



.....

### Xabier Cid Vidal

Departamento de Física de Partículas,  
Universidade de Santiago, Santiago de  
Compostela, Espanha  
E-mail: xcidvidal@gmail.com

### Ramón Cid Manzano

Instituto de Ensino Secundario IES de  
Sar, Santiago de Compostela, Espanha  
e Departamento de Didáctica das  
Ciências Experimentais, Universidade  
de Santiago, Santiago de Compostela,  
Espanha  
E-mail: ramon.cid@usc.es

.....

O estudo dos fenômenos elétricos (fundamentalmente a eletrostática) nos primeiros níveis do ensino médio costuma apresentar dificuldades, fundamentalmente no que diz respeito ao conceito abstrato de carga elétrica e campo elétrico às unidades utilizadas, à equação de Coulomb - na que aparece uma constante que não é tal pois depende do meio - e aos exemplos pouco motivadores que habitualmente se utilizam. Neste artigo, apresenta-se uma proposta de ensino a qual pretende aproximar alunos e alunas da Electrostática através do LHC (Large Hadron Collider), o mais potente dos aceleradores de partículas e a maior máquina já construída pela ciência e a tecnologia, mediante a realização de uma série de atividades que relacionam o LHC com conteúdos relacionados à eletricidade. Graças à grande dimensão do experimento e à espetacularidade das instalações, podemos despertar um maior interesse por parte dos alunos e por tanto uma aprendizagem mais simples e significativa dos conceitos envolvidos. Ademais, isso permitirá aos alunos conhecer de uma forma contextualizada um dos maiores sucessos da ciência e tecnologia da história da humanidade, auxiliando-os assim na aquisição de uma verdadeira cultura científica.

**A** data de 19 de março de 2010 marca o dia em que feixes de prótons a 3.5 TeV de energia circularam perfeitamente no LHC (*Large Hadron Collider*) pela primeira vez. Esta foi a mais alta energia já alcançada em um acelerador de partículas e constituiu um importante passo para o começo do programa de investigação do LHC, que pretende chegar a energia de 7 TeV. No dia 30 de março, feixes de 3.5 TeV colidiram para um valor de energia total de 7 TeV, marcando o início do programa de investigação do LHC. Físicos de partículas de todo o mundo estão ansiosos pela nova física que começa a surgir a partir de uma energia três vezes e meia maior que a anteriormente alcançada em um acelerador de partículas. O LHC (ver Fig. 1) é o acelerador de partículas mais potente do mundo e dará lugar à maior quantidade de informação nunca antes obtida noutro experimento, esperando-se que revele algumas das grandes incógnitas que estão abertas em áreas como a natureza íntima da matéria, a criação do universo, a matéria escura, a energia escura, partículas exóticas, etc.

É habitual que nos livros-texto de física de Ensino Médio apareçam imagens ou se mencione o CERN para chamar atenção dos grandes aparatos utilizados, à grande quantidade de cientistas colaboradores ou aos experimentos de grande dimensão que nele se levam a cabo. Porém, elas não deixam de ser uma simples menção que se resume a um mero detalhe e não possuem transcendência didática.

Devido à grande repercussão e importância deste experimento, os professores

de física do Ensino Médio podem aproveitar este recurso para abordarem certos tópicos tanto da física clássica como da física moderna. Os autores deste artigo têm realizado várias propostas neste sentido para explicar alguns conteúdos como o magnetismo [1], a dinâmica [2] e a energia [3]. Também temos tratado outros aspectos mais específicos para introduzir ao professor tópicos da física de partículas, como a luminosidade [4] ou as partículas de Higgs [5]. Também fizemos uma aproximação teórica que explica o motivo de não haver perigo das colisões do LHC acabarem com nosso planeta [6]. Recolhemos boa parte de todos esses trabalhos e muitas outras informações adicionais no sítio "Olhando o LHC mais de perto": <http://www.lhc-closer.es> [7].

Trata-se, pois, de fazer coincidir dois importantes objetivos educativos: por um lado, facilitar a aprendizagem significativa de conceitos físicos de um modo contextualizado, e, por outro, adquirir conhecimentos sobre um dos experimentos científicos mais importantes da história.

### Justificativa teórica da estratégia

O ensino da física no Ensino Médio encontra-se na maioria dos casos limitada ao estudo dos conceitos clássicos, sem

**Físicos de partículas de todo o mundo estão ansiosos pela nova física que começa a surgir a partir de uma energia três vezes e meia maior que a anteriormente alcançada em um acelerador de partículas. O LHC é o acelerador de partículas mais potente do mundo e dará lugar à maior quantidade de informação nunca antes obtida noutro experimento**

abordar os avanços e descobrimentos mais atuais. Repassando as temáticas presentes no currículo de física, podemos observar que o maior peso recai no período anterior ao século XIX (Galileo, Newton e Boyle, por exemplo) e muito timidamente aparecem certas contribuições

do século XX relacionadas basicamente aos modelos atômicos (Thomson, Planck, Rutherford e Bohr). Estamos

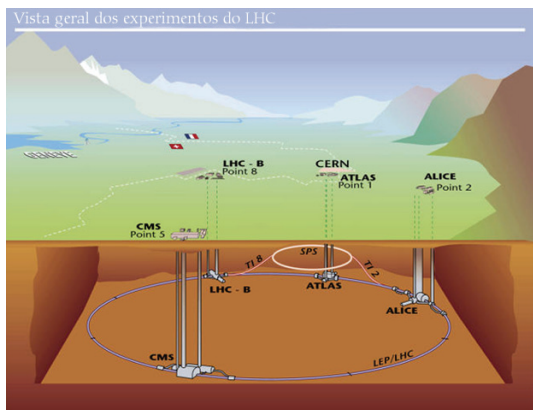


Figura 1 - Esquema do acelerador de partículas LHC, com 27 km de perímetro e a uma profundidade média de 100 m por debaixo da fronteira franco-suíça.

falando de feitos e logros situados muito longe no tempo, algo particularmente negativo do ponto de vista dos adolescentes (para os quais, o que aconteceu antes do seu nascimento é “pré-história”). Se além disso a apresentação da matéria vai acompanhada dos tradicionais exemplos e problemas descontextualizados, podemos afirmar que acabamos por ficar presos no tempo e os estudantes ficarão atônitos ante as imagens televisivas ou notícias jornalísticas relacionadas à ciência contemporânea que são apenas mencionadas em aula.

Um professor de física deve estar consciente da direção para a qual se dirige a investigação da sua área de conhecimento, para poder por seus alunos em contato com perspectivas de desenvolvimento da física atual. Ele tem, portanto, a obrigação de levar à aula os avanços e acontecimentos mais atuais.

Vários estudos [8] evidenciam que existe um grande desinteresse dos discentes face aos estudos científicos. O ensino usual da ciência é o responsável, junto à imagem e valorização negativa desta e o tema do gênero, pela diminuição do número de alunos que cursam o Ensino Médio, bem como das matérias optativas e em particular pela grande porcentagem de alunos que abandonam a física.

O ensino habitual da física leva todos estes aspectos em conta, centrando-se naqueles mais conceituais e propedêuticos ao mesmo tempo que ignora outros que, segundo a investigação em didática [9], conseguiriam aumentar a motivação nos alunos e seu interesse pelas ciências com um tratamento mais experimental, mais contextualizado, que ajuda a resolver problemas atuais reais e a responder perguntas fundamentais.

Além disso, a existência de uma valo-

rização social negativa da ciência dá lugar a que os estudantes tenham uma imagem negativa da mesma (pouco interessante, difícil, entediante, destinada apenas para os gênios, etc.) e no caso da física em particular, de suas repercussões perigosas à sociedade e ao meio ambiente: contaminação, armamentos, energia nuclear, etc. Se a isto somarmos que a presença de mulheres na ciência, ao longo da história, ainda que existente, foi escassa (embora esta diferença esteja desaparecendo nos dias de hoje), enfrentamos um problema ainda da visibilidade de suas contribuições ao campo das ciências. O resultado que vimos de tudo isto é a evasão progressiva por

parte dos alunos, particularmente do sexo feminino, ao estudo das ciências em geral e da física em particular [10].

Por tudo o que foi exposto anteriormente, é necessária a utilização de um recurso que tome em consideração esta situação. Com esta ação pretendemos que os professores se comprometam com o conhecimento e a docência de uma parte da física importante e atual, conseguindo além disso que os alunos relacionem a física ensinada em sala de aula com aquilo que os físicos fazem nos dias correntes. Para tanto, o LHC é um exemplo perfeito para estudar conceitos relacionadas com grandezas elétricas, pois a carga e o campo elétrico são conceitos fundamentais e as partículas carregadas as protagonistas de todo o experimento.

Não estamos tratando aqui daquilo que em didática se entende como um problema autêntico [11], uma vez que os alunos deveriam conhecer suficientemente o experimento. Podemos, no entanto, aproveitar em parte o que eles já sabem sobre conceitos de eletricidade e o que nós lhes podemos adiantar sobre o LHC, visando formular perguntas que se aproximam à tipologia de problema autêntico:

- Por que no LHC utilizamos partículas carregadas?
- Como geramos estas partículas com carga elétrica?
- Como podemos acelerá-las?
- Como fazemos que as partículas, apesar de se repelirem, fiquem juntas em um feixe?
- Como podemos medir a sua quantidade com magnitudes conhecidas?

**Vários estudos evidenciam que existe um grande desinteresse dos discentes face aos estudos científicos. Além disso, a existência de uma valorização social negativa da ciência dá lugar a que os estudantes tenham uma imagem negativa da mesma**

Com o intuito de responder a estas perguntas, e utilizando como elemento motivador a máquina mais complexa da história, introduzimos conceitos, magnitudes, unidades, expressões e procedimentos matemáticos de maneira a, partindo de uma proposta real, chegarmos mais facilmente aos objetivos que se pretendem atingir no Ensino Médio em relação à eletricidade. Naturalmente, os conceitos de carga, partícula (protón ou eletrón) e o conceito de átomo ou íon continuam tendo uma componente abstrata com consequentes dificuldades para alunos em estados cognitivos pouco formais. Porém, conseguiremos, introduzindo-os na forma que aqui se apresenta, fazer com que surjam de maneira mais acessível e próxima.

Por outro lado, evitamos uma estratégia mais generalizada quando se pretende introduzir uma física mais atual. É muito comum que se apresente um novo descobrimento ou um feito como sendo algo “excepcional” e pouco relacionado ao conteúdo curricular. Pretendemos, porém, que esta nova abordagem científica se torne parte da estratégia didática de uma forma contextualizada e estendida no tempo.

Há ainda uma componente educativa nada desprezível relacionada à educação de valores. A dimensão internacional da colaboração mundial no CERN é uma das características a serem levadas à aula, pois há técnicos e cientistas de 80 países trabalhando em Genebra e virtualmente algo em torno de 500 instituições científicas. Também devemos ter muito presente, pela sua importância, a participação de muitas mulheres nos diversos campos técnicos e científicos, o que

ajuda a romper a inércia psicológica com relação ao binômio mulher-trabalho científico.

### **O próton, o grande protagonista**

Naturalmente, poderíamos ter elegido em seu lugar o elétron e de fato o grande acelerador do CERN (chamado LEP), anterior ao atual, utilizava elétrons como partículas colisoras. Neste caso, usamos os prótons porque são os atuais protagonistas no LHC, e a ideia é fazê-los presentes de forma contínua durante o trabalho curricular de um determinado tópico (a eletrostática, neste caso), com o objetivo de torná-lo “tão familiar” para os estudantes, que se fique, para eles, fácil falarmos de carga elétrica, lei de Coulomb,



constante dielétrica, número atômico, número de massa, íons, etc.

No Ensino Médio não podemos ir mais além na ideia do átomo do que aquela que o entende como uma entidade na qual os prótons e elétrons apresentam uma propriedade que resulta na sua atração mútua. Esta propriedade é a que chamamos carga elétrica,<sup>1</sup> e a experiência leva-nos a concluir que há dois tipos de carga que, no princípio, foram chamadas de “resinosa” e “vidrosa” e, posteriormente, “positiva” e “negativa” em função da ideia que Benjamin Franklin tinha deste fenômeno. O cientista norte-americano acreditava que a matéria possuía uma quantidade concreta de fluido elétrico. Se houvesse um excesso de fluido criava-se uma carga positiva, sendo que sua falta dava lugar a uma carga negativa. A ideia, hoje o sabemos, é equivocada, mas os nomes acabaram por ficar. O que importa é que objetos de cargas de mesmo sinal se repelem ao passo que cargas de sinais contrários se atraem.

Os prótons (mas não os elétrons) ainda apresentam outro tipo de carga mais poderosa - a carga nuclear forte - que também é uma propriedade dos nêutrons, que permite que prótons atraiam-se mutuamente, atraiam nêutrons e estes últimos entre si. Eles formam assim uma estrutura muito compacta e densa, chamada núcleo atômico. Esta atração supera em muito a repulsão que os prótons exercem entre si devido à sua carga elétrica. Os prótons do núcleo atraem os elétrons devido às suas cargas elétricas contrárias, e fazem com que os elétrons se movam ao redor do núcleo, formando um objeto espacial que chamamos átomo. Até esse ponto, podemos seguir com esquemas, desenhos ou mesmo jogos, introduzindo também o número atômico e de massa, para que pouco a pouco estes novos conceitos comecem a formar parte do conhecimento dos alunos. Porém, há algumas perguntas a serem respondidas:

- Como lutar contra o enorme grau de abstração que o conceito de carga elétrica implica?
- Como familiarizar os alunos com estas partículas carregadas?
- Como torná-las “visíveis”?
- Como reforçar as explicações sobre elétrons e prótons?
- Como fazer com que os alunos considerem estas partículas como as verdadeiras protagonistas de toda a matéria que os rodeia?

Uma possível estratégia: utilizemos o LHC.

Primeiro fazemos uso da motivação, falando um pouco do CERN (o maior

laboratório de física do mundo) e do acelerador LHC: a máquina e o experimento. Não apresentaremos aqui esta abordagem, pois nos artigos anteriormente citados, em nossa página na internet, bem como em outros sítios, o leitor poderá encontrar dados, referências e informações para preparar esta introdução. Além disso, as imagens falam quase que por si sós.

Indicaremos assim alguns conteúdos que se pode levar à aula com o objetivo de responder às perguntas por nós colocadas. Voltamos a lembrar que o que se pretende é trabalhar os conteúdos simultaneamente, de maneira que os alunos aprendam de forma conjunta os conteúdos de eletrostática ao mesmo tempo que conheçam o grande experimento.

### Conteúdos de eletrostática para o Ensino Médio a partir do LHC

1) Por que utilizar partículas tão pequenas com carga elétrica?

As partículas elementares carregadas, como o próton, são utilizadas nestes experimentos por duas razões:

a) Tendo carga elétrica, podemos acelerá-las facilmente utilizando o fenômeno da repulsão e atração elétrica, como veremos posteriormente. No CERN há vários dispositivos aceleradores acoplados que vão incrementando a velocidade (ver Fig. 2) dos prótons, até que cheguem ao maior destes aceleradores - o LHC - onde alcançam a máxima velocidade para depois obrigá-los a colidir (ver Fig. 3).

b) Sendo partículas elementares, fornecem-nos muita informação quando colidem entre si, tanto no que diz respeito ao comportamento no mundo das diminutas dimensões como sobre a estrutura interna da matéria. Na realidade, o que os físicos fazem não é muito diferente do que faz uma criança quando golpeia um objeto com outro para saber o que há dentro deste último.

É justo recordar aqui Joseph John Thomson, que utilizava os raios catódicos (os elétrons) para compreender a natureza atômica da matéria, e Ernest Rutherford

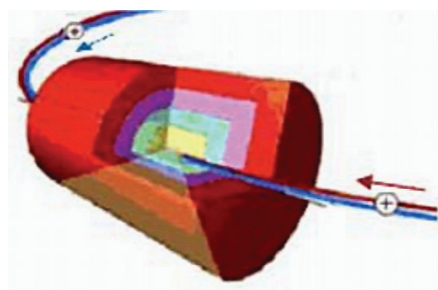


Figura 2 - Os prótons chegam ao interior de um dos detectores do LHC.

que, fazendo colidir partículas alfa, descobriu o núcleo atômico. O LHC não deixa de ser um experimento semelhante, porém em outra escala.

2) Como geramos os prótons?

Para continuar a aproximação dos alunos ao assunto das partículas elementares, devemos explicar como fazemos para obtê-los. No CERN tudo começa com um cilindro no qual encontramos hidrogênio (ver Fig. 4). Esse gas é formado pelos átomos mais simples que existem: um elétron girando ao redor de um próton. O que temos que conseguir é que esse elétron e esse próton, que se atraem para formar um átomo, sejam separados. Por isso, necessitamos de um equipamento que tenha duas regiões carregadas com cargas de sinais opostos. Assim o elétron será atraído para o lado positivo, enquanto o próton para o negativo. Este dispositivo especial é chamado de Duoplasmatron, dentro do qual o hidrogênio é submetido a uma diferença de potencial de cem mil Volts (100 kV). Desta maneira, elétrons e prótons, por terem cargas contrárias, conseguem ser separados, sendo que os prótons são expelidos por uma das extremidades do aparelho já como partículas livres, iniciando seu longo caminho para chegar finalmente ao LHC.

É certo que introduzimos o conceito de voltagem ao falar da separação das partículas. Os alunos sabem que os aparelhos eletrodomésticos de suas casas devem ser conectados à rede elétrica e que se caracterizam por uma voltagem (127 V ou 220 V). Telefones celulares têm baterias recarregáveis que proporcionam 4 V de diferença de potencial, ao passo que pilhas comuns fornecem 1,5 V. Também sabem que quanto mais alta a voltagem (alta tensão) maior a energia disponível. Por isso, podemos utilizar este conceito prévio, embora conceitualmente não tenhamos abordado o significado de potencial elétrico.

3) Como aceleramos os prótons?

Com os prótons já separados dos elétrons, estes primeiros são ejetados do Duoplasmatron com uma certa veloci-

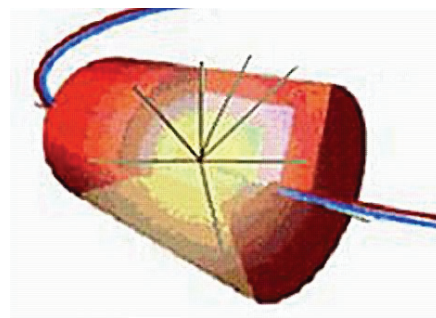


Figura 3 - Os prótons colidem gerando novas partículas.

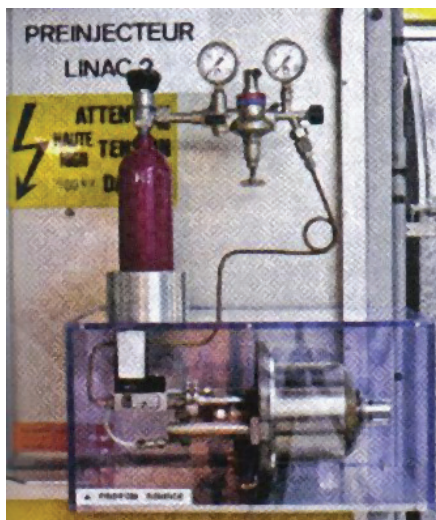


Figura 4 - Podemos ver o cilindro de hidrogênio, e na parte inferior o duoplasmatron, onde o elétron e o próton do átomo de H são separados.

Porém, quanto mais rápidos eles forem, maior será a quantidade de informação que poderemos obter das colisões que ocorrerão mais tarde. Para isso precisamos acelerá-los ainda mais. Os aparelhos de TV tradicionais (tubos de raios catódicos) aceleram elétrons desde a parte traseira do aparelho para que eles atravessem o interior do tubo de TV a uma grande velocidade e colidam com a tela (ver Fig. 5). A colisão gera pontos de luz que depois são captadas pelos nossos olhos e processadas em nossos cérebros na forma de imagens. Esta é uma boa maneira de explicar como funciona o LHC. Os prótons são acelerados e levados a dois tubos de enorme extensão, circulares e paralelos, mas movimentando-se em sentidos contrários. Depois nós os obrigamos a se cruzarem em 4 pontos, onde as colisões daí produzidas gerarão novas partículas que serão detectadas por quatro grandes olhos do equipamento para serem posteriormente interpretadas pelos físicos.

Retornemos à aceleração. Mais uma

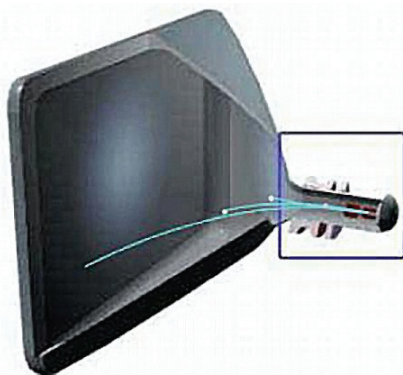


Figura 5 - Um acelerador de partículas doméstico.

vez utilizamos a importante propriedade do próton: sua carga elétrica. Na sua versão mais clássica, o que temos que fazer é acelerá-los e atraí-los para uma região carregada negativamente e que, uma vez por aí passando, essa zona se torne positiva, “empurrando-os” na direção correta, o que deve ser repetido inúmeras vezes. Como outros prótons seguem, temos que mudar as zonas positivas em negativas alternadamente. Falando de modo simples, é nisto que consiste um acelerador de partículas. Como vemos na Fig. 6, os tubos que vão alternando sua carga elétrica para atrair e repelir os prótons aumentam de tamanho pois, como estão aceleradas, percorrem distâncias cada vez maiores dentro de um mesmo intervalo de tempo.

Há dois tipos gerais de dispositivos aceleradores: lineares e circulares. A diferença básica consiste no fato de que nos primeiros as partículas que queremos acelerar passam uma só vez pelo sistema, adquirindo um incremento de velocidade em uma única passagem. Nos circulares, as partículas em trajetória circular passam seguidamente pela zona onde está o sistema de aceleração, incrementando de forma escalonada sua velocidade. Ambos apresentam suas vantagens e inconveniências, mas este não é o momento para falar sobre isto. É interessante, talvez, dizer que no caso do CERN inicia-se com um acelerador linear, chamado LINAC2, para depois conduzir os prótons a sucessivos aceleradores circulares cada vez maiores: PSBoost, PS, SPS e finalmente o LHC (ver Fig. 7).

Para fazer uma comparação com o familiar aparelho de TV, podemos dizer que esta acelera os elétrons mediante uma voltagem de 20.000 V, ao passo que a cadeia de aceleradores que acabamos de mencionar do CERN proporciona uma voltagem “acumulada” de 7 trilhões de Volts, ou, como preferem falar os físicos, de 7 TV (TeraVolts).

Uma forma mais habitual de representar a energia dada a uma partícula consiste em multiplicar a voltagem aplicada pela sua carga elétrica, tomando a carga do próton (ou elétron) como unidade

$$\begin{aligned} \text{Energia} &= 7 \text{ TV} \times 1e \rightarrow \\ \text{Energia} &= 7 \text{ TeV} \text{ (7 Tera-electron-Volt)}. \end{aligned}$$

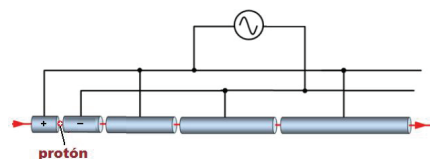


Figura 6 - Acelerador linear.

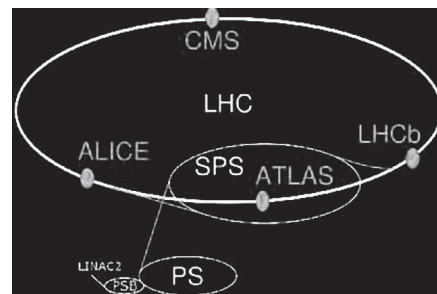


Figura 7 - Cadeia de aceleradores do CERN.

Voltando à comparação anterior, a energia comunicada a cada próton é 350 milhões de vezes maior que aquela proporcionada pelos tubos de raios catódicos de um aparelho de televisão. Precisaríamos de 350 milhões de tubos de raios catódicos de televisão um atrás do outro para conseguir esta voltagem. Considerando cada tubo destes como tendo as dimensões típicas de 12 cm, teríamos um comprimento total de

$$\begin{aligned} 350 \times 10^6 \times 0,12 &= \\ 40 \times 10^6 \text{ m} &\text{ (40.000 km!)}. \end{aligned}$$

Estariamos assim falando de uma montagem que daria a volta na Terra. Assim, os 27 km do LHC não parecem quilômetros em demasia.

#### 4) Os prótons repelem-se

O objetivo fundamental do experimento é chegar a conclusões acerca das colisões entre prótons de maior energia possível. Em função disto, toda a tecnologia do LHC está dirigida no sentido de conseguir grandes concentrações de prótons nos dois feixes contrários para se conseguir um grande número de colisões. Para isto, os prótons gerados no Duoplasmatron e depois acelerados são agrupados em pacotes (*bunches*) que devem satisfazer duas condições: o maior número possível de partículas e a maior duração de estabilidade (ver Fig. 8). Recordemos que prótons, por terem mesma carga elétrica, repelem-se, o que torna o *bunch* instável. A maior eficácia é conseguida com  $1,15 \times 10^{11}$  prótons em cada pacote, sendo a dimensão de cada um deles no feixe de 7,48 cm de comprimento e uma seção reta de  $1 \text{ mm}^2$ . Quando se cruzam nos detectores, estes *bunches* são comprimidos até uma dimensão de  $16 \times 16$  micrômetros (milésimo de milímetro) para aumentar as probabilidades de colisões. Calculemos a distância média entre os prótons.

Quando longe da região de colisão, o “volume esférico disponível” para cada próton é de aproximadamente

$$\frac{7,48 \times 0,01}{1,15 \times 10^{11}} = 6,5 \times 10^{-13} \text{ cm}^3/\text{próton}.$$



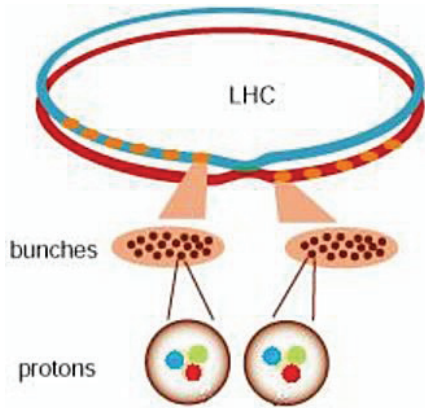


Figura 8 - Os pacotes de prótons (bunches) em cada feixe.

O raio de cada uma destas esferas é de  $r \sim 8 \times 10^{-5}$  cm e portanto a distância média entre prótons:  $d = 2r \rightarrow d \sim 2 \times 10^{-4}$  cm.

Estamos assim em condições de calcular a força coulombiana de repulsão entre eles

$$F = k \frac{q \times q'}{d^2} \rightarrow F = 9 \times 10^9 \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(2 \times 10^{-6})^2} \rightarrow F \sim 6 \times 10^{-17} \text{ N.}$$

Esta é a força com a qual se repelem os prótons dentro de um mesmo pacote. Pode parecer uma força pequena, mas lembremo-nos que estamos falando de partículas com uma massa da ordem de  $10^{-27}$  kg. Para eles, esta força é enorme, que tende a separá-los e jogá-los contra as paredes do tubo por onde circulam. Naturalmente, isso deve ser evitado e para tanto utilizam-se potentes sistemas magnéticos (quadrupolos magnéticos) que alternadamente vão se contrapondo a esta repulsão no eixo horizontal e depois vertical (ver Fig. 9). A situação é ainda mais radical quando os pacotes se aproximam do ponto de colisão, pois aí a seção reta passa a ser de  $16 \times 16$  micrômetros. Repetindo os cálculos, neste caso para o volume disponível temos

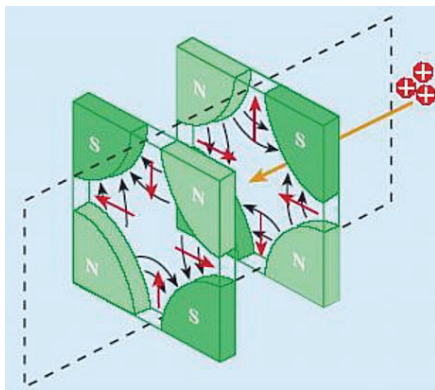


Figura 9 - Os prótons são obrigados a se juntar no eixo horizontal e depois no vertical.

$$\frac{7,48 \times (16 \times 10^{-4})^2}{1,15 \times 10^{11}} = 2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{próton.}$$

O raio de cada uma das esferas é  $r \sim 5 \times 10^{-6}$  cm, e portanto a distância média próton-próton é  $d = 2r \rightarrow d \sim 10^{-5}$  cm. Isto resulta em uma força de repulsão de

$$F = k \frac{q \times q'}{d^2} \rightarrow F = 9 \times 10^9 \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(10^{-7})^2} \rightarrow F \sim 2 \times 10^{-14} \text{ N.}$$

Estamos aqui falando de uma repulsão de três ordens de grandeza maior que aquela atuando longe das zonas de colisão. Novos sistemas magnéticos (sextupolos, decapolos, etc.) são encarregados de corrigir as deformações que os pacotes (ver Fig. 10) sofrem por estas repulsões. Como os pacotes também se repelem, é necessário ainda otimizar o seu número para que o número de colisões seja adequado. O número de pacotes em cada um dos dois feixes é de 2808, e a separação entre eles é de (lembremos que o tubo principal do LHC tem 27 km)

$$d \sim 27000 \text{ m}/2808 \rightarrow d \sim 10 \text{ m.}$$

A carga elétrica total para cada pacote (bunch) de prótons vale

$$Q = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,15 \times 10^{11} = 18,4 \times 10^{-9} \text{ C.}$$

Imaginemos agora cada pacote como um objeto compacto carregado de 18,4 nC. Cada pacote repele o que tem perto de si (a cerca de 7,5 m de distância) de acordo com a lei de Coulomb, com uma força de intensidade

$$F = 9 \times 10^9 \cdot (18,4 \times 10^{-9})^2 / (10)^2 \rightarrow F \sim 3 \times 10^{-8} \text{ N.}$$

Devido à massa extraordinariamente pequena de cada pacote, o efeito desta pequena força de repulsão é muito importante. Contudo, pelo fato de cada pacote ter dois outros pacotes, um adiante e outro atrás de si, os efeitos de repulsão tendem a cancelar-se. Não obstante, a configuração dos pacotes não é completamente simétrica, o que gera instabilidades que aumentam com o tempo. Além disso,

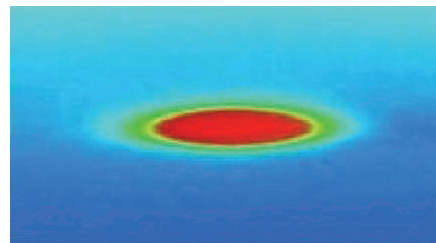


Figura 10 - Visualização de um pacote quando detectado ao passar por um determinado ponto do trajeto.

os prótons colidem com moléculas que existem dentro do tubo uma vez que o vácuo não é perfeito. Também nas zonas de colisão os pacotes contrários sofrem, obviamente, interações repulsivas. Tudo isto dá lugar (junto a outros fatores) a um tempo limite de operação dos dois feixes de prótons (*luminosity lifetime*), que não excede 10 horas de funcionamento. Passado este tempo é necessário retirar os pacotes do acelerador, deixando o sistema livre e preparado para uma nova carga de pacotes.

5) As cargas em movimento geram uma corrente elétrica

O que temos dentro de cada um dos dois tubos do acelerador são centenas de bilhões de prótons movendo-se a grande velocidade. Isso representa na realidade uma corrente elétrica (ver Fig. 11), um importante parâmetro que caracteriza o acelerador (*circulating current beam*). O número total de prótons em cada feixe é

$$N = 2808 \times 1,15 \times 10^{11} = 3,23 \times 10^{14} \text{ prótons.}$$

Calculemos agora quantas voltas eles dão pelo perímetro do acelerador a cada segundo. Como a velocidade que eles possuem é praticamente a da luz, temos  $300000 \text{ km} / 27 \text{ km} \rightarrow 11.000$  voltas.

Assim, em um segundo, a carga total que passa por qualquer ponto do acelerador vale

$$Q = 3,23 \times 10^{14} \times 1,6 \times 10^{-19} \times 11000 = 0,57 \text{ C/s,}$$

ou seja

$$I = 0,57 \text{ A.}$$

Para ter uma intensidade semelhante em uma linha de transmissão convencional necessitaríamos de

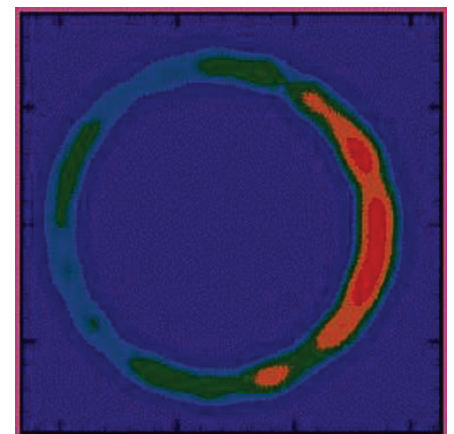


Figura 11 - Os prótons circulando próximos à velocidade da luz, formando o feixe do acelerador, constituem uma autêntica corrente elétrica.

$N = 0,57 / 1,6 \times 10^{-19} = 3,6 \times 10^{18}$  prótons (dez mil vezes mais!).

## Conclusões

Apresentamos aqui uma forma de levar conteúdos de eletrostática para a sala de aula utilizando recursos e ideias da maior máquina já construída pela ciência. Por um lado, facilitamos a aprendizagem de conteúdos abstratos e pouco atrativos para os estudantes do Ensino Médio, ao passo que do outro, apresentamos, concomitantemente, um dos resultados científico-tecnológicos mais importantes de todos os tempos.

Reiteramos a importância de que este tipo de ação se faça de maneira contextualizada: introduzindo na aula os grandes sucessos científicos e relacionando-os aos conceitos com os quais pretendemos trabalhar. Desta forma, os alunos vão construindo o conhecimento de maneira natural, com maior motivação e portanto mais significativamente.

Outros aspectos didáticos muito im-

portantes que se protagonizam a partir desta proposta é a dimensão internacional do experimento, no qual a Espanha e o Brasil estão presentes junto a outros oitenta países, e o significativo número de mulheres que participam dos diferentes campos de pesquisa científica e tecnológica do LHC.

Portanto, a ideia fundamental é utilizar um acontecimento científico de grande repercussão como estratégia didática, evitando que este tipo de ação seja apresentado de forma isolada e descontextualizada.

## Notas

<sup>1</sup>O nome carga elétrica é a versão traduzida do que inicialmente poderíamos chamar “quantidade de matéria ambárica”, pois, historicamente, a raiz da palavra elétrico provém de elektron (âmbar em grego). O âmbar, uma resina de pinheiros petrificada, pode atrair pequenas partículas quando friccionado, por exemplo, na lâ.

## Referências

- [1] R. Cid, *Physics Education* **40**, 332 (2005).
- [2] R. Cid, *Revista Española de Física* **20**, 48 (2006).
- [3] R. Cid and X. Cid Vidal, *Physics Education* **44**, 78 (2009).
- [4] R. Cid y X. Cid Vidal, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **3**, 638 (2009).
- [5] R. Cid and X. Cid Vidal, *Physics Education* **45**, 73 (2010).
- [6] R. Cid y X. Cid Vidal, *Revista Española de Física* **22**, 33 (2008).
- [7] Taking a closer look at LHC: <http://www.lhc-closer.es>.
- [8] J. Solbes J.R. Montserrat y C. Furió, *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales* **21**, 91 (2007).
- [9] A. Caamaño (coord), *Didáctica da Física e da Química* (Editorial GRAÓ, Barcelona, 2010).
- [10] D. Gil, B. Macedo, J. Martínez, C. Sifredo y A. Vilches (eds) *¿Cómo Promover el Interés por la Cultura Científica?* (OREALC/UNESCO, Santiago de Chile, 2005).
- [11] M.P. Jiménez Aleixandre (coord), *Enseñar Ciencias* (Editorial GRAÓ, Barcelona, 2003).



Centro de Referência  
para o Ensino de Física



O **CREF**, Centro de Referência para o Ensino de Física, tem por objetivos:

- Incorporar à formação de professores, nos cursos de licenciatura em física da UFRGS e em geral, os novos conhecimentos científicos em física e astronomia, as tecnologias de informação, os avanços da teoria de ensino-aprendizagem e os resultados da pesquisa em ensino.

- Ampliar e intensificar atividades de formação continuada, presencial e a distância, de professores de física e de ciências do Ensino Médio e Fundamental.

- Atualizar conteúdos, modernizar laboratórios, utilizar recursos de comunicação e de informação e aprimorar métodos de ensino e materiais instrucionais no âmbito das disciplinas básicas de física lecionadas para os cursos de formação científica e profissional, na UFRGS e outras instituições de ensino superior.

- Estender à comunidade escolar, em todos os níveis e modalidades de ensino, e à população em geral, conhecimentos, avanços e aplicações da física e da astronomia, como parte da educação para a cidadania na sociedade do conhecimento.

<http://www.if.ufrgs.br/cref>