

A Física de Altas Energias

Wagner de Paula Carvalho (UERJ)

1/3/2023



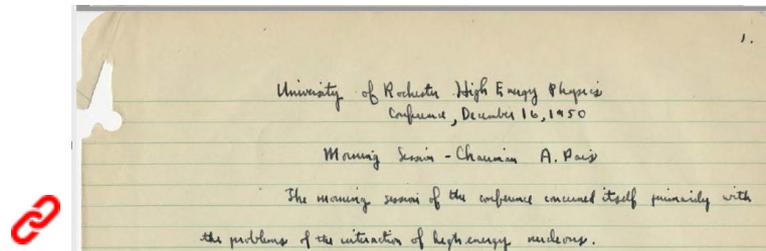
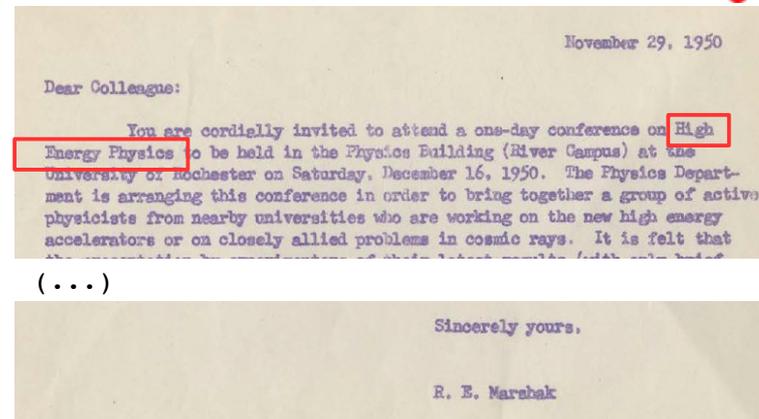
LISHEP 2023, Sessão A – 1 a 3 de março de 2023

O que é a Física de Altas Energias?

Esta é a denominação atual para a área de pesquisa que estuda a **Física das Partículas Elementares e das Interações Fundamentais da Natureza**.

O termo em inglês *high energy physics* (HEP) começa a ser usado por volta de 1950.

Um exemplo é na **First Rochester Conference** que reuniu um seleto grupo de cientistas na Universidade de Rochester em 16 de dezembro de 1950.

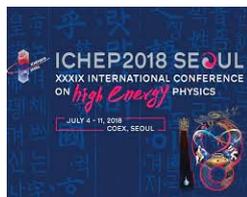


carta convite

proceedings

O que é a Física de Altas Energias?

A conferência de Rochester deu origem à [International Conference on High Energy Physics \(ICHEP\)](#) que é realizada bienalmente e é uma das mais prestigiosas na área.



O que é a Física de Altas Energias?

O termo **altas energias** está relacionado à energia disponível para produzir novas partículas.

Pela teoria da relatividade de Einstein, existe uma equivalência entre massa e energia:

$$E = mc^2$$

Esta equivalência se manifesta nas reações entre partículas subatômicas, possibilitando a criação de novas partículas a partir da energia cinética das partículas que interagem.

Um exemplo é a reação:

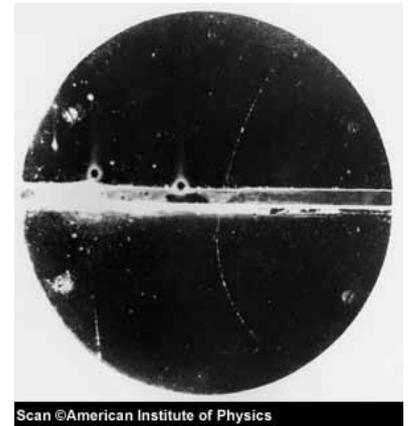


O que é a Física de Altas Energias?

A primeira partícula elementar, na concepção moderna do termo, a ser descoberta, foi o **elétron** em 1897.

Com a descoberta do **nêutron** em 1932, juntando-se ao elétron e o **próton**, todas as partículas que compõem a matéria ordinária passavam a ser conhecidas, assim como o **fóton**, responsável pela interação eletromagnética que mantém os elétrons ligados ao núcleo do átomo.

No mesmo ano de 1932, contudo, uma nova partícula é descoberta em um experimento com o objetivo de estudar a **radiação cósmica**: o **pósitron**, que tem a mesma massa que o elétron, mas carga elétrica positiva, sendo justamente a **antipartícula** do elétron.

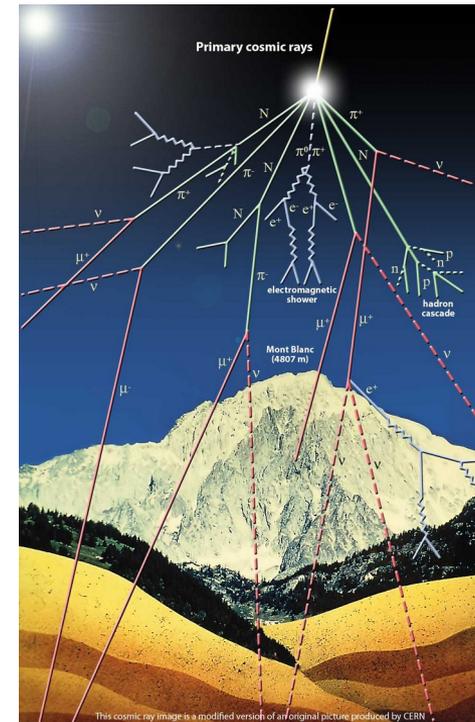


O que é a Física de Altas Energias?

Nos anos que se seguiram, novas partículas foram descobertas em experimentos de raios cósmicos.

Até meados da década de 1940, os raios cósmicos eram a única fonte de partículas suficientemente energéticas para produzir outras partículas.

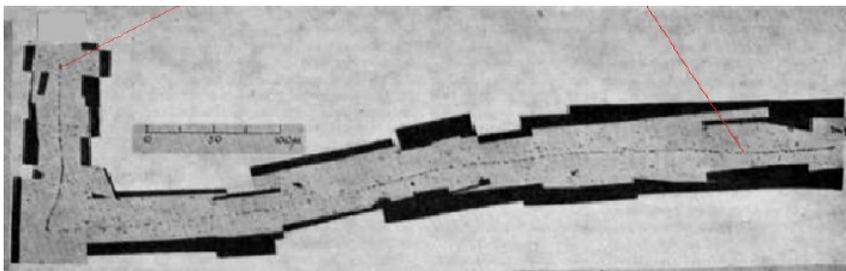
Embora, nessa época, já houvessem sido desenvolvidos **aceleradores de partículas** (ver apresentação do **Prof. Luiz Mundim**), estes ainda não eram capazes de acelerar partículas até as energias requeridas para a criação de novas partículas.



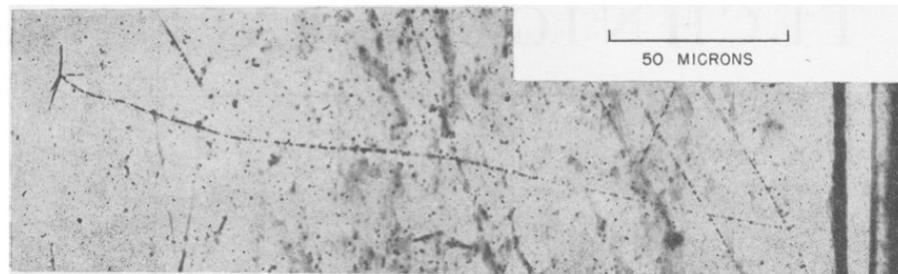
O que é a Física de Altas Energias?

Os físicos, porém, já haviam percebido a necessidade de construir aceleradores que pudessem atingir maiores energias e, na segunda metade da década de 1940, começaram a surgir novas máquinas capazes de cumprir este objetivo.

Em 1948, **píons** foram **produzidos e observados pela primeira vez em laboratório**, usando o **cíclotron** da UC em Berkeley. Esta partícula havia sido descoberta no ano anterior através da análise de emulsões fotográficas expostas aos raios cósmicos.



raios cósmicos (1947)



cíclotron (1948)

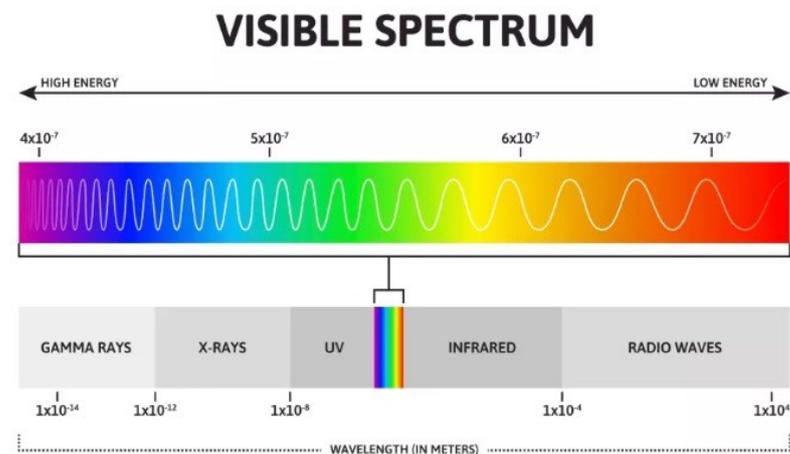
O que é a Física de Altas Energias?

Além de propiciar as condições para a criação de mais partículas, o aumento da energia dos aceleradores permite investigar dimensões cada vez menores.

Pela relação de de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Portanto, quanto maior for a energia/momento da partícula, menor será o comprimento de onda a ela associado e a dimensão espacial que pode ser sondada.



relação energia vs. comprimento de onda para **fótons**

O que é a Física de Altas Energias?

Assim, podemos afirmar que o advento dos aceleradores de altas energias na virada da década de 1940 para 1950, inaugura a chamada Física de Altas Energias!

Desde então, temos assistido ao constante desenvolvimento e aumento da energia dos aceleradores, e a evolução dos sistemas de detecção de partículas e construção de experimentos cada vez mais complexos.

Aceleradores e Detectores

A atividade experimental em Física de Altas Energias envolve dois componentes fundamentais:

- um sistema para acelerar e produzir colisões entre partículas
- um sistema para detecção dos produtos das colisões

Complementarmente a estes, há outros elementos, como:

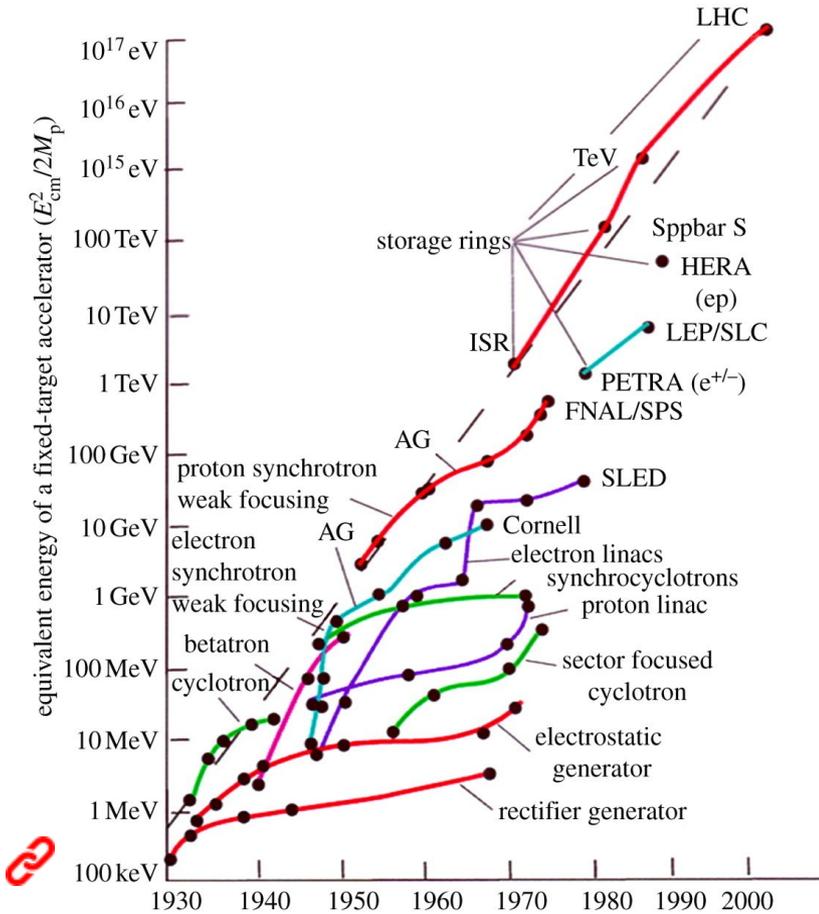
- a infraestrutura computacional
- sistemas eletrônicos para aquisição de dados
- outros serviços técnicos e de engenharia para suporte à operação do acelerador e sistema de detecção

Aceleradores e Detectores

Nesta sessão da LISHEP, haverá apresentações dedicadas aos **Aceleradores de Partículas** (Prof. Luiz Mundim) e aos **Detectores de Partículas** (Prof. Helio Nogima).

Por esta razão, nesta apresentação serão abordados apenas alguns aspectos mais genéricos sobre estes temas, e que sirvam para ilustrar as características mais gerais dos empreendimentos experimentais na Física de Altas Energias.

Aceleradores e Detectores



No que diz respeito aos aceleradores, há uma ampla variedade deles, que podem ser organizados em diferentes categorias:

- eletrostáticos ou “eletromagnéticos”
- lineares ou “circulares” (órbita fechada)
- feixes de partículas: elétrons (e), hádrons (p, alfa, núcleos), p-p, p- \bar{p} , e⁺e⁻, e-p

A energia dos aceleradores tem aumentado de forma constante ao longo dos anos (um fator de 10 a cada 7 anos, aproximadamente), fato evidenciado no diagrama ao lado.

Aceleradores e Detectores

Dentre os aceleradores atualmente em operação, podemos destacar:

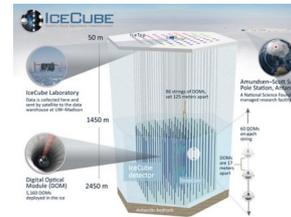
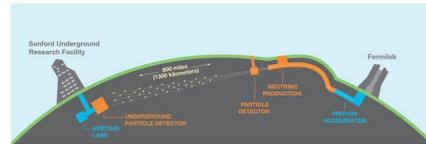
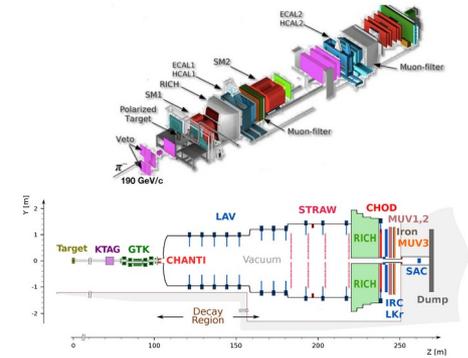
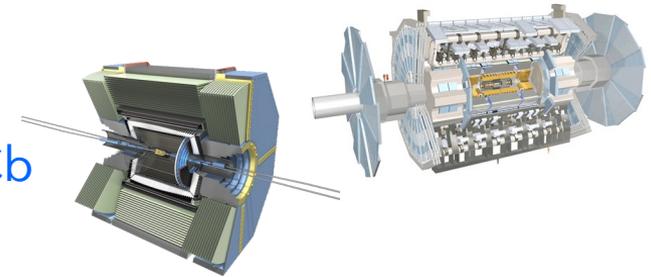
- **Main Injector**, Fermilab (EUA): feixes de prótons e antiprótons para experimentos dedicados ao estudo dos neutrinos
- **SuperKEKB**, KEK (Japão) e **BEPC II** (China): colisores e^+e^-
- **LHC**, CERN (Suíça): colisor p-p, p-A, A-A



Aceleradores e Detectores

Quanto aos detectores, ou também chamados espectrômetros, uma possível divisão em categorias é a seguinte:

- Detectores em anéis colisores: **ALICE**, **ATLAS**, **CMS** e **LHCb** no LHC, **Belle II** no KEK, **BES III** no BEPC II.
- Detectores de alvo fixo: **COMPASS** e **NA62** no SPS/CERN
- Detectores de neutrinos: **IceCube**, **DUNE**, ...



Grandes Laboratórios

CERN

Maior laboratório para pesquisa em Física de Altas Energias no mundo. Opera o maior e mais poderoso acelerador já construído, o **LHC** (Large Hadron Collider).

Suas origens remontam ao ano de 1949, mas foi **oficialmente estabelecido em 1954**, próximo à cidade de Genebra, na Suíça.

Sua missão é descrita [aqui](#), e pode ser resumida em:

- realizar pesquisa de primeira classe (*world-class*) em física fundamental;
- prover uma estrutura de aceleradores de partículas que possibilitem pesquisas na fronteira do conhecimento humano;
- unir os povos através da ciência;
- treinar novas gerações de físicos, engenheiros e técnicos, e difundir os valores da ciência e tecnologia para a sociedade.



O acrônimo CERN vem de *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, termo atribuído ao conselho estabelecido em uma reunião da Unesco em 1951. Dada a evolução ocorrida da pesquisa em física nuclear em direção à física de partículas, hoje é mais frequentemente denominado **Laboratório Europeu para a Física de Partículas**.

Um curto vídeo (em inglês) sobre o CERN pode ser acessado clicando no ícone ao lado



Grandes Laboratórios

CERN

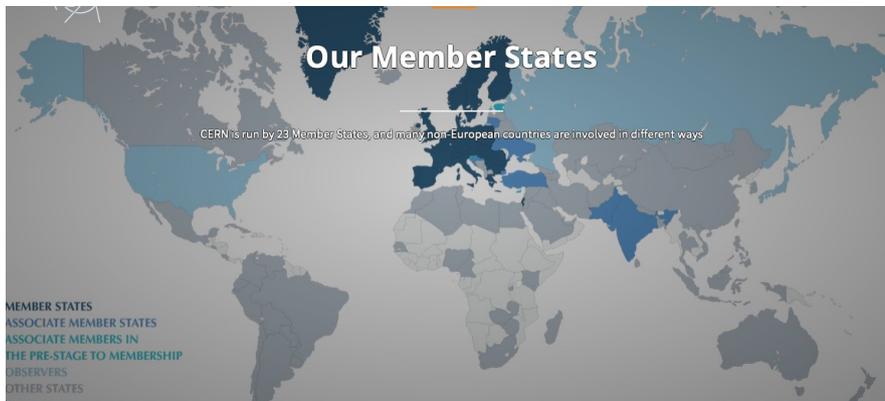


Governança

- I Conselho do CERN (auxiliado por um Comitê de Política Científica e um Comitê Financeiro)
- II Diretor Geral e Directorado
- III Chefes de Departamentos

Filiação

- I Países Membros: obrigações e privilégios diferenciados; compartilham a maior parte dos custos de operação e são responsáveis por todas as decisões importantes que afetam a organização.
- II Países Associados
- III Países Observadores
- IV Países Não-Membros (status atual do **Brasil**)



Grandes Laboratórios

CERN



Em Números

- 23 países membros, 10 países associados, 2 países e 2 organizações internacionais observadores e aproximadamente 50 países não-membros com acordos de cooperação assinados com o CERN, além de cerca de 20 outros países com os quais são mantidos contatos científicos
- Mais de 600 instituições e universidades ao redor do mundo usam as instalações do CERN
- Em torno de 2500 membros contratados do CERN envolvidos em projeto, construção e operação de infraestrutura de pesquisa
- Vasta comunidade de usuários do CERN, dentre estes, mais de 12000 cientistas de mais de 100 nacionalidades
- Orçamento em 2022: ~CHF 1,4 bilhões (≈ US\$ 1,4 bilhões)

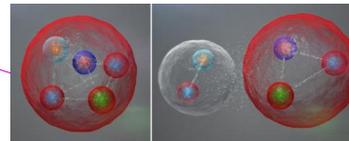
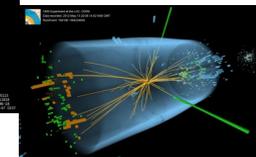
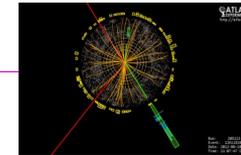
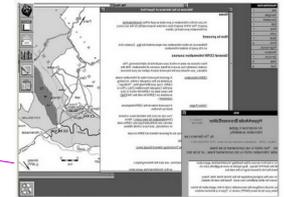
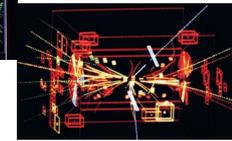


CERN



Marcos Científicos e Tecnológicos

- Primeira observação de um **anti-núcleo**, o anti-deutério (1965)
- Desenvolvimento da **câmara multi-fios proporcional** (1968)
- Desenvolvimento de uma **tela capacitiva sensível a toque** (1972)
- Descoberta das **correntes fracas neutras** (1973)
- Descoberta dos **bósons W e Z** (1983)
- Determinação do **número de famílias de neutrinos leves** (1989)
- Primeiro servidor e website entram em funcionamento, **nascimento da WWW** (1990)
- Criação de átomos de **anti-hidrogênio** (1995)
- Descoberta do **plasma de quarks e gluons**, um novo estado da matéria (2000)
- Descoberta do **bóson de Higgs** (2012)
- Descoberta de estados de **pentaquarks** (2015)



Grandes Laboratórios

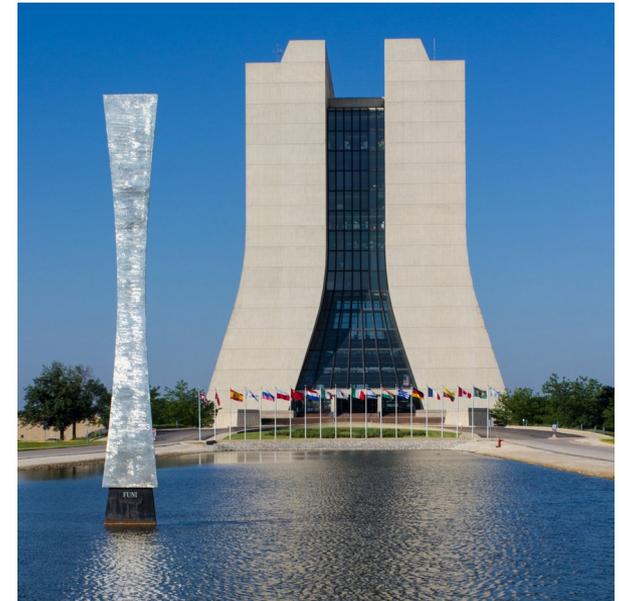
Fermilab

Maior laboratório para pesquisa em Física de Altas Energias nos EUA.

Fundado em 1967 com o nome de *National Accelerator Laboratory*, é localizado próximo à cidade de Chicago, no estado de Illinois.

Nele operou até 2011 o **Tevatron**, maior acelerador de partículas até a entrada em funcionamento do LHC. Com 6,28 km de circunferência, foi o primeiro a usar **magnetos supercondutores** para acelerar prótons e antiprótons, o que permitiu superar a barreira de 1 TeV de energia de centro de massa nas colisões $p\text{-}\bar{p}$.

Após o encerramento da operação do Tevatron, o Fermilab redirecionou seu programa de pesquisa fundamental para a física de neutrinos, com destaque para o futuro experimento **LBNF/DUNE**.



Grandes Laboratórios

Fermilab



Sua missão atual é impulsionar descobertas :

- construindo e operando aceleradores e detectores de partículas de fronteira;
- realizando pesquisas de ponta com parceiros nacionais e globais;
- desenvolvendo novas tecnologias para ciência que dêem apoio à competitividade industrial do país.



Contribui ativamente para o experimento CMS no CERN, sendo sede para o consórcio USCMS de instituições estadunidenses que participam do experimento.

Mantém, ainda, um importante centro regional, o *LHC Physics Center* (LPC) e a *maior unidade de computação para o CMS fora do CERN*.

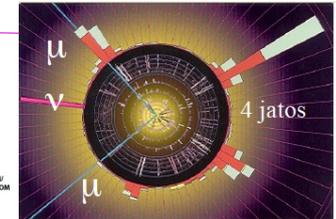
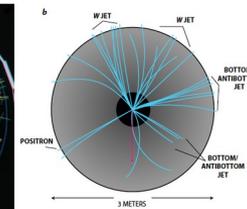
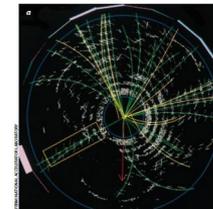
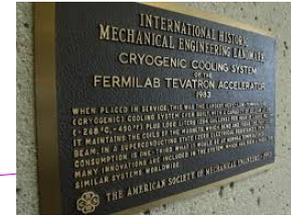


Fermilab



Marcos Científicos e Tecnológicos

- Descoberta do **quark bottom** (1977)
- Entrada em operação do Tevatron, primeiro supersíncrotron a usar magnetos supercondutores (1983)
- Descoberta do **quark top** (1995)
- Observação de **violação direta da simetria CP em decaimentos de káons** (1999)
- Descoberta do **neutrino do tau** (2000)
- Descoberta do **bárion Ω_b** (2008)



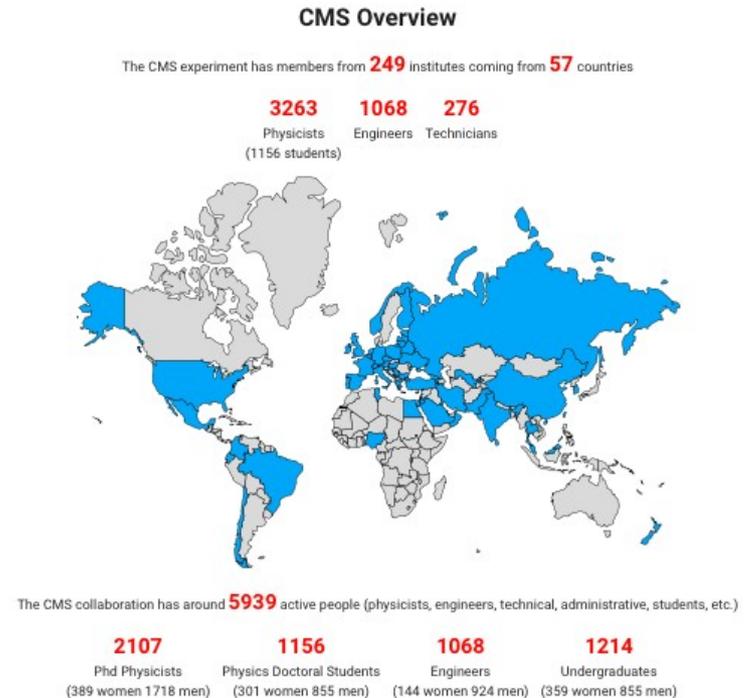
Grandes Colaborações Internacionais

Os experimentos modernos em Física de Altas Energias demandam grandes equipes para sua consecução, envolvendo **centenas ou até milhares** de físicos, engenheiros, cientistas de computação e outros profissionais.

Como exemplo, nas colaborações internacionais responsáveis por gerir e operar os 4 grandes experimentos do LHC, os números aproximados são:

- ALICE e LHCb: ~**2000** membros
- ATLAS e CMS: ~**6000** membros

A figura ao lado mostra a “demografia” da colaboração CMS, detalhada em algumas categorias.



Grandes Colaborações Internacionais

Gerir e operar colaborações dessa magnitude, demanda uma estrutura organizacional bastante complexa.

Para começar, as colaborações são regidas por **constituições** definidas quando de sua formação, e que estabelecem seus mecanismos e regras de funcionamento e organização.

Estruturas organizacionais típicas existentes nas grandes colaborações internacionais:

- **Administrativa**: conselhos de administração, executivo, financeiro, de representantes das instituições, de publicações, de conferências
- **Operacionais**: coordenações técnica, de tomada de dados, de física
- **Subsistemas**: diferentes subsistemas que compõem o experimento, por exemplo, sistema de trajetografia, calorimetria, detecção de múons, etc.
- **Tópicos de Análise**: por exemplo, modelo padrão, supersimetria, Higgs, etc.

Repositórios e Fontes de Informação em HEP

Uma vasta quantidade de informações sobre a física de partículas encontra-se hoje disponível online.

A parte os periódicos científicos, algumas das mais relevantes são:

- **PDG** (Particle Data Group): <https://pdg.lbl.gov>
- **INSPIRE**: <https://inspirehep.net>
- **ArXiv**: <https://arxiv.org>
- **HEPData**: <https://www.hepdata.net>
- **ROOT**: <https://root.cern.ch>

Há muitos portais e sites com listas de links para fontes de informação sobre a área. Uma excelente compilação pode ser encontrada no repositório github [Online Particle Physics Information](https://github.com/particledatagroup/hep-resources):

<https://github.com/particledatagroup/hep-resources>

Caminhos Futuros para a Física de Altas Energias

Muitos estudos estão em andamento sobre futuros aceleradores e detectores que substituirão os atuais, e garantirão o contínuo avanço da área nas décadas por vir.

Estes estudos estão agrupados nos tópicos e subtópicos:

- **Fronteira de Energia**
 - **Colisores de léptons:** International Linear Collider (ILC), Compact Linear Collider (CLIC), Future Circular e^+e^- Collider (FCC-ee), Circular Electron Positron Collider (CepC), Cool Copper Collider (C³), Muon Colliders
 - **Colisores de hádrons e hádron/lépton:** Future Circular Collider - Hadron/Hadron (FCC-hh), Super Proton-Proton Collider (SPPC)
- **Aceleradores de Alta Intensidade para Pesquisa em Neutrinos e Processos Raros**
- **Tecnologias de Aceleração e Aceleradores Avançados**
 - **P&D em magnetos supercondutores**
 - **P&D em tecnologia de RF**
 - **P&D em alvos e fontes**
 - **Métodos avançados de aceleração**
- **Avanços em Física dos Feixes**

A Física de Altas Energias no Brasil

A moderna Física Experimental de Partículas no Brasil tem origem no grupo formado pelos pesquisadores [Alberto Santoro](#), [João dos Anjos](#) e [Moacyr Souza](#) do CBPF e [Carlos Escobar](#) (USP).

A convite do [Prof. Leon Lederman](#), Diretor do Fermilab, foram fazer um estágio de pesquisa de dois anos, entre 1984 e 1986, em um experimento de ponta no Fermilab, dando então início a uma frutífera colaboração com aquele laboratório.

Nos anos que se seguiram, muitos estudantes foram formados e titulados, nucleando vários dos grupos experimentais de Física de Altas Energias no Brasil.

Pode-se afirmar que essencialmente todos os grupos hoje atuando no país têm conexões com esse grupo pesquisadores. E, em particular, com o [Prof. Alberto Santoro](#), hoje professor titular aposentado na UERJ e emérito da FAPERJ. E, também, [diretor da LISHEP, que este ano faz 30 anos da sua primeira edição. Parabéns!!](#)