. Sua intenção era usá-las no estudo de reações nucleares envolvendo o boro para determinar a energia e o momento dos nêutrons produzidos nas reações.

<sup>13</sup> Fotomicrografia é uma fotografia tirada através de um microscópio.

<sup>14</sup> A partícula  $\alpha$ , constituída de dois prótons e dois nêutrons, é equivalente ao núcleo do hélio.

<sup>15</sup> Na relação alcance-energia, o alcance é o comprimento do traço deixado na emulsão pela partícula carregada leve produzida, no caso, a partícula  $\alpha$  ou o próton.

<sup>16</sup> O deutério é um isótopo do hidrogênio e o seu núcleo tem um nêutron, além de um próton.

<sup>17</sup> Dêuteron é o núcleo do deutério.

<sup>18</sup> 1 keV = 1 mil eV.

<sup>19</sup> 1 MeV = 1 milhão eV.

<sup>20</sup> Bórax, ou borato de sódio, é um sal hidratado contendo sódio e boro.

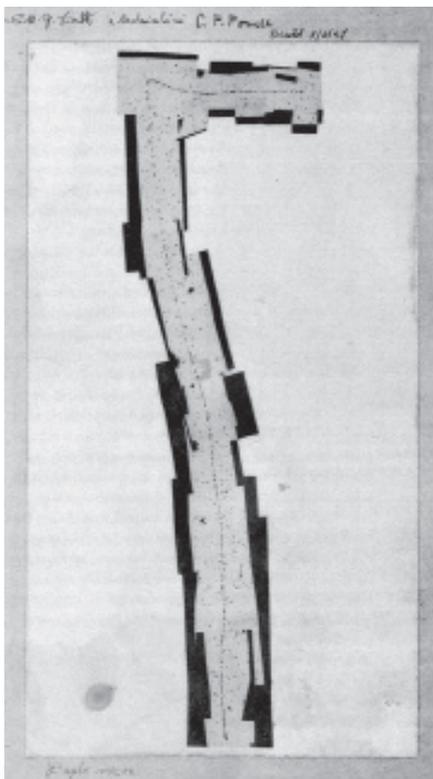
Lattes e Occhialini decidiram ainda expor algumas placas de emulsão em montanhas. Occhialini levou algumas placas ao Pic du Midi (2.800 m), nos Pirineus franceses, e deixou-as expostas por seis semanas. Somente algumas dessas placas tinham sido carregadas com bórax, mas todas eram concentradas, para as quais a relação alcance-energia havia sido obtida. Após recuperar as emulsões e revelá-las, Occhialini notou diferença entre as placas normais e aquelas carregadas com bórax: essas últimas tinham registrado quantidade muito maior de eventos do que as normais. A adição de bórax havia tornado as emulsões mais resistentes contra a perda da imagem, e a imagem latente na emulsão perdurava por tempo mais longo<sup>21</sup>. Em consequência, aquelas emulsões registraram número maior de traços de partículas do que as normais. O número e a variedade de traços registrados nas emulsões carregadas com bórax eram tão impressionantes, que a intenção original de medir a energia dos nêutrons logo se tornou secundária. Após alguns dias de observação, uma das microscopistas achou um evento incomum. Nas palavras do próprio Lattes, ele descreve este evento como “um **méson** parando, e, emergindo do fim do seu traço, um novo méson de alcance cerca de 600 mm, todos contidos na emulsão”<sup>22</sup> (Lattes, 1984). O maior espalhamento múltiplo nesse traço e a variação da densidade de grãos ao longo de seu comprimento permitiam distinguir a partícula observada de um próton. Dentro de somente poucos dias, um segundo evento foi observado, mas a partícula secundária não parara dentro da emulsão. Medindo a densidade de grãos, foi possível obter um alcance extrapolado da mesma ordem daquele do primeiro evento, em torno de 610 mm. A observação desses dois eventos foi publicada na revista *Nature* (Lattes *et al.*, 1947c). No mesmo volume da revista, Lattes e Occhialini publicaram a determinação da energia e direção de nêutrons da **radiação cósmica**, obtidos por meio de tais emulsões (Lattes and Occhialini, 1947).

<sup>21</sup> A emulsão contém brometo de prata. Quando uma partícula carregada atravessa a emulsão, ela ioniza a prata. Posteriormente, quando a emulsão é revelada, ocorre uma reação de oxirredução e a prata ionizada é transformada em prata metálica. Esse é o processo de formação da imagem. A adição de bórax à emulsão protela a **recombinação** da prata ionizada com o íon de bromo, permitindo que a emulsão fique por tempo mais longo sem perder a imagem latente.

<sup>22</sup> Na época do descobrimento, as partículas com massa entre a massa do próton e do elétron eram chamadas genericamente de mésons. Assim, falava-se inicialmente em **méson**  $\pi$  (pi) e méson  $\mu$ , e só anos mais tarde o méson  $\mu$  passou a ser denominado múon e a ser reconhecido como um membro da família dos léptons (ver **neutrino**), não mais um méson. O **méson**  $\pi$  continuou sendo um **méson** e passou a ser designado simplesmente como **píon**. Por essa razão, Lattes se refere aos decaimentos do **píon** e do múon como o decaimento de dois mésons.

Quando ficou claro que era necessário registrar um número maior de eventos, Lattes foi pesquisar no Departamento de Geografia da Universidade de Bristol e descobriu que no monte Chacaltaya, nos Andes bolivianos, havia uma estação meteorológica operando a 5.200 m de altitude, a apenas 20 km da capital La Paz. Lattes propôs a Powell e a Occhialini que ele próprio voasse até a Bolívia e lá expusesse as emulsões carregadas de bórax aos **raios cósmicos**. Lattes gostava de contar que a sua escolha de viajar numa companhia brasileira, ao invés de britânica, lhe salvou a vida já que o voo no qual ele supostamente deveria ter viajado acidentou-se próximo a Dakar, vitimando todos os passageiros (Lattes, 1984). A parte restante da história é bem conhecida. Quando Lattes retornou a Bristol, as emulsões foram reveladas e examinadas. Foram encontrados 30 eventos em que se podia observar o decaimento de um **píon** em um múon, e o decaimento subsequente do múon. Da contagem de traços foi também possível obter a razão entre as massas dessas partículas. Os resultados foram publicados imediatamente (Lattes *et al.*, 1947d, 1947e). Os autores identificaram a partícula mais pesada, o **píon**, como a partícula cuja existência havia sido prevista pelo físico teórico japonês Hideki Yukawa (1907-1981), (Yukawa, 1935) e a partícula secundária, o múon, como a partícula que havia sido descoberta em 1937 por C. D. Anderson e S. H. Neddermeyer (Neddermeyer and Anderson, 1937) e, independentemente, por J. C. Street e E. C. Stevenson (Street and Stevenson, 1937).

Uma montagem de fotomicrografias dos traços deixados na emulsão por um **píon** que decaí, produzindo um múon, é mostrada na Figura 6. Vê-se o traço deixado por um **píon**, quase horizontal, no lado superior da Figura, e que decaí em um múon, o qual, por sua vez, deixa traço mais longo, aproximadamente vertical. O comprimento total do traço do múon na emulsão é cerca de meio milímetro. A foto foi obtida pela equipe no laboratório em Bristol, e posteriormente publicada na revista *Nature* em 24 de maio de 1947 (Lattes *et al.*, 1947d, 1947e).



**Figura 6.** Fotomontagem autografada por Lattes, Occhialini e Powell, datada de 3/4/47, de um "duplo méson", como Lattes escreve no rodapé (Lattes et al., 1947d)

Lattes deixou Bristol no fim de 1947 com uma bolsa da Fundação Rockefeller e a intenção de trabalhar com Eugene Gardner nos Estados Unidos, na produção artificial de **píons** no cíclotron<sup>23</sup> de 184 polegadas que começara a operar em Berkeley. A expectativa geral era a de que a energia das partículas  $\alpha$  do feixe do acelerador, que era de 380 MeV, era insuficiente para produzir **píons**. Lattes, entretanto, acreditava que a energia poderia ser suficiente no caso daquelas colisões em que o momento interno do núcleon do alvo<sup>24</sup> estivesse alinhado com o momento do feixe, assim fornecendo energia suficiente no sistema do centro de massa para que um **píon** pudesse ser produzido. Apenas uma semana após chegar a Berkeley, Lattes foi capaz de achar traços de **píons**

<sup>23</sup> Um tipo de acelerador de partículas eletricamente carregadas, em que estas descrevem uma trajetória espiral, do centro para fora.

<sup>24</sup> O alvo mais utilizado foi de carbono, embora algumas observações também tivessem sido feitas bombardeando alvos de berílio, cobre e urânio.

nas emulsões que havia trazido de Bristol e que haviam sido expostas no acelerador. Esta descoberta tão rápida demonstra como é importante conhecer o que se procura: Lattes conhecia os traços que **píons** deixavam nas emulsões e, assim, não teve dificuldade em identificar traços dessas partículas quando produzidos artificialmente. Dois trabalhos foram publicados descrevendo o método que foi empregado e seus resultados. O primeiro descreve a observação de **píons** negativos (Gardner and Lattes, 1948) e o segundo, a observação de **píons** positivos sendo produzidos (Burfenig *et al.*, 1949). A maior parte dos resultados que foram relatados referem-se a **píons** produzidos em alvos de carbono. As emulsões utilizadas foram as fabricadas pela *Ilford Ltd.* Usando o valor medido do alcance dos **píons** na emulsão e o raio de curvatura no campo magnético aplicado, a massa dos **píons** foi estimada como sendo cerca de 300 vezes a massa do elétron.

Ainda em 1948, Lattes encontrou-se com Hideki Yukawa, em Princeton, nos EUA. Nessa oportunidade, foi tirada foto histórica de vários físicos brasileiros com o famoso físico japonês, foto esta mostrada na Figura 7.



**Figura 7.**

Da esquerda para a direita, de pé, ao fundo, Walter Schützer, Hideki Yukawa, Cesar Lattes; sentados, em primeiro plano, Hervásio de Carvalho, José Leite Lopes e Jayme Tiomno. Foto tirada em Princeton, em 1948. O fotógrafo foi o padre Xavier Roser (Acervo CBPF)

Lattes relatou também outro fato curioso ocorrido naquela época (Lattes, 1984). Pouco antes de deixar Berkeley, em fevereiro de 1949, Edwin McMillan (1907-1991), físico americano laureado com o prêmio Nobel de Química de 1951, pediu-lhe para que olhasse algumas placas de emulsões que haviam

sido expostas a **raios  $\gamma$**  (gama) produzidos no síncrotron<sup>25</sup> de elétrons de 300 MeV, então em operação. Lattes conta que em apenas uma noite ele foi capaz de detectar doze **píons**, e que na manhã seguinte entregou as placas a McMillan com mapas informando onde ele poderia encontrar os **píons**. Essas observações nunca foram publicadas, mas, ainda segundo Lattes, essa seria a primeira observação da reação de fotoprodução de **píons**.

Lattes retornou ao Brasil em 1949 e, com outros cientistas brasileiros importantes, criou o CBPF no Rio de Janeiro. Ele deixou a USP, transferindo-se para o Rio de Janeiro para se tornar o primeiro diretor no novo centro de pesquisa e ministrar aulas na Faculdade Nacional de Filosofia (FNFi), da Universidade do Brasil (UB). Nos anos seguintes, as atividades de pesquisa em física no CBPF se desenvolveram e atraíram estudantes de todas as partes da América do Sul. Lá a física de **raios cósmicos** foi um dos temas principais de pesquisa desde os primeiros anos.

O primeiro trabalho científico realizado por físicos no CBPF reflete o legado de Lattes. Elisa Frota Pessoa (1921-), pesquisadora emérita do CBPF, e Neusa Margem Amato (1926-) usaram emulsões nucleares irradiadas no acelerador de Berkeley, que Lattes lhes havia oferecido para estudar o decaimento de **píons** positivos e concluírem que o modo de decaimento resultando em elétrons era, no mínimo, cem vezes menos frequente do que aquele resultando em múons (Frota Pessoa e Margem, 1950).

Outro gesto de Lattes teve impacto na física de **raios cósmicos** fora do Brasil, mais especificamente, na Argentina. Ele presenteou Estrella Mazzolli de Mathov com algumas placas de emulsão trazidas de Bristol. Estrella juntou um grupo de estudantes e começou a trabalhar com essas emulsões (Bonifazi, 2010), também dando impulso ao desenvolvimento da área na Argentina.

Em 1951, Lattes também participou dos esforços para criar o CNPq, de enorme importância para o desenvolvimento científico e tecnológico do país nos últimos sessenta anos. Nesse mesmo período, foram iniciados os trabalhos para a construção de um laboratório permanente de física de **raios cósmicos** no monte Chacaltaya. O espanhol Ismael Escobar Vallejo (1918-2009) foi a pessoa responsável por instalar uma rede de estações meteorológicas na Bolívia, inclusive aquela em Chacaltaya que tinha chamado a atenção de Lattes quando procurava por um local a grande altitude para expor as emulsões. A importância da descoberta do **píon** e a observação de

---

<sup>25</sup> O síncrotron é um acelerador de partículas eletricamente carregadas em que estas descrevem uma trajetória circular, sendo aceleradas em sincronia com a atuação de um campo magnético que as direciona.

seu decaimento por Lattes, Occhialini e Powell (Lattes *et al.*, 1947d e 1947e) teve repercussão no mundo todo e inspirou Escobar a apresentar, em 1949, proposta de construção de um laboratório permanente. Sua proposta foi aprovada pela *Universidad Mayor de San Andrés* e pelo governo boliviano em 1951. O *Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya* foi criado nesse mesmo ano. Mesmo antes de sua aprovação, cientistas de vários países tinham ido à Bolívia em missões para expor detectores à **radiação cósmica**. Em 1952, foi assinado acordo entre a *Universidad Mayor de San Andrés* e o CBPF, vindo a possibilitar que físicos brasileiros pudessem trabalhar naquele Laboratório. Nos anos seguintes, expedições científicas oriundas de vários países lá chegaram e encontros foram organizados e realizados, dando grande impulso ao desenvolvimento científico local. Um relato detalhado da história do *Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya* e de sua relevância para a ciência boliviana pode ser encontrado em Bastos (1999). Vários físicos brasileiros estiveram envolvidos em pesquisas nesse laboratório, em colaboração com físicos e técnicos bolivianos. Além de Lattes, Occhialini e Camerini após retornarem de Bristol, Roberto Salmeron, Hervásio de Carvalho, Alfredo Marques, Rudolph Thom, Ricardo Palmeira, Fernando de Souza Barros lá trabalharam com Ismael Escobar e Alfredo Hendel, da Bolívia, apenas para nomear alguns. Georges Schwachheim e Andrea Wataghin desenvolveram projeto para estudar a dependência da criação de **chuveiros** penetrantes com a altitude, mas seus resultados acabaram não sendo publicados em revistas internacionais.

No início da década de 1950, o CBPF dispunha da instrumentação necessária para a pesquisa em **raios cósmicos**. Se necessário, os instrumentos eram levados para o monte Chacaltaya. Sempre que possível, o transporte do Rio de Janeiro para La Paz era feito em voos regulares do Correio Aéreo Nacional da FAB, que auxiliava no transporte de instrumentos e de pessoas para a Bolívia. Para detectores maiores e mais pesados, quando o uso de aviões era impossível, o transporte era em trens ou pequenos caminhões. Rios eram cruzados em carros de bois. Tais expedições são descritas e documentadas em Marques (1994). Uma expedição foi organizada para transportar para Chacaltaya uma **câmara de nuvens** doada ao CBPF por Marcel Schein (1902-1960), da Universidade de Chicago. A intenção de Lattes e colaboradores era a de usar a câmara para medir o tempo de vida média do **píon** e investigar o **espectro de energia** e densidade de **chuveiros** em Chacaltaya. Também havia a intenção de estudar outros **mésons** e partículas instáveis nos **chuveiros** detectados. Entretanto, não há resultados publicados referentes a esses trabalhos.

Entre 1955 e 1956, Lattes passou um ano sabático nos Estados Unidos, inicialmente como pesquisador associado no Instituto Enrico Fermi para Estudos

Nucleares da Universidade de Chicago e, posteriormente, na Universidade de Minnesota. Participou então de estudos do decaimento de **píons** produzidos em interações de **raios cósmicos de altas energias**. Emulsões nucleares foram usadas como detectores e expostas em balões a 30 km de altitude. Desse período datam as publicações Fowler *et al.*, 1957 e Anderson and Lattes, 1957.

Retornando ao Brasil em 1957, Lattes retoma suas pesquisas e atividades de ensino no CBPF e na UB no Rio de Janeiro. Em 1960, Schenberg convida-o para retornar à USP. Ele aceita o convite e forma um grupo de pesquisa na USP para investigar interações de **raios cósmicos de altas energias** com emulsões nucleares expostas no monte Chacaltaya.

Entre 1960 e 1962, Lattes participa do projeto *International Cooperative Emulsion Flight*, com **câmaras de emulsões** que eram expostas a **raios cósmicos** em voos de balão organizados pelo já citado Marcel Schein e seus colaboradores da Universidade de Chicago. Os balões atingiam 30 km de altitude. Após processamento químico, as emulsões eram distribuídas entre os vários laboratórios participantes da colaboração em quinze países. O grupo de Lattes na USP era um dos participantes.

Um novo período de intensas atividades experimentais iniciou-se na década de 1960, quando Lattes e seus colaboradores prepararam a construção das primeiras **câmaras de emulsão** para serem expostas em Chacaltaya pela Colaboração Brasil-Japão.

## Colaboração Brasil-Japão (1959-)

Ao fim do segundo período, a pressão sobre a área de pesquisa em **raios cósmicos** era crescente, com mais aceleradores de partículas sendo construídos e atingindo energias cada vez maiores. A pesquisa em **raios cósmicos** gradualmente mudou o seu foco para estudar interações nucleares em energias que ainda não podiam ser alcançadas nos aceleradores da época.

Neste terceiro período a maioria dos físicos que se dedicavam ao estudo de **raios cósmicos** no Brasil participou dos experimentos com **câmaras de emulsões** nucleares realizados no âmbito da Colaboração Brasil-Japão. Esta colaboração durou por mais de trinta anos e produziu resultados significativos sobre interações nucleares induzidas por partículas da **radiação cósmica** com energias entre  $10^{13}$  e  $10^{17}$  eV.

É interessante lembrar as circunstâncias que resultaram nessa colaboração frutuosa e nos laços que conectaram físicos desses dois países. A descoberta do **píon** e de seu decaimento no múon por Lattes, Occhialini e Powell em

1947 (Lattes *et al.*, 1947d e 1947e) forneceu evidências decisivas da existência dos **mésons**. A existência dessas partículas, além de ter sido predita por Hideki Yukawa (Yukawa, 1935), era também consistente com a hipótese da teoria dos dois **mésons** de S. Sakata e T. Inoue (Sakata and Inoue, 1946) e também de Y. Tanikawa (Tanikawa, 1947). Embora esses autores tivessem apresentado suas teorias no Japão em 1942, os trabalhos correspondentes só foram publicados em revistas internacionais anos mais tarde. Físicos japoneses também tinham participado em discussões sobre o spin<sup>26</sup> da partícula prevista por Yukawa. Enquanto o americano Robert Marshak (1916-1992) e o alemão Hans Bethe (1906-2005), prêmio Nobel de Física de 1967, apresentavam argumentos a favor de serem férmions (Marshak and Bethe, 1947), Taketani e seus colaboradores defendiam a ideia de que a partícula responsável pelas forças nucleares deveria ser um bóson (Taketani *et al.*, 1949).

Yukawa recebeu o prêmio Nobel em Física em 1949 após a confirmação da existência de **mésons**. Este foi um evento muito importante à época no Japão. Em reconhecimento a esta importância, a comunidade de imigrantes japoneses no Brasil e seus descendentes iniciaram um movimento para convidar Yukawa para vir a São Paulo, e coletaram fundos para sua visita (ver “Imigrantes japoneses no menor observatório do mundo” no Capítulo “Astrônomos amadores” neste Volume). Entretanto, a saúde de Yukawa impediu que essa visita se concretizasse na ocasião, de modo que os fundos foram enviados ao Japão para serem usados no apoio de atividades científicas naquele país. Em particular, uma parte desse dinheiro foi dada a um grupo de jovens físicos para estudo de **raios cósmicos** utilizando emulsões nucleares. Yoichi Fujimoto relata a importância desse apoio e a influência que teve no desenvolvimento futuro de atividades de pesquisa através da colaboração de físicos do Brasil e do Japão (Fujimoto, 1999). Em seu testemunho, ele descreve o progresso conseguido na produção de placas de emulsão nuclear de boa qualidade no Japão. Fujimoto também relata projeto para desenvolver um novo tipo de detector consistindo de um sanduíche de muitas camadas de placas de chumbo e de material fotossensível. As camadas fotossensíveis eram compostas de placas de emulsão nuclear e de filmes de raios-X altamente sensíveis, também fabricados no Japão. Esses filmes de raios-X registravam partículas de **chuveiros** eletromag-

---

<sup>26</sup> O spin é uma propriedade quântica das partículas fundamentais, relacionada ao seu momento angular intrínseco. Partículas fundamentais com spin semi-inteiro (1/2, 3/2, 5/2 ...) são férmions, enquanto aquelas com spin inteiro (0, 1, 2...) são bósons. Elétrons, prótons, nêutrons, **neutrinos** e múons são férmions, enquanto fótons e **mésons** (e, portanto, os **píons**) são bósons.

néticos como pequenas manchas distinguíveis a olho nu para **chuveiros** de 1 TeV<sup>27</sup> ou acima, e haviam sido adicionados a fim de possibilitar buscas rápidas de eventos a olho nu sobre grandes áreas. Um detector desse tipo havia sido testado em um voo de balão em 1956 e tinha sido bem-sucedido em registrar **mésons** produzidos em interações de **raios cósmicos** de **altas energias**. Em 1958, a fim de atingir energias maiores, os físicos planejaram aumentar a área dessa **câmara de emulsões**, expondo-a aos **raios cósmicos** no monte Norikura, a 2.800 m acima do nível do mar. Porém, essa altitude resultou ser ainda muito baixa para que se conseguisse observar um fluxo razoável de eventos. Por essa razão, o grupo japonês considerou a possibilidade de expor a câmara em Chacaltaya, onde Lattes expusera as emulsões nas quais se comprovou a descoberta do **píon**. Também era sabido no Japão que Lattes ainda trabalhava no *Laboratório de Física Cósmica de Chacaltaya*, de maneira que a ideia de uma colaboração pareceu natural.

Foi assim que em 1959 Yukawa escreveu uma carta para Lattes, informando-o sobre o Grupo Cooperativo de Emulsões no Japão que alguns físicos tinham organizado em 1954 e apresentando a intenção desse grupo de desenvolver um experimento em Chacaltaya. Yukawa também sugeriu que esse experimento fosse realizado na forma de colaboração entre grupos brasileiros e japoneses. Lattes respondeu positivamente e, em 1961, quando visitou o Japão para participar da Conferência Internacional de Raios Cósmicos em Kyoto, se encontrou com o grupo de cientistas japoneses e, juntos, planejaram os passos a serem dados para tornar o projeto uma realidade. Este foi o nascimento de duradoura e frutuosa colaboração entre físicos de instituições nos dois países. Em mais de 30 anos, 25 **câmaras de emulsões** foram expostas em Chacaltaya, a primeira delas em 1962 e a última, em 1993.

A estrutura básica das câmaras expostas em Chacaltaya era a do tipo descrito acima por Fujimoto (1999). Uma montagem típica consistia de uma câmara superior, uma camada-alvo de piche, um intervalo de 150 cm de ar e uma câmara inferior. Dessa maneira, a câmara superior era voltada à detecção de **chuveiros** iniciados na atmosfera ou em suas camadas de chumbo e, ao mesmo tempo, funcionava como blindagem para a câmara inferior contra os elétrons e **raios  $\gamma$**  atmosféricos. A camada de piche era praticamente transparente aos **raios  $\gamma$**  produzidos em interações locais, devido à sua espessura e ao baixo número atômico do carbono, seu constituinte. A câmara inferior registrava os **chuveiros** produzidos nas interações nucleares na camada-alvo. O intervalo de ar proporcionava a distância de deslocamento necessária para alcançar uma separação suficiente entre os **raios  $\gamma$**  na câmara inferior, possibilitando identi-

---

<sup>27</sup> 1 TeV = 1 trilhão eV.

ficá-los univocamente. Dimensões típicas das câmaras superior e inferior eram  $44 \text{ m}^2$  e  $33 \text{ m}^2$ , respectivamente. O tempo médio de exposição de uma câmara era em torno de 500 dias. Uma foto de uma câmara inferior já montada, com os envelopes contendo filmes e emulsões nucleares intercalados com placas de chumbo, é mostrada na Figura 8. Vê-se também a estrutura metálica que suporta a câmara superior, com montagem similar à da câmara inferior.



**Figura 8.** A câmara inferior já montada, com os envelopes contendo filmes e emulsões nucleares intercalados com placas de chumbo. Vê-se também a estrutura metálica que suporta a câmara superior, com montagem similar (Acervo DRCC<sup>28</sup>/IFGW)

Uma excelente revisão dos resultados principais obtidos pela Colaboração Brasil-Japão através dos anos até 1980 foi publicada em Lattes *et al.*, 1980. Resultados importantes foram apresentados regularmente nas conferências internacionais de raios cósmicos, que ocorrem com frequência bienal e congregam a comunidade mundial de físicos de **raios cósmicos**.

<sup>28</sup> DRCC: Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia do IFGW/Unicamp.

Estudos sistemáticos de interações nucleares na camada de carbono e na atmosfera revelaram três tipos fenomenológicos de produção múltipla de **píons**, chamados mirim, açu e guaçu, explorando os significados das palavras na língua tupi. Os jatos mirim eram aqueles consistentes com uma simples extrapolação em escala dos dados obtidos em aceleradores na região em torno de 1 TeV. Jatos açu eram considerados responsáveis pela quebra da relação de escala e sua frequência aumentava com a energia, sendo  $\approx 50\%$  a 100 TeV. Jatos guaçu eram encontrados em interações atmosféricas em energias mais altas, em torno de 1 mil TeV. Supostamente, três estados intermediários denominados mirim, açu e guaçu seriam produzidos nas interações, correspondentes a esses três tipos de jatos. Esses eram identificados por massas de repouso<sup>29</sup> e multiplicidade de partículas produzidas crescente com a energia. As energias de repouso desses estados intermediários mirim, açu e guaçu foram estimadas em 2 ~ 3 GeV, 15 ~ 30 GeV e 100 ~ 300 GeV, respectivamente.

Entre os resultados interessantes publicados pela Colaboração Brasil-Japão está a observação de eventos chamados Centauro, cuja principal característica era uma quase total ausência de **raios**  $\gamma$  originários do decaimento de **píons** neutros, e a presença de grande número de decaimentos atribuídos a **hádrons**. A observação desse tipo de evento foi relatada na Conferência Internacional de Raios Cósmicos de 1973 (Brazil-Japan Collaboration, 1973). Este tipo de interação não foi observado em experimentos em aceleradores até o momento.

Presentemente o detector CASTOR (*Centauro And Strange Object Research*), parte do experimento CMS (*Compact Muon Solenoid*), no LHC (*Large Hadron Collider*) do CERN (*European Organization for Nuclear Research*) possibilitará estudos detalhados de partículas produzidas em colisões a energias de 14 TeV no sistema centro de massa, que é da ordem das energias de partículas próximas ao eixo de **chuveiros** observados nos experimentos com **câmaras de emulsão**. A procura por interações exóticas, tais como as observadas em **raios cósmicos**, é uma das motivações para este detector que trabalha na fronteira do conhecimento. Físicos brasileiros têm papel importante nesse experimento, tendo participado da proposta e da construção do detector CASTOR.

Em uma das primeiras linhas de uma publicação da Colaboração Brasil-Japão referente a bolas-de-fogo na produção múltipla de **píons** (Chinellato

---

<sup>29</sup> A massa de repouso de um corpo é aquela medida por um observador para o qual esse corpo se encontra em repouso. A energia relativística de um corpo é composta pela energia associada à massa de repouso mais a sua energia cinética.

*et al.*, 1983), há a menção ao trabalho pioneiro de Wataghin, em 1941, em que é introduzida a ideia de bolas-de-fogo a partir dos experimentos com **chuveiros** penetrantes de **raios cósmicos**. Esta havia sido a contribuição de Wataghin no Simpósio de Raios Cósmicos realizado no Rio de Janeiro, em 1941 (Wataghin, 1943).

Nos 30 anos de colaboração, muitos físicos japoneses visitaram o Brasil. Yoichi Fujimoto, Shun-ichi Hasegawa, Akinori Ohsawa, Toru Shibata, Kei Yokoi, Kotaro Sawayanagi, Naoyuki Arata e outros aqui ficaram por períodos curtos e também longos, tanto no Rio de Janeiro quanto em Campinas, trabalhando com os colegas brasileiros. No Brasil, físicos participando das atividades de pesquisa eram de instituições do Estado de São Paulo (inicialmente da USP e, a partir de 1967, da Unicamp para onde Lattes e seu grupo haviam se transferido) e do Estado do Rio de Janeiro (do CBPF a partir de 1964 e, posteriormente, também da Universidade Federal Fluminense, UFF). Em Campinas, muitos físicos trabalharam com Lattes por anos, como Edison Shibuya, Armando Turtelli, Claudio Santos, Marta Mantovani, José Augusto Chinellato, Margarita Ballester, a autora deste texto, Miguel Luksys, José Bollandi, Valdir Rodrigues, Marcio Menon e muitos outros. No Rio, o primeiro físico do CBPF a se envolver na colaboração foi Anna Maria Freire Endler, a quem logo se juntaram Neusa Margem Amato e Francisco de Oliveira Castro, e ainda mais tarde, Carlos Navia e Regina Maldonado, da UFF.

Quando Lattes se aposentou na Unicamp em 1986, Edison Shibuya assumiu o trabalho de liderar o time brasileiro. Muitos estudantes também estiveram envolvidos nos experimentos, trabalhando na montagem e desmontagem das câmaras, na revelação dos filmes de raios-X e emulsões nucleares e também na análise dos resultados. Uma parte deles concluiu doutorado e continuou posteriormente trabalhando na física de **raios cósmicos**. Esses estudantes daquela época formariam a terceira geração de físicos de **raios cósmicos** no Brasil.

A Figura 9 mostra Lattes sentado no DRCC/IFGW na década de 1970, em companhia de Jean Meyer, seu colega de tempos da FFCL/USP, que havia retornado da Europa para trabalhar no IFGW. Também estão na foto a microscopista Lígia Maria Stella, à esquerda, e a autora deste texto, à direita.



**Figura 9.** A microscopista Lígia Maria Stella, Cesar Lattes, Jean Meyer e a autora deste texto no DRCC/IFGW, em 1975 (Acervo DRCC/IFGW)

## Observatório Pierre Auger<sup>30</sup> (1992-)

No início da década de 1990, nova ideia desafiadora para o foco da pesquisa em **raios cósmicos** de altíssimas energias motivou a concepção e construção do Observatório Pierre Auger. Este é o maior conjunto de detectores de **raios cósmicos** já construído e é o resultado dos esforços de uma colaboração internacional de pesquisadores de 18 países. Seu objetivo principal é possibilitar o estudo dos **raios cósmicos** de mais **altas energias** já observados até hoje — acima de  $10^{18}$  eV — a fim de obter informação sobre suas origens, processos de aceleração e propagação, composição e **espectro energético**.

Em novembro de 1995, realizou-se reunião na sede da UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) em Paris, em que se instalou a Colaboração Pierre Auger. Nessa primeira reunião, foi decidido iniciar a construção do Observatório no hemisfério sul, na Argentina — em sua concepção original, o Observatório teria dois sítios, um em cada hemisfério. Houve

---

<sup>30</sup> Pierre Victor Auger (1899-1993) foi um físico francês que trabalhou em física atômica, nuclear e **raios cósmicos** e teve papel importante na criação do CERN.

disputa entre África do Sul, Argentina e Austrália para ser o país sede. O fator decisivo que levou à escolha da Argentina foi a existência de comunidade científica sólida na Argentina e no Brasil, assim como parque industrial avançado nos dois países, capaz de produzir os equipamentos necessários.

O desenho do Observatório foi completado em 2002, e um protótipo operou até 2005, quando se iniciou a construção do Observatório definitivo.

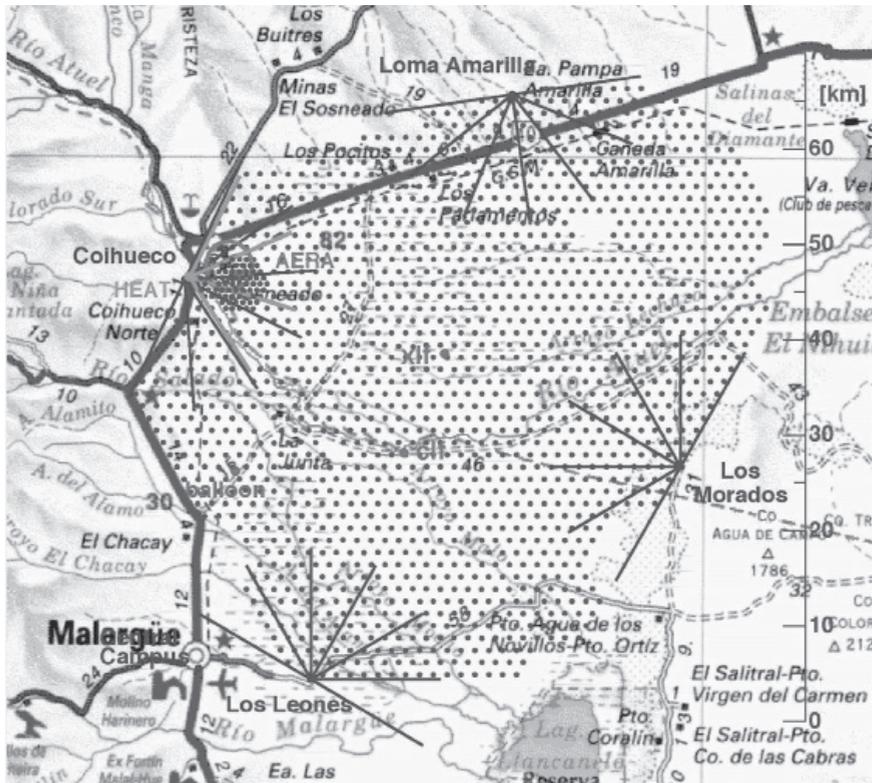
O Observatório está localizado nos pampas argentinos, nas proximidades da cidade de Malargüe, cerca de 370 km ao sul de Mendoza, e a 1.400 m acima do nível do mar. A sede do Observatório é mostrada na Figura 10.



**Figura 10.** Prédio central do Observatório Pierre Auger, em Malargüe (Acervo Observatório Pierre Auger)

Para a detecção dos **chuveiros** induzidos pelos **raios cósmicos** de energias extremas ao atravessarem a atmosfera, são exploradas duas técnicas complementares: detectores de luz Cherenkov e telescópios de fluorescência. Cada detector de luz Cherenkov consiste de um tanque em polietileno contendo água pura, instrumentado com três fotomultiplicadoras, painel solar e baterias para alimentar a eletrônica, uma antena para a transmissão de dados até a central de aquisição, e um GPS para registrar o tempo da chegada das partículas do **chuveiro** no detector. Os fótons emitidos pelo efeito Cherenkov, quando partículas atravessam a água com velocidades maiores do que a da luz na água, são coletados pelas fotomultiplicadoras, permitindo posteriormente estimar o número de elétrons,

fótons e múons do **chuveiro** que atravessaram cada detector e, após calibração, estimar a energia do **raio cósmico** que deu origem ao **chuveiro**. No Observatório Auger, 1.660 desses detectores estão espalhados em área de 3 mil km<sup>2</sup>. O arranjo é regular, com distância entre os detectores de 1,5 km. Um mapa mostrando esquematicamente a disposição dos detectores de superfície no sítio, bem como a localização dos prédios que abrigam os telescópios de fluorescência, é mostrado na Figura 11. Maiores detalhes sobre a operação dos detectores podem ser encontrados em *The Pierre Auger Collaboration* (2010b).



**Figura 11.** Disposição dos detectores de luz Cherenkov do Observatório Pierre Auger. Cada ponto representa um dos 1.660 detectores de superfície distribuídos em área de 3 mil km<sup>2</sup>. Os cinco sítios de telescópios de fluorescência (Los Leones, Coihueco, Los Morados, Loma Amarilla e HEAT) estão localizados na periferia da área, com os campos de visão dos telescópios assinalados pelas retas radiais. A escala em quilômetros está à direita da Figura

Vinte e quatro telescópios de fluorescência estão instalados em quatro prédios localizados em pequenas elevações na periferia daquela área e

cobrem a atmosfera acima do arranjo de detectores na superfície. Os telescópios medem a luz de fluorescência emitida isotropicamente (ver **isotrópico**) pelas moléculas de nitrogênio excitadas pelas partículas do **chuveiro**. Cada telescópio coleta a luz que incide sobre espelho esférico de 11 m<sup>2</sup> e é por ele refletida numa câmara com 440 fotomultiplicadoras. No telescópio é adotada a óptica das câmaras Schmidt<sup>31</sup> a fim de minimizar a aberração de coma<sup>32</sup>. O campo de visão de cada telescópio cobre 30° em **azimute** e 30° em **elevação**. Desse modo, os seis telescópios em um prédio cobrem um ângulo azimutal de 180°. Maiores detalhes sobre a construção e o funcionamento dos telescópios de fluorescência



**Figura 12.** Ao fundo, um dos prédios que abriga seis telescópios de fluorescência. Em primeiro plano, um dos 1.660 detectores de superfície (Acervo Observatório Pierre Auger)

<sup>31</sup> Um tipo de telescópio desenhado em 1930 na Alemanha por Bernhard Schmidt, cujo esquema óptico foi otimizado para a fotografia astronômica proporcionando um amplo campo de visão e reduzida aberração óptica.

<sup>32</sup> Coma é um defeito na imagem produzida por telescópio, quando um feixe de raios paralelos ao eixo óptico não produz um ponto, mas imagem difusa com aparência de cometa, daí o nome.

do Observatório Auger podem ser encontrados em (*The Pierre Auger Collaboration* (2010a)). Três telescópios adicionais instalados junto a um dos prédios, com campo de visão entre 30° e 60° de **elevação**, possibilitam a detecção de **chuveiros** atmosféricos de menor energia. Os telescópios de fluorescência do Observatório Auger têm 100% de eficiência para a detecção de **chuveiros** atmosféricos com energias acima de  $3 \times 10^{18}$  eV a distâncias de até 40 km. Um dos prédios do Observatório Pierre Auger que abriga seis telescópios de fluorescência é mostrado na Figura 12, com um dos 1.660 detectores de superfície em primeiro plano.

Embora a construção do Observatório Auger tenha sido completada em 2008, a aquisição de dados tem sido praticamente contínua desde janeiro de 2004, com operação mesmo enquanto era expandida a área coberta pelos detectores. Os resultados iniciais mais significativos já publicados se referem ao **espectro de energia**, às direções de chegada e ao estudo de composição dos **raios cósmicos**. Resultados envolvendo limites para o fluxo de **neutrinos** e limites para o fluxo e fração de fótons também foram publicados.

O **espectro** medido pelo Observatório Pierre Auger, cobrindo energias acima de  $10^{17,5}$  eV, mostra claramente duas características: uma mudança do índice espectral<sup>33</sup> em  $5 \times 10^{18}$  eV, conhecida como *tornozelo* do **espectro**, e a supressão do fluxo para energias acima de  $10^{19,5}$  eV (*The Pierre Auger Collaboration*, 2010c). Tais características podem ser decorrentes de interações dos **raios cósmicos** com fótons da **Radiação Cósmica de Fundo** na faixa de micro-ondas, durante a sua propagação desde as suas fontes até a Terra, ou ainda, podem ser consequência das características da aceleração dos **raios cósmicos** nas fontes, ou da localização destas últimas. Observações adicionais são ainda necessárias para melhor compreender a causa real das características observadas.

A Colaboração Auger também analisou as distribuições das direções de chegada dos **raios cósmicos** para vários intervalos de energias. Uma análise que teve grande repercussão envolveu a correlação entre as direções dos **raios cósmicos** mais energéticos, com energias acima de  $55 \times 10^{18}$  eV, com as posições de **núcleos de galáxias ativas** (*The Pierre Auger Collaboration*, 2007, 2008a, 2010d). Embora a significância do resultado não tenha aumentado com o tempo, a probabilidade de obter uma correlação como a observada a partir de uma distribuição **isotrópica** de **raios cósmicos** continua sendo menor do que 1%.

No estudo de composição dos **raios cósmicos** (*The Pierre Auger Collaboration*, 2010e), as observações indicam composição predominantemente leve para energias entre  $10^{18}$  eV e  $10^{18,5}$  eV, consistente com prótons, e uma ten-

---

<sup>33</sup> Inclinação da reta no gráfico do **espectro**.

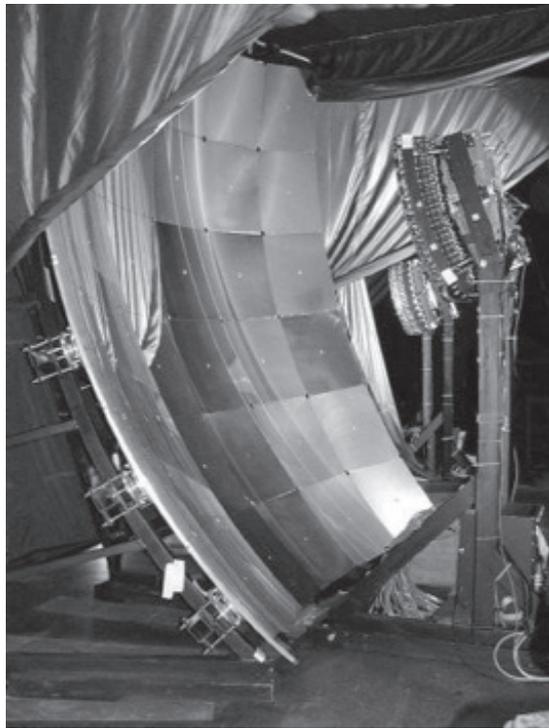
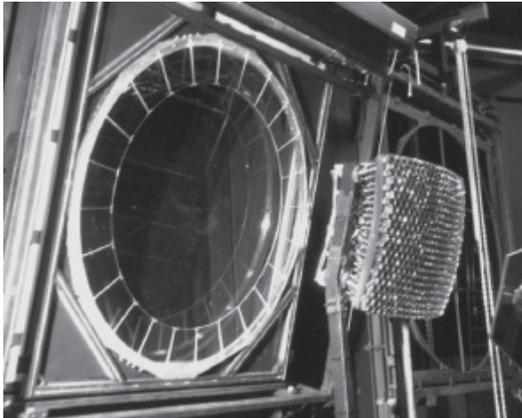
dência para uma composição gradualmente mais pesada para energias acima dessa faixa. Entretanto, as interpretações sobre a composição química ainda dependem fortemente de modelos para as interações hadrônicas (interações que envolvem **hádrons**) a essas energias altíssimas, modelos obtidos de extrapolações de resultados de interações em aceleradores a energias duas ordens de grandeza inferiores.

**Neutrinos** e fótons com energias acima de  $10^{18}$  eV ainda não foram detectados no Observatório Auger, levando a previsões de limites para o fluxo de **neutrinos** (*The Pierre Auger Collaboration*, 2008b, 2009a) e limites para o fluxo e fração de fótons (*The Pierre Auger Collaboration*, 2008c, 2009b). Esses resultados trazem fortes implicações astrofísicas e também permitem restringir alguns modelos teóricos de produção de **raios cósmicos**.

Físicos brasileiros participaram do Observatório Auger desde o início do projeto, sob a liderança de Carlos Ourivio Escobar (IFGW/Unicamp) e Ronald C. Shellard (CBPF). Ambos presidiram o *Collaboration Board* em várias oportunidades. Outros físicos em instituições brasileiras participaram dos estágios de construção, tomada e análise de dados. Suas contribuições foram significativas tanto na construção do arranjo de detectores de superfície, quanto para os telescópios de fluorescência e vários ocupam posições relevantes na estrutura de operação do Observatório. Várias indústrias brasileiras participaram no desenvolvimento de detectores para o Observatório.

Vale destacar a contribuição brasileira no processo de produção de um anel de lentes corretoras na parte periférica do diafragma. Essas lentes aumentam a área coletora de luz nos telescópios, aumentando a razão sinal/ruído, sem causar perda significativa na **resolução**. O grupo brasileiro estudou o sistema óptico através de simulações de seu desempenho com diferentes formatos do anel corretor e escolheu o perfil que melhor cumpriria os requisitos desejados. A empresa Schwantz Ltda. em Indaiatuba, SP, aceitou o desafio de produzir os anéis corretores para o Observatório, construindo as máquinas politrizes diamantadas de grande precisão necessárias para dar forma aos anéis de lente esférica<sup>34</sup> de cerca de  $1 \text{ m}^2$ , certamente um feito tecnológico, já que o raio interno do anel mede 85 cm, e o externo, 110 cm. Todos os telescópios do Observatório são equipados com esses anéis corretores (Oliveira *et al.*, 2004). O conjunto do anel de lentes corretoras de um dos telescópios, bem como o espelho que reflete a luz sobre a câmara de fotomultiplicadoras, é mostrado na Figura 13.

<sup>34</sup> A lente esférica tem superfície não esférica que elimina ou reduz aberrações ópticas, evitando a complexidade de sistemas com múltiplas lentes.



**Figura 13.** Acima, à esquerda, o anel de lentes corretoras de um dos telescópios de fluorescência e a câmara de fotomultiplicadoras que mede a luz após esta ser refletida em um espelho (não mostrado). Abaixo, à direita, o espelho do telescópio, que capta a luz e a focaliza sobre a câmara de fotomultiplicadoras (Acervo Observatório Pierre Auger)

Também houve participação brasileira no primeiro projeto para as janelas dos telescópios, com desenho complexo e funcionando por controle remoto, e para as persianas e cortinas de segurança dos telescópios, projeto a cargo da empresa Equatorial Sistemas, em São José dos Campos, SP. A contribuição

para o detector de superfície também foi significativa. Grande parte dos 1.660 tanques de polietileno foi produzida pelas indústrias brasileiras Rotoplastyc Indústria de Rotomoldados Ltda., em Carazinho, RS, e Alpina Termoplásticos, em São Paulo. Igualmente, grande fração das baterias que alimentam a eletrônica de aquisição de dados é produzida pela empresa brasileira Baterias Moura, em Belo Jardim, PE.

Físicos brasileiros atuam como coordenadores de tarefas de análise e são responsáveis pelo desempenho de componentes do detector. A participação de físicos de várias instituições tem recebido apoio contínuo de agências de fomento no país (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, FAPERJ; CNPq; Financiadora de Estudos e Projetos, Agência Brasileira de Inovação a partir de 2014, FINEP e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, MCTI).

Com o Observatório Pierre Auger a comunidade de físicos de **raios cósmicos** se expandiu, ultrapassando os limites do eixo São Paulo-Rio de Janeiro. Presentemente são onze instituições no Brasil com pesquisadores envolvidos com a operação do Observatório e análise de dados: CBPF, Instituto de Física da UFRJ (IF/UFRJ), Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (IF/UFF), Instituto de Física de São Carlos (IFSC/USP), Instituto de Física da USP (IF/USP), IFGW/Unicamp, Universidade Federal do ABC (UFABC), Faculdade Independente do Nordeste (FAINOR, Vitória da Conquista, BA), Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS, BA), Universidade Federal da Bahia (UFBA, Salvador) e Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB, Vitória da Conquista). Em todas essas instituições jovens físicos da quarta geração na física de **raios cósmicos** estão iniciando grupos de pesquisadores na área. Assim, os estudantes de hoje serão a quinta geração de físicos de **raios cósmicos** no Brasil.

## Conclusão

A história da física de **raios cósmicos** no Brasil foi contada ao longo de quatro períodos. O que chama a atenção em todos eles é que o trabalho aqui desenvolvido sempre foi na fronteira do conhecimento na área e competitivo no nível internacional.

Particularmente importante no primeiro período foi o trabalho pioneiro de Gleb Wataghin e seu grupo em São Paulo, tanto do ponto de vista da predição teórica de Wataghin sobre a produção múltipla de **mésons**, quanto pelos resultados experimentais obtidos por ele e seus assistentes. Wataghin sempre

cuidou para que seus resultados fossem apresentados em revistas internacionais. Num tempo em que o acesso a essas revistas era muito mais difícil do que hoje em dia, ele mostrou estar sempre a par dos desenvolvimentos e conquistas mais recentes. Ele também soube superar o isolamento do Brasil dos principais centros de física no mundo. Publicou muitos de seus trabalhos como cartas ao editor da *Physical Review*, possibilitando assim que seus resultados principais se tornassem conhecidos e difundidos rapidamente. Wataghin cultivou boas relações e amizade com físicos famosos da época no mundo todo, o que lhe permitiu enviar seus estudantes ao exterior para trabalhar com pesquisadores importantes, proporcionando trocas de ideias e contribuindo para o desenvolvimento da física no Brasil.

Wataghin e Lattes deixaram um legado para as gerações seguintes trabalhando na física de **raios cósmicos** no Brasil. Eles estabeleceram um padrão internacional ao trabalharem na fronteira do conhecimento e em intensa colaboração com físicos de outros países.

A nova geração de físicos de **raios cósmicos** no Brasil segue essa tradição e mantém a forte cooperação internacional ao trabalhar no Observatório Pierre Auger. Cabe aos novos pesquisadores dar continuidade a essa atmosfera de internacionalismo e vanguarda, continuando a tradição deixada pelos seus antecessores.

## Referências

ABC (1943), *Symposium sobre Raios Cósmicos*, Rio de Janeiro: Imprensa Nacional.

Anderson, H. L. and Lattes, C. M. G. (1957), Search for the Electronic Decay of the Positive Pion, *Il Nuovo Cimento*, 6, 1356-1381.

Bastos, C. Aguirre (1999), Formación del Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya in F. Caruso, A. Marques e A. Troper (Eds.), *Cesar Lattes, a descoberta do méson  $\pi$  e outras histórias*, Rio de Janeiro: CBPF.

Bonifazi, Carla (2010), Cosmic Ray Physics in Argentina, *4<sup>th</sup> School on Cosmic Rays and Astrophysics*, UFABC, Santo André, SP, August 23 to September 03, 2010, disponível em [http://pos.sissa.it/archive/conferences/118/039/CRA%20School\\_039.pdf](http://pos.sissa.it/archive/conferences/118/039/CRA%20School_039.pdf), acesso em 26/2/14.

Brazil-Japan Collaboration (1973), Air shower cores observed by Chacaltaya emulsion chamber, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> ICRC*, Denver, 4, 2671-2675.

Burfening, John; Gardner, Eugene and Lattes, C. M. G. (1949), Positive Mesons Produced by the 184-Inch Berkeley Cyclotron, *Phys. Rev.*, 75, 382-387.

Chinellato, José A.; Dobrigkeit, Carola; Bellandi Filho, J.; Lattes, Cesar M. G.; Menon, Marcio J.; Navia, Carlos E.; Pemmaraju, Ammiraju; Sawayanagi, Kotaro; Shibuya, Edisson H.; Turtelli Jr., Armando; Amato, Neusa M.; Arata, Naoyuki; Oliveira Castro, F. M.; Maldonado, Regina H. C.; Aoki, Hiroshi; Fujimoto, Yoichi; Hasegawa, Shunichi; Semba, Hiroshi; Tamada, Masanobu; Tanaka, Kojiro; Yamashita, Seibun; Shibata, Toru; Yokoi, Kei; Kumano, Hiroshi; Ohsawa, Akinori and Tabuki, Takaaki (1983), Brasil-Japan Collaboration of Chacaltaya Emulsion Chamber Experiment, Fire-Balls in Pion Multiple Production, *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, 76, 1-39.

Cocconi, G. (1949), Some Properties of the Cosmic-Ray Ionizing Particles That Generate Penetrating Showers, *Phys. Rev.*, 75, 1074-1078.

Cuer, P. and Lattes, C. M. G. (1946), Radioactivity of Samarium, *Nature*, 158, 197-198.

Fowler, P. H.; Freier, P. S.; Lattes, C. M. G.; Ney, E. P. and St. Loran, S. J. (1957), Angular Correlation in the  $p\text{-}\mu\text{-}e$  Decay of Cosmic Ray Mesons, *Il Nuovo Cimento*, 6, 63-68.

Frota Pessoa, Elisa e Margem, Neusa (1950), “Sobre a Desintegração do Meson Pesado Positivo”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 22, 371.

Fujimoto, Y. (1999), Discovery of Pi and Mu Mesons and Brazil-Japan Collaboration on Cosmic Rays in F. Caruso, A. Marques e A. Troper (Eds.), *Cesar Lattes, a descoberta do méson  $\pi$  e outras histórias*, 27-34, Rio de Janeiro: CBPF.

Gardner, Eugene and Lattes, C. M. G. (1948), Production of Mesons by the 184-inch Berkeley Cyclotron, *Science*, 107, 270-271.

Gross, B. (1932), Zur Druckabhängigkeit der Ionisation durch Ultrastrahlung, *Zeitschrift für Physik*, 78, 271-278.

Gross, B. (1933), Zur Absorption der Ultrastrahlung, *Zeitschrift für Physik*, 83, 214-221.

Gross, B. (1934), “Raios cósmicos: resumo das conferências do Dr. Bernhard Gross, no anfiteatro de física da Escola Politécnica do Rio de Janeiro”, *Revista Brasileira de Engenharia*, 27, 6-12.

Gross, B. (1935), Pour l’analyse des rayons cosmiques, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 7, 287-300.

Gross, B. (1936a), On the hard component of cosmic rays, *Phys. Rev.*, 50, 1188-1189.

Gross, B. (1936b), “Sobre o efeito de transição dos raios cósmicos”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 8, 75-77.

Gross, B. (1937), Zum Breiteneffekt der Ultrastrahlung, *Zeitschrift für Physik*, 105, 334-340.

Gross, B. (1938), On the latitude effect of the soft component of cosmic rays, *Phys. Rev.*, 53, 607-607.

Gross, B. (1939a), A Remark on the Latitude Effect of Cosmic Rays, *Phys. Rev.*, 55, 112.

Gross, B. (1939b), “Sôbre o efeito da latitude da radiação cósmica”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 11, 43-58.

Gross, B. (1949), On Permanent Charges in Solid Dielectrics. II. Surface Charges and Transient Currents in Carnauba Wax, *J. Chem. Phys.*, 17, 866-872.

Gross, B. (1976), *Entrevista a R. Guedes e T. Franken*, 92 páginas, Rio de Janeiro: CPDOC/FGV.

Gross, B. and Denard, L. Ferreira (1945), On Permanent Charges in Solid Dielectrics. I. Dielectric Absorption and Temperature Effects in Carnauba Wax, *Phys. Rev.*, 67, 253-259.

Lattes, C. M. G. (1984), My work in meson physics with nuclear emulsions in J. Bellandi and A. Pemmaraju (Eds.), *Topics on Cosmic Rays — 60th anniversary of C. M. G. Lattes*, Vol.1, Campinas: Editora da Unicamp.

Lattes, C. M. G. (1999), “O Nascimento das Partículas Elementares”, palestra dada no Rio de Janeiro em 11/10/96 no 45º aniversário do CNPq, reproduzida em F. Caruso, A. Marques e A. Troper (Eds.), *Cesar Lattes, a descoberta do méson  $\pi$  e outras histórias*, Rio de Janeiro: CBPF.

Lattes, C. M. G.; Fowler, P. H. and Cuer, P. (1947a), Range-Energy Relation for Protons and  $\alpha$ -Particles in the New Ilford ‘Nuclear Research’ Emulsions, *Nature*, 159, 301-302.

Lattes, C. M. G.; Fowler, P. H. and Cuer, P. (1947b), A Study of Nuclear Transmutations of Light Elements by the Photographic Method, *Proc. of the Phys. Soc. London*, 59, 883-900.

Lattes, C. M. G.; Fujimoto, Y. and Hasegawa, S. (1980), Hadronic Interactions of High Energy Cosmic-Ray Observed by Emulsion Chambers, *Phys. Rep.*, 65, 151-229.

Lattes, C. M. G.; Muirhead, H.; Occhialini, G. P. S. and Powell, C. F. (1947c), Processes involving charged mesons, *Nature*, 159, 694-697.

Lattes, C. M. G. and Occhialini, G. P. S. (1947), Determination of the Energy and Momentum of Fast Neutrons in Cosmic Rays, *Nature*, 159, 331-332.

Lattes, C. M. G., Occhialini, G. P. S. and Powell, C. F. (1947d), Observation on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions, *Nature*, 160, 453-456.

Lattes, C. M. G., Occhialini, G. P. S. and Powell, C. F. (1947e), Observation on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions Part 2, *Nature*, 160, 486-492.

- Lattes, C. M. G.; Schützer, Walter and Schenberg, Mario (1947f), Classical Theory of Charged Point-Particles with Dipole Moments, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 19, 193-245.
- Lattes, C. and Wataghin, G. (1946), On the Abundance of Nuclei in the Universe, *Phys. Rev.*, 69, 237.
- Marques, Alfredo (1994), “Expedições” in Alfredo Marques (Ed.), *Cesar Lattes 70 Anos – A Nova Física Brasileira*, Rio de Janeiro: CBPF.
- Marshak, R. E. and Bethe, H. A. (1947), On the two-meson hypothesis, *Phys. Rev.*, 72, 506-509.
- Mascarenhas, S. (1999), Bernhard Gross and his contribution to physics in Brazil, *Braz. J. Phys.*, 29, 217-219.
- Meyer, H. A. and Schwachheim, G. (1949), Exchange Phenomena of the Nucleons that Generate Penetrating Showers, *Phys. Rev.*, 76, 149.
- Meyer, H. A.; Schwachheim, G. and Wataghin, A. (1948), On the Production of Showers of Penetrating Particles, *Phys. Rev.*, 74, 846-847.
- Meyer, H. A.; Schwachheim, G.; Wataghin, A. and Wataghin, G. (1949a), On the Nature of Mesons in Penetrating Showers, *Phys. Rev.*, 75, 908-909.
- Meyer, H. A.; Schwachheim, G.; Wataghin, A. and Wataghin, G. (1949b), On Penetrating Showers in Cosmic Radiation, *Phys. Rev.*, 76, 598-601.
- Neddermeyer, S. H. and Anderson, C. D. (1937), Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles, *Phys. Rev.*, 51, 884–886.
- Oliveira, M. A. L. de; Souza, V. de; Reis, H. C. and Sato, R. (2004), Manufacturing the Schmidt corrector lens for the Pierre Auger Observatory, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 522, 360-370.
- Pompéia, P. A.; Souza Santos, M. Damy and Wataghin, G. (1940), Penetrating cosmic-ray showers, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 12, 229-232.
- Sakata, S. and Inoue, T. (1946), On the correlations between mesons and Yukawa particles, *Prog. Theor. Phys.*, 1, 143-150.
- Sala, O. and Wataghin, G. (1945), Showers of Penetrating Particles, *Phys. Rev.*, 67, 55-56.
- Sala, O. and Wataghin, G. (1946), Showers of Penetrating Particles at Altitude of 22,000 Feet, *Phys. Rev.*, 70, 430.
- Schenberg, M. (1939), “Sobre uma componente ultra-mole da radiação cósmica”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 11, 149.
- Schenberg, M. (1940a), “Origem da componente dura da radiação cósmica”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 12, 33.

Schenberg, M. (1940b), On the theory of multiplicative showers, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 12, 281-299.

Schenberg, M. and Occhialini, G. (1939), “Sobre uma componente ultra-mole da radiação cósmica I”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 11, 351.

Schenberg, M. and Occhialini, G. (1940), “Sobre uma componente ultra-mole da radiação cósmica II”, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 12, 197.

Sessler, G. M. (1999), Bernhard Gross and the evolution of modern electret research, *Braz. J. Phys.*, 29, 220-225.

Souza Santos, M. Damy de; Pompéia, P. A. and Wataghin, G. (1941), Showers of Penetrating Particles, *Phys. Rev.*, 59, 902-903.

Souza Santos, M. Damy de e Wataghin, G. (1937), Sopra un nuovo tipo di contatore di corpuscoli, *Il Nuovo Cimento*, 15, 104-107.

Street, J. C. and Stevenson, E. C. (1937), New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron, *Phys. Rev.*, 52, 1003–1004.

Taketani, M.; Nakamura, S.; Ono, K. and Sasaki, M. (1949), On the two-meson theory, *Phys. Rev.*, 76, 60- 63.

Tanikawa, Y. (1947), On the cosmic-ray meson and the nuclear meson, *Prog. Theor. Phys.*, 2, 220- 221.

*The Pierre Auger Collaboration* (2007), Correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic objects, *Science*, 318, 938-943.

*The Pierre Auger Collaboration* (2008a), Correlation of the highest-energy cosmic rays with the positions of nearby active galactic nuclei, *Astropart. Phys.*, 29, 188-204.

*The Pierre Auger Collaboration* (2008b), Upper Limit on the Diffuse Flux of Ultrahigh Energy Tau Neutrinos from the Pierre Auger Observatory, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 211101.

*The Pierre Auger Collaboration* (2008c), Upper Limit on the Cosmic-Ray Photon Flux Above 1019 eV Using the Surface Detector of the Pierre Auger Observatory, *Astropart. Physics*, 29, 243-256.

*The Pierre Auger Collaboration* (2009a), Limit on the diffuse flux of ultrahigh energy tau neutrinos with the surface detector of the Pierre Auger Observatory, *Phys. Rev. D*, 79, 102001.

*The Pierre Auger Collaboration* (2009b), Upper limit on the cosmic-ray photon fraction at EeV<sup>35</sup> energies from the Pierre Auger Observatory, *Astropart. Physics*, 31, 399-406.

---

<sup>35</sup> 1 EeV = 10<sup>18</sup> eV.

*The Pierre Auger Collaboration* (2010a), The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory, Nuclear Instruments and Methods, *Physics Research A*, 620, 227-251.

*The Pierre Auger Collaboration* (2010b), Trigger and Aperture of the Surface Detector Array of the Pierre Auger Observatory, Nuclear Instruments and Methods, *Physics Research A*, 613, 29-39.

*The Pierre Auger Collaboration* (2010c), Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above  $10^{18}$  eV using the Pierre Auger Observatory, *Phys. Lett. B*, 685, 239-246.

*The Pierre Auger Collaboration* (2010d), Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter, *Astropart. Phys.*, 34, 314-326.

*The Pierre Auger Collaboration* (2010e), Measurement of the Depth of Maximum of Extensive Air Showers above  $10^{18}$  eV, *Phys. Rev. Lett.*, 104, 091101.

Wataghin, G. (1943), On the production of groups of mesotrons by high energy collisions, *Symposium sobre Raios Cósmicos*, 129-136, Rio de Janeiro: Imprensa Nacional.

Wataghin, G. (1946), On the multiple production of mesons, *Phys. Rev.*, 74, 975-976.

Wataghin, G. (1947), Showers of Penetrating Particles at Altitude of 26,000 feet, *Phys. Rev.*, 71, 453.

Wataghin, G. e Souza Santos, M. Damy de (1938), Sulla produzione degli sciami in profondità, *La Ricerca Scientifica*, 2, 1-4.

Wataghin, G. and Souza Santos, M. Damy de (1939), Cosmic-Ray Showers at Great Depths, *An. Acad. Bras. Cienc.*, 11, 1-9.

Wataghin, G.; Souza Santos, M. Damy de and Pompéia, P. A. (1940a), Simultaneous Penetrating Particles in the Cosmic Radiation, *Phys. Rev.* (Letter to the Editor), 57, 61.

Wataghin, G.; Souza Santos, M. Damy de and Pompéia, P. A. (1940b), Simultaneous Penetrating Particles in the Cosmic Radiation II, *Phys. Rev.*, 57, 339.

Yukawa, H. (1935), On the Interaction of Elementary Particles. I, *Proc. Phys.-Math.*

