



Três interações da natureza, a forte, a fraca e a eletromagnética, são descritas por uma teoria chamada de Modelo Padrão (MP), desenvolvido ao longo das últimas quatro décadas. A quarta interação, a gravitacional, é descrita pela Teoria da Relatividade Geral formulada por Albert Einstein em 1915. Uma característica das interações eletromagnéticas e gravitacionais, que não é compartilhada pelas outras duas, é que são de longo alcance. Isso significa que elas são “sentidas” a qualquer distância das fontes: a carga elétrica na primeira e a massa, a energia e a pressão na segunda. Mas, quanto mais longe das fontes, menor o seu efeito. Isso é consequência da bem conhecida lei do inverso do quadrado dos respectivos potenciais.

Os “blocos fundamentais” com os quais se constrói o MP são os quarks e os léptons. Essas partículas foram descobertas, ao longo das últimas décadas, em diversos laboratórios do mundo. Os primeiros quarks, **u** (*up*), **d** (*down*) e **s** (*strange*) foram propostos no começo dos anos 60 para classificar os hádrons

observados experimentalmente (o próton e o nêutron são os mais conhecidos, mas há centenas deles). Contudo, no fim dessa década, experimentos no acelerador de Stanford, nos Estados Unidos, onde elétrons de alta energia eram espalhados por prótons, indicavam que estes eram constituídos por objetos puntiformes e “quase” livres, ou seja, não interagiam entre si como o fazem as partículas com cargas

Quarks foram propostos no começo dos anos 60 para classificar os hádrons observados experimentalmente. Contudo, no fim dessa década, experimentos indicavam que estes eram constituídos por objetos puntiformes e “quase” livres, ou seja, não interagiam entre si como o fazem as partículas com cargas elétricas ou objetos com massa

elétricas ou objetos com massa. Esse comportamento tinha sido previsto por J.D. Bjorken, e R. Feynman chamou esses objetos de partons. Os físicos experimentais J.I. Friedman, H.W. Kendall e R.E. Taylor ganharam o prêmio Nobel de Física de 1990 por esta descoberta.

Nos anos seguintes tornou-se claro que alguns partons eram os quarks, mas que havia outros como, por exemplo, os glúons (as partículas mediadoras da interação forte).

Assim, começava a se vislumbrar o fato de que os prótons, nêutrons e todos os outros hádrons são compostos principalmente de quarks e glúons. Por outro lado, os léptons, como o elétron, não têm estrutura e não sentem a interação

.....
Vicente Pleitez
 Instituto de Física Teórica/UNESP

Corria a década de 1960, e, de repente, as notícias a respeito de novas partículas tornouse tão parte do cotidiano que os jornais estranhavam a falta da descoberta de uma partícula diferente em uma dada semana. Deste então a proposta da existência de quarks já era seriamente considerada pelos cientistas, mas uma questão permeceu por décadas: por que léptons não sentiam a interação forte? A resposta a essa questão foi esclarecida pela descoberta da liberdade assintótica e rendeu a seus propositores o Prêmio Nobel de Física de 2004.

forte. Para se chegar a essa conclusão foi muito importante a descoberta da *liberdade assintótica* por David J. Gross da Universidade de Princeton, e seu então estudante de doutorado Frank Wilczek e, independentemente, por H. David Politzer da Universidade de Harvard. Por isso, os três compartilharam o prêmio Nobel de Física de 2004. Esta propriedade, aparentemente contraditória,

Se medimos a carga do elétron longe dele (o que faz a maioria dos físicos e engenheiros) a carga tem um valor, que é aquele citado nos livros. Mas se medimos a carga do elétron “bem perto dele” medimos um valor maior

estabelece que quanto mais próximos os quarks estão uns dos outros, mais fraca é a força entre eles. Quando estão extremamente próximos comportam-se como partículas livres (daí a expressão *liberdade assintótica*).

A baixas energias típicas da Física Atômica (keV)¹ e Nuclear (MeV), a interação eletromagnética é descrita de maneira muito precisa pela Eletrodinâmica Quântica ou QED pela sigla em inglês. Esta teoria descreve a interação dos fótons com as partículas eletricamente carregadas, como o elétron. A intensidade desta interação é caracterizada pelo valor da carga elétrica elementar do elétron: $-e$, ou a do próton $+e$. A carga elétrica, portanto, determina quão forte é essa interação, e é definida como a constante de acoplamento da QED. Desde os anos 30, sabia-se que quando se realizavam cálculos mais precisos de seções de choque de espalhamento entre partículas carregadas, obtinham-se resultados inconsistentes: infinitos! Os problemas principais apareciam quando a energia era muito alta, que corresponde, segundo as leis da Física Quântica, a distâncias pequenas. Uma boa teoria deveria produzir resultados numéricos, de maneira a comparar com os dados experimentais. Esse problema foi resolvido em 1949 quando um procedimento chamado de

renormalização foi proposto. Segundo este esquema, re-definindo apropriadamente alguns parâmetros, como a carga e a massa do elétron, é possível obter resultados finitos que coincidem com grande

precisão com os resultados experimentais. O preço a pagar é que a carga e a massa “renormalizadas” são agora parâmetros livres, que devem ser determinados experi-

mentalmente. A altas energias, ou pequenas distâncias, a massa do elétron pode ser desprezada. Isso pareceria indicar que nessa situação a teoria não teria nenhuma escala de massa ou energia. Contudo, o formalismo da renormalização implica a necessidade de introduzir uma escala de energia arbitrária, isto é, o seu valor não importa do ponto de vista físico. Isso quer dizer que o cálculo não deve depender da escolha que se faça para essa escala de energia. Matematicamente, essa invariância sob a escolha dessa escala de energia é descrita pela chamada *equação do grupo de renormalização* introduzida em 1953 por A. Petermann e E. Stückelberg e também, em 1954, pelos físicos Murray Gell-Mann e Francis Low.

Que consequências têm tudo isso? Bom, acontece que aparece uma dependência do valor da carga elétrica com a distância ou, o que é o mesmo, com a energia. Lembremos que no sistema de unidades internacional (SI), a carga do elétron tem o valor $|e| \approx 1.602 \times 10^{-19}$ C. No entanto, já no fim dos anos 40, alguns físicos, tinham mostrado que efeitos de natureza quântica e relativística provocam o cresci-

mento do valor desta carga quando se aumentava a energia, ou equivalentemente, a distância, de onde medimos a carga, era encurtada. Por exemplo, definindo a chamada *constante de estrutura fina*, α , (em unidades apropriadas com $h/2\pi = c = 1$) como

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi'} \quad (1)$$

obtém-se um valor experimental aproximado de 1/137 que é consistente com o valor da carga elétrica, e , mencionado acima. Contudo, esse valor corresponde a distâncias grandes (baixas energias) típicas da maioria dos fenômenos físicos macroscópicos, como os encontrados nos aparelhos eletrodomésticos, dispositivos opto-eletrônicos etc. No entanto, para distâncias tão pequenas como aquelas atingidas na colisão de elétrons e pósitrons (a antipartícula do elétron), o valor de α encontra-se próximo de 1/128, diferente do valor acima. Basicamente, isso quer dizer que se medimos a carga do elétron longe dele (o que faz a maioria dos físicos e engenheiros) a carga tem um valor, que é aquele citado nos livros. Mas se medimos a carga do elétron “bem perto dele” medimos um valor maior.

No início dos anos 70, alguns físicos conheciam uma classe de teorias em que era possível definir uma carga equiva-

lente àquela da teoria QED, que ao contrário da carga elétrica, diminuiria com a distância. Foram, no entanto, os ganhadores do Nobel deste ano que criaram uma teoria deste tipo, a Cromodinâmica Quântica (QCD na sigla em inglês), que descreve a interação entre quarks e glúons, responsável por manter estas partículas confinadas no interior dos hádrons. Esta teoria

Quanto mais próximos os quarks estão uns dos outros, mais fraca é a força entre eles. Quando estão extremamente próximos comportam-se como partículas livres (daí a expressão liberdade assintótica)

pressupõe que os quarks e glúons possuam uma carga de cor (na ausência de outra nomenclatura). Daí o nome de interação colorida.

Podemos definir neste caso um parâmetro g_s , onde o índice indica o tipo de força considerada, no caso *strong* (forte), similar à carga

elétrica, e uma constante adimensional α_s , correspondente à da QED definida na Eq. (1), como

$$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi} \quad (2)$$

Se a uma energia baixa, por exemplo, alguns MeV, α_s tem um valor grande, e nesse caso não podemos usar o mesmo método da QED, ou seja, cálculos perturbativos, mas numa energia maior, da ordem de GeV, típica de grandes aceleradores, o valor de α_s é bem menor. Na Fig. 1, apresentamos valores experimentais de α_s , definida na Eq. (2), em função da energia que coincidem com a previsão da QCD. Essa é a essência da liberdade assintótica: a interação forte é realmente forte - a baixas energias, tornando-se menos intensa, ou mais "fraca" a altas energias. A característica chave da QCD que a diferencia da QED é que os glúons interagem entre si. Isso não acontece no caso da interação eletromagnética porque os fótons, os mediadores da interação, são neutros e, portanto não "vêm" uns aos outros. É justamente a interação entre os glúons que propicia um comportamento da QCD em oposição à QED para grandes energias.

Foi a descoberta da liberdade assintótica que tornou possível a con-

A descoberta da liberdade assintótica que levou a se propor as Teorias de Grande Unificação, nas quais as três interações, forte, fraca e eletromagnética seriam descritas por uma mesma teoria com apenas uma constante de acoplamento

Foi a descoberta da liberdade assintótica que tornou possível a confirmação experimental da QCD como a teoria que descreve as interações entre quarks e glúons e que é responsável pela ligação destes nos hádrons

firmação experimental da QCD como a teoria que descreve as interações entre quarks e glúons e

que é responsável pela ligação destes nos hádrons. A baixas energias, onde essas interações são fortes, o estudo dos processos envolvidos ainda é pesquisa de fronteira da Física Nuclear e das

partículas elementares. Uma propriedade complementar à liberdade assintótica é o *confinamento* dos quarks e glúons. Eles nunca foram observados isoladamente e supõe-se que, como a baixas energias a interação colorida é muito intensa, o que levaria ao confinamento de quarks e glúons. Até o presente, não existe prova rigorosa do confinamento.

Finalmente, devemos mencionar que foi a descoberta da liberdade assintótica que levou a se propor as *Teorias de Grande Unificação*, nas quais as três interações, forte, fraca e eletromagnética seriam descritas por uma mesma teoria com apenas uma constante de acoplamento. Na Fig. 2, pode-se apreciar a evolução da constante de acoplamento. Ela diminui no caso da interação forte

(liberdade assintótica) enquanto que aumenta para a interação fraca e eletromagnética. Esse comportamento permitiria estimar a energia onde as três constantes seriam iguais. Até o momento não se conhece qual seria essa teoria "unificada" mas existem várias candidatas. Confirmar qual delas é a correta é uma tarefa para os físicos nas próximas décadas.

Nota

1eV (elétron-Volt) é a importante

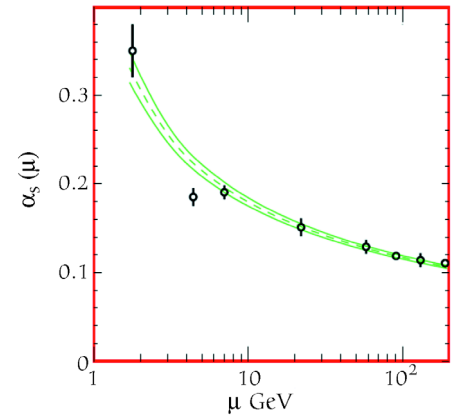


Figura 1. Comportamento da constante de acoplamento α_s em função da energia. Os pontos correspondem aos resultados experimentais e as linhas aos valores previstos pela QCD (Fonte: <http://pdg.lbl.gov/2004/reviews/qcdrpp.pdf>).

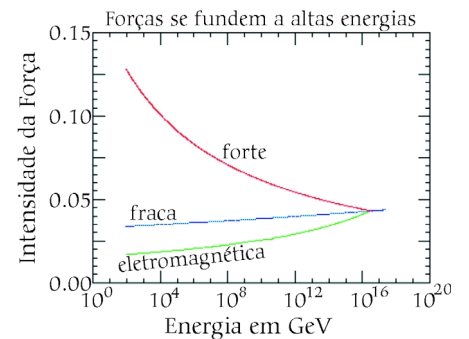


Figura 2. Comportamento esperado das constantes de acoplamento das três interações em função da energia (Fonte: <http://www.aventuradaparticulas.ift.unesp.br/frames.html>).

unidade de energia da Física Atômica. Corresponde à energia adquirida por um elétron ao atravessar uma diferença de potencial de 1 Volt ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$).

Sugestões para leitura

- M.A. Moreira, *Partículas e Interações*, este número.
 - F. Ostermann e C. Cavalcanti, *FnE* v. 2, n. 1, maio (2001)
 - M.J.G. Veltman, *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics* (World Scientific, Singapore, 2003).
- A página no Museu eletrônico Nobel <http://nobelprize.org/index.html> contém detalhes de todos os prêmios Nobel. Vale a pena a consulta regularmente.