



Afísica contemporânea descreve os fenômenos naturais em termos de quatro interações fundamentais que, para efeitos de compreensão em um contexto mais próximo da física newtoniana, podemos pensar como sendo descritas por campos de forças. A força gravitacional e a eletromagnética são as interações fundamentais que se fazem sentir no mundo macroscópico, inclusive em escala humana. As outras duas, a força nuclear forte e a força nuclear fraca, não se revelam em escala macroscópica. Aparecem apenas em escala subatômica - na verdade, como o nome indica, nas escalas nuclear e subnuclear, portanto a distâncias tão pequenas ou ainda menores que o décimo do trilionésimo do centímetro, o que corresponde ao centésimo de milésimo da escala atômica ou à milionésima parte da nanoescala.

A força gravitacional é a responsável pelos movimentos planetários e pela organização da estrutura em larga escala de nosso Universo. A força eletromagnética é a interação que responde pela formação dos átomos, pelas ligações moleculares e pelos processos biológicos fundamentais, por exemplo. Já a força nuclear forte responde pela coesão dos prótons e dos nêutrons no interior dos núcleos atômicos e pela ligação dos quarks no interior dos hádrons; finalmente, a interação nuclear fraca é a responsável pelos processos radioativos, em que núcleos

atômicos instáveis decaem e emitem partículas.

Cada um destes campos de força é descrito por uma teoria. A força gravitacional, em sua escala macroscópica, é descrita pela mecânica newtoniana, sempre que as velocidades envolvidas forem baixas se comparadas à velocidade da luz; ainda em escala macroscópica, e mesmo cosmológica, mas no regime em que fenômenos relativísticos começam a operar, a descrição do campo gravitacional fica a cargo da teoria da relatividade geral. A descrição microscópica da gravitação, que constitui o que se chama na literatura de gravitação quântica, é um campo de investigação com várias questões ainda em aberto. De fato, abordagens mais recentes como a das teorias de Supercordas são novos encaminhamentos no sentido de, entre outras questões, resolver os problemas da gravitação quântica.

Quatro interações fundamentais descrevem todos os fenômenos naturais que observamos. Duas são observáveis no mundo macroscópico (gravitacional e a eletromagnética) e duas apenas em escala subatômica (nuclear forte e nuclear fraca)

Já a eletrodinâmica quântica descreve os fenômenos que envolvem a força eletromagnética. Foi desenvolvida a partir do início da década de 1940 e ajudou a entender o mundo das chamadas partículas elementares - ou seja, partículas 'indivisíveis'. Trabalhos publicados entre 1961 e 1968 ajudaram a formular a teoria que unificou tanto os fenômenos eletromagnéticos quanto aqueles regidos pela força nuclear fraca. A teoria eletrofraca ou o Modelo de Salam-Weinberg-Glashow - como ficou conhecido - mostrou, portanto,

.....
José Abdalla Helayël-Neto
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF/MCT) e Grupo de Física Teórica
José Leite Lopes (GFT - JLL)
e-mail: helayel@cbpf.br
.....

Neste artigo, procura-se ressaltar e elucidar o papel central das simetrias na construção de modelos e teorias para as interações fundamentais. neste cenário, introduz-se a supersimetria, discute-se o seu conceito, apresentam-se as suas conseqüências e se esclarece o seu papel primordial no programa de unificação dos campos de força da natureza.

que essas duas forças, apesar de se nos apresentarem com características marcadamente distintas, têm uma origem comum, sendo possível propor para elas um cenário de unificação que ilustra como ambas se separam no regime da natureza em que fazemos as nossas observações.

A cromodinâmica quântica (QCD) é a teoria física que incorpora o conhecimento experimental e a fenomenologia das interações nucleares fortes; a sua formulação ficou estabelecida em 1973, com os trabalhos de Gross e Wilczek, e independentemente, de Politzer, o que valeu a estes três autores o Prêmio Nobel de Física de 2004. Esta é uma teoria que ainda ocupa uma parte considerável da comunidade dos teóricos e apresenta desafios estimulantes a serem esclarecidos, como por exemplo a resolução do problema do confinamento dos quarks e glúons no interior dos hádrons, o desenvolvimento de técnicas matemáticas e computacionais para os chamados cálculos não-perturbativos e a compreensão da teoria incluindo efeitos de temperatura finita, a fim de compreender o seu rico diagrama de fases.

Neste cenário das quatro interações fundamentais devidamente organizadas em termos de teorias microscópicas, que incorporam tanto as leis do mundo quântico quanto a teoria da relatividade especial, percebe-se que o conceito-chave para a formulação das mesmas é o conceito de simetria, e, ao lançar mão da idéia de simetria, as teorias de Yang-Mills, propostas em 1954, estabelecem o referencial teórico para a formulação de todas as teorias acima mencionadas. Do ponto de vista matemático, cada interação tem associado a si um grupo de simetria, estrutura matemática que obedece a um conjunto de regras bem específicas; no que diz respeito às características de cada campo de força, o grupo de simetria organiza e sistematiza grandezas de natureza física como as cargas e as correntes envolvidas na interação. Os fenômenos eletromagnéticos são descritos em termos de um grupo de simetria designado por $U(1)$, associado à carga elétrica; a fenomenologia das interações fracas acomoda-

da-se na estrutura imposta pelo grupo $SU(2)$, que responde pelo chamado isospin fraco; a QCD é formulada em termos do grupo $SU(3)$, que descreve a carga de cor e, finalmente, o grupo subliminar à gravitação é o $SO(1,3)$, conhecido como o grupo de Lorentz, associado a uma grandeza intrínseca das partículas elementares, a que nos referimos como spin.

O conceito de simetria e a estrutura algébrica a ela correspondente organiza as leis de conservação associadas a um dado tipo de interação, sistematiza a classificação das partículas e dos estados físicos da teoria em termos de especificações bem precisas - os chamados números quânticos - e estabelece mecanismos para a compreensão das relações existentes entre as massas e cargas das partículas envolvidas na interação considerada. Entretanto, estas relações de massa envolvem exclusivamente bósons (partículas de spin inteiro) ou férmions (partículas com spin semi-inteiro e que obedecem ao chamado Princípio da Exclusão de Pauli); as simetrias usuais não inter-relacionam, contudo, os setores bosônico e fermiônico. É exatamente neste ponto, a compartimentação bóson-férmion, que a Supersimetria faz a sua entrada na cena das interações fundamentais.

E, muito interessante também, é se observar que foi exatamente em 1973, quando as teorias específicas para cada interação ficaram estabelecidas, que se inaugurou a era da Supersimetria como conceito fundamental no projeto de construção de uma teoria de unificação dos quatro campos de força da natureza, tendo o propósito, inclusive, de viabilizar um ambiente teórico para a consolidação de uma teoria quântica para a gravitação.

A Supersimetria coloca férmions e bósons no mesmo patamar, e, na proposta de ser uma simetria do espectro de partículas físicas (entretanto, é preciso deixar claro que ainda não foi detectada experimentalmente), propõe que bósons e férmions possam figurar no

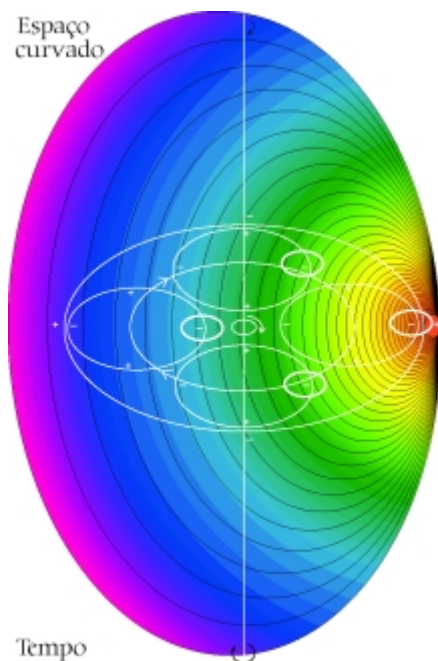
mesmo grupo de partículas degeneradas em massa, ou que, caso venham a ter massas muito próximas, que esta diferença possa ser reproduzida em termos de um mecanismo de violação da Supersimetria. Em um mundo regulado pelas leis da Supersimetria, a cada bóson de uma certa massa corresponderia um férmion com a mesma massa. Não é esta a situação que encontramos no mundo a nós acessível das partículas verdadeiramente elementares. Mas a idéia é que isto deva ocorrer em uma escala de altíssimas energias, ainda muito afastadas do regime de energia a que temos acesso experimental.

A partir da premissa de que existe um princípio de simetria segundo o qual bósons e férmions possam ser degenerados em massa é que se desenvolveu fortemente a Supersimetria na comunidade da física teórica de altas energias; em 1975, já eram conhecidas as ditas extensões supersimétricas da eletrodinâmica quântica e das teorias de Yang-Mills, em cujo contexto são descritas as interações nucleares fortes e fracas. Em 1976, conseguiu-se chegar à formulação supersimétrica da gravitação, em uma teoria denominada Supergravidade, que trouxe uma compreensão mais aprofundada de como deve ser a interação gravitacional no mundo microscópico.

Em todas estas teorias, a idéia de que a interação seja mediada por um bóson intermediário fica, agora com a Supersimetria, acrescida da presença de férmions parceiros dos bósons mediadores, também conhecidos



Visão artística dos eventos dentro de uma câmara de bolhas.



A supersimetria, em sua proposta de unificar férmions e bósons, traz naturalmente consigo uma descrição do campo gravitacional, e sua versão específica para o mesmo é a supergravidade, onde tempo e espaço se unificam em um cenário espaço-temporal mais amplo, o chamado superspaço.

como bósons de gauge. No caso da eletrodinâmica, o fóton é acompanhado do férmion neutro denominado fotino; no contexto das interações fracas, os bósons carregados W e o bóson neutro Z são acompanhados dos férmions chamados W -inos e Z -ino. Os parceiros supersimétricos dos glúons da QCD são conhecidos como gluínos e, como parceiro do gráviton, partícula de massa nula e spin -2 (o *quantum* da interação gravitacional) aparece o gravitino, férmion eletricamente neutro com spin $-3/2$. Nenhum destes parceiros supersimétricos é degenerado em massa com o bóson que acompanha; por exemplo, o fotino e o gravitino não são partículas de massa de repouso nula, como o fóton e o gráviton.

Isto impõe que a maneira de se introduzir a Supersimetria nas teorias de interações fundamentais, de forma compatível com a realidade experimental de que dispomos, é através dos chamados mecanismos de quebra. Propõe-se que a Supersimetria tenha operado no Universo em seus instan-

tes iniciais e que, com o resfriamento do mesmo, esta simetria entre bósons e férmions tenha sido quebrada (existem mecanismos específicos e independentes para se implementar a violação da Supersimetria) de tal forma que, em seu regime atual, as partículas introduzidas pela Supersimetria no espectro físico tenham suas massas em uma escala acima da escala acessível aos experimentos atuais de altas energias. Isto significa que os "inos" devem estar todos localizados na escala do TeV, ou seja, uma ordem de grandeza acima da escala fixada para a separação das interações fracas dos setores eletromagnético e forte, o que ocorre na faixa das centenas de GeV. Apenas para efeito de referência, a energia de repouso do próton é de 0.938 GeV.

A Supersimetria também tocou questões teóricas muito relevantes, como o atenuamento das divergências (quantidades infinitas) no regime ultravioleta (região de altíssimas energias) das teorias quânticas de campos, essenciais para a descrição das interações fundamentais, e culminou com uma teoria de gravitação com mais possibilidades de consistência do que a gravitação quântica tradicional; além desta notável realização, a Supersimetria possibilitou a formulação da primeira classe de teorias quânticas de Yang-Mills livres de qualquer tipo de divergência ultravioleta, concretizando uma grande expectativa de Dirac, que sempre sustentava que uma teoria quântica viável deveria ser absolutamente finita. Também, na sua busca por uma teoria de unificação dos diferentes campos de força, a Supersimetria resolve alguns problemas fundamentais de consistência que o programa usual de unificação enfrenta.

Os dez primeiros anos de desenvolvimentos em Supersimetria (1974-1984) foram marcados pela incorporação desta simetria na física de partículas, no programa de unificação e no projeto de construção de uma teoria matematicamente consistente para a gravitação. Vários modelos de Supergravidade foram propostos e a célebre Supergravidade- $N = 8$, com uma série de mecanismos agregados,

figurou, por certo tempo na literatura, como o paradigma da teoria mais propícia para a unificação das interações fundamentais.

A segunda fase, iniciada em 1985, já nos apresenta a Supersimetria em uma outra perspectiva, colocando-a na qualidade de um ingrediente físico e matemático necessário para a construção das teorias de Supercordas - nesta visão, genuínas teorias fundamentais - as quais, se espera, possam propiciar o cenário que viabilize o programa de unificação, incorporando o setor gravitacional, descrito, neste novo panorama, por uma teoria quântica consistente para a gravitação. A Supersimetria foi, assim, definitivamente incorporada à física de partículas e vem sendo, de forma crescente, aplicada também a outros campos da Física, como a física nuclear, a física da matéria condensada e, até mesmo, a alguns sistemas biofísicos. Seria bastante oportuno ainda mencionar que sistemas quanto-mecânicos muito simples, como aqueles constituídos por partículas, carregadas ou neutras, e sujeitas a certas configurações de campo magnético externo, exibem características de uma supersimetria que se revela como uma simetria dinâmica. Esta é uma indicação de como a Supersimetria possa ser subjacente a interessantes sistemas quânticos realísticos. Finalmente, com a entrada em operação do *large hadron collider* (o LHC), a partir de 2007-2008, espera-se dispor de recursos experimentais suficientes para a busca e a identificação de partículas supersimétricas (o que seria um teste direto da Supersimetria) e de outras consequências indiretas da presença da Supersimetria no mundo físico, reforçando o seu marcante papel na formulação das teorias fundamentais para a descrição dos campos de força da natureza.

Saiba mais sobre supersimetria

<http://web.mit.edu/afs/athena.mit.edu/user/r/e/redingtn/www/netadv/ssym.html>

<http://www.supersymmetry.com/>

<http://www1.imperial.ac.uk>

<http://www.ocf.berkeley.edu>