



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

RAQUEL DE ALMEIDA SILVA

**OS PRINCIPAIS ACELERADORES DE PARTÍCULAS: UM RELATO
HISTÓRICO DA BUSCA POR ALTAS ENERGIAS**

CUITÉ-PB

2019

RAQUEL DE ALMEIDA SILVA

**OS PRINCIPAIS ACELERADORES DE PARTÍCULAS: UM RELATO
HISTÓRICO DA BUSCA POR ALTAS ENERGIAS**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Cuité, como exigência parcial à obtenção do título de Licenciada em Física.

Orientador: Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas

**CUITÉ – PB
2019**

S586p

Silva, Raquel de Almeida.

Os principais aceleradores de partículas: um relato histórico da busca por altas energias / Raquel de Almeida Silva. – Cuité, 2019.

72 f. : il. color.

Monografia (Licenciatura em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas, Prof. Dr. Nilton Ferreira Frazão".

Referências.

1. Aceleradores de Partículas. 2. História. 3. Evolução Científica e Tecnológica. I. Dantas, Joseclécio Dutra. II. Frazão, Nilton Ferreira. III. Título.

CDU 539.1.076(043)

RAQUEL DE ALMEIDA SILVA

**OS PRINCIPAIS ACELERADORES DE PARTÍCULAS: UM RELATO
HISTÓRICO DA BUSCA POR ALTAS ENERGIAS**

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Cuité, como exigência parcial à obtenção do título de Licenciada em Física.

Aprovada em : ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joseclécio Dutra Dantas - UFCG
(Orientador)

Prof. Dr. Nilton Ferreira Frazão - UFCG
(Coorientador)

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde – UFCG
(Examinador Interno)

**CUITÉ – PB
2019**

Dedico este trabalho a meus pais, Romero e Iracema, que sempre me deram o amor necessário para enfrentar qualquer obstáculo.
Meu porto seguro.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu saúde e força para superar as dificuldades e concluir este trabalho. Mesmo não merecendo, ele me amou e me sustentou até aqui.

A minha mãe Iracema de Almeida, minha rainha, que me deu apoio e incentivo nas horas mais difíceis, de desânimo e desespero. A meu pai Romero dos Santos, meu herói, que, apesar de todas as dificuldades, nunca me desamparou.

Aos meus irmãos, Rafael e Rogério, por todo carinho e incentivo. A minha cunhada Josy e ao meu sobrinho Roger, que é o príncipe da minha vida. Sou grata a minha família em geral que, junto comigo, torceu para essa conquista.

Ao meu noivo maravilhoso Israel Lázaro, pelo companheirismo, paciência, cuidado, carinho e respeito.

Às minhas amigas Jucimeri Ismael, Mariza Fernandes e Rosane Valência que, desde o início do curso, estiveram ao meu lado caminhando, evoluindo, tornando a jornada mais leve e agradável, aguentando os estresses do dia-a-dia.

Às minhas colegas de quarto da Residência, Verônica e Janiele, pelo acolhimento, pela amizade e pelos ensinamentos de vida. A Gerlane, Isabel e Amanda, pelo companheirismo, pela amizade e pelas noites de descontrações proporcionadas após dias cansativos e desgastantes.

Ao meu orientador professor Dr. Joseclécio Dutra Dantas, pela orientação, pelas palavras de incentivo, pela amizade e o profissionalismo.

A todos os docentes do curso de Física, por todos os momentos de aprendizagem. Agradeço cada momento. Em especial, agradeço aos professores; Dr. Nilton Ferreira Frazão, Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde e Dr. Heron Neves de Freitas, pelas observações e contribuições dadas a este trabalho.

A todos os meus colegas do PIBID e da Residência Pedagógica, por todos os momentos de aprendizagem e companheirismo. Em especial, agradeço ao supervisor Jabes da Silva Costa, pela ajuda em cada etapa ao longo dos projetos na escola.

A CAPES pelo apoio financeiro. À Coordenação de Assistência Estudantil pelo auxílio moradia durante esses anos.

RESUMO

Muito se fala em estudos de partículas. Isso remete a também falar sobre aceleradores de partículas, que são instrumentos utilizados nas pesquisas desses estudos. Apesar disso, é possível que muitas pessoas ainda desconheçam a existência desses instrumentos ou, caso conheçam, poucos sabem como se deu o processo de desenvolvimento ao longo dos anos. Ademais, não é abrangente a quantidade de livros que fazem menção ao assunto em língua portuguesa. A partir disso, este trabalho vem tentar sanar um pouco esta lacuna, trazendo uma revisão geral do funcionamento dos principais aceleradores de partículas, sem se deter a detalhes matemáticos. Este trabalho tem propósito de relatar a história de alguns principais aceleradores de partículas, proporcionando ao leitor uma visão geral da evolução destas máquinas em termos de tecnologia e energia alcançada. Para tanto foi feita uma revisão bibliográfica, em livros e artigos que abordam o tema, e em páginas de internet oficiais de alguns laboratórios. Foi possível perceber que a busca por altas energias, gerada da competição entre grandes laboratórios, trouxe impactos com a criação e utilização dessas máquinas no desenvolvimento da ciência, tecnologia e da sociedade como um todo, de forma direta ou indireta.

Palavras-Chave: Aceleradores de partículas, história, evolução científica e tecnológica.

ABSTRACT

Much is said in particle studies. This also refers to particle accelerators, which are instruments used in the research of these studies. Despite this, it is possible that many people still do not know the existence of these instruments or, if they know, few know how the process of development of these instruments has developed over the years. For more, it is not comprehensive the amount of books that mention the subject in Portuguese. From that, this work tries to remedy this gap a bit, bringing a general review of the functioning of the main particle accelerators, without dwelling on the mathematical details. This work is intended to report the history of some major particle accelerators, providing to the reader an overview of the evolution of these machines in terms of technology and energy achieved. For that, a bibliographic revision was made, in books and articles that deal with the subject, and in official websites of some laboratories. It was possible to perceive that the search for high energies, generated by the competition between large laboratories, brought impacts with the creation and use of these machines in the development of science, technology and society as a whole, directly or indirectly.

Key words: Particle accelerators, history, scientific evolution, scientific and technological developments.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 ANTES DOS GRANDES | 13 |
| 2.1 Cockcroft-Walton: multiplicador de voltagem | 13 |
| 2.2 Cíclotron | 16 |
| 2.3 Sincrocíclotron..... | 21 |
| 2.4 Síncrotron | 23 |
| 3 FERMILAB | 25 |
| 3.1 Novo projeto: Anel Principal | 25 |
| 3.2 Tevatron: primeiro síncrotron supercondutor do mundo | 29 |
| 3.3 Abandonado no deserto do Texas | 32 |
| 4 CERN..... | 34 |
| 4.1 Surgimento do CERN..... | 35 |
| 4.2 Primeiras metas..... | 36 |
| 4.2.1 Sincrocíclotron (SC): primogênito | 37 |
| 4.2.2 Síncrotron de prótons (PS): primeiro recorde | 37 |
| 4.3 Próximos passos a serem dados | 39 |
| 4.3.1 Anéis de Armazenamento a Interseção (ISR) | 40 |
| 4.3.2 Super Próton Síncrotron (SPS)..... | 42 |
| 4.4 LEP: o antecessor do LHC..... | 45 |
| 4.5 LHC- o maior de todos..... | 48 |
| 5 O USO DOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS NO BRASIL..... | 53 |
| 5.1 Primeiros aceleradores que tivemos por aqui | 53 |
| 5.2 Primeira fonte de luz síncrotron no hemisfério SUL | 55 |
| 5.3 Uma das fontes de luz síncrotron mais brilhantes do mundo | 58 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 63 |

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das eras, o homem desenvolveu ferramentas para observar o mundo. Desenvolver ferramentas é uma das características que nos faz humanos. Para observar o macrocosmo, por exemplo, o homem desenvolveu o telescópio. Já para observar o microcosmo, o homem desenvolveu o microscópio, o qual possibilitou a descoberta de microrganismos. Sobre esse último, pode-se dizer que a humanidade está, há algum tempo, em uma fase que não se contenta mais em observar apenas esses microrganismos. Ela quer ir mais a fundo, a ponto de poder observar as moléculas, os átomos e as partículas subatômicas em funcionamento. Ou seja, quer entender melhor os mais ínfimos componentes da matéria. Para fazer essas observações de estruturas tão minúsculas, o homem foi construindo microscópios cada vez mais potentes, que fazem um mergulho para dentro do que é imensamente pequeno. Atualmente, esses microscópios super potentes são os aceleradores de partículas.

Podemos definir aceleradores de partículas como sendo ferramentas experimentais desenvolvidas para acelerar feixes de partículas carregadas. Estes feixes podem ser usados em experiências de Física das altas energias para o estudo do núcleo atômico e das interações entre partículas elementares, ou como fonte de radiação síncrotron.

Apesar dos aceleradores de partículas serem instrumentos extremamente importantes para o estudo fundamental da matéria, muitas pessoas desconhecem sua existência, utilidade, funcionamento e seu desenvolvimento ao longo dos anos. É possível que, mesmo nos cursos de graduação em Física, grande parte dos estudantes não tenha a oportunidade de, em algum momento, conhecer um pouco do funcionamento geral dos aceleradores de partículas ou das pesquisas que vêm sendo realizadas nesses ambientes. Além do mais, não são muitos os livros em língua portuguesa que tratam do assunto. Pensando-se nisso, este trabalho faz um apanhado de informações de como se deu o desenvolvimento de alguns aceleradores de partículas, suas contribuições e relevância e, na medida do possível, uma revisão geral do funcionamento dos mais conhecidos, sem entrar em detalhes matemáticos mais aprofundados. Partimos dos primeiros aceleradores construídos por volta de 1929 por Van der Graaf, Cockroft e Walton, até às grandes máquinas que temos hoje, como o LHC, localizado em Genebra na Suíça, e o Sirius que está em fase final de construção aqui no Brasil.

Deste modo, objetiva-se contribuir com a disseminação da história de alguns aceleradores, proporcionando ao leitor, em uma linguagem simples, uma visão geral de como se deu a evolução dessas máquinas em termos de tecnologia e energia alcançada. A metodologia consistiu, exclusivamente, de uma revisão bibliográfica em livros e artigos que tratam do tema, e nas páginas de internet oficiais dos laboratórios que abrigam os principais aceleradores. Os resultados são organizados seguindo uma ordem cronológica em cada capítulo, não no texto como um todo. A estrutura do trabalho é descrita a seguir.

No Capítulo II, apresenta-se o surgimento e a evolução dos primeiros aceleradores de partículas no mundo, salientando as limitações que levaram ao aperfeiçoamento de cada acelerador.

Dando continuidade ao trabalho, no capítulo III, retrata-se o processo de construção do Fermilab, o grande competidor do CERN. É abordado da fase de planejamento do projeto até o segundo maior colisor de partículas do mundo. O Capítulo é finalizado, com o relato de um projeto da Física americana que não obteve sucesso.

Logo depois, no Capítulo IV, mostra-se a história de construção do CERN, a Organização Europeia para Pesquisa Nuclear. Vê-se a importância do laboratório na aplicação de novos conceitos que levaram à criação de aceleradores revolucionários. Uma disputa amigável entre ele e o Fermilab o fez construir o maior acelerador de partículas de todos os tempos, fazendo-o líder da fronteira de altas energias.

Em seguida, no Capítulo V, é apresentado um pouco da história dos aceleradores de partículas aqui, no Brasil. É feito um breve levantamento dos primeiros aceleradores que tivemos por aqui. Na sequência, é exposto o projeto, a utilidade e a importância das duas máquinas que levaram e estão levando o Brasil a um patamar de concorrência mundial.

Por fim, no Capítulo VI, é o momento de tecer algumas conclusões que foram sendo sintetizadas e compreendidas no decorrer deste trabalho.

2 ANTES DOS GRANDES

O progresso na Física de partículas e a conseqüente descompactação gradual das propriedades fundamentais do universo historicamente ocorreram mais rápido com o aperfeiçoamento dos aceleradores de partículas. Naturalmente isso não podia ocorrer de um dia para o outro. Eram necessários anos de estudos e testes por parte de físicos experimentais e teóricos para que as melhorias em aceleradores de partículas pudessem ser realizadas. É relevante notar a importância dos primeiros aceleradores de partículas construídos, devido a terem servido como base na pesquisa de Física de partículas. O progresso desses aceleradores é medido pela aceleração dos feixes de partículas para energias mais altas, a utilização de novas tecnologias e a aplicação de novas ideias. Veremos neste capítulo como se deu esse progresso, ressaltando a limitação e aperfeiçoamento de cada acelerador. Partiremos do primeiro acelerador eletrostático, até os aceleradores do tipo síncrotron usados até hoje.

2.1 Cockcroft-walton: multiplicador de voltagem

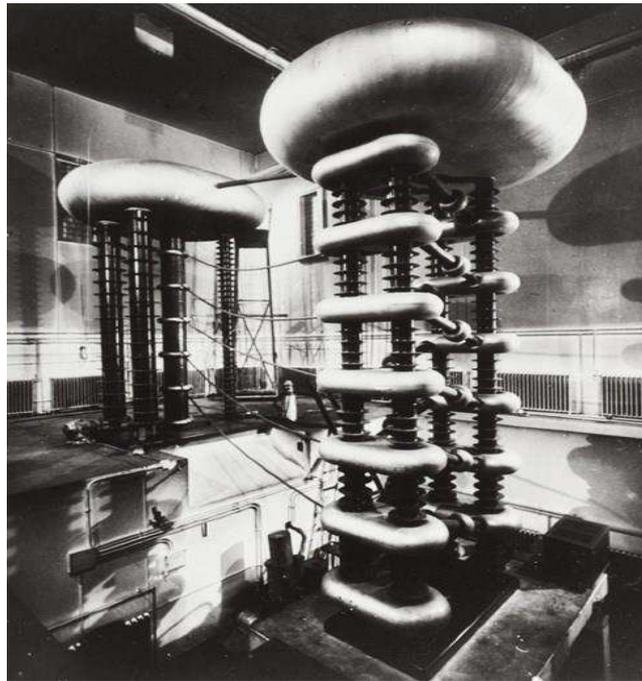
Os aceleradores de partículas nos permitem estudar objetos muito pequenos que nos levam à estrutura mais íntima da matéria encontrada ao nível do núcleo dos átomos. Pensando-se nisso, cientistas foram criando cada vez mais métodos e instrumentos para o estudo desse mundo subatômico.

Ernest Rutherford (1871-1937), físico e químico neozelandês, ganhador do Nobel de Química de 1908 por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e a química de substâncias radioativas, foi um dos primeiros a fazer experimentos relacionados a atirar partículas uma contra as outras ou contra um anteparo (FRAZÃO, 2017).

Após várias contribuições com o modelo atômico, Rutherford começou a pensar na possibilidade de acelerar prótons para usá-los como projéteis em seus experimentos. Ele deixou dois de seus estudantes, John Cockcroft (1897–1967) e Ernest Walton (1903–1995), encarregados da construção de um instrumento que pudesse produzir um grande potencial elétrico, no qual acelerasse esses prótons. Eles deram início a um aparelho deste tipo por volta de 1929 e conseguiram construir um multiplicador de tensão que consistia de um conjunto complicado de capacitores conectados a diodos retificadores que atuam com interruptores.

Com essa máquina eles foram capazes de acelerar prótons a uma energia de até 700 KeV. Formada por um transformador de 200 kV e um retificador de corrente, apto a produzir uma imensa voltagem entre dois eletrodos, este aparelho ficou conhecido como acelerador Cockcroft-Walton (Figura 1) e foi o primeiro acelerador de partículas do tipo eletrostático. Estes são aceleradores que simplesmente usam um campo elétrico para aumentar a velocidade de uma partícula carregada (ABDALLA, 2004).

Figura 1. O acelerador de Cockcroft-Walton em Cambridge



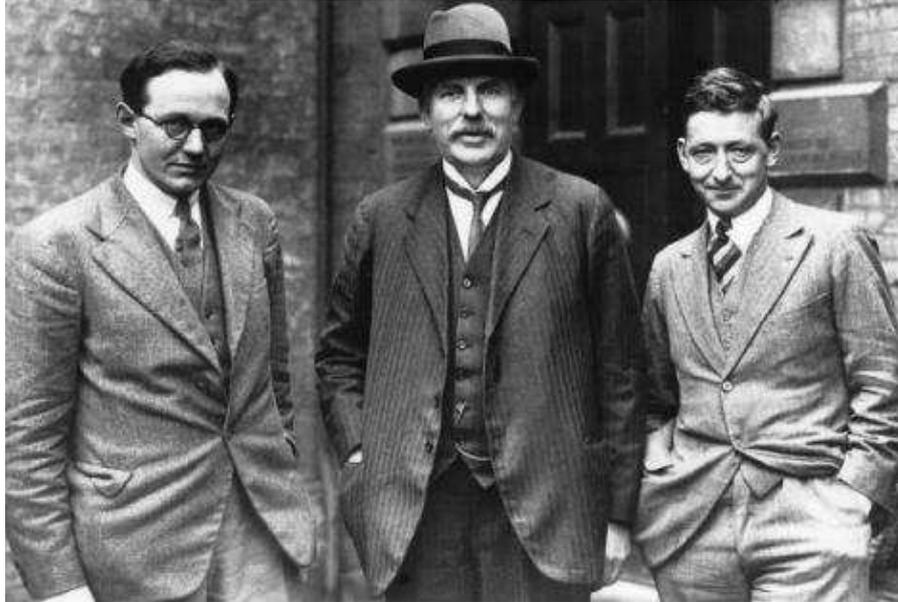
Fonte: <https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/stories/science-and-technology/cockcroft-walton-generator/>

Em 1932, eles usaram um potencial de 500 kV para acelerar prótons através de um tubo de oito pés¹ em direção a um alvo de lítio e descobriram que os prótons desintegraram o núcleo de lítio em duas partículas alfa² (SANTOS, 2013). Tal trabalho fez com eles ganhassem o Nobel de Física de 1951 por seu trabalho pioneiro na transmutação de núcleos atômicos por partículas atômicas artificialmente aceleradas. A Figura 2 mostra a fotografia, da esquerda para direita, de Cockcroft, Ruherford e Walton, logo após o experimento com o novo acelerador em 1932.

¹ Unidade de medida de comprimento. Um pé equivale a 0,3048 metros

² Partículas carregadas formadas por dois prótons e dois nêutrons, sendo, portanto, núcleos de hélio.

Figura 2. Fotografia de Cockroft, Rutherford e Walton



Fonte: http://madeupinbritain.uk/Split_the_Atom

Os aceleradores eletrostáticos foram bem-sucedidos e ainda são usados hoje em diversas aplicações, mas eles têm limitações, sendo as voltagens muito altas um pesadelo técnico. Já em 1924, um físico sueco, Gustav Ising, propôs o conceito teórico de um acelerador linear, um dispositivo que poderia acelerar partículas para o equivalente a uma tensão muito alta pelo acúmulo de uma série de etapas de tensão moderada. Um acelerador linear é um tipo de acelerador no qual as partículas carregadas ganham energia deslocando-se em linha reta, por um campo elétrico estacionário ou através de campos elétricos com radiofrequência (MARTINS; SILVA, 2014). Nestes aceleradores as partículas passam apenas uma vez em cada uma das estruturas de aceleração, diferentemente dos aceleradores circulares que veremos mais a frente.

Em 1929, na universidade de Princeton, o físico americano Robert Van de Graaff também estava trabalhando em um equipamento que gerasse grandes potenciais elétricos. Estava iniciada então a temporada de criação dos aceleradores de partículas.

Os trabalhos de Rutherford, Cockroft, Walton e de muitos outros, abriram caminho para a Física das partículas e para a construção de aceleradores ainda mais complexos que serão apresentados nas próximas seções deste trabalho.

2.2 Cíclotron

A era dos aceleradores havia começado. Porém, em meio a esses avanços no estudo da Física de partículas, surgiu um obstáculo na construção desses aceleradores de partículas: era muito perigoso, quando não improvável, operar com as altíssimas voltagens necessárias para os experimentos.

Pensando nisso, o Físico americano Ernest Orlando Lawrence (1901-1958) idealizou uma máquina na qual não seria necessário aplicar uma considerável quantidade de voltagem de uma só vez, mas usar pequenas voltagens, regularmente, várias vezes. Porém, ao invés de acelerar partículas em uma seção reta, elas seriam aceleradas em uma seção circular. Em parceria com o estudante estadunidense Milton Stanley Livingston (1905-1986), construiu o primeiro acelerador circular da história nos anos de 1930 a 1932 na Universidade da Califórnia, denominado Cíclotron (LUIZ; MONTEIRO, 2011).

O funcionamento de um acelerador circular ou cíclico consiste de uma estrutura que tem por finalidade forçar a partícula a passar diversas vezes pelo sistema de aceleração (MENEZES, 2008). Fundamenta-se na ideia de cruzamento entre campo elétrico e magnético. Estes, na região de aceleração, devem ser perpendiculares um ao outro. Quando uma partícula carregada positivamente é acelerada várias vezes através de um campo elétrico e de um campo magnético perpendicular, as partículas são aceleradas até atingirem a velocidade pretendida.

Segundo Rosenfeld, uma analogia para se entender o aparelho criado por Lawrence pode ser a seguinte:

[...] imagine uma pessoa girando uma bola presa em um elástico. Você, a uma certa distância, dá um tapa na bola cada vez que ela passa a sua frente. Depois de alguns tapas a velocidade da bola será bem maior e o elástico estará mais esticado. Para um observador olhando de cima, a bola traçará uma espiral. Esse é um modo de visualizar o processo de aceleração das partículas com carga elétrica. Os seus tapas representam a ação do campo elétrico e o elástico representa a ação do campo magnético nessas partículas, no caso representadas por uma bola (ROSENFELD, 2013).

Assim, nos aceleradores do modelo cíclotron, feixes de partículas sofrem a ação de um campo elétrico oscilante e de um campo magnético, que faz com que o feixe realize ciclos

recebendo um impulso na voltagem em cada órbita, aumentando a energia da partícula a cada volta.

Não só no ciclotron, mas na maioria dos aceleradores de partículas, um campo elétrico é usado para acelerar as partículas carregadas, enquanto um campo magnético é aplicado para guiar a partícula através da estrutura acelerada. Pode-se fazer uma breve descrição de como ocorre o movimento de uma partícula carregada sob a influência desses dois campos. Uma partícula com carga q em um campo elétrico E experimentará uma força:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1)$$

A partícula será acelerada em uma direção que depende do sinal da carga. Por exemplo, um próton carregado positivamente acelerará em direção ao terminal negativo do campo elétrico, isto é, o cátodo. A velocidade v adquirida pela partícula pode ser expressa como:

$$v = \sqrt{\frac{2q|E|}{m}}, \quad (2)$$

onde m é a massa da partícula e $|E|$ é a magnitude do campo elétrico.

A partícula também ganhará energia cinética T , dada por:

$$T = \frac{1}{2}mv^2. \quad (3)$$

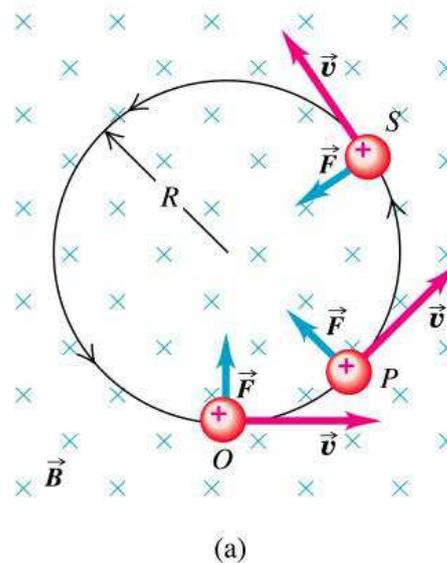
Em contraste, uma partícula carregada não adquirirá energia cinética de um campo magnético, mas haverá uma mudança na direção de sua velocidade. O movimento da partícula, com velocidade \vec{v} , em um campo magnético é governado pela força \vec{F} , dada por:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (4)$$

Onde \vec{B} é o campo magnético.

Se o campo magnético for aplicado perpendicularmente ao movimento da partícula, a força magnética será ortogonal ao campo magnético e à velocidade. A deflexão da partícula é representada na Figura 3.

Figura 3. Representação do movimento de uma partícula carregada positiva no campo magnético uniforme.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Fonte: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/movimento-circular-no-campo-magnetico.htm>

A partícula é defletida perpendicularmente à direção da velocidade instantânea \vec{v} e do campo magnético \vec{B} .

Essa força, \vec{F} , fornece a aceleração centrípeta necessária para manter a partícula se movendo em um círculo e no plano perpendicular à direção do campo magnético, de modo que:

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad (5)$$

Onde R é o raio de curvatura. Portanto:

$$qBv = \frac{mv^2}{R}, \quad (6)$$

Ou:

$$\frac{qB}{m} = \frac{v}{R} = \omega, \quad (7)$$

Onde ω é a velocidade angular:

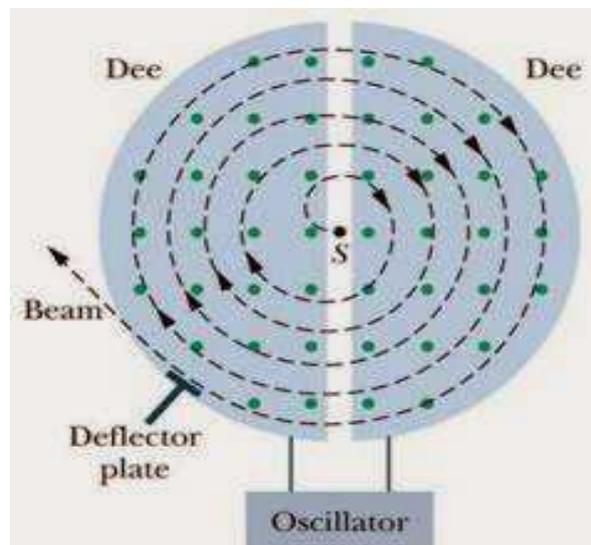
A frequência do ciclotron ou frequência do oscilador f_{osc} na qual a partícula completa um caminho circular é:

$$f_{osc} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi R} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (8)$$

No caso do próton no ciclotron, q e m são valores fixos. Na prática, o oscilador é projetado para trabalhar com uma certa frequência fixa f_{osc} .

O cíclotron possui dois eletrodos vazios e isolados semicirculares em formas de dees (Figura 4), situadas em uma câmara de vácuo, no interior do campo magnético existente entre os polos de um eletroímã. Esses eletrodos são conectados a uma fonte de voltagem alternada de modo que o campo elétrico no espaço entre os dees direciona ora em um sentido, ora no sentido contrário (HALLIDAY, 2009). Durante o tempo em que as partículas estão dentro dos dees, o feixe é inclinado em uma trajetória circular pelo campo magnético e a polaridade da tensão é alterada, de modo que as partículas serão continuamente aceleradas. A frequência com a qual a tensão de aceleração deve ser alterada é a frequência do oscilador definida na Equação 8. No espaço entre esses eletrodos, as partículas sentem a voltagem que as acelera fazendo com que elas ganhem energia a cada ciclo, ou seja, em vez de trajetórias semicirculares, elas percorrem voltas a todo o momento em fase com as oscilações do potencial, até que um curso em espiral carregue a partícula até a extremidade da estrutura. Lá, um material defletor faz com que ela atravesse uma abertura e saia do sistema com energia máxima (PEACH; WILSON; JONES, 2011).

Figura 4. Diagrama esquemático de um cíclotron



Fonte: <http://fisicafresutpr.blogspot.com/2014/02/trajetorias-helicoidais-se-velocidade.html>

A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático de um cíclotron, mostrando a fonte de partículas S e os dees. Um campo magnético \vec{B} uniforme é aplicado para fora do plano da Figura. As partículas descrevem uma trajetória espiral no cíclotron, ganhando energia cada vez que atravessam o espaço entre os dees.

O desempenho do ciclotron se fundamenta no fato de que a frequência f com a qual a partícula circula perante a ação do campo magnético tem de ser igual à frequência f_{osc} do oscilador elétrico, ou seja,

$$f = f_{osc}. \quad (9)$$

Esta é a condição de ressonância, e segundo ela, para que a energia da partícula aumente é necessário que a frequência f_{osc} do oscilador elétrico seja coincidente à frequência com a qual a partícula circula (HALLIDAY, 2009).

Capaz de acelerar átomos carregados a altas velocidades, o ciclotron se tornou um dos principais equipamentos para investigação do núcleo atômico. O primeiro protótipo da máquina, puseram em atividade em 1931, com 11 cm de diâmetro e 2 mil Volts. Era capaz de acelerar prótons a uma energia de 80 mil elétron-volts. Um ano depois foi quebrada a barreira de 1 milhão de elétron-volts, com a construção de um ciclotron com 28 cm de diâmetro e energia de 1,27 MeV (STEERE, 2005). Esse ciclotron foi usado na quebra de átomos algumas semanas após a experiência de Cockcroft e Walton, os alunos de Rutherford.

Nos anos subsequentes, Lawrence fundou o conhecido *Radiation Laboratory* (designado como RadLab), na Universidade de Berkeley, o qual tornou-se o primeiro laboratório de Física de partículas, onde engenheiros e cientistas trabalhavam reunidos nos experimentos. Neste lugar, Lawrence construiu aceleradores do tipo ciclotron que chegaram a altos valores de energia para a época. Em 1933 ele anunciou o alcance de prótons com energias de 4,8 milhões de eV. No ano seguinte Lawrence patenteou a invenção e ganhou o prêmio Nobel de Física de 1939 “em reconhecimento à invenção do ciclotron, a seu desenvolvimento e aos resultados obtidos, especialmente com a produção de elementos artificialmente radioativos” (ROSENFELD, 2013). Na Figura 5 podemos observar a fotografia de Livingston (esquerda) e Lawrence (direita) com um ciclotron de 37 polegadas.

Figura 5. Livingston e Lawrence



Fonte: <https://www.aps.org/programs/outreach/history/historicsites/lawrencelivingston.cfm>

Hoje, os cíclotrons são muito usados no tratamento para o câncer. Cerca de quarenta centros ao redor do mundo realizam esse tratamento de ponta, operando cíclotrons com energias de 70 a 250 MeV. Além disso, eles também são utilizados para produzir radiofármacos através do bombardeamento de partículas em determinados alvos (CARUSO; CARVALHO; SANTORO, 2000).

Os estudos e invenções não só na área de Física de partículas, mas como em toda Física básica estavam crescendo cada vez mais. Porém uma interrupção ocorreu quando a maioria dos cientistas teve que largar suas pesquisas ao serem convocados a participar da segunda guerra mundial, com a qual eles contribuiriam na construção de novas armas e em projetos de defensivas.

2.3 Sincrocíclotron

Com o fim da segunda guerra mundial, Lawrence e outros físicos que participavam desse confronto puderam regressar para onde estavam. A colaboração e apoio na área da pesquisa básica aumentaram nesta época, tendo em vista o reconhecimento para o desenvolvimento do país (SCHWARTZMAN, 2001).

Com o apoio financeiro que Lawrence precisava, ele podia construir aceleradores cíclotrons cada vez mais potentes. Porém, havia alguns limites na operação desses. Para

velocidades maiores que 10% da velocidade da luz deve-se levar em consideração o efeito relativístico. Conforme a expressão $E = mc^2$ deduzida por Einstein no segundo artigo sobre a relatividade de 1905, a massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo energético (ARRUDA; VILLANI, 1996). Assim, quanto maior a velocidade da partícula, maior será a massa e menor a frequência de revolução. No caso a frequência de revolução passa a depender da velocidade da partícula, o que não ocorria antes. Portanto, as partículas tardam quanto à frequência do oscilador, que normalmente tem um valor fixado causando um retardo no aumento da energia, levando para uma quantidade constante. Como consequência tem-se a diminuição do sincronismo entre o alternador e o movimento da partícula que irá se agravar a cada volta.

Para solucionar o problema da barreira de energia do ciclotron, arquitetou-se um dispositivo que proporciona alterar a frequência aplicada aos dês, conforme as dificuldades de focalização magnética e a mudança relativística da massa das partículas. A esse dispositivo deu-se o nome de Sincrociclotron, também conhecido como ciclotron modulado em frequência porque a frequência f_{osc} é variada (STEERE, 2005).

A concepção do Sincrociclotron que corrigia o erro da limitação de energia foi viabilizada pela presença da frequência do oscilador variar com o tempo enquanto as partículas estão sendo aceleradas. Quando isso ocorre, a frequência de revolução é igual à frequência da oscilação ou da voltagem que é usada nos dês (HALLIDAY, 2009). Permanecendo com sincronismo, as partículas voltam a obter energia e se movem em órbitas de raios progressistas, até a maior órbita concedida pelo tamanho do magneto usado no aparelho.

Tal princípio transformou o ciclotron convencional em um instrumento muito mais poderoso que acelera partículas a energias superiores (RABELO, 2016). Isso acontece porque não existe limite no número de revoluções necessárias para a obtenção de uma dada energia, ao contrário do ciclotron.

O Sincrociclotron de Berkeley, que começou a operar em novembro de 1946, produziu feixes de partículas alfa com energia de 390 MeV (ROSENFELD., 2013).

2.4 Síncrotron

Aparentemente, o problema relacionado à construção de aceleradores que acelerassem partículas a altas energias tinha acabado, visto que não havia limites nas energias obtidas em um Síncrocíclotron. Precisava-se apenas aumentar o diâmetro do acelerador, pois quanto maior a energia maior será o raio da órbita das partículas. Entretanto, os síncrocíclotrons não obtiveram tanto sucesso para acelerar partículas a altas energias em razão das dificuldades tecnológicas e financeiras de produzir os enormes ímãs. O que acontece é que, assim como no cíclotron, toda a região do síncrocíclotron deve estar dentro de um campo magnético, encarregado por deixar as partículas em órbitas espirais, o que requer grandes magnetos, resultando em um custo altíssimo.

Assim, mais uma vez surgia uma possível barreira na busca de altas energias nessas máquinas, em virtude de que o aumento da energia estava ligado ao aumento do raio da órbita. Já o aumento desse raio implicava na necessidade de ampliar o tamanho do magneto. Gradualmente, os tamanhos e preços estavam se tornando excessivos (MARTIN; SILVA, 2014).

Em 1945 apareceu uma ideia diferente e ousada: as partículas deixariam de efetuar órbitas espirais, em que o raio cresce com a energia, e passariam a circular com um raio orbital fixo. Para conseguir isso, o campo magnético deve variar conforme as partículas aceleram. Esse dispositivo ficou conhecido como Síncrotron (GRAÇA, 1992).

A ação do Síncrotron se dá mediante um campo magnético que motiva a deflexão da partícula para uma órbita circular, da qual a intensidade do campo é modulada de maneira cíclica, conservando assim órbitas cujo raio é estável, independentemente do ganho de energia e massa (PEACH; WILSON; JONES, 2011). Isso fica claro quando atentamos para a Equação 4. Se $|\vec{v}|$ aumenta, a \vec{F} de deflexão aumenta e a partícula percorre uma espiral. Para manter a órbita circular, $|\vec{B}|$ deve ser reduzido de maneira cíclica. Sendo assim, nessa nova definição, o raio da órbita das partículas seria mantido fixo, alterando-se o campo magnético. Logo, apesar do acréscimo de energia, a partícula manterá uma trajetória circular constante.

Desta forma os Síncrotrons são os aceleradores padrão atuais para pesquisa em Física de partículas, visto que eles resolvem tanto o problema da perda de sincronia da partícula quanto o da exigência de ímã de tamanho e custo gigantescos. Tanto a magnitude do campo magnético quanto a frequência do oscilador são variadas com o tempo para manter uma

partícula sincronizada em um raio orbital constante, descrevendo assim uma trajetória circular ao invés de espiral (HALLIDAY, 2009).

Com o amplo progresso na área de energia atômica, grandes recursos tornaram-se disponíveis para uso da pesquisa (RABELO, 2016). Quando a AEC (Comissão de Energia Atômica) ficou no controle do programa de energia nuclear nos Estados Unidos, decidiram construir então duas grandes instalações naquele país: o Cosmotron, finalizado em 1952 em Brookhaven, na cidade de Nova York, operando a uma energia de 3 GeV, tornando-se o primeiro síncrotron de prótons do mundo, e o primeiro a ultrapassar o limite de MeV. O outro foi o Bevatron, na costa oeste em Berkeley, concluído em 1954, operando com o dobro da energia do Cosmotron (ROSENFELD, 2013).

O acelerador que substituiu o Cosmotron em Brookhaven foi o AGS (Alternating Gradient Synchrotron), que traduzido significa Síncrotron de Gradiente Alternado. Desenvolvido em 1960, acelerava prótons a energias de 33 GeV. Neste era empregado o conceito de focalização forte ou gradiente de focalização, onde os gradientes de campo dos 240 ímãs do acelerador são sucessivamente alternados para dentro e para fora, permitindo que as partículas sejam impulsionadas e focadas no plano horizontal e vertical ao mesmo tempo (DEPARTMENT OF ENERGY'S, 1991). O AGS tornou-se o maior acelerador de partículas na escala de energia naquele momento, ultrapassando o Síncrotron de Prótons (PS) do CERN que há poucos meses antes havia quebrado o recorde mundial de energia de aceleração de prótons, o qual será tratado com mais detalhes no Capítulo 4.

3 FERMILAB

Disse o professor Stefan Soldner-Rembold, porta-voz do experimento DZero do Tevatron no Fermilab, à BBC News: “Há sempre razões a favor e contra uma prorrogação. Eu ainda acho que, especialmente em termos do Higgs, teria sido bom ter mais três anos. Podemos ver agora que estamos tão perto” (RINCON, 2011). Essa declaração foi dada em janeiro de 2011, logo após ter sido negado o pedido de prorrogação à vida útil do Tevatron. Em razão disso, um dos mais poderosos “destruidores de átomos” do mundo, na vanguarda da descoberta científica por um quarto de século, foi desativado no Fermilab.

Chamado inicialmente de Laboratório Nacional de Aceleradores, o Fermilab ou simplesmente NAL, começou suas operações em 15 de junho de 1967, o qual foi construído em 6.800 acres³ de terra perto da cidade de Batavia, Illinois, em um local que incluía os edifícios de um pequeno conjunto habitacional chamado Weston (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2019a). Veremos neste capítulo o processo de construção do Fermilab, desde o seu planejamento até o seu maior projeto. Começaremos falando sobre sua primeira grande máquina, um acelerador de partículas com tamanho aproximado de seis quilômetros de circunferência chamado Anel Principal. Veremos que este acelerador acarretou a construção do segundo mais poderoso colisor de partículas do mundo, o Tevatron.

3.1 Novo projeto: Anel Principal

Por muitos anos, o AGS foi o destaque para a pesquisa em Física de altas energias, pesquisa que levou a uma compreensão mais profunda da natureza fundamental da matéria (DEPARTMENT OF ENERGY’S, 1991). Mas a disputa por altas energias era acirrada. Em virtude disso, os Estados Unidos, logo após o início do funcionamento do AGS, começou a pensar em um novo projeto que acelerasse partículas com maior energia que o acelerador em Brookhaven.

A AEC instituiu um grupo de físicos para selecionar, entre várias propostas, a que seria aceita para construção do sucessor do AGS. A maior parte das propostas era de

³ Unidade de área utilizada no sistema imperial e no sistema tradicional dos Estados Unidos. Um acre foi definido como 4046,8564224 metros quadrados.

Berkeley, Brookhaven e de algumas universidades do meio-oeste americano. Evidentemente Brookhaven e Berkeley tinham proveito nessa escolha, visto que as duas já tinham experiência no ramo. E assim aconteceu: o grupo de físicos encarregado para escolha de uma equipe que coordenasse esse novo projeto indicou, em 1963, o pessoal de Berkeley (R. ROSENFELD, 2013).

Os físicos do meio-oeste não ficaram muito contentes com essa decisão. Eles alegavam que os investimentos do governo em Física de altas energias eram polarizados em Brookhaven e Berkeley. Assim as universidades e os políticos da região meio-oeste começaram a reclamar, visto que a implantação de instituições de pesquisas acarreta um desenvolvimento econômico no lugar (OLIVEIRA JR, 2014).

Robert Rathbun Wilson (1914-2000), físico estadunidense, foi um dos mais importantes contribuintes na pesquisa e no desenvolvimento de aceleradores desde Ernest Lawrence (BOYCE D. MCDANIEL, 2001). O mesmo estava presente na conferência internacional da Itália, em setembro de 1965, onde o grupo de Berkeley apresentou o projeto para um acelerador de 200 GeV com um valor previsto de 348 milhões de dólares. Wilson, que foi um dos grandes propulsores na construção do Laboratório de Estudos Nucleares em Cornell, nos Estados Unidos, onde foi diretor do mesmo e junto com seus colegas construiu, no período de 20 anos, quatro Síncrotrons de elétrons, ficou indignado com o projeto apresentado. Wilson achou o projeto pouco elegante, sem graça e muito caro (R. ROSENFELD, 2013). Isso porque ele tinha uma insistência em *design* mais arrojado, mais compacto e econômico, visto claramente nos aceleradores que construiu em Cornell (BOYCE D. MCDANIEL, 2001). No decorrer de sua carreira como especialista na área de aceleradores, ele havia construído aceleradores com mais bom gosto e com um orçamento muito menor do que estava sendo proposto pelo grupo de Berkeley. Isso o deixou extremamente indignado, fazendo com que ele desaprovasse o projeto.

A Guerra do Vietnã, que, a princípio, teve um amplo apoio da opinião pública norte-americana, pois era vista e divulgada como sendo um esforço para salvar os habitantes do Vietnã, e também o mundo, da crescente ameaça comunista, já começara a causar prejuízos para os cofres públicos dos Estados Unidos. Isso porque sua intervenção na guerra vinha custando-lhe montanhas de dinheiro, com armas e instrutores militares, sem contar no desperdício de vidas que vinha ocorrendo e que ainda haveria ao longo do conflito (PEDROSO, 2015). Assim o governo americano, que já estava ficando desgastado, ouviu rumores sobre os projetos de Wilson e gostou dessa forma de trabalho.

Quando o estudo do projeto foi concluído, a AEC iniciou uma competição nacional para selecionar um local para o novo acelerador. Depois de grandes influências políticas, ela escolheu Weston, Illinois, no meio- Oeste, em 7 de dezembro de 1966. Com os rumores do seu ótimo trabalho e forma econômica de trabalho, Robert Wilson, diretor enérgico do Laboratório de Estudos Nucleares da Universidade de Cornell, foi convidado a ser diretor desse novo projeto e aceitou a direção do Laboratório Nacional de Aceleradores em 28 de fevereiro de 1967 (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2019a).

Em janeiro de 1968, o pessoal do Laboratório Nacional de Aceleradores finalizou um novo relatório de projeto parcialmente baseado no estudo do projeto de Berkeley, que estabeleceu o plano para o laboratório. Eles se mudaram para o local de Weston em setembro de 1968, e o laboratório deu início ao primeiro acelerador em 1º de dezembro deste mesmo ano. Na Figura 6 temos a fotografia de Wilson e sua equipe na cerimônia de inauguração do Fermilab.

Figura 6. Robert Rathbun Wilson na cerimônia de inauguração do Fermilab



Fonte: <https://cerncourier.com/the-founding-of-fermilab/>

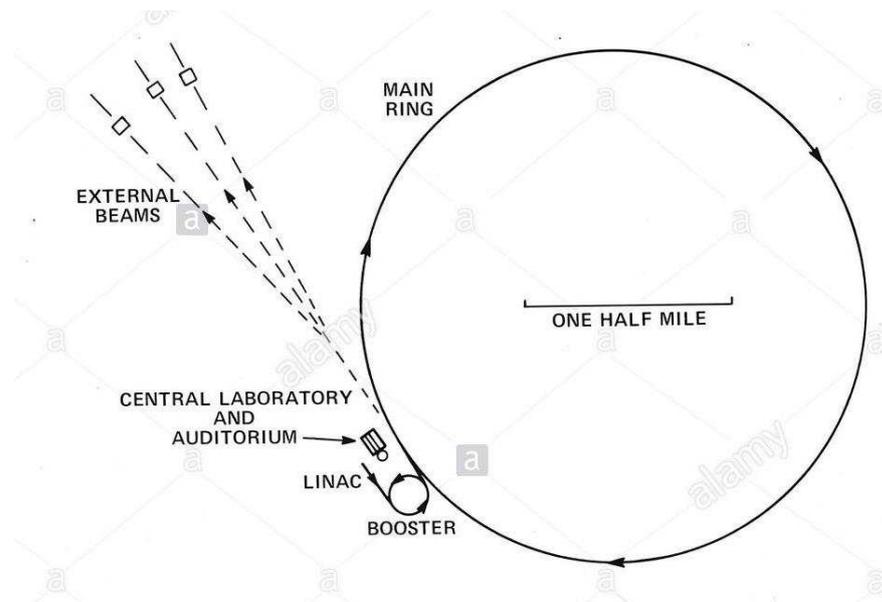
Em 1 de março de 1972, funcionários do Laboratório Nacional de Aceleradores, o qual recebeu o nome, em 1974, *Fermi National Accelerator Laboratory*, ou somente Fermilab, em homenagem ao físico Enrico Fermi, abriram as portas para uma nova era de compreensão do mundo em que vivemos, quando o acelerador conhecido como Main Ring (Anel Principal), com um raio de 1 km, acelerou um feixe de prótons de hidrogênio para a energia projetada de

200 GeV. Na noite do mesmo dia, essa energia aumentou para 300 GeV. Devido à instalação em uma estrutura mecânica e magnética não convencional e extremamente compacta, mas ainda funcional, assim também como o redesenho das estruturas magnéticas levando a maiores campos magnéticos, duplicando assim a energia dos prótons circulando no mesmo tamanho de túnel, foi possível usar um orçamento inferior ao exigido inicialmente no projeto inicial de Berkeley (BOYCE D. MCDANIEL, 2001).

O Anel Principal acelerou prótons a energias de 500 GeV a partir de 1976, mais que o dobro do programado inicialmente. Isso mesmo havendo um grande problema com os defeitos apresentados por 350 dos 1014 ímãs um ano antes das operações começarem. Em 1977, seus feixes de partículas foram usados em experimentos que revelaram o quark de botton. Seis anos depois, ele passou a atuar como injetor e fonte de prótons para um futuro acelerador do Fermilab. Posteriormente ele foi substituído por um novo projeto, o Injetor Principal, que atuaria com mais eficiência e atenderia melhor as perspectivas da época. (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2019b).

Assim como boa parte dos aceleradores, antes das partículas chegarem ao acelerador principal, elas passam por outros mecanismos que as preparam para chegar com uma energia consideráveis nesse acelerador principal. Podemos entender com mais detalhes como esse mecanismo funcionava observando o esquema da Figura 7.

Figura 7. Representação do Anel Principal



Fonte: <https://c8.alamy.com/comp/T6YB3F/diagram-of-fermilabs-linear-particle-accelerator-with-a-four-mile-circumference-main-ring-and-smaller-booster-ring-1973-image-courtesy-us-department-of-energy>

Os prótons gerados pelo gás hidrogênio em um pré-acelerador movem-se em sucessão aumentando a energia, através do acelerador linear. De acordo com a Figura 7, após saírem do acelerador linear, LINAC, os prótons seguem caminho para o Booster. Este, por sua vez, é um acelerador do tipo síncrotron, que também irá aumentar a energia do feixe antes desses serem inseridos no Anel Principal. Ao chegarem ao Anel Principal, os prótons viajam pelo anel de 4 milhas 70.000 vezes em 1,6 segundos, aumentando a energia em cada revolução até atingirem uma energia de 200 GeV. Mais fontes de alimentação poderiam ser adicionadas posteriormente para aumentar a energia de pico do acelerador até 500 GeV. (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2019b). Depois de atingir a energia máxima, os prótons são extraídos e transportados para áreas experimentais. Cientistas de todo o mundo poderiam usar o feixe para conduzir uma variedade de experimentos que produziriam novos conhecimentos sobre as características e interações das partículas do átomo.

3.2 Tevatron: primeiro síncrotron supercondutor do mundo

O Fermilab foi construído em um período perturbado da história americana. Mesmo com os bons resultados da participação dos físicos na segunda guerra mundial, alguns políticos perguntavam a respeito do retorno de investimentos na Física de altas energias. Robert Wilson, junto com sua equipe, já estava idealizando um novo projeto que viesse substituir o acelerador em funcionamento. A competitividade por altas energias, não podia parar. Ele pediu ao Departamento de Energia um nível mais alto de financiamento para que o desenvolvimento desse novo acelerador pudesse prosseguir a um ritmo avançado. Porém, a maneira de trabalho de Wilson e suas ligações da época da guerra já não eram o bastante para obter recursos. Abatido com os novos obstáculos, ele decidiu renunciar, como uma forma de protesto (BOYCE D. MCDANIEL, 2001).

Em 1979, Leon Lederman foi designado para ser o segundo diretor do laboratório. Ele, que já vinha exercendo grande liderança na comunidade científica, ganhou o Prêmio Nobel de Física, em 1988, juntamente com Melvin Schwartz e Jack Steinberger pelo método do feixe de neutrinos e pela demonstração da estrutura do duplete dos léptons através da descoberta do neutrino do múon. No entanto, seu maior feito, foi finalizar a obra iniciada por Wilson, a

construção de um dos maiores e mais inovadores aceleradores de partículas até aquele momento, o Tevatron (BERNARDES, 2018).

O Tevatron foi o primeiro colisor de prótons com antiprótons ⁴ que rompeu a barreira de energia de 1000 GeV ou 1 TeV. Entrou em atividade habitual em 1987 e tornou-se o acelerador de maior energia no mundo por quase 25 anos, compreendendo uma energia perto de 2 TeV. Apenas o LHC superou seu recorde. Ele usava ímãs mais poderosos no mesmo túnel de 4 milhas de circunferência construído para o Anel Principal no Fermilab. Foi o primeiro acelerador a usar esse tipo de ímã supercondutor (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2011). A característica mais conhecida de um material supercondutor é a repentina perda por completo da resistência elétrica, quando ele é sujeito a temperaturas muito baixas. Essa perda de resistência provoca uma enorme economia de energia elétrica (HUGH D. YOUNG, 2009). Nos aceleradores de partículas, o gigantesco campo magnético gerado pelos supercondutores possibilita a aceleração dos feixes de prótons a velocidades muitíssimo altas, proporcionando a colisão dos mesmos com máxima energia (CRISTIANO et al., 2017).

O refinado método utilizado para levar os materiais supercondutores a baixas temperaturas era o uso de grandes porções de hélio líquido. A alta tecnologia criada pelo Fermilab para o Tevatron foi posteriormente empregada em aparelhos hospitalares de ressonância magnética, que carecem de poderosos campos magnéticos. (R. ROSENFELD, 2013).

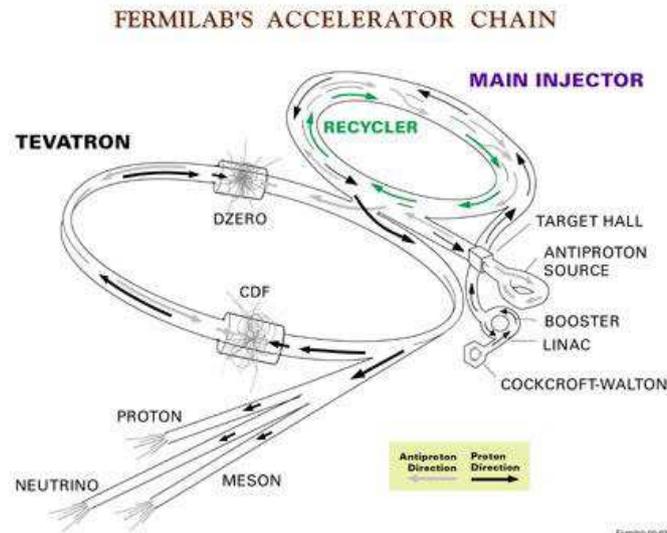
O Tevatron normalmente produzia cerca de 10 milhões de colisões próton-antipróton por segundo. Cada colisão gerava centenas de partículas. Uma quantidade de 200 colisões por segundo eram registradas em cada detector para estudo posterior (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2011).

Para criar alguns dos feixes de partículas mais poderosos do mundo, o Fermilab usou uma série de aceleradores. Iniciando com o gás hidrogênio, os cientistas produziam raios de prótons. Eles redirecionavam uma parcela dos feixes de prótons para gerar antiprótons, que, por sua vez, eram gerados através do resultado da colisão de prótons com uma placa de níquel. Quando a aglomeração de antiprótons tornava-se suficiente, eles eram colocados no Tevatron, onde colidiam nos detectores CDF e DZero com prótons viajando em direção oposta.

⁴ Antipartícula do próton

A seguir podemos observar, na Figura 8, a representação esquemática de como era o Fermilab após a construção do Tevatron.

Figura 8. Representação de sistema de funcionamento do Tevatron



Fonte: <http://www.fnal.gov/pub/tevatron/>

O Linac, acelerador linear, acelerava os íons de hidrogênio carregados negativamente a 400 MeV. Logo depois que eles entravam no próximo acelerador, os íons passavam através de uma folha de carbono, que removia elétrons dos íons de hidrogênio, criando prótons positivamente carregados. Como já foi dito, parte destes prótons era direcionada para produção de antiprótons. Os prótons vindos do Linac viajavam pelo Booster cerca de 20.000 vezes. Eles experimentavam uma força aceleradora de um campo elétrico em uma cavidade de radiofrequência durante cada revolução. Isso aumentava a energia dos prótons até 8 GeV até o final do ciclo de aceleração. De acordo com o esquema da Figura 8, em seguida, o Booster enviava prótons para o Injetor Principal que, por sua vez, acelerava prótons e antiprótons para injeção no Tevatron. Lá, eles eram acelerados em sentidos opostos e colidiam nos detectores usados (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE, 2014a).

CDF e Dzero são os dois detectores que os físicos usaram no túnel de Tevatron para observar colisões entre prótons e antiprótons. Cada detector possuía vários subsistemas de detecção que reconheciam os diversos tipos de partículas que surgiam de colisões próximas à velocidade da luz. Analisando os “destroços”, os cientistas estudaram a estrutura da matéria, espaço e tempo. Em 1995, físicos de ambos os experimentos observaram os primeiros quarks top produzidos pelos aceleradores (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF

SCIENCE, 2014b). O programa de pesquisa Tevatron também produziu inúmeras conquistas em tecnologia de detecção, aceleração e computação (FERMILAB, 2012).

O Tevatron e o colisor do CERN estiveram envolvidos em uma corrida para descobrir, entre outras coisas, o Higgs. Mas o aperto estava nos orçamentos da ciência, e o financiamento adicional não foi identificado para dar continuidade ao Tevatron (OVERBYE, 2011). Após uma extensa e saudável trajetória, a disputa entre o Fermilab e o CERN encerrou-se em 30 de setembro de 2011, quando o Tevatron foi oficialmente desligado. Os Estados Unidos deixaram a competição pelo extremo das altas energias (R. ROSENFELD, 2013). Mas o Tevatron foi substituído pelo Grande Colisor de Hádrons, sobre o qual iremos falar com mais detalhes no próximo capítulo, que é capaz de atingir energias muito mais altas do que a máquina dos EUA.

3.3 Abandonado no deserto do Texas

Em 1982, Leon Lederman, então diretor do Fermilab, falara sobre a competição com a Europa, principalmente com o CERN. Ele expôs sua vontade de começar o planejamento do próximo grande acelerador de partículas americano, que mais tarde ficou conhecido como *Superconducting Super Collider* (SSC) (R. ROSENFELD, 2013).

A construção começou em 1991, do que teria sido o maior acelerador de partículas do mundo, perto da cidade de Waxahachie, no Texas. A circunferência estimada do SSC seria de 87,1 km (ENGLISH, 2016). Só para podermos comparar, o super colisor do CERN tem apenas 27 quilômetros de circunferência. Uma explosão nos custos do projeto, fez com que o congresso tomasse uma decisão radical. O que começou com 4,5 bilhões de dólares para o orçamento foi rapidamente mudado para 11 bilhões de dólares após o início da construção. Isso fez com que o projeto fosse sufocado (GRUNDHAUSER, 2019). A construção já havia atingido um estado muito avançado, mas o Congresso dos Estados Unidos acabou por desistir do projeto em outubro de 1993, após dez anos de planejamento, deixando o supercondutor abandonado no deserto do Texas (SAULT, 2018).

O SSC teria acelerado os prótons com uma capacidade de 40 TeV, muito mais do que o atual recorde mundial do laboratório do CERN, em Genebra, de 14 TeV. Muitos fatores contribuíram para o cancelamento do projeto, mas, como mencionado, as preocupações orçamentárias estavam no nível mais alto da lista. Além disso, o projeto foi mal administrado

por físicos do departamento de energia, e o colapso da União Soviética degradou a necessidade de os EUA competirem com a superioridade científica como superpotência (ENGLISH, 2016). Como um todo, a comunidade de Física Americana foi esmagada pela decisão de cancelar a construção. Afinal, isso poderia ter sido o lar de algumas das descobertas científicas mais significativas do mundo, assim como o Grande Colisor de Hádrons é hoje.

4 CERN

Numa manhã de quinta-feira do mês de setembro de 2008, a BBC transmitiu uma notícia que deixou a comunidade científica, principalmente do CERN, abalada: Uma menina na Índia se suicidou depois de assistir a reportagens de TV cujo conteúdo era um experimento de Física que poderia trazer o fim do mundo. “Tentamos desviar a atenção dela e dissemos que ela não deveria se preocupar com essas coisas, mas não tivemos sucesso”, disse o pai da menina Chaya aos repórteres da BBC.

O CERN, financiado no momento atual por vinte e dois Estados Membros, foi criado, em 1953. É atualmente o maior e mais importante laboratório no mundo na área de Física de partículas elementares, situado na localidade noroeste de Genebra, na divisa Franco-suíça (CASTRO, 2010). Segundo os fundadores, a maior intenção desta organização científica era criar um centro de referência mundial de pesquisa de Física para evitar a saída de cérebros para os Estados Unidos da América, devido às cicatrizes profundas na comunidade científica deixada pela segunda guerra mundial. Além disso, a organização também tinha como alvo a elevação e a parceria entre os Países Europeus no que se tratava do estudo primordial da Física das Altas Energias, de maneira que possibilitasse à Europa a frente nesse campo (SALMERON, 2014).

Iniciaremos este capítulo falando como se deu o processo de desenvolvimento e criação do CERN. Em seguida falaremos sobre seus primeiros projetos, inclusive, seu primeiro recorde. Após isso, veremos o processo de construção e funcionamento do primeiro acelerador do tipo colisor. Ainda falaremos sobre um projeto ambicioso que, ao passar por algumas modificações, trouxe grande influência para o CERN. Logo depois, trataremos sobre o projeto que antecedeu o maior de todos do CERN, e do mundo. Por fim, falaremos sobre o próprio. Veremos que o maior e mais complexo experimento já produzido pela humanidade, é o Grande Colisor de Hádrons, designado LHC.

4.1 Surgimento do CERN

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, uma ampla parcela da Europa estava destruída. A ciência e a economia estavam em situação crítica. Já os Estados Unidos, que também participaram da guerra, saíram ilesos, visto que nunca tiveram batalhas em seu território. Suas universidades e laboratórios não sofreram dano algum, o que fez a pesquisa continuar. Essa situação ocasionou a partida de alguns cientistas europeus para os Estados Unidos (SALMERON, 2014). Neste cenário, alguns físicos europeus surgiram com a ideia da construção de um novo laboratório de Física, mais precisamente de Física de altas energias. As principais razões para realização de tal projeto seria diminuir o fluxo de físicos europeus que estavam indo para os Estados Unidos. Além disso, alegava-se que um laboratório europeu seria capaz de levar paz e parceria entre países que recentemente estavam em guerra (R. ROSENFELD, 2013). Os cientistas estavam se tornando cada vez mais conscientes de que novos avanços na área da Física exigiam recursos além daqueles das nações europeias, enquanto os estadistas estavam ansiosos para promover projetos dignos que simbolizassem o novo espírito da unidade europeia.

O físico francês Louis de Broglie, ganhador do Prêmio Nobel de Física de 1929 por sua descoberta da natureza ondulatória dos elétrons, expôs a primeira proposta oficial para a construção de um laboratório europeu na Conferência Cultural Europeia, que começou em Lausanne (perto de Genebra) em dezembro de 1949. Em sua proposta, ele sugeria a criação de uma instituição internacional de pesquisa com investimentos para equipamentos, transcendendo o que cada nação poderia investir individualmente. Mas a tensão foi maior na quinta Conferência Geral da UNESCO⁵, realizada em Florença em Junho de 1950, onde o físico americano Isidor Isaac Rabi, premiado com o Nobel de Física de 1944 por seu método de ressonância para registrar as propriedades magnéticas dos núcleos atômicos, mostrou uma resolução proposta por sua delegação, autorizando a UNESCO a “auxiliar e encorajar a formação de laboratórios regionais de pesquisa para potencializar a colaboração científica internacional” (TSESMELIS, 2018). Assim, com a ajuda da UNESCO, uma série de conferências em 1950 e 1951 abriu o caminho para o estabelecimento de um laboratório internacional de Física nuclear.

⁵ Sigla para United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [Organização Educacional, Científica e Cultural das Nações Unidas], entrou em funcionamento em 1946.

Em fevereiro de 1952, em Genebra, onze governos assinaram um acordo de criação de um conselho provisório denominado “Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”, que em português, significa Conselho Europeu para Pesquisa Nuclear. Daí surgia a sigla CERN, que foi mantida desde então (CHOI, 2015).

A primeira reunião do conselho ocorreu três meses após seu surgimento, em Paris. Foram estabelecidas equipes de trabalho para planejar as máquinas que seriam construídas, procurar um terreno para o laboratório e estudar a teoria da Física de altas energias. Esta última, liderada pelo físico dinamarquês Niels Bohr, o qual ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1922 por seus serviços na investigação da estrutura dos átomos e da radiação que emana deles, não necessitava aguardar a construção do laboratório e teve início em Copenhague. Em agosto, do mesmo ano, na segunda reunião do conselho, foi apresentado um projeto mais definido para os primeiros equipamentos. A terceira reunião foi realizada em outubro, em Amsterdam. Nela a oferta da Suíça para fornecer um local perto de Genebra para o Laboratório foi aceita. Influenciou muito na seleção a neutralidade suíça na segunda guerra mundial, sua localização e boa infraestrutura (KRIGE, 1996). Na sexta reunião do Conselho, que sucedeu em Paris em 1 de Julho de 1953, a Convenção CERN que estabeleceu a Organização foi assinada, sob reserva de ratificação, por 12 Estados. A convenção foi aos poucos ratificada pelos 12 Estados-Membros fundadores: Bélgica, Dinamarca, França, República Federal da Alemanha, Grécia, Itália, Países Baixos, Noruega, Suécia, Suíça, Reino Unido e na antiga Iugoslávia. No dia 29 de Setembro de 1954, após a ratificação, o CERN, como Organização Europeia para Pesquisa Nuclear, nasceu oficialmente (TSESSELIS, 2018).

4.2 Primeiras metas

Enquanto os Estados Unidos estavam trabalhando na construção de dois grandes síncrotrons, o CERN realizava seu planejamento científico, iniciado antes mesmo da aprovação oficial dos países-membros. Em 1951, foram propostas duas metas. A primeira seria a construção de um ambicioso síncrotron de prótons (PS), que levaria mais tempo para ser feito e que deveria tomar a liderança no quesito de altas energias. E a segunda seria a construção de um menos poderoso, um Síncrocíclotron (SC), que serviria para dar início de forma rápida à pesquisa em física de partículas e fornecer alguma experiência de construção

de acelerador por uma colaboração europeia, fortificando assim a parceria entre os físicos de várias nações (CHOI, 2015). Em 1952, o conselho provisório do CERN aprovou a criação dos dois projetos. O grupo encarregado de construir o SC seria liderado pelo físico holandês Cornelis Bakker, e o físico norueguês Odd Dahl ficou encarregado de liderar o grupo que ficaria responsável pela construção do PS (CERN, 2006).

4.2.1 Síncrotron (SC): primogênito

Os trabalhos para construção do Síncrotron (SC), o primeiro acelerador do CERN, começaram imediatamente após sua aprovação. O projeto estava quase completo em 1953, quinze meses após a criação do grupo que se mudou para Genebra em 1954. A construção começou em 1955, tendo como primeiro diretor-geral do laboratório, o físico suíço-americano Felix Bloch, professor da Universidade Stanford e ganhador do prêmio Nobel de 1952. O primeiro feixe foi obtido em 1957. Prótons foram acelerados com energia máxima de 600 MeV (KRIGE, 1996). O SC teve longa duração de vida. Como pioneiro do CERN, teve papel fundamental na realização dos primeiros experimentos realizados. Testemunhando realizações físicas muito importantes durante seus 33 anos de operação, parou de operar definitivamente somente em 1990, sendo o primeiro de uma série formidável de aceleradores e colisores construídos no CERN (EUROPEAN PHYSICAL SOCIETY, 2019).

4.2.2 Síncrotron de prótons (PS): primeiro recorde

O síncrotron de prótons, que era o projeto mais ambicioso naquele momento, também foi aprovado pelo conselho em 1952. Esse deveria ser o mais poderoso. Seria do tipo Cosmotron dos Estados Unidos que, naquele momento, era o maior do mundo em termos de energia (CERN, 1959). A intensão era justamente ultrapassá-lo, fazendo o acelerador de um laboratório recém criado ser o mais potente na escala de energia.

No verão de 1952, para ajudar na realização do projeto, o grupo responsável pela criação do acelerador que viria para ser superior a todos os outros, liderado por Odd Dahl, fez uma viagem de estudos para os Estados Unidos. Lá eles analisariam com mais detalhes o Cosmotron. Foram convidados e recepcionados pelo pessoal do Laboratório Nacional de Brookhaven, que era onde operava o acelerador. Ao chegar, foram surpreendidos com uma

novidade. Os físicos do laboratório de Brookhaven estavam estudando um novo método para construção desses equipamentos, denominado focalização forte ou gradiente alternado (PLASS, 2012). Já foi discutido no Capítulo 2 que, posteriormente, esse método foi adotado por eles na construção do sucessor do Cosmotron.

Embora um projeto de um Síncrotron semelhante ao Cosmotron tenha sido elaborado pelo grupo do PS, foi decidido, após essa visita, projetar um Síncrotron incorporando o novo princípio. Esse método prometia que uma energia mais alta poderia ser alcançada pelo mesmo custo. Em outubro de 1952, o ainda provisório Conselho aceitou felizmente essa proposta ousada, que significava abandonar o Síncrotron planejado anteriormente, semelhante ao Cosmotron, de 10 GeV e estudar, em vez disso, um Síncrotron de Próton (PS) de 24 GeV, baseado no princípio de gradiente alternado não experimentado (KRIGE, 1996). Embora a possibilidade de construir um acelerador com quase o triplo da energia do primeiro projeto fosse fascinante, foi uma decisão muito corajosa a tomada pelos físicos do CERN, haja vista que seria a primeira vez que essa técnica, criada recentemente e presente somente em trabalhos teóricos, seria aplicada.

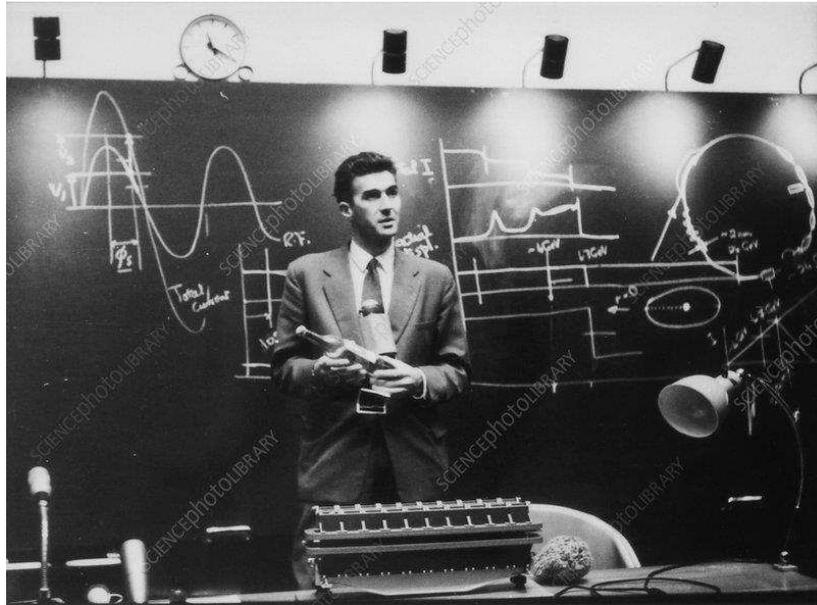
Mesmo sendo laboratórios concorrentes, Brookhaven e CERN compartilharam conhecimento e se ajudaram. Brookhaven chegou até a mandar físicos de sua instituição para auxiliar na construção desse novo projeto. É interessante atentar para esse trabalho em equipe dos dois laboratórios, que deixou a rivalidade de lado por um bem maior, que é o desenvolvimento da ciência.

John Adams era um inglês que, por escolha própria, não tinha qualificação formal, mas ainda assim tornou-se especialista na elaboração e construção de máquinas e instrumentos que investigavam a natureza das partículas. Ele foi contratado pelo CERN no final de 1953 e, devido a alguns acontecimentos, assumiu no ano seguinte, com 33 anos, o papel de novo líder do grupo responsável pela construção do PS (KRIGE, 1996).

Em uma quarta feira do mês de novembro de 1959, Adams estava diante de um auditório cheio no CERN, segurando uma garrafa vazia de vodca. O mesmo estava a comemorar a quebra do recorde, que acontecera na noite anterior, do acelerador mais potente do mundo na época (R. ROSENFELD, 2013). O PS acelerou prótons atingindo uma energia de 24 GeV. Este foi um dia de orgulho para a ciência europeia. Foi a primeira máquina de prótons do seu tipo a operar e foi durante um breve período o mais poderoso acelerador de partículas do mundo (CERN, 2019). Fala-se breve período porque no ano seguinte estava entrando em funcionamento o AGS de Brookhaven que, como já foi visto no Capítulo 2,

acelerou partículas com uma energia de 33 GeV e que também usava o método de focalização forte. Na Figura 9, apresenta-se a fotografia de John Adams, logo após quebrar o recorde de altas energias com o PS.

Figura 9. John Adams com a garrafa de vodka em 1959, comemorando recorde do CERN.



Fonte: <https://www.sciencephoto.com/media/223125/view/john-adams-cern-record-breaker-1959>

O PS foi o primeiro Síncrotron do CERN e o primeiro acelerador de prótons a usar o método de focalização forte. Inicialmente, era o principal acelerador do CERN desse tipo, mas, quando o laboratório construiu novos aceleradores na década de 1970, o principal papel do PS era fornecer partículas para as novas máquinas. Ao longo dos anos, sofreu muitas modificações e a intensidade de seu feixe de prótons aumentou mil vezes. Ele está em atividade até hoje, como uma seção do conjunto de máquinas que aceleram prótons em várias etapas antes de eles serem introduzidos no imenso acelerador LHC (CERN, 2019).

4.3 Próximos passos a serem dados

Pelo que já foi visto até aqui, a construção de um acelerador de partículas leva muito tempo para ser concluída. Partindo de seu planejamento até a finalização de sua construção física, são anos de trabalho. Em virtude disso, após a conclusão de uma máquina dessas, era

necessário dar início a novos planejamentos, com metas maiores e ideias melhoradas para dar continuidade à construção desses aceleradores.

No laboratório do CERN não era diferente. Após a operação do PS, foi sugerido por Adams ao conselho do CERN, dar início ao planejamento da máquina que sucederia o PS. Para obter um consenso na comunidade europeia quanto a melhor maneira de desenvolver as instalações de pesquisa do CERN, um “Comitê Europeu para Futuros Aceleradores” foi designado em 1962. Em 1963 este comitê recomendou a construção de mais um PS, fundamentado no anterior, mas com energia de 300 GeV. Este foi nomeado de Super Próton Síncroton (SPS). Além desta, havia outra proposta. A construção do primeiro acelerador do tipo colisor. Seria uma máquina revolucionária, mas com energia e orçamento inferior ao do SPS. Serviria para estudar essa nova invenção que, na condição de ser eficaz, causaria total mudança no desenvolvimento dos futuros aceleradores de partículas (CHOI, 2015).

4.3.1 Anéis de Armazenamento a Interseção (ISR)

Na realização de experimentos, até aquele momento, era usado o método de “experimentos com alvo fixo”. Neste, um feixe de partículas aceleradas era direcionado para um alvo parado e examinavam os efeitos das colisões, com o uso de instrumentos adequados. Porém, percebeu-se que seria possível obter energia muito mais alta, se os feixes de partículas pudessem ser persuadidos a colidir de frente, um com o outro (HÜBNER, 2012).

Para entender por que isso acontece, vamos considerar o que ocorre em um experimento de acelerador com alvo fixo. Quando as partículas aceleradas atingem a energia necessária, elas são direcionadas para um alvo e colidem com as partículas estacionárias do alvo. A maior parte da energia dada às partículas aceleradas tenta manter as partículas que resultam da colisão se movendo na direção das partículas incidentes (para conservar o momento). Apenas uma fração bastante moderada é “energia útil” para o propósito real do experimento, que é a transformação de partículas, e a criação de novas partículas. Se, ao invés de um alvo fixo, houvesse um alvo móvel, no qual as partículas colidissem, a energia útil seria muito maior (RUSSO, 1996).

Sendo assim, a segunda proposta do grupo de trabalho era baseada no conceito do Intersecting Storage Rings (ISR), que significa Anéis de Armazenamento a Intersecção, que consiste em acelerar dois feixes de partículas em direções opostas, em anéis circulares, impondo então que esses feixes colidam diretamente em lugares de intersecção desses anéis.

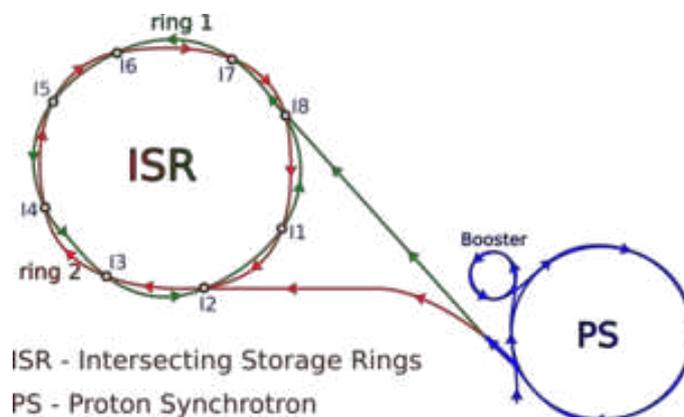
Portanto, o interesse do CERN no ISR consistia na perspectiva de colidir de frente prótons a uma energia de 28 GeV cada, tendo 56 GeV de energia útil disponível. Para conseguir isso com um acelerador de alvo fixo, seria necessário uma máquina com uma energia de cerca de 1700 GeV (R. ROSENFELD, 2013).

Após vários estudos, finalmente uma proposta oficial foi feita em 1964 ao Conselho do CERN para a construção de dois anéis concêntricos (menos nas oito regiões onde ocorre a colisão entre os feixes), que seriam alimentados com prótons do PS existente no laboratório (RUSSO, 1996).

O projeto, liderado pelo físico norueguês Kjell Johnsen, foi aprovado no ano seguinte. No mesmo ano de aprovação, o governo francês concordou em disponibilizar à Organização uma área de terra adjacente ao Laboratório Europeu do CERN para a construção da nova máquina, visto que não havia espaço suficiente para o ISR dentro da área cedida pela Suíça para o CERN. Assim, o CERN tornou-se a primeira organização internacional que cruzou uma fronteira fisicamente (ADAMS et al., 1981).

O ISR consiste em dois anéis concêntricos de ímãs, com 300 m de diâmetro, nos quais os prótons viajam em direções opostas. Os anéis são construídos em um túnel subterrâneo circular a uns 200 m de distância do PS. Os dois anéis não são exatamente circulares, mas são entrelaçados para que eles se cruzem em oito pontos. Esses pontos são chamados de regiões de interseção. É justamente o lugar onde os feixes podem colidir (JOHNSEN, 1973). Uma representação esquemática da configuração e dos caminhos do feixe pode ser vista na Figura 10.

Figura 10. Representação esquemática da configuração e dos caminhos do feixe no ISR



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intersecting_Storage_Rings_02.svg

Primeiro os prótons são acelerados para a energia necessária (que pode ser entre 11 e 26 GeV) no PS. Eles são então ejetados por um sistema de ejeção rápida em um canal de transferência onde um sistema magnético os guia em direção ao ISR. Este canal se bifurca em dois e, dependendo se um ímã de deflexão é ligado ou não, os prótons viajam ao longo dos canais para a esquerda ou direita para entrar em um ou no outro anel (JOHNSEN, 1973).

Em 27 de janeiro de 1971, no CERN, a máquina ISR entrou em operação pela primeira vez, fazendo com que dois feixes de prótons colidissem. Esse tipo de configuração ficou conhecido como anéis de colisão, ou colisores (ADAMS et al., 1981). Seu bom resultado mostrou uma nova direção para os próximos projetos. Ao longo dos anos de funcionamento da máquina, diversas técnicas e conceitos, que seriam empregados futuramente, foram testados e aperfeiçoados. As experiências obtidas com o ISR foram posteriormente exploradas no Super Próton-Antipróton Síncrotron (SPPS) no CERN, no Tevatron no Fermilab, no RHIC em Brookhaven e, finalmente, pelo LHC no CERN.

4.3.2 Super Próton Síncrotron (SPS)

O SPS era sem hesitação o projeto mais ganancioso, que ficaria no lugar do PS na fronteira de altas energias no CERN. O plano original do CERN foi construir tanto o ISR como o SPS ao mesmo tempo, mas o último foi adiado, dado o seu custo muito mais elevado, maior tempo de construção e o fato de que a escolha do seu local poderia ser uma fonte de tensão entre os Estados-Membros, que acabou por ser verdade nos próximos anos (U, 1976).

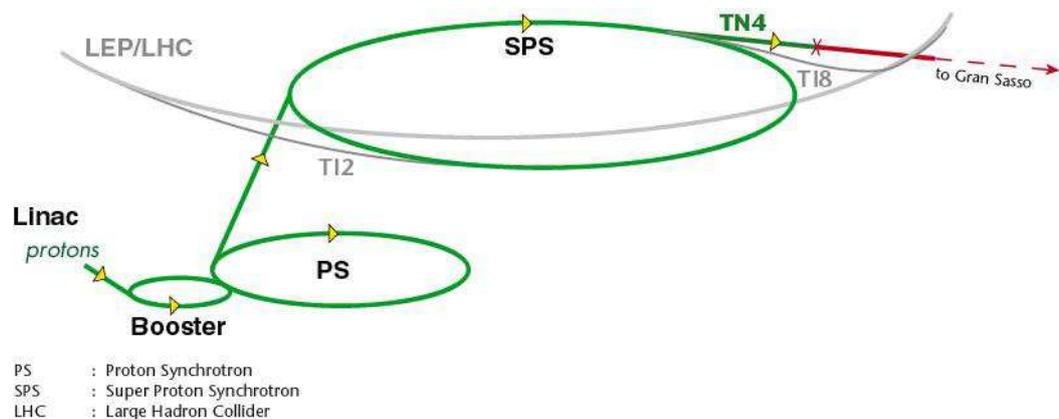
Em 1967 as ideias para construção do SPS ainda não haviam sido aprovadas. Por ser uma grande proposta e o seu tamanho prometer ser dez vezes maior que o PS, não tinha espaço suficiente para sua construção, o que exigiria um novo laboratório. Em 1964, O conselho do CERN solicitou aos países-membros propostas de estalagens para o novo acelerador (DUDLEY, 2018). Três anos depois, dentre várias propostas, cinco foram selecionadas. Todas desejavam receber o novo laboratório. Gerou-se então uma situação difícil, pois existiam alguns integrantes que abandonariam o projeto caso a proposta aceita por ele não fosse aprovada (HÜBNER, 2012).

John Adams, que tinha retornado à Inglaterra em 1961 para dirigir um novo laboratório, foi convidado em 1968 pelo conselho do CERN a supervisionar o projeto do SPS, que estava parado. O conselho via nele a capacidade e o talento de levar o projeto à frente. Em 1970, ele fez uma oferta que além de resolver o problema espinhoso do local, após anos

de longas discussões, também traria diversos benefícios técnicos e financeiros para o laboratório. Sua proposta consistia em localizar o novo acelerador ao lado do laboratório do CERN já existente usando o PS como injetor. A proposta de Adams era tentadora e foi aceita no ano seguinte. Surgiu assim mais um laboratório, conhecido como laboratório II, para alojar o SPS. Foi estabelecido que tivesse um diretor-geral para cada laboratório e Adams foi escolhido para ser o diretor do laboratório II (Os dois laboratórios foram unificados em 1976) (DUDLEY, 2018).

A construção da nova máquina do CERN começou logo em seguida, com a escavação do túnel subterrâneo de quarenta metros de profundidade que a abrigaria, em mais um terreno dado pela França, em Prévessin, a alguns quilômetros do laboratório I, em Meyrin. À medida que o design e a construção dos componentes da máquina progrediam no CERN, percebeu-se que a tecnologia de ímãs supercondutores não avançou o suficiente para serem incorporados no SPS. Por outro lado, foi possível encontrar ímãs convencionais e design apropriado para construir o anel, que dava ao acelerador uma capacidade de pico de energia de 400 GeV (U, 1976). Na Figura 11 podemos observar um esquema de representação do SPS.

Figura 11. Esquema de representação do Super Próton Síncrotron (SPS)



Fonte: <http://www.chronozoom.com/cern/cern/e11219bb-d4f0-442a-b552-15faf9a5c863#/t29b28831-5999-46ae-a724-636d23eb1e99>

Na Figura 11 mostra-se o caminho do feixe de prótons que já vem sofrendo aceleração no PS, a uma energia de 28 GeV. Em seguida, é injetado no anel do SPS de 7 km de circunferência, fazendo com que o mesmo atinja altas energias (R. ROSENFELD, 2013). O SPS começou a operar em junho de 1976 com uma energia de 400 GeV. Porém, o SPS já não

era o acelerador de maior energia do mundo. Devido a seu longo tempo para ser aprovado pelo conselho, o SPS perdera a chance de ganhar o título de maior acelerador do mundo para o *Main Ring*, que operou com energia de 500 GeV, finalizado em 1976 no Fermilab, nos Estados Unidos (DUDLEY, 2018). Mais uma vez o CERN era passado para trás em termos de domínio na fronteira de energia.

O SPS era do tipo de acelerador que fazia experimentos com colisões do feixe de prótons com alvos fixos, assim como o acelerador na época em funcionamento no Fermilab (RUSSO, 1996). Em 1976, o físico italiano Calor Rubbia e colaboradores surgiram com uma ideia de aumentar a energia do SPS sem a necessidade de mexer em seu tamanho. Eles sugeriram transformar o SPS em um dispositivo que colidisse frontalmente prótons com antiprótons viajando em sentidos opostos (EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH, 2008). Esse dispositivo era fundamentado no ISR que, como já vimos, colidia prótons frontalmente. Para operar como um colisor de Próton-Antipróton, o SPS sofreria modificações substanciais; seria alterado de um síncrotron de um feixe para um sincrotron colisor de dois feixes.

A causa que fez Rubbia e colaboradores apresentarem essa ideia foi o fato de que a colisão de prótons com sua antipartícula⁶ faz com que eles desapareçam, dando surgimento a uma grande quantidade de energia, maior que a energia disponível em comparação com um único feixe colidindo contra um alvo fixo. Essa energia, por sua vez, é transformada em novas partículas. Rubbia fez a proposta tanto para o CERN quanto para o Fermilab. Mas dessa vez o CERN saiu na frente, quando em 1978, o Conselho do CERN aprovou o projeto, que ficou conhecido como “Super Proton–Antiproton Synchrotron” (SPP-S), traduzido do inglês Super Síncrotron Proton-Antiproton (EVANS, 1988)

As dificuldades para fazer a alteração para esse novo tipo de colisor eram demais. Primeiro porque antiprótons não dão em árvore; era preciso produzi-los. Outra dificuldade era o armazenamento, pois “guardar” antiprótons não era uma tarefa fácil (R. ROSENFELD, 2013). Mais uma vez a saída que tinha era usar o antigo PS de 26 GeV do CERN. Dessa vez ele serviria para produzir os antiprótons, que em seguida seriam armazenados em um distinto anel, denominado “acumulador de antipróton” (EVANS, 1988).

⁶ Partícula elementar (pósitron, antipróton ou antinêutron) de massa igual, mas de propriedades eletromagnéticas e de carga bariônica ou leptônica opostas às da partícula correspondente.

As primeiras colisões do SPP-S ocorreram em julho de 1981. Os principais experimentos no acelerador foram UA1 e UA2⁷, onde os bósons W e Z foram descobertos em 1983. Tal descoberta rendeu para Carlo Rubbia e Simon der Meer o prêmio Nobel de Física de 1984 por suas contribuições decisivas para o grande projeto, que levou à descoberta das partículas de campo W e Z, comunicadoras de interação fraca (EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH, 2008). Essa foi uma conquista significativa na Física que validou ainda mais a teoria eletrofraca⁸. Também ajudou a garantir a decisão de construir o próximo grande acelerador do CERN, Large Electron Positron collider (LEP), que é o Grande Colisor de Elétrons e Póstrons, o qual iremos falar a seguir, cujo trabalho era produzir em massa os bósons Z e W para mais estudos.

Como vimos, o SPS foi construído inicialmente para acelerar prótons, e continuou a fazê-lo, mas também operou como colisor próton-antipróton. Veremos que, além dessas funções, ele exerceu o cargo de injetor de elétron e pré-injetor final do LHC. O colisor foi desativado no final de 1991, já que não era mais competitivo com o colisor de Prótons-Antiprótons de 1,5 TeV no Fermilab, que estava em operação desde 1987.

4.4 LEP: o antecessor do LHC

Até este momento foi relatado como se deu a evolução de aceleradores de prótons. Porém, assim como prótons, qualquer outra partícula pode ser acelerada, incluindo os elétrons. Por não possuírem composição interna, seus experimentos se dão de maneira mais precisa. Pode-se dizer então que aceleradores de prótons se adequam a descobrir novas partículas, ao passo que os de elétrons são mais recomendados para o estudo minucioso do comportamento e das propriedades de partículas já conhecidas (LEONHARDT, 1990).

Após o grande sucesso do SPP-S, que contribuiu de forma excepcional na pesquisa de altas energias no CERN, resultando na descoberta dos bósons W e Z, a ideia de construir um enorme anel de colisão elétron-póstron surgiu. Como foi dito acima, experimentos utilizando elétrons possibilitam medidas de grande precisão. Assim, um acelerador desse tipo seria perfeito para estudar a fundo essas partículas recém-descobertas no SPP-S.

⁷ Detectores de partículas. Esses tinham equipamentos em que os sinais das partículas eram capazes de ser digitalizados, suspendendo o uso de fotografias e permitindo que computadores realizassem a análise dos dados.

⁸ Unificação das interações eletromagnética e fraca.

Para a aprovação do projeto do LEP, vários obstáculos tinham que ser superados, inclusive o financeiro. Quando elétrons são acelerados há uma enorme emissão de luz síncrotron⁹ (será tratada com mais detalhes no próximo capítulo), causando assim uma ampla perda de energia (A. FASSÔ, K. GOEBEL, M. HÔFERT, G. RAU, H. SCHÖNBACHER, G.R. STEVENSON, A.H. SULLIVAN, 1984). Essa perda deve ser equilibrada com a introdução de mais energia no sistema. Essa compensação de energia pesa no bolso, visto que aumenta o custo da conta elétrica do laboratório, tornando-se também um agente que limita a energia final do feixe (MARTINS; SILVA, 2014).

Em 1980, surgiu a proposta de usar os aceleradores síncrotrons existentes, o PS e o SPS, como injetores para o LEP, mais uma vez demonstrando a sabedoria da estratégia de manter todos os aceleradores juntos em um só lugar (TAYLOR; TREILLE, 2017). Isto reprimiu todas as discussões sobre o possível local do LEP em outros lugares da Europa e evitou o debate altamente político sobre a localização que havia ofuscado e atrasado o projeto SPS.

O projeto foi aceito pelo conselho do CERN em julho de 1981. Foi alojado em um lugar adjacente às atuais instalações de alta energia da Organização e situado na fronteira entre a França e a Suíça, em um túnel de 4 metros de diâmetro com 27 quilômetros de circunferência. Em quatro pontos ao redor do acelerador, enormes detectores chamados ALEPH (Aparelho para LEP Física), DELPHI (Detector com Lepton, Photon e Hadron Identification), L3 e OPAL (Omni Purpose Apparatus para Lep) estudavam o que acontecia quando elétrons e pósitrons colidiam com alta energia. O LEP tornou-se o maior acelerador de elétron-pósitron já construído. A escavação do túnel LEP foi o maior projeto de engenharia civil da Europa antes do Túnel do Canal da Mancha¹⁰. Três máquinas de perfuração de túneis começaram a escavar o túnel em fevereiro de 1985 e o anel foi completado três anos depois (CERN ACCELERATING SCIENCE, 2019).

O LEP foi ligado no verão de 1989. O projeto foi composto por duas fases: LEP1 e LEP2. Na primeira fase, por seis anos, o LEP1 tinha o trabalho de produzir partículas Z, portadoras da força fraca, uma das forças fundamentais da natureza. Essas partículas foram produzidas no LEP1 quando elétrons e pósitrons colidiram com energia suficiente para fornecer sua massa, por volta de 91 GeV. Em 1995, a era Z do LEP1 chegou ao fim. Uma

⁹ Tipo de radiação eletromagnética de alto fluxo e alto brilho. É usada para investigar novos materiais e sistemas biológicos.

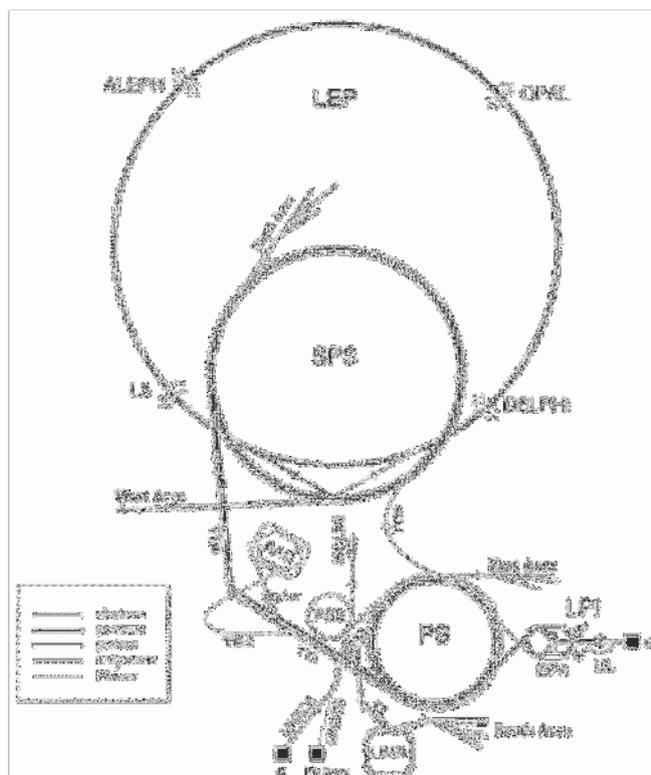
¹⁰ Via aquática que liga a Grã-Bretanha à França. Com uma área aproximada de 75 mil quilômetros, estabelece conexão do Mar do Norte com o Oceano Atlântico.

tecnologia com módulos de aceleração supercondutores, que minimizam a perda de energia, fez a máquina subir sua energia para 190 GeV. Esta segunda fase do LEP2 foi para produzir e estudar as partículas W, companheiras do Z que, como já vimos, foram descobertas no CERN em 1983. Em sua trajetória, o LEP produziu uma quantidade enorme dessas partículas, o que tornou possível um estudo detalhado de suas propriedades, confirmando mais uma vez as estimativas do Modelo Padrão ¹¹(TAYLOR; TREILLE, 2017).

Outra contribuição dada nesta época foi a invenção do *world wide web* (www). O sistema foi desenvolvido no início das operações do LEP1, pelo cientista britânico Tim Berners- Lee, e tinha como objetivo facilitar o compartilhamento de grandes quantidades de dados entre os milhares de participantes que utilizavam o laboratório (CLEMENTE, 2014).

Antes de serem injetadas no anel principal, as partículas tinham que ser aceleradas em um número de outros aceleradores menores. A existência desses injetores ajudou a convencer a comunidade de que o LEP deveria ser construído no CERN. A Figura 12 mostra a representação completa do acelerador.

Figura 12. Representação do sistema do LEP



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Map-of-all-accelerators-at-CERN-before-the-LHC-LEP-Large-Electron-Positron-collider_fig1_41216535

¹¹ Consiste na descrição de três forças: eletromagnética, fraca e forte.

Como representado na Figura 12, primeiro os elétrons eram produzidos por emissão termiônica¹². Após isso, os elétrons eram acelerados ao longo de um acelerador linear de elétrons, o injetor LEP Linac (LIL). Alguns dos elétrons eram desviados em um alvo de tungstênio para produzir os pósitrons; os elétrons e os pósitrons eram então passados para o anel acumulador de elétrons e de pósitrons (EPA), onde eles ficavam acumulados e armazenados. Em seguida, as partículas eram então enviadas para o Síncrotron de Prótons (PS), onde eles eram acelerados em grupos de até alguns GeV. Depois disso, eles eram transferidos para o SPS, onde a aceleração adicional ocorria antes da injeção no anel LEP (CERN ACCELERATING SCIENCE, 2019).

Durante 11 anos de pesquisa, os experimentos do LEP forneceram um estudo detalhado da interação eletrofraca. O bóson de Higgs também foi procurado na máquina, mas como não foi encontrado, foi possível estabelecer um limite inferior na massa da partícula. O LEP foi fechado em 2 de novembro de 2000 para dar lugar à construção do *Large Hadron Collider* no mesmo túnel, a máquina que prometia encontrar essa partícula (R. ROSENFELD, 2013).

4.5 LHC- o maior de todos

Por fim chegamos ao que foi e ainda é o maior acelerador de partículas de todos os tempos. O Large Hadron Collider (LHC), Grande Colisor de Hadron, é o caçula de uma geração que começou há quase noventa anos, com os primeiros aceleradores criados por Cockcroft, Walton e Lawrence.

A busca para encontrar e estudar o bóson de Higgs, que era fundamental para o modelo padrão, foi um dos principais motivos para construção do LHC. O bóson de Higgs, previsto pela primeira vez em 1964 pelo físico britânico Peter Higgs (PIMENTA et al., 2013), já vinha sendo procurado experimentalmente em outros aceleradores, como o Tevatron e o antecessor do LHC, mas não houve sucesso. Outro motivo para realização desse projeto era a incansável competição pelo domínio das altas energias, principalmente com os Estados Unidos, que propôs em 1982 a construção do *Superconducting Super Collider* de 40 TeV que, como já vimos, foi cancelado em outubro de 1993, por falta de orçamento.

¹² Emissão de elétrons por uma superfície metálica aquecida. É gerado pela passagem de uma alta corrente elétrica e uma baixa diferença de potencial.

Em 1990, o projeto para instalação de um acelerador de prótons no túnel construído para alojar o LEP estava pronto. Um ano depois, logo após o início das operações do LEP, o conselho reconheceu oficialmente que o LHC viria a ser a máquina que certamente faria o CERN continuar progredindo na Física de partículas. Mas só em 1994 o conselho aprovou, de forma decisiva, a construção do LHC (SMITH, 2007).

A construção do LHC e seus experimentos levaram vários anos para ser concluída. Somente após 8 anos do desligamento do LEP, que ocorreu em 2000, foi anunciado que os testes para acelerar partículas no LHC iriam começar. O mundo inteiro voltou sua atenção para o LHC. A mídia fez a cobertura de tudo. Dias antes de começarem os testes do acelerador, noticiários transmitiam comunicados que chegavam a causar medo na população. Foi um desses noticiários que se dirigia ao LHC como sendo a “máquina do apocalipse” e que geraria buracos negros, os quais findariam engolindo a Terra, que causou grande tragédia em uma família indiana. A garota indiana Chaya de 16 anos chegou a tirar sua própria vida, depois de ver um desses noticiários locais na TV de um vizinho. Acreditando em tais notícias, imaginou que não aguentaria presenciar o fim de tudo e todos que ela amava. Este pensamento fez com que ela aproveitasse a saída dos seus pais para o trabalho, e tomasse inseticida, causando sua morte (BBC NEWS, 2008). Infelizmente, uma mídia irresponsável e o comentário de pessoas leigas causaram tal fatalidade. Para tentar interromper a operação da máquina, foi iniciado até um processo jurídico nos Estados Unidos. Após todo esse impacto, o CERN preocupou-se com tamanha repercussão e deu uma declaração oficial informando sobre a ausência de riscos de ocorrerem buracos negros, e que não havia razão para pânico quando a máquina começasse a operar (ELLIS et al., 2008).

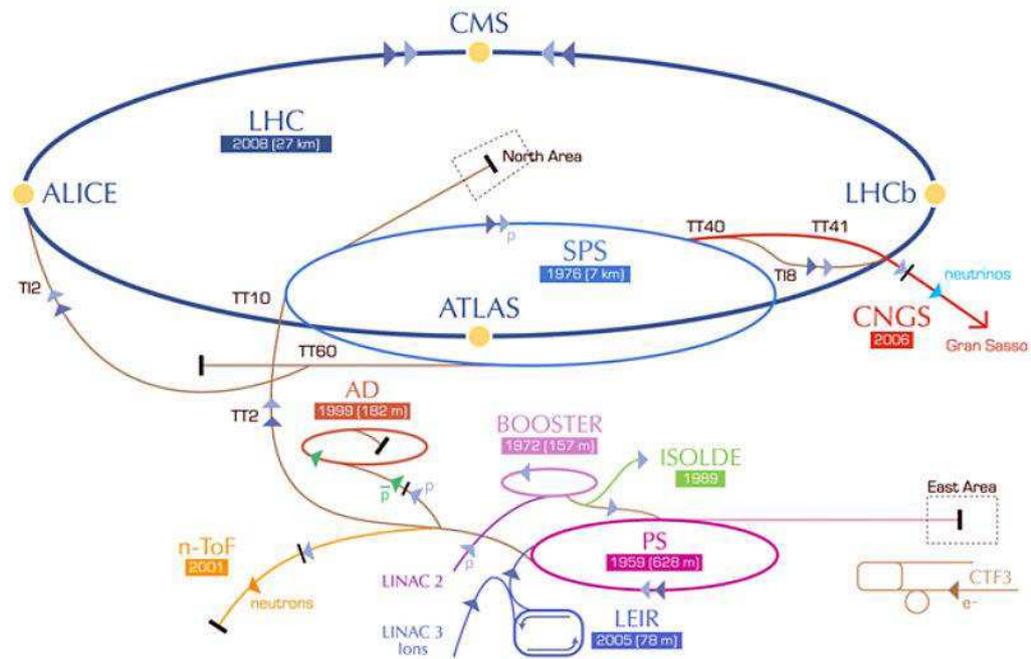
No dia 10 de setembro de 2008 os primeiros feixes de prótons foram acelerados em sentidos opostos no LHC. Apenas nove dias depois, foi preciso parar seu funcionamento, devido a um vazamento de hélio líquido que ocasionou uma explosão, danificando uma série de magnetos. Apenas no dia 20 de novembro do ano seguinte, o LHC voltou a operar novamente (NINIO, 2018). Um mês depois, um novo recorde foi estabelecido por ele, ultrapassando então o Tevatron e tomando então a liderança na área de altas energias.

O LHC também teve que enfrentar diversas dificuldades tecnológicas para se tornar a máquina que se tornou. Para que as partículas do LHC obtivessem energia máxima, foi decidido usar super ímãs, que gerassem altíssimos campos magnéticos com intensidade de 8.6 T. Gerar esses campos não seria uma tarefa fácil. No caso do LHC, há dois feixes, geralmente prótons, que circulam em sentidos opostos dentro de diferentes tubos, separados por uma

pequena distância. O campo magnético responsável por fazer essas partículas circularem é produzido por eletroímãs. Para impedir perdas de energia relacionadas à resistência elétrica, fazia-se uso de materiais supercondutores (RHODES, 2013). Como já vimos essa tecnologia também já tinha sido usada no Tevatron no Fermilab. A dificuldade é que esse material só torna-se supercondutor em temperaturas extremamente baixas (ver Capítulo 3). A temperatura necessária para esses eletroímãs funcionarem no LHC é de $-271,3^{\circ}\text{C}$, ou seja, muito próximo do zero absoluto. Assim o LHC pode ser considerado o lugar mais frio do universo. Além de um túnel muito frio, o LHC tem que ter o tubo com o máximo de vácuo que conseguir. Justamente porque qualquer “sujeirinha” encontrada pelo feixe pode causar sua eliminação (RINCON, 2008).

Os físicos usam o LHC para recriar as condições logo após o Big Bang, colidindo os dois feixes de frente com muita energia. O LHC em si é composto por quatro túneis circulares; alguns são aceleradores antigos do CERN, em forma de anéis, e quatro detectores espalhados ao longo desses anéis. Cada detector desses compõe um experimento diferente. O LHC colide partículas mais “pesadas”, como prótons e alguns íons de chumbo. O processo todo começa com uma pequena garrafa de hidrogênio gasoso. Um campo elétrico vai ser aplicado no gás que sai dessa garrafa, e com isso ele vai remover elétrons dos átomos. Isso faz com que o gás emita prótons. A partir daí, esses prótons vão seguir um caminho com várias etapas, ao longo do complexo de aceleradores do CERN. Na Figura 13 pode-se ver melhor como se dá esse conjunto de aceleradores do CERN.

Figura 13. Conjunto de aceleradores do CERN



Fonte: petfisica.uwixsite.com

É possível observar na Figura 13 que o primeiro acelerador do complexo é o Linac 2, um pequeno acelerador linear que acelera prótons à uma energia de 50 MeV. Após isso eles são então injetados no Booster e em seguida no antigo PS, que acelera os prótons a 1.4 GeV e 25 GeV de energia, respectivamente. Depois, os prótons são enviados ao SPS, onde são acelerados a 450 GeV. Por último, os prótons são transferidos aos dois tubos de feixes do LHC: um dos feixes circula no sentido horário e o outro no sentido anti-horário. Após 20 minutos circulando no LHC, os prótons atingem sua energia máxima de 6.5 TeV e, normalmente, ambos circulam por muitas horas antes de colidirem em um dos quatro detectores de partículas - ALICE, ATLAS, CMS E LHCb – onde a energia total no ponto de colisão é igual a 13 TeV (SÁ, 2017). De maneira resumida, esses grandes detectores servem para obter os sinais de forma digital, gerando uma enorme quantidade de dados.

Os prótons no LHC viajam a uma velocidade muito próxima à da luz. Eles levam 1 segundo para darem 11 mil voltas no anel de 27 km. Só para termos noção de comparação, o atual recordista de meia- maratona completou o percurso de 21,1 km no tempo de 58 min e 23 s.

Em julho de 2012, cientistas do CERN finalmente anunciaram que, foi descoberta em experiências do ATLAS e do CMS, uma nova partícula que poderia ser o bóson de Higgs.

A mesma possuía propriedades parecidas com aquelas preditas para o Higgs do modelo padrão. Em março do ano seguinte, a direção do CERN fez um comunicado afirmando que, ao fim de 50 anos de investigação, a partícula descoberta é realmente um bóson de Higgs (PIMENTA et al., 2013).

O futuro da Física de altas energias está no LHC. No dia 15 de junho do ano passado (2018), a comissão do CERN realizou uma cerimônia de inauguração para marcar o início das obras de engenharia civil na grande atualização do LHC. A atualização aumentará o potencial do acelerador para novas descobertas em Física, começando em 2026. Segundo o físico teórico professor John Ellis, o projeto denominado por HiLumi permitirá obter muito mais do LHC do que já foi possível chegar até agora. Com a atualização bem sucedida, será permitido investigar muito mais profundamente a história do Universo, examinar processos muito raros e estudar a Física de partícula com muito mais detalhes do que o LHC regular estuda (RINCON, 2018).

5 O USO DOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS NO BRASIL

“Com o novo acelerador de partículas que está sendo construído no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, será possível entender doenças degenerativas ou problemas ligados ao cérebro”, afirma o diretor-geral do CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais), e diretor do Projeto Sirius, Antônio José Roque da Silva. Por entender a importância dessas máquinas que aceleram partículas, o Brasil também buscou investir nesses equipamentos. Porém, ao invés de construir aceleradores do tipo que colidem partículas com o objetivo de entender a estrutura interna dentro do núcleo, como o LHC, o Brasil se deteve à construção de aceleradores de elétrons do tipo que mantêm uma órbita estável para geração de luz síncrotron.

Iniciaremos esse Capítulo com um breve relato sobre os primeiros aceleradores que tivemos no Brasil, ressaltando sua importância e dificuldade de construção na época. Em seguida falaremos sobre o UVX, o primeiro acelerador do hemisfério sul dedicado à criação de luz síncrotron, que opera até hoje. Por último, falaremos do Sirius, um dos maiores projetos da ciência brasileira, e um dos pioneiros em sua categoria em todo o mundo. Veremos então que a ciência brasileira, na área de aceleradores de partículas, parte do zero para ir a um estado da arte, causando impacto em diferentes vetores que são importantes para um país.

5.1 Primeiros aceleradores que tivemos por aqui

No Brasil, o primeiro acelerador de partículas foi construído em 1950 pelo professor Marcello Damy na Universidade de São Paulo (USP) (FIGUEREDO, 2002). Ele foi discípulo do físico experimental russo Gleb Vassielievich Wataghin, naturalizado italiano, que deu grande impulso às pesquisas em Física no Brasil e na Itália (LAMARÃO, 2016). O acelerador construído por Damy foi um acelerador de elétrons e ficou conhecido como Betatron. Sendo o primeiro acelerador de partículas da América Latina, o Betatron acelerou elétrons com energia de 22 MeV, tendo seu primeiro feixe em 1951 (ROGERS, 1952).

Nessa mesma época, também foi construído na USP um acelerador eletrostático do tipo Van de Graaff, pelo Professor Oscar Sala, também discípulo de Wataghin (FIGUEREDO,

2002). Com a construção do acelerador Van de Graaff, realizada no período de 1951 a 1954, Oscar Sala teve a oportunidade de formar uma geração de físicos talentosos (FLORIO, 2010). Isso porque os estudos em Física nuclear, através do acelerador de Van de Graaff, possibilitou aos jovens pesquisadores, a partir de 1950, a chance de fazer ciência na área de Física nuclear experimental.

O acelerador coordenado por Sala, tinha capacidade de acelerar partículas a energias de até 3 MeV e funcionou até o final da década de 1960, no estudo de problemas em reações nucleares e estrutura nuclear. Sala percebeu que o Van de Graaff que eles tinham já era um aparelho um pouco ultrapassado. Assim, ele substituiu esse aparelho pelo acelerador Pelletron, que era uma evolução do acelerador Van de Graaff (PEREIRA, 2010). O Pelletron foi comprado e instalado pela equipe comandada por Sala. Com capacidade de acelerar núcleos atômicos a energias de 8 MeV, o Pelletron começou a operar em 1972 e continua em funcionamento até os dias atuais (DEPARTAMENTO DE FÍSICA NUCLEAR, 2019).

Na época de construção do acelerador de Van Graaff da USP, a maioria das peças foi comprada fora, porque a indústria aqui era extremamente rudimentar. Posteriormente, com o Pelletron, o que a indústria ainda não tinha, criava-se coragem e fazia-se; assim a indústria se desenvolvia (FLORIO, 2010). Isso contribuiu para que o maior acelerador de partículas que está sendo construído no País atualmente fosse um projeto cem por cento brasileiro.

No final dos anos 60, um grupo liderado pelo Professor José Goldemberg, presidente da Sociedade Brasileira de Física de 1975 a 1979, iniciou as atividades de construção do Acelerador Linear da USP, o que deu origem à atual denominação LABORATÓRIO DO ACELERADOR LINEAR (LAL). A construção teve início a partir de duas estruturas aceleradoras, do já antigo Mark II, doadas pela Universidade de Stanford (FIGUEREDO, 2002). O Acelerador Linear operou até 1993 e conseguiu produzir um feixe de elétrons da ordem de 70 MeV (INSTITUTO DE FÍSICA, 2019).

Deve-se também mencionar a proposta de construção, no início dos anos de 1950, de um ciclotron no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro. O projeto foi inicialmente aprovado, mas terminou sendo cancelado por causa da crise nacional que atingiu seu ápice com o suicídio de Getúlio Vargas (LAMARÃO, 2016). Hoje o maior projeto brasileiro envolvendo um acelerador é o do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas, que veremos com mais detalhes nas próximas seções.

5.2 Primeira fonte de luz síncrotron no hemisfério SUL

Brevemente citada no capítulo anterior, luz síncrotron é um tipo de radiação eletromagnética de alto fluxo e alto brilho, que permite a realização de experimentos mais rápidos com uma investigação detalhada de materiais. É gerada quando partículas carregadas, principalmente elétrons, submetidas a velocidades próximas a da luz, têm seu caminho desviado por campos magnéticos. Conforme a energia dos elétrons, a radiação produzida pode ir de luz infravermelha até raios X. Seu vasto espectro possibilita aos pesquisadores usar os comprimentos de onda apropriados para cada experimento que deseja ser realizado (CNPEM, 2014).

As máquinas que produzem essa luz síncrotron propiciam a análise da matéria em suas diversas formas, com aplicações em várias áreas do conhecimento, como Física, Química, engenharia dos materiais, nanotecnologia, biotecnologia, farmacologia, medicina, geologia e geofísica, agricultura, oceanografia, petróleo e gás, paleontologia, etc (RIOS et al., 2007).

Dada a relevância dessa fonte de luz síncrotron, no início dos anos 80, houve uma percepção da importância desse tipo de projeto. Não somente pela sua utilização, mas naquele momento, inclusive, para poder ter um projeto desafiador para as novas gerações de cientistas (SILVA, 1996).

As discussões para construção de uma fonte de luz síncrotron teve início em 1981 quando o então presidente do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Lyncaldo Albuquerque, exige ao diretor do CBPF, Roberto Lobo, ideias para construção de um laboratório nacional com uma grande máquina de pesquisa (BRUM; MENEGHINI, 2005). O início da década estava vendo a criação das primeiras fontes de luz síncrotron chamada segunda geração: aceleradores circulares de elétrons aptos para fornecer radiação síncrotron principalmente para ser usada no estudo de materiais. O projeto tinha como objetivos a produção de mão de obra qualificada em ciência e o crescimento do número de pesquisadores em Física experimental (SILVA, 1996).

Em 5 de dezembro de 1984 é definitivamente criado o Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron (LNRS), sob direção provisória de Roberto Lobo e envolvimento dos pesquisadores Ricardo Rodrigues e Aldo Craievich. No ano seguinte, um pequeno grupo de pesquisadores foi mandado ao *Stanford Synchrotron Radiation Laboratory* (SSRL) para

aprenderem a projetar um acelerador síncrotron (Figura 14) (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019a).

Figura 14. Grupo de pesquisadores enviados ao SSRL



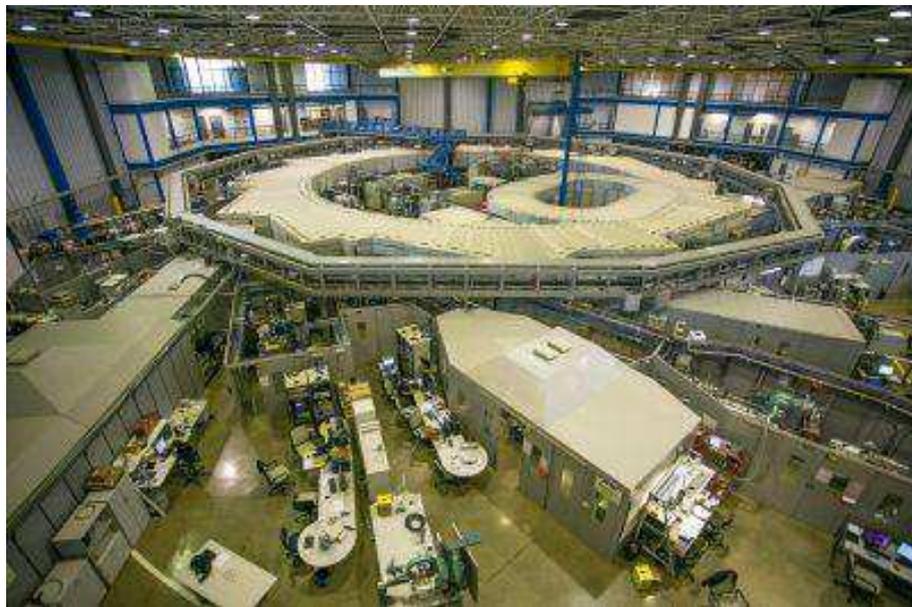
Fonte: <https://www.lnls.cnpem.br/o-lnls/concecao/>

A Figura mostra a foto, da esquerda para a direita: Helmut Wiedemann (pesquisador do SSRL), que supervisionou o grupo de cientistas durante o tempo que permaneceram lá, e os pesquisadores Liu Lin, Hélio Tolentino e Ricardo Rodrigues (líder do grupo) (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019a). Eles voltaram com programas ligados a área de física de aceleradores para continuar o projeto aqui. O sonho era a construção de um Síncrotron mais avançado para época, com energia de 3 GeV. Porém, devido às dificuldades financeiras e técnicas na época, a energia de funcionamento teve que ser reduzida por mais da metade, passando a ser 1,15 GeV (PETROFF, 2017). Em fevereiro de 1985 a cidade de Campinas, no Estado de São Paulo, é escolhida para sediar o laboratório. No ano seguinte, tendo como base o Síncrotron de segunda geração, Cylon Gonçalves da Silva torna-se diretor geral do projeto e muda seu nome para Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) (BRUM; MENECHINI, 2005).

A construção da máquina teve início em janeiro de 1987. Diante de um contexto político agitado e uma inflação fora do controle, os precursores do projeto tiveram que agir com certa bravura e persistência para que o mesmo tivesse continuidade (RIOS et al., 2007). Só em maio de 1996 que os elétrons deram sua primeira volta no anel de armazenamento. Um ano antes havia sido anunciado que a energia dos elétrons seria aumentada para 1,37 GeV. No primeiro dia de Julho de 1997, a fonte de luz síncrotron do LNLS, denominado UVX, sigla que representa “do ultravioleta ao raio-X”, foi aberta para os usuários (PETROFF,

2017). Ele abriu com 7 estações experimentais, chamadas linhas de luz. É nessas estações onde os materiais são analisados. Esforços continuaram para aumentar esse número de linhas. Melhorando as técnicas e estabilidade ao longo do tempo, esse número subiu para 17 linhas de luz, que possibilitam a realização de experimentos em várias técnicas de análise microscópica da matéria usando radiação infravermelha, ultravioleta e raios X (SAVIGNANO, 2015). Na Figura 15 pode-se observar a fotografia do acelerador UVX e suas linhas de luz.

Figura 15. Fotografia da fonte de luz síncrotron, UVX



Fonte: <https://www.lnls.cnpem.br/uvx/aceleradores/>

O caminho dos elétrons começa em um acelerador linear de 120 MeV. Ao saírem desse acelerador linear, eles são introduzidos em um Síncrotron Injetor, ou Booster, de 500 MeV. Após passar por esse sistema de injeção, os elétrons são acelerados no último anel com uma energia de 1,37 GeV. Ao passo que eles são acelerados no decorrer do anel, a radiação síncrotron é emitida tangencialmente à trajetória dos elétrons. Após isso, a radiação é filtrada em um monocromador, e mandada para as linhas de luz, onde serão realizadas as análises nos materiais (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019b).

Em 10 anos, o LNLS evoluiu de forma tecnológica para a construção desse acelerador do tipo síncrotron. Ele foi o primeiro acelerador desse tipo do Hemisfério Sul, e ainda é o único em toda a América Latina (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019a). Ele tem suas estações experimentais abertas a todo público científico. Os que desejam fazer uso de alguma estação do laboratório tem que submeter projetos de pesquisa ao comitê

científico. Os que forem aceitos têm o privilégio de desenvolverem suas pesquisas no LNLS (BRUM; MENEGHINI, 2005). Nos últimos anos, em torno de 1500 pessoas utilizaram e se beneficiaram do Síncrotron, em um universo de 6 mil usuários hoje, que já em algum momento fez uso do LNLS. Desse público, 80 por cento dos usuários são brasileiros, distribuídos praticamente em todo território nacional. O restante dos usuários é de estrangeiros, principalmente argentinos. Isso mostra a importância regional que o acelerador tem (PETROFF, 2017). Outra característica importante do LNLS é que ele não foi um projeto simplesmente comprado ou encomendado. A maior parte dos componentes que formam o acelerador de elétrons teve de ser fabricado aqui, o que tornou a construção da fonte de luz síncrotron 85% nacional. É um projeto que exigiu um bom número de recursos humanos, e formou pessoas nas diferentes áreas de Física de aceleradores e engenharia. Era um desafio capacitar e treinar pesquisadores para uso da luz síncrotron. Mas havia uma forte componente de instrumentação científica, o que resultou em um time extremamente treinado (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019a).

Localizado no CNPEM, o LNLS evoluiu ao longo desses 30 anos para ter o síncrotron funcionando em alto desempenho dentro das suas possibilidades. Dentro do centro há outros três laboratórios nacionais: O Laboratório Nacional de Biociências (LNBio), de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) e o de Nanotecnologia (LNNano). Para o LNLS o futuro próximo é o Sirius, do qual vamos falar na próxima seção. O mesmo, depois de finalizado será a fonte de luz síncrotron mais brilhante em todo o mundo. Sendo pioneiro em sua tecnologia, trará vários benefícios para a ciência brasileira.

5.3 Uma das fontes de luz síncrotron mais brilhantes do mundo

Com o avanço da tecnologia, o UVX começou a ficar para trás diante de outros aceleradores da mesma categoria. Os usuários começaram a perceber as limitações do equipamento (RAUEN, 2016). Em 2003, ou seja, 6 anos depois do laboratório começar a funcionar, é apresentado pela primeira vez, na Reunião Anual de Usuários, a necessidade de construção de uma nova fonte de luz síncrotron maior e mais moderna. Em 2006, a Associação Brasileira de Tecnologia de Luz Síncrotron (ABTluS), que era na época a gestora do LNLS, recomendou que uma força tarefa fosse criada para discussão de um novo síncrotron. Em 2008 é entregue ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCIT) a primeira

proposta conceitual do projeto. Era um síncrotron de 3^o geração¹³, chamado LNLS-2 (AGUIAR, 2018).

No ano seguinte, o projeto começa de fato a decolar, quando o governo encaminha 2 milhões em recursos. Dois workshops são feitos com a comunidade para início de algumas discussões. Em 2010 o nome do projeto é mudado para Sirius e, logo no ano seguinte, a Organização Social ABTLuS muda de nome para o atual CNPEM (RAUEN, 2016). Entre 2009 e 2012, um projeto mais estruturado é construído. Em 2012 esse projeto é apresentado ao 1^o Comitê Internacional de Máquinas. Neste, foram convidados vários especialistas do mundo para virem ao laboratório, para avaliar o projeto que estava sendo apresentado. O painel internacional, ao avaliar o projeto, disse que estava muito bom para 2012, mas recomendou fortemente a avaliação da possibilidade de migrar para uma nova tecnologia. Eles recomendaram a mudança para um projeto com um síncrotron de maior brilho¹⁴ e emitância¹⁵ mais baixa, um síncrotron de 4^a geração (CNPEM, 2014). A tecnologia usada seria a que estava começando a surgir com a construção do síncrotron sueco, chamado Max IV. Essas máquinas são capazes de atingir baixíssima emitância por meio de desenhos inovadores da rede magnética¹⁶ (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019c).

O painel ressaltou que existiriam enormes desafios tecnológicos porque ninguém nunca havia construído algo com essa nova tecnologia. O Brasil seria o primeiro no mundo, ao lado da máquina sueca. Apesar das dificuldades tecnológicas de como construir e operar a máquina de forma segura e estável, a equipe que estava a frente do projeto do Sirius, assumiu esse desafio, o que exigiu desde 2012 um completo redesenho de todos os componentes dos aceleradores e linhas de luz (RAUEN, 2016). Em 15 de janeiro de 2015, tendo como diretor geral do projeto Antônio José Roque da Silva, as obras das edificações para nova fonte de luz síncrotron iniciaram de fato (LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON, 2019c). Na Figura 16, temos a representação da estrutura do acelerador de 3 GeV.

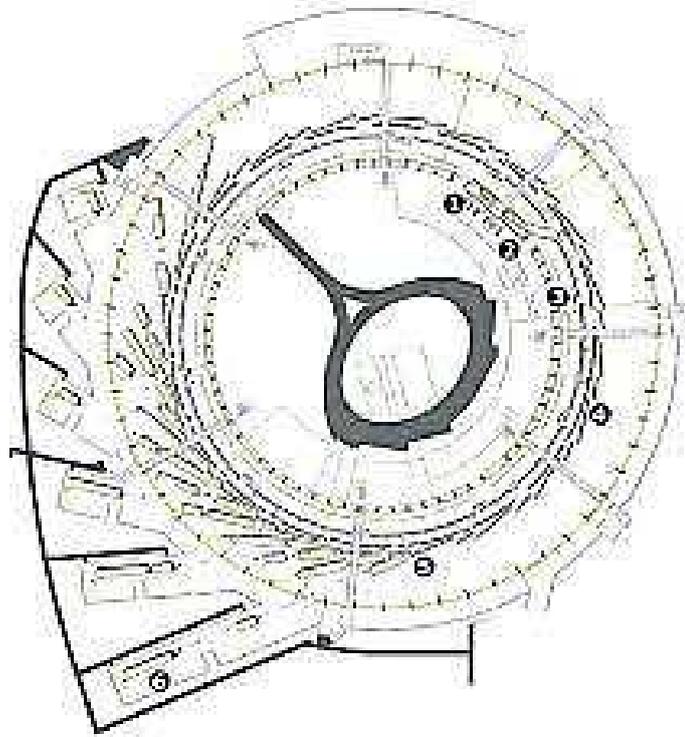
¹³ Principalmente baseada em onduladores (dispositivos magnéticos que permitem ganhar mais de 3 ordens de magnitude em brilho) e emitância de alguns nanômetros.radianos (nm.rad). O brilho atingiu 10^{18} e mais tarde 10^{20} nas primeiras instalações de terceira geração.

¹⁴ Número de fótons emitidos pela fonte em uma determinada faixa espectral de energia, por unidade de tempo, por unidade de tamanho e divergência angular da fonte.

¹⁵ Medida do tamanho e da divergência angular do feixe de elétrons.

¹⁶ Conjunto de imãs que controla a trajetória do feixe de elétrons.

Figura 16. Representação da estrutura do Sirius



Fonte: CNPEM, 2014

Semelhante ao UVX, o sistema de injeção começa com os elétrons sendo injetados no Linac através do canhão de elétrons. No Linac, o feixe de elétrons começa a ganhar energia ao ser acelerado a uma altíssima velocidade. Após isso, os elétrons são direcionados ao Booster; lá eles aumentam sua energia até a energia de operação da fonte de luz. Ao saírem do Booster, os elétrons entram no Anel de Armazenamento. Neste anel principal, o feixe de elétrons é mantido em órbitas estáveis, onde tem sua trajetória desviada por campos magnéticos, gerando então luz síncrotron. Essa luz síncrotron passa pelo monocromador, para em seguida ser conduzida e direcionada até as amostras, de forma a revelar informações sobre o material analisado.

Ao final do ano de 2015, quase 20% das obras civis estavam finalizadas. Em novembro de 2018, foi entregue sua primeira etapa. A mesma incluiu o término das obras civis e a atual entrega do prédio que comporta a infraestrutura de pesquisa, além da conclusão da montagem do Linac e do Booster. Na atualidade há apenas um laboratório da 4ª geração de luz síncrotron em funcionamento no mundo: o MAX-IV, na Suécia, inaugurado em 2016 (EPTV, 2018). Na Figura 17 podemos ter uma visão geral da parte externa do Sirius.

Figura 17. Fotografia do Sirius com primeira etapa concluída



Fonte: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/11/accelerador-de-particulas-sirius-e-inaugurado-em-cerimonia-oficial.html>

Vê-se na Figura 17, o CNPEM, em Campinas (SP), com a primeira etapa do Sirius concluída. Como já foi dito acima, essa primeira etapa do projeto foi inaugurada em novembro do ano passado, com o edifício de 68 mil metros quadrados de área e 15 metros de altura, compondo os dois primeiros aceleradores dos três que integram o projeto.

Em 8 de março deste ano, 2019, gritos de comemoração ecoaram nos corredores do prédio do Sirius, quando foi dada a primeira volta completa de elétrons no Booster. A segunda parte do projeto é composta pelo início das operações do Sirius e a abertura das seis primeiras linhas de luz, que está prevista para o próximo ano, 2020. O projeto concluído contém outras sete linhas de luz, e demanda investimentos de 1,8 bilhões, incluído toda mão de obra, o acelerador e as 13 linhas de luz previstas para funcionamento em 2021. Essa quantia está sendo financiada pelo Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC, 2019).

Com o Sirius, os pesquisadores poderão realizar estudos com tecnologia avançada em diversas áreas, como saúde, energia, tecnologia, agricultura e meio ambiente. Será possível até realizar experimentos que nunca foram feitos em outra parte do mundo, por exemplo, a intensão de se fazer prováveis imagens tomográficas de uma célula. O diretor geral do Sirius também explica que será possível analisar o cérebro de acordo com estímulos que recebe ou doenças que possui. Assim doenças degenerativas ou problemas ligados ao cérebro poderão ser entendidos (SOUZA, 2018).

Como efeito de comparação, o Sirius irá possuir energia duas vezes maior e emitância cerca de 360 vezes menor que a do UVX. Isso vai, como consequência, permitir que se tenham raios X capazes de penetrar materiais muito mais espessos, com profundidade de até alguns centímetros, o que seria impossível para o UVX. Essa penetração será primordial para o estudo de metais, além de concreto e de rochas, o que fará ter impacto positivo, por exemplo, em análises da camada pré-sal. Além dessa penetração, o foco extremamente concentrado do feixe de raios-X, será muitíssimo importante na realização de experimentos em nanociência e biotecnologia (CNPEM, 2014).

Um projeto como o Sirius exigiu uma série de desenvolvimento de alta tecnologia, desde a parte civil, com uma construção extremamente sofisticada, até todos os componentes dos aceleradores e linhas de luz. Enormes desafios tiveram que ser enfrentados e vencidos. Assim como para o UVX, buscou-se o máximo de parcerias com empresas brasileiras. O fato de adquirir equipamentos fornecidos por essas empresas gerou, portanto, impacto na cadeia tecnológica do país. Estima-se que 85% dos gastos do projeto ficaram no país, distribuídos por tais empresas.

O Sirius é um projeto estruturante para o Brasil. Ele vai fornecer para a comunidade científica o que há de mais moderno em questão de análise de materiais. Sendo um dos equipamentos mais modernos do mundo, permitirá que toda a comunidade brasileira, nas mais diversas áreas, tanto acadêmicas quanto industriais, possam realizar seus experimentos e pesquisas. Pode-se dizer, então, que a “ciência de Síncrotron” no Brasil, e na América Latina foi construída do zero e atingiu um nível de maturidade que permite hoje, de fato, competir com qualquer outro país.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho objetivou contribuir com a disseminação da história de alguns aceleradores de partículas, para que proporcionasse ao leitor, em uma linguagem simples, uma visão geral de como se deu a evolução dessas máquinas em termos de tecnologia e de energia. Procuramos entender a história de construção também, desde os primeiros aceleradores, já construídos para serem usados de forma experimental, até os mais potentes que estão em funcionamento hoje. Este trabalho vem tentar preencher parte da lacuna existente no que diz respeito à escassez de fontes, em língua portuguesa, que tratem do desenvolvimento histórico dos aceleradores de partículas.

Através do desenvolvimento deste trabalho, é possível perceber o quão importante foi o processo de evolução dos aceleradores de partículas para a humanidade. A busca por energias mais elevadas esbarrava no problema dos altos custos. Para reverter a situação, uma nova tecnologia era desenvolvida, a contratação de célebres que resolveria o problema era efetivada. Novas tecnologias produziam resultados, às vezes, imprevistos. Isso exigia adaptação, correções, reinterpretação da Física envolvida.

Além de importantes descobertas científicas, tais como a descoberta do bóson de Higgs no LHC, as consequências do desenvolvimento tecnológico relacionados às pesquisas em Física fundamental também se mostram presentes. Vários aspectos tecnológicos foram derivados: tratamentos contra o câncer, fabricação de radiofármacos, potentes ímãs usados em aparelhos de ressonância magnética, a *world wide web*. Além disso, uma enorme quantidade de pessoas foi treinada em áreas de ponta. É possível que, posteriormente, muitas dessas pessoas utilizaram seus conhecimentos em outros setores. O impacto, na sociedade, desses recursos humanos de altíssimo nível formados em Física de altas energias é difícil de medir, mas certamente é grande. Mesmo assim, infelizmente, alguns entraves econômicos e políticos dificultaram o progresso de desenvolvimento de algumas máquinas. Projetos atrasaram e outros nem chegaram a ser concluídos, mesmo com vários anos de planejamento.

O poder de competitividade de um país no mundo, aliado a posse de certa tecnologia também se fez presente ao longo do desenvolvimento deste trabalho. A competição pela fronteira das altas energias, a possibilidade de proporcionar a realização de um experimento em condições que não haveria em outro lugar estimulava a criação e desenvolvimento de máquinas cada vez mais potentes com tecnologias inovadoras. Nota-se que mesmo com tal

competição, havia entre alguns laboratórios, certas vezes, companheirismo quando se tratava de compartilhar novas ideias e invenções, objetivando o avanço da ciência.

Não só a participação conjunta de cientistas ou instituições é importante, mas também a colaboração entre países. Vimos que de uma dessas colaborações surgiu o maior laboratório de Física de partículas do mundo, o qual explorou projetos que acabaram se expandindo, trazendo grandes benefícios para sociedade.

Por fim, percebe-se também que as impressões e atitudes que a sociedade tem a respeito da ciência, muitas vezes, são equivocadas. Que a falta de conhecimento científico, a ignorância e a maneira como informações são passadas, podem gerar preocupação e medo na sociedade, causando uma negatividade sobre a ciência e a figura científica. De maneira complementar, perspectivas para futuros trabalhos podem ser direcionadas no sentido da realização de estudos detalhados sobre alguns desses aceleradores vistos, abrangendo desde sua parte técnica, considerando conceitos físicos, até suas principais contribuições e aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M. C. **O discreto charme das partículas elementares**. Editora da UNESP (FEU). Praça de sé, 108. São Paulo SP

A. FASSÔ, K. GOEBEL, M. HÔFERT, G. RAU, H. SCHÔNACHER, G.R. STEVENSON, A.H. SULLIVAN, W. P. S. AND J. W. N. T. Radiation problems in the design of the large electron-positron collider (LEP). n. March, 1984.

ADAMS, J. et al. Intersecting Storage Rings bow out. 1981.

AGUIAR, R. S. DE. **Projeto Sirius : como a mídia retrata a construção da mais cara e complexa infraestrutura científica do país**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINA, 2018.

ARRUDA, S. M.; VILLANI, A. SOBRE AS ORIGENS DA RELATIVIDADE ESPECIAL : RELAÇÕES ENTRE QUANTA E RELATIVIDADE EM 1905. **Cad.Cat.Ens.Fis**, v. 13, p. 32–47, 1996.

BBC NEWS. **Girl suicide “over Big Bang fear”**. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/7609631.stm>>. Acesso em: 4 abr. 2019.

BERNARDES, J. **Leon Lederman trouxe avanços para estudo de partículas elementares**. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/leon-lederman-trouxe-avancos-para-estudo-de-particulas-elementares/>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

BOYCE D. MCDANIEL, A. S. **Robert rathbun wilson 1915–2000**. [s.l: s.n.]. v. 80

BRUM, J. A.; MENEGHINI, R. O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. **São Paulo em Perspectiva**, v. 16, n. 4, p. 48–56, 2005.

CARUSO, F.; CARVALHO, B.; SANTORO, A. **A FÍSICA DE ALTAS ENERGIAS E A TERAPIA DE CÂNCER COM PRÓTONS: MOTIVAÇÕES E PERSPECTIVAS**, 2000. (Nota técnica).

CASTRO, M. **Study of ATLAS sensitivity to the single top s-channel production.** [s.l: s.n.].

CERN. Proton synchrotron. **CERN annual report 1959**, n. November, 1959.

CERN. Fifty years of research at CERN. n. September 2004, 2006.

CERN. **The Proton Synchrotron.** Disponível em: <<https://home.cern/science/accelerators/proton-synchrotron>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

CERN ACCELERATING SCIENCE. **large-electron-positron-collider @ home.cern.** Disponível em: <<https://home.cern/science/accelerators/large-electron-positron-collider>>. Acesso em: 3 abr. 2019.

CHOI, H. A Brief History of Bargaining. **Ssrn**, n. September, 2015.

CLEMENTE, R. **A World Wide Web completa 25 anos.** Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2014/03/11/tecnologia/1394554623_973239.html>. Acesso em: 14 jun. 2019.

CNPEM. **Projeto Sírius: a nova fonte de luz síncrotron brasileira.** Campinas: [s.n.].

CRISTIANO, E. et al. CERÂMICAS SUPERCONDUTORAS: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES. 2017.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA NUCLEAR. **Acelerador Pelletron.** Disponível em: <<http://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/acelerador-pelletron>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

DEPARTMENT OF ENERGY'S. Alternating Gradient Synchrotron Complex. **Brookhaven National Laboratory**, p. 11973, 1991.

DUDLEY, J. T. The Super Proton Synchrotron (SPS): A Tale of Two Lives. In: [s.l: s.n.]. p.

180–191.

ELLIS, J. et al. Review of the safety of LHC collisions. **Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics**, v. 35, n. 11, 2008.

ENGLISH, T. **The USA's Super Collider Lies Abandoned in the Texas Desert**. Disponível em: <<https://interestingengineering.com/usas-super-collider-lies-abandoned-texas-desert>>. Acesso em: 9 abr. 2019.

EPTV. **Sirius: 1ª etapa da maior estrutura científica do País será inaugurada nesta quarta; veja números**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2018/11/13/sirius-1a-etapa-da-maior-estrutura-cientifica-do-pais-sera-inaugurada-nesta-quarta-veja-numeros.ghtml>>.

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH. **A Nobel discovery**. Disponível em: <<https://public-archive.web.cern.ch/public-archive/en/Research/UA1-UA2-en.html>>. Acesso em: 2 abr. 2019.

EUROPEAN PHYSICAL SOCIETY. **distinction_sitesSC @ www.eps.org**. Disponível em: <https://www.eps.org/page/distinction_sitesSC#>. Acesso em: 26 mar. 2019.

EVANS, L. Third John Adams Memorial Lecture THE PROTON-ANTIPROTON COLLIDER Lecture delivered at CERN on 25 November 1987. n. November 1987, 1988.

FERMILAB. Fermilab's Tevatron. n. June, 2012.

FIGUEREDO, M. V. **PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UMA REDE DE MICROONDAS PARA ALTA POTÊNCIA**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2002.

FLORIO, V. Oscar Sala e o diálogo da ciência. **Ciência e Cultura**, v. 62, p. 30–32, 2010.

FRAZÃO, D. **Biografia de Ernest Rutherford**. Disponível em: <https://www.ebiografia.com/ernest_rutherford/>. Acesso em: 30 mar. 2019.

GRUNDHAUSER, E. **Desertron: The Superconducting Super Collider**. Disponível em: <<https://www.atlasobscura.com/places/superconducting-super-collider>>. Acesso em: 9 abr. 2019.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 8. ed. [s.l.: s.n.].

HÜBNER, K. The CERN intersecting storage rings (ISR). **European Physical Journal H**, v. 36, n. 4, p. 509–522, 2012.

HUGH D. YOUNG, R. A. F. **Física III Eletromagnetismo**. 12. ed. [s.l.] São Paulo, 2009.

INSTITUTO DE FÍSICA. **História dos aceleradores no LAL**. Disponível em: <<http://portal.if.usp.br/microtron/pt-br/node/348>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

JOHNSEN, K. CERN Intersecting Storage Rings (ISR). v. 70, n. 2, p. 619–626, 1973.

KRIGE, J. **Chapter 1 CERN from the mid-1960s to the late 1970s**. [s.l.] Elsevier B.V., 1996. v. 3

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. **PROJETO E CONSTRUÇÃO**. Disponível em: <<https://www.lnls.cnpm.br/o-lnls/projeto-e-construcao/>>. Acesso em: 30 abr. 2019a.

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. **ACELERADORES**. Disponível em: <<https://www.lnls.cnpm.br/uvx/aceleradores/>>. Acesso em: 30 abr. 2019b.

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. **HISTÓRIA DO PROJETO SIRIUS**. Disponível em: <<https://www.lnls.cnpm.br/sirius/historia-sirius/>>. Acesso em: 8 maio. 2019c.

LAMARÃO, S. **Pesquisa científica e circulação do conhecimento: Gleb Wataghin e a constituição do campo da física no Brasil**, 2016.

LEANDRO DA CONCEIÇÃO LUIZ, KEILA THAÍS DA SILVA MONTEIRO, R. T. B. Os aceleradores de partículas e sua utilização na produção de radiofármacos. **Revista Brasileira de Farmácia**, v. 92, n. 3, p. 90–95, 2011.

LEONHARDT, J. W. Industrial application of electron accelerators in G.D.R. **International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part**, v. 35, n. 4–6, p. 649–652, 1990.

MARTINS, M. N.; SILVA, T. F. Electron accelerators: History, applications, and perspectives. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, n. February, p. 78–85, 2014.

MCTIC. **Primeira volta de elétrons é alcançada no segundo acelerador de partículas do Sirius.** Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2019/03/Primeira_volta_de_eletrons_e_alcançada_no_segundo_acelerador_de_particulas_do_Sirius.html. Acesso em: 6 maio. 2019.

MENEZES, K. K. DE. **Interação da Radiação com a Matéria - Aceleradores e Proteção Radiológica**. [s.l: s.n.].

NINIO, M. **Aquecimento pára LHC por dois meses.** Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe2209200801.htm>. Acesso em: 6 abr. 2009.

OLIVEIRA JR, A. DE. A universidade como polo de desenvolvimento local/regional. **Caderno de Geografia**, v. 24, p. 1–12, 2014.

OVERBYE, D. Recalling a Fallen Star’s Legacy in High-Energy Particle Physics. 2011.

PEACH, K.; WILSON, P.; JONES, B. Accelerator science in medical physics. **British Journal of Radiology**, v. 84, n. SPEC. ISSUE 1, 2011.

PEDROSO, R. Representações da Guerra do Vietnã nas HQs do Capitão América. **Revista**

Contemporânea, v. 2, n. 8, p. 1–15, 2015.

PEREIRA, D. Oscar Sala e o desenvolvimento dos Aceleradores de partículas no Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 62, p. 28–29, 2010.

PETROFF, Y. Radiação de Síncrotron no Brasil UVX e Sirius. **Ciência e Cultura**, v. 69, n. 3, p. 18–22, 2017.

PIMENTA, J. J. M. et al. O bóson de Higgs. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 2, p. 1–14, 2013.

PLASS, G. The CERN proton synchrotron: 50 years of reliable operation and continued development. **From the PS to the LHC - 50 Years of Nobel Memories in High-Energy Physics**, v. 454, n. 2011, p. 29–47, 2012.

R. ROSENFELD. **O cerne da matéria. A aventura científica que levou à descoberta do bóson de higgs**. [s.l: s.n.].

RABELO, L. A. **PROJETO ELETROMAGNÉTICO DE UM PÓS-ACELERADOR PROJETO ELETROMAGNÉTICO DE UM PÓS-ACELERADOR**. [s.l: s.n.].

RAUEN, C. V. **O PROJETO SIRIUS E AS ENCOMENDAS TECNOLÓGICAS PARA A CONSTRUÇÃO DA NOVA FONTE DE LUZ**, 2016.

RHODES, C. J. Large Hadron Collider (LHC). **Science Progress**, v. 96, n. 1, p. 95–109, 2013.

RINCON, P. **Cern lab goes “colder than space”**. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7512586.stm>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

RINCON, P. **Tevatron atom smasher shuts after more than 25 years**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/science-environment-15079119>>. Acesso em: 11 abr. 2019.

RINCON, P. **Work starts to upgrade Large Hadron Collider**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/science-environment-44484062>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

RIOS, F. J. et al. Estudos por μ XRF-Sincrotron de fluidos mineralizadores detectados em minérios uraníferos, ferríferos e depósitos epitermais. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 4, p. 373–377, 2007.

ROGERS, J. D. **A HISTÓRIA DOS ACELERADORES NO BRASIL**, 1952.

RUSSO, A. **Chapter 4 The intersecting storage rings. The construction and operation of CERN's second large machine and a survey of its experimental programme**. [s.l.] Elsevier B.V., 1996. v. 3

SÁ, N. **Uma-breve-introdução-ao-complexo-de-aceleradores-do-CERN---A-Organização-Europeia-para-Pesquisa-Nuclear @ petfisciau.wixsite.com**. Disponível em: <<https://petfisciau.wixsite.com/petfisciau/el/single-post/2017/02/06/Uma-breve-introdução-ao-complexo-de-aceleradores-do-CERN---A-Organização-Europeia-para-Pesquisa-Nuclear>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

SALMERON, R. Aula de Física. **Pesquisa FAPESP**, 2014.

SANTOS, C. O sincrocíclotron do CNPq: da concepção ao abandono. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 1607, p. 1–21, 2013.

SAULT, S. **The Abandoned Texas Superconducting Super Collider: Colossal Expense Can Cause Colossal Failure**. Disponível em: <<https://texashillcountry.com/abandoned-texas-superconducting-super-collider/>>. Acesso em: 9 abr. 2019.

SAVIGNANO, V. **História do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – parte 1. O sonho de uma grande máquina de pesquisa no Brasil e os passos prévios à construção do laboratório**. Disponível em: <<https://www.sbpmat.org.br/pt/historia-do-laboratorio-nacional-de-luz-sincrotron-parte-1-o-sonho-de-uma-grande-maquina-de-pesquisa-no-brasil-e-os-passos-previos-a-construcao-do-laboratorio/>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

SCHWARTZMAN, S. 8 - Modernização do Pós-Guerra. **Um Espaço Para a Ciência Formação Da Comunidade Científica No Brasil**, n. Tabela 9, p. 1–16, 2001.

SILVA, C. G. DA. The National Laboratory for Synchrotron Light. The BRAZIL EXPERIENCE. p. 10–15, 1996.

SMITH, C. L. How the LHC came to be. **Nature**, v. 448, n. 7151, p. 281–284, 2007.

SOUZA, F. **Sirius: As mentes por trás do maior acelerador de partículas do Brasil**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-45335690>>. Acesso em: 8 maio. 2019.

STEERE, A. **A Timeline of Major Particle Accelerators**. [s.l: s.n.].

TAYLOR, T.; TREILLE, D. The Large Electron Positron Collider (LEP): Probing the Standard Model. p. 217–261, 2017.

TSESMELIS, E. **CERN, Ciência para a paz**, 2018.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE. **Tevatron shuts down, but analysis continues**. Disponível em: <<http://news.fnal.gov/2011/09/tevatron-shuts-analysis-continues/>>. Acesso em: 22 fev. 2019.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE. **Accelerator**. Disponível em: <<http://www.fnal.gov/pub/tevatron/tevatron-accelerator.html>>. Acesso em: 13 mar. 2019a.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE. **The Tevatron: 28 years of discovery and innovation**. Disponível em: <<http://www.fnal.gov/pub/tevatron/>>. Acesso em: 13 mar. 2019b.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE. **The Birth of Fermilab**. Disponível em: <<http://50.fnal.gov/the-birth-of-fermilab/>>. Acesso em: 8 mar. 2019a.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY OFFICE OF SCIENCE. **main_ring @ history.fnal.gov**.

Disponível em: <https://history.fnal.gov/main_ring.html>. Acesso em: 11 fev. 2019b.

U, A. The 400 GeV proton synchrotron. **Publications Section**, v. 23, p. 1–7, 1976.