

Teorias de Tudo como Projeto de Pesquisa

¹ Geová Maciel de Alencar Filho;

² Makarius Oliveira Tahim;

³ Célio Rodrigues Muniz;

⁴ Raimundo Nogueira da Costa Filho.

Resumo

A ideia de unificação tem se tornado um princípio guia na Física fundamental nas últimas décadas. Nesse contexto, a teoria de supercordas é uma das abordagens mais promissoras para se obter uma teoria final da Física. Nesse trabalho, fazemos uma revisão histórica da unificação na Física e discutimos o papel central que as simetrias representam para este conjunto de ideias.

Palavras-Chaves: *Cordas, Dimensões-extras, Membranas.*

Abstract

The idea of unification has been seen as an guide principle in fundamental Physics in the last decades. In this context, the superstring theory is one of the most promising approaches to obtain a final physical theory. In this work we make a historical review of Unification in Physics and discuss the important role symmetries do in these lines of reasoning.

Key-words: strings, extra dimensions, membrane.



De Aristóteles a Maxwell

A busca por uma teoria unificada das interações fundamentais começou há quase um século. Antes disso, os próprios conceitos de unificação e de física fundamental desenvolveram-se durante aproximadamente dois milênios e, de forma acelerada, após o advento da Física Moderna com Galileu Galilei.

No século IV a.c Aristóteles propõe a existência das esferas celestes e do mundo sublunar. As leis da Física seriam então diferentes nessas duas regiões. Dentre as motivações de Aristóteles está o fato de que os objetos celestes têm movimentos perpétuos, o que não acontece com nenhum corpo terrestre. Além disso, segundo ele, os corpos terrestres tendem a ir para seu lugar «natural», que é cair para a terra; já os corpos celestes não caem, portanto, devem obedecer a leis diferentes. É importante notar que o método de Aristóteles era simplesmente contemplativo, chegando a conclusões, simplesmente observando a natureza. Talvez isso se deva ao fato de que, naquela época, vivia-se em um regime escravocrata, e qualquer trabalho manual era visto como inferior (KUHN, 2006) Na Idade Média, a igreja toma a proposta de Aristóteles como doutrina, que é ensinada por

1 Professor de Física na Universidade Federal do Ceará; Doutorado em Física pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho; Email:geovamaciel@gmail.com

2 Professor de Física na Universidade Estadual do Ceará; Doutorado em Física pela Universidade Federal do Ceará. Email: makariustahim@gmail.com

3 Professor de Física na Universidade Estadual do Ceará; Doutorado em Física pela Universidade Federal do Ceará, Email:celiomuniz@yahoo.com

4 Professor de Física na Universidade Federal do Ceará; Doutorado em Física pela Universidade Federal do Ceará Email:raimundo.costaafilho@gmail.com.

vários séculos como sendo uma verdade inquestionável.

Apesar disso, no século X, o filósofo e matemático afegão Al-Biruni é o primeiro a dizer explicitamente que todos os fenômenos, sejam no céu ou na terra, obedecem às mesmas leis físicas. Mesmo chegando a uma conclusão que posteriormente se mostrou correta, é necessário vê-la de forma crítica. Devemos ter em mente que o importante não é somente a conclusão a que chegamos, mas como chegamos a ela. No caso de Al-Biruni, assim como no de Aristóteles, essa conclusão foi alcançada sem um método experimental, como o utilizado na Física Moderna.

No século XIV, pouco antes da Revolução Científica, o filósofo e frade William de Ockham, afirma um princípio simples, mas de grande importância, conhecido como “Navalha de Ockham”. Em suas próprias palavras: “Se em tudo o mais forem idênticas às várias explicações de um fenômeno, a mais simples é a melhor». Em outras palavras, uma teoria com menos premissas e que explica os mesmos fatos é a melhor. Transportando esta ideia para a Física, podemos dizer que esse princípio está fortemente ligado à ideia de unificação, já que nesta buscamos uma teoria única que nos explicaria todos os fenômenos da natureza, reduzindo assim ao máximo o número de premissas.

Com o advento da era moderna, pode-se dizer que a unificação na Física caminhou a passos largos. Galileu funda a Física Moderna ao defender que, para se entender os fenômenos, deve-se empreender a realização exaustiva de experimentos controlados. Através de seus experimentos, propõe o Princípio da Relatividade, ou seja, que as leis da Mecânica devem ser as mesmas para referenciais com velocidades relativas constantes, ditos inerciais. O exemplo dado por Galileu é simples: imagine que alguém esteja dentro de um quarto fechado sem janelas. Para essa pessoa seria impossível diferenciar experimentalmente se ela estaria em movimento com velocidade constante, em um barco, por exemplo, ou se estaria em terra firme. Quaisquer experimentos com colisões de bolas ou de objetos em queda livre forneceriam resultados idênticos e não permitiria saber o estado de movimento do quarto. Esse fato, apesar de aparentemente óbvio, tem que ser testado experimentalmente, pois não há nenhuma contradição lógica se o contrário for verdadeiro.

Este é o primeiro momento em que o Princípio da Relatividade é afirmado, mas é interessante notar aqui algo muito importante: Galileu afirma que as leis da Mecânica são as mesmas para dois referenciais animados com velocidades relativas constantes. Mas como relacionar um referencial a outro? De nossos estudos escolares, sabemos que essa transformação é dada por “ $s' = s - vt$ ”, onde “ s ” é a posição (coordenada medida numa dada direção) do objeto para um referencial com velocidade “ v ” em relação ao referencial em repouso e “ s ” a posição para este referencial. De fato, essa relação entre os dois referenciais nem sempre é válida. Veremos, posteriormente, que Einstein manteve o Princípio da Relatividade de Galileu, mas modificou a relação (ou transformação) entre os dois referenciais. Uma das suposições que podem ser usadas para obter a relação encontrada por Galileu é que o comprimento dos objetos é o mesmo para os dois referenciais, o que deixa de ser válido na Relatividade de Einstein.

Chegamos agora em um ponto que pode ser visto como a primeira unificação da história da Física. Através da observação da Lua por meio de um telescópio, Galileu notou que nosso satélite natural possui montanhas e que, dada a posição do Sol, as sombras são projetadas de forma idêntica ao que acontece na Terra. Através desse simples dado experimental, Galileu chegou a uma conclusão de grande profundidade: diferente do que disse Aristóteles e do que era defendido pela igreja, as leis da Terra e do Céu são as mesmas! Na Lua, montanhas projetam sombras obedecendo às mesmas leis que usamos na Terra. Dessa forma, Galileu unificou as leis do Céu e da Terra, isto é, as leis das esferas celestes e as do mundo sublunar, derrubando uma doutrina que perdurou por séculos.

Pouco tempo após Galileu, Newton propõe as leis da dinâmica e expõe suas concepções de espaço e tempo. Para ele, estas entidades eram independentes de quaisquer influências “exteriores” e os fenômenos físicos aconteciam nesse “teatro” imutável. Newton também propôs a lei da gravitação. Para ele, a força que faz a maçã cair é a mesma que mantém os planetas em órbita. Para isso, era necessária uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância entre os corpos. Dessa forma, Newton reforça a ideia de Galileu de que as leis da Física são as mesmas na esfera celeste e no mundo sublunar. Esta lei seria, portanto, chamada de Gravitação Universal.

A próxima grande unificação na Física iria acontecer somente no século XIX. Antes de 1820, a eletricidade e o magnetismo eram pensados como fenômenos distintos. Nesse ano, Oersted notou que uma agulha imantada próxima a um fio era defletida ao se ligar uma corrente elétrica. Sabendo que esse tipo de deflexão era causado pelo magnetismo, Oersted imediatamente vislumbrou que deveria haver alguma relação entre a eletricidade e o magnetismo. Posteriormente, essa ideia foi desenvolvida por Ampère e Faraday, e passou-se então a denominar essa teoria de Eletromagnetismo. É importante notar que, para esse fim, Faraday introduziu a ideia de campo. Para ele, o campo eletromagnético iria intermediar a interação entre dois objetos carregados. Futuramente, a ideia de campo teria um papel predominante na Física do século XX.

O Eletromagnetismo propiciou a próxima e última unificação do século XIX. De posse das equações que descrevem o Eletromagnetismo, Maxwell introduziu um novo termo usando motivações de consistência da teoria. Com a introdução desse novo termo, ele mostrou que o campo eletromagnético obedece a uma equação de onda e, ao calcular a velocidade de propagação dessa onda, surgiu uma grande surpresa: essa velocidade era igual à da luz no vácuo, conhecida de diversos e independentes métodos de medida. Assim, Maxwell propôs que a luz era uma onda eletromagnética, unificando dessa forma a Ótica e o Eletromagnetismo. É importante notar que boa parte das teorias da Física, na época, foram unificadas: a eletricidade, o magnetismo e a ótica. A única que permanecia excluída era a Gravitação, problema que, de fato, perduraria por muito tempo. Apesar disso, Faraday já tinha procurado experimentalmente alguma relação entre Eletromagnetismo e Gravitação.

É digno de nota que ainda no século XIX, Riemann prova que a matemática é consistente quando são consideradas dimensões espaciais maiores que três o que teve um grande impacto na época, e que gerou importância crescente nas buscas por unificação durante o século XX.

Após a prova de Riemann, muitas especulações ocorreram em torno da existência real dessas dimensões. Até mesmo a literatura foi influenciada, e livros sobre seres fictícios que povoavam as dimensões extras apareceram. Apesar disso, somente no século XX, as consequências físicas da existência de dimensões extras começaram a ser compreendidas melhor.

O Espaço-Tempo Dinâmico

O início do século XX foi aberto por duas revoluções: o início da Mecânica Quântica com Planck e o desenvolvimento da Relatividade Especial por Einstein. Esta acrescenta uma nova constante fundamental da natureza, a velocidade da luz (c). Nada na natureza pode viajar numa velocidade maior que a da luz, que se torna um limite superior de velocidade. Além disso, como dito na introdução, Einstein preserva o princípio da relatividade de Galileu, mas muda as transformações que relacionam dois referenciais inerciais, que agora têm a forma: “ $s'=k(s-vt)$ ” onde “ k ” é um fator multiplicativo que depende da velocidade “ v ”. Além disso, o tempo medido pelos dois referenciais é diferente, com relação dada por: “ $t'=k(t-vs/c^2)$ ”.

Podemos citar várias consequências importantes da Relatividade Especial, dentre elas, a unificação de várias entidades que antes se achava não terem relação direta. Primeiramente, o espaço e o tempo foram colocados em pé de igualdade, de forma que passou a ser denominado espaço-tempo. Isso pode ser visto pela transformação dada acima, em que além das coordenadas, o tempo também se modifica quando mudamos de um referencial para outro. Isso levou à noção de espaço quadridimensional, em que a quarta dimensão seria de natureza temporal, não espacial. Além disso, a relação $E=mc^2$ também pode ser vista como uma unificação entre matéria e energia, uma vez que estas podem se *transmutar* entre si.

Na segunda década do século XX, Gunnar Nordstrom fez talvez a primeira tentativa teórica de unificar a gravitação com o eletromagnetismo. Para isso ele acrescenta às quatro dimensões espaços-temporais uma dimensão espacial extra, obtendo, portanto, um espaço de cinco dimensões, quatro espaciais e uma temporal. Para ele, essa dimensão extra seria apenas um artifício matemático, sem se realizar de fato na natureza. Na sua teoria, o eletromagnetismo em cinco dimensões daria origem ao eletromagnetismo e à gravitação em quatro. Logo, para um observador que vive em quatro dimensões, a gravitação seria na verdade uma manifestação do eletromagnetismo pentadimensional. A nossa impossibilidade de enxergar essa dimensão extra viria do fato dela ser compacta, ou seja, teria a forma de uma circunferência de raio infinitamente pequeno. A teoria foi esquecida, pois não previa a correção para o periélio de Mercúrio nem a deflexão da luz, os quais foram obtidos por Einstein na sua teoria Geral da Relatividade.

Também na segunda década do século passado, em paralelo ao trabalho de Nordstrom, Einstein desenvolveu a teoria da Relatividade Geral. A principal motivação era a inconsistência existente entre a gravitação universal de Newton e a Relatividade Especial. A gravitação universal newtoniana é uma força de ação à distancia, ou seja, se diminuirmos a distância entre um corpo e outro que esteja a uma grande distância, este sentiria o aumento da força instantaneamente. Segundo a Relatividade Especial, nada pode se propagar com uma velocidade maior do que a da luz; deste modo, ou a Relatividade ou a Gravitação deveriam ser modificadas. Einstein modificou a Gravitação newtoniana e a unificou com a Relatividade Especial, dando origem à Relatividade Geral. Com o desenvolvimento desta teoria, Einstein chegou a conclusões profundas sobre a estrutura do espaço-tempo. A primeira é que, diferente do que foi suposto por Newton, o espaço-tempo é dinâmico e pode ser encurvado. Essa forma de se encurvar depende da distribuição de matéria e energia do universo. Esse espaço curvo nos dá, por exemplo, a deflexão da luz que foi medida posteriormente, confirmando assim a Teoria da Relatividade Geral. Portanto, o espaço-tempo deixou de ser o teatro em que os fenômenos físicos aconteciam para entrar, dinamicamente, no desenrolar dos próprios fenômenos. Além disso, Einstein estendeu o princípio da relatividade para referenciais quaisquer e não somente aqueles com velocidade relativa constante.

Outra previsão importante da Relatividade é a existência de buracos negros. O primeiro a notar essa possibilidade foi Schwarzschild, ao encontrar uma solução com simetria esférica para as equações de Einstein. Segundo sua solução, existe a possibilidade de uma região do espaço-tempo ser tão curvo que nada conseguiria sair dela. Essa região teria a forma de uma esfera, e todo corpo que ultrapassasse o horizonte de eventos (a casca desta esfera), nunca poderia sair. De fato, essa solução tem um problema, pois ao nos aproximarmos da origem desta esfera, obtemos resultados infinitos para a curvatura do espaço-tempo. Esse infinito pode nos indicar que a Relatividade Geral não seja mais válida para regiões com curvaturas muito grandes. Fisicamente, esta situação ocorre quando uma estrela sucumbe à sua atração gravitacional e sua massa se concentra em um ponto, dando origem a uma singularidade no espaço-tempo chamada de buraco negro.

Após o desenvolvimento da Relatividade Geral, Kaluza utiliza a ideia de dimensão extra de Nordstrom, mas propõe que a teoria fundamental seria a Gravitação. Dessa forma, a Relatividade Geral seria válida em um espaço de cinco dimensões, e para observadores que vivem nas quatro dimensões, o eletromagnetismo seria uma manifestação da gravitação pentadimensional. Note a inversão que ocorre entre Kaluza e Nordstrom; para este, a teoria fundamental seria o eletromagnetismo. Isso foi possível porque a Relatividade Geral apresenta um grande número de componentes para o campo gravitacional, ampliado pelo acréscimo de mais uma dimensão no espaço-tempo, o que possibilita interpretar alguns desses componentes como sendo os do campo eletromagnético. Para Kaluza, assim como para Nordstrom, essa dimensão extra era somente um artifício matemático.

Oscar Klein, usando ideias da Mecânica Quântica, foi o primeiro a propor que essa dimensão seria real e desenvolveu a teoria de Kaluza, que ficou então conhecida como teoria de Kaluza-Klein. Esta teoria obteve resultados importantes, mas tinha alguns problemas. O primeiro era a existência de uma partícula não massiva, que não era encontrada na natureza. O outro era o problema da estabilidade da dimensão extra. Assim como Nordstrom, Kaluza e Klein consideraram que essa dimensão compacta tinha a forma de uma circunferência de raio “ r ”. O problema, nesse caso, seria explicar o fato do raio dessa dimensão extra permanecer constante. Se isso não acontecesse, o raio poderia colapsar para zero, deixando-nos novamente com um universo de quatro dimensões, ou poderia se expandir dando-nos então uma dimensão extra que seria visível. A teoria foi esquecida para reaparecer novamente algumas décadas depois. Einstein passa então praticamente todo o resto de sua vida à procura de uma teoria do campo unificada, uma teoria única que poderia descrever tanto o eletromagnetismo como a gravitação.



A Revolução Quântica

Como dito na seção anterior, a teoria quântica foi uma das revoluções do início do século XX. Sem entrar nos pormenores do seu desenvolvimento, podemos dizer que é uma teoria para explicar fenômenos que ocorrem em escala microscópica. Deste modo, toda a física atômica, por exemplo, é estudada através desta teoria. Durante o desenvolvimento da teoria quântica, criaram-se os chamados métodos de quantização. Isso quer dizer que qualquer que seja a teoria, desde que envolva de alguma forma fenômenos em escala microscópica, ela deve ser quantizada. Em princípio, a teoria quântica foi desenvolvida para fenômenos não relativísticos e para explicar o comportamento de uma partícula. Essa teoria foi então denominada Mecânica Quântica.

Algo importante a se notar é o fato de ser necessário associar um campo a cada partícula descrita pela Mecânica Quântica, o que ficou conhecido como dualidade onda-partícula. Isso se deve ao fato de um elétron, por exemplo, poder ter um comportamento do tipo partícula ou do tipo onda devido a esse campo associado a ele. Podemos nos perguntar, portanto, se seria necessário quantizar o campo eletromagnético. De fato, isso ocorreu e deu origem a Teoria Quântica de Campos. O interessante é que isso fornece como resultado o fóton, ou seja, o “quantum” de luz, reforçando, portanto, a dualidade onda-partícula.

Até agora, descrevemos brevemente a quantização da partícula e do campo eletromagnético, mas o fato é que, nas primeiras décadas do século XX, mais duas interações fundamentais foram descobertas. A primeira foi a força fraca, que é responsável pelos fenômenos de decaimento radioativo, que vinham sendo estudados e descritos experimentalmente desde o início de século. A outra é a força forte, responsável pela coesão dos núcleos atômicos. A partir da década de 30,

enquanto Einstein dedicava-se à sua teoria unificada do campo, a Teoria Quântica de Campos desenvolveu-se, sempre no intuito de quantizar consistentemente tanto o eletromagnetismo quanto as forças fraca e forte.

Neste ponto, podemos nos fazer a seguinte pergunta: que teoria devemos usar para descrever um buraco negro? A teoria da Relatividade Geral seria necessária, pois estamos lidando com campos gravitacionais intensos. A teoria quântica também seria necessária, dado que estamos lidando com um objeto microscópico, pois toda a massa de uma estrela está concentrada em um ponto. Portanto, o correto seria usar uma teoria quântica da gravitação. Como a gravitação é descrita por um campo, o mais óbvio seria tentar usar os métodos desenvolvidos pela Teoria Quântica de Campos. Seguidas vezes isso foi tentado sem sucesso, usando diversos métodos e ferramentas que, com o tempo, foram desenvolvidos no âmbito dessa teoria. Físicos famosos como Pauli e Heisenberg tentaram quantizá-la, sem sucesso.

Apesar desses problemas em aberto, a maior parte da comunidade de físicos da época se concentrou no desenvolvimento da teoria quântica, deixando de lado a Gravitação. A Teoria Quântica de Campos deu origem à próxima grande unificação da história da física, dando grande impulso nesta ideia. Weinberg, Salam e Glashow mostraram que o Eletromagnetismo e a Força Fraca eram manifestações de uma única força, que ficou conhecida por Eletrofraca. Por essa unificação receberam o Prêmio Nobel de Física de 1979. Dessa forma, todos os fenômenos eletromagnéticos e os relacionados a decaimento radioativo poderiam ser explicados por essa única teoria. Os mesmos métodos foram usados para a força forte com sucesso e isso nos dá o modelo padrão das partículas elementares.

O Modelo Padrão é fortemente baseado no conceito de grupos de simetria e consegue explicar, num arcabouço único, as forças eletromagnética, fraca e forte. O grupo de simetrias do modelo padrão é dado por $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ e tem como componentes fundamentais o que ficou conhecido por bósons e férmions (QUIGG, 1983). Os férmions são o que forma a matéria e os bósons são responsáveis por sua interação. Assim, o elétron seria um férmion e o fóton (quantum do campo eletromagnético) seria um bóson. Para as outras forças temos algo semelhante. Para a força forte, por exemplo, os férmions seriam os quarks e o campo responsável por sua interação dará origem aos glúons, que são bósons. A única interação não incluída no MP é a gravitacional. De fato, apesar da tentativa de grandes físicos do século passado, como Feynman, Heisenberg e Dirac, nem mesmo uma versão quântica da gravidade foi obtida.

Note que, semelhante ao que ocorreu no século XIX, chegamos a um ponto em que praticamente todos os fenômenos podiam ser explicados por um conjunto único de ideias, enquanto a gravitação permanece de fora. Logo, a gravitação encontrava-se, em princípio, com dois problemas: encontrar uma quantização consistente e unificá-la com as outras três interações fundamentais.

A Estrada Para a Unificação

Depois do desenvolvimento do Modelo Padrão, a busca por uma teoria que o unificasse com a gravitação tornou-se o santo graal da física fundamental. Com esse fim, Bryce Dewitt generaliza a ideia de Nordstrom e inclui mais sete dimensões para obter o grupo de simetria correto. Dessa forma, semelhante ao modelo de Kaluza-Klein, a teoria fundamental seria a gravitação em onze dimensões e todas as forças do modelo padrão (Eletrofraca + Forte) seriam manifestações daquela

teoria (fundamental) nas quatro dimensões não compactas. Um dos problemas dessa unificação é que ela não inclui férmions, ou seja, a matéria. Outro problema seria o fato de que as dimensões extras aparecem de forma *ad hoc*, na teoria.

Durante o desenvolvimento do MP, foi descoberta a supersimetria (BILAL, 2001), uma simetria entre bósons e férmions. Para cada férmion e bóson da natureza deveria haver um superparceiro e a quantidade de partículas da natureza dobraria. Deste modo, a supersimetria pode ser vista como uma unificação das noções de bósons e férmions. Além disso, a supersimetria tem uma característica muito importante: ela diminui as divergências (infinitos) que aparecem em uma teoria.

Devido a essas características, Freedman, Ferrara e Nieuwenhuizen propuseram uma versão supersimétrica da gravitação, denominada supergravidade (BERGSHOEFF, 1982). A ideia seria matar dois coelhos com uma cajadada só. O primeiro seria que os férmions entrariam naturalmente na teoria, devido à supersimetria. O segundo era a esperança de que, como a supersimetria diminui as divergências de uma teoria, a teoria fosse renormalizável. Infelizmente, foi mostrado que a teoria não é renormalizável, por essa razão, a teoria ficou parcialmente esquecida.

Existe atualmente uma proposta que resolve tanto o problema da quantização quanto o da unificação da gravitação com as outras forças. Essa é conhecida como teoria de supercordas. Um dos aspectos interessante dessa proposta é que ela engloba todas as propostas anteriores de unificação, como a supersimetria e a existência de dimensões extras. Até então, todas as teorias consideravam como entidades fundamentais da natureza objetos pontuais. Esses descrevem no espaço-tempo o que é conhecido como *worldline* (linha-mundo). A teoria de cordas, por sua vez, considera como entes fundamentais objetos unidimensionais que, ao se propagarem no espaço-tempo, descrevem uma *worldsheet* (folha-mundo).

Esta ideia pode parecer simples, mas as consequências são de longo alcance. Ao se quantizar a teoria de cordas livre de interações, a primeira coisa que se observa é que no espectro da corda fechada existe um modo de vibração não massivo de spin 2 (POLCHINSKI, 1998), que é identificado com o gráviton, a partícula mensageira da interação gravitacional. Isso é uma indicação de que a teoria de cordas seja uma teoria quântica da gravidade. De fato, ao se considerar campos de fundo aleatórios, ou uma métrica qualquer, vê-se que uma corda só pode se propagar consistentemente se esses campos obedecerem à equação de Einstein da Relatividade Geral. Logo, vemos que a teoria de cordas não só quantiza como exige a gravitação como uma condição de consistência quântica.

Já no espectro da corda aberta, temos um modo de massa nula e spin 1 (POLCHINSKI, 1998), que é o mensageiro da interação eletromagnética. Logo, a teoria de cordas também resolve o segundo problema, unificando as interações eletromagnética e gravitacional. Todos os campos descritos acima são campos bosônicos, e essa teoria de cordas, que não possui férmions, são chamadas de corda bosônica. Um fato intrigante e interessante da teoria de cordas é que ela é altamente determinada por condições de consistência. Uma dessas condições nos diz que a teoria é consistente em um espaço-tempo de 26 dimensões, podendo isso ser visto como mais uma previsão da teoria: o número de dimensões do espaço-tempo.

Como exposto anteriormente, a ideia de dimensões extras não surgiu em teoria de cordas (APPELQUIST, 1988). O ponto forte no modo como surgem nesta teoria é que elas não aparecem de forma *ad hoc* ou impostas, mas como uma condição de consistência, portanto, essa é uma restrição imposta pela teoria de cordas: o espaço não pode ter quatro ou sete dimensões, é necessário que sejam exatamente 26.

É importante notar que, dentre os experimentos a se realizar no LHC (Large Hadron Collider), está à busca da existência de dimensões extras. Isso não seria uma comprovação da teoria de cordas, mas daria suporte a ela. Como diria o filósofo Popper, de fato nenhuma teoria física pode ser provada como correta, o máximo que podemos ter são tentativas frustradas (ou não), de que ela esteja errada. Portanto, se dimensões extras não forem encontradas no LHC isso será um problema para a teoria de cordas. Se elas forem encontradas, isso não comprova que a teoria esteja correta, apesar de dar suporte à mesma.

A teoria da corda bosônica tem o problema, como o próprio nome diz, de não possuir férmions. Além disso, ela descreve uma partícula de massa negativa, que vem do modo zero de oscilação da corda. Esses problemas podem ser resolvidos acrescentando-se férmions na teoria, através da supersimetria (POLCHINSKI, 1998). Com isso, a teoria de cordas engloba mais uma ideia utilizada nas tentativas de unificação, dando-nos a teoria de supercordas.

Existem versões supersimétricas de várias teorias. A do modelo padrão (AITCHISON, 2005) é uma de suas extensões mais promissoras, tendo consequências interessantes inclusive para a cosmologia, em que um dos candidatos à matéria escura é o parceiro supersimétrico do neutrino. Nessas teorias, a supersimetria é colocada de forma *ad hoc*, como no caso das dimensões extras em teorias de Kaluza-Klein. Mais uma vez, podemos dizer que a única a prever a existência da supersimetria é a teoria de cordas, já que isso também é necessário por ordens de consistência da teoria. A supersimetria também será testada pelo LHC (SHMATOV, 2007), o que poderá dar ou não suporte à teoria de supercordas.

É interessante notar que a partir da década de 70, as teorias não renormalizáveis começaram a ser reinterpretadas. A ideia era que o fato de uma teoria não ser renormalizável não indicaria que ela não seria física, mas que ela deveria ser originada de uma teoria mais fundamental (WEINBERG, 1979). A teoria não renormalizável emergiria de forma efetiva, ou seja, como uma consequência de outra teoria que seria renormalizável. Por esse novo ponto de vista, tanto a gravidade quanto a supergravidade podem ser vistas como uma manifestação efetiva de uma teoria mais fundamental, que se mostrou ser a teoria de cordas. É realmente impressionante que o simples fato de considerarmos como objeto fundamental uma corda forneça resultados tão profundos. Dessa pequena suposição, é possível extrair tanto as equações da Relatividade Geral quanto as da supergravidade.

Diferente do modelo padrão, em que o grupo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ é escolhido fenomenologicamente, a teoria de supercordas só é consistente com alguns grupos de simetria: $SO(32)$ e $E_8 \times E_8$ (POLCHINSKI, 1998). As teorias supersimétricas livres de inconsistências são então: Tipo I, Tipo IIA, Tipo IIB, Heterótica $SO(32)$ e Heterótica $E_8 \times E_8$ (LIU, 1990). Algo a ser questionado é o fato de existirem cinco diferentes teorias de cordas consistentes. Isso traria a ideia de que a teoria que se propõe unificar as interações fundamentais não seria única. Esse problema foi resolvido ao se descobrir que todas essas teorias estão relacionadas entre si por uma rede de dualidades. Essas dualidades mostram que tais teorias podem ser consideradas como sendo limites de uma única teoria que ficou conhecida como teoria M.

Tendo no seu espectro todos os campos fundamentais, podemos nos perguntar se a teoria de cordas também prevê a maneira correta de interação entre esses campos. A resposta é sim, e isso é obtido apenas definindo a interação como colando ou separando cordas. Desse ponto de vista, todas as interações da natureza podem ser obtidas. Todos os resultados descritos acima surgem de forma bastante elegante e natural. Por todos esses motivos, a teoria de cordas é vista como a melhor candidata para uma teoria unificada.

Dizemos “candidata”, pois apesar do que foi descrito acima, a teoria ainda precisa ser testada. Isso tem se tornado um problema, pois como uma teoria da gravitação quântica, ela só se manifesta em sua forma completa em escala e energia muito acima da acessível atualmente ao homem. Algumas de suas previsões podem ser testadas no LHC, como dimensões extras e a supersimetria e o que nos resta seria aguardar esses resultados.

Apesar disso, John Schwarz, um dos fundadores da teoria de cordas (GREEN, 1987), costuma dizer que a teoria de cordas já fez sua primeira previsão amplamente testada experimentalmente: a gravidade! Segundo ele, se Einstein não tivesse desenvolvido a Relatividade Geral, ela seria descoberta pela teoria de cordas, da maneira como foi descrita acima.

Referencias Bibliográficas:

AITCHISON, J.R., *Supersymmetry and the MSSM: An elementary introduction*, arXiv:hep-ph/0505105.

APPELQUIST, A. et al.; *Modern Kaluza-Klein Theories*, Addison Wesley Publishing Company, 1997.

BERGSHOEFF, E.; DE ROO, M.; DE WIT, B.; VAN NIEUWENHUIZEN, P.; “*Ten-Dimensional Maxwell-Einstein Supergravity, Its Currents, And The Issue Of Its Auxiliary Fields*”, Nucl. Phys. B195, 97 (1982).

BILAL, A. *Introduction to Supersymmetry*, arXiv:hep-th/0101055v1.

GREEN, M. B.; SCHWARZ, J. H.; WITTEN, E.; “*Superstring Theory. vol. 1*, Cambridge, Uk: Univ. Pr. (1987)

KUHN, T.; *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Editora Perspectiva, São Paulo, 2006.

LIU, J., “*Gauge and Gravitational Anomaly Cancellation In Type I SO(32) Superstring Theory*”, Nucl. Phys. B362, 141 (1991).

POLCHINSKI, J.; *String Theory, vols. 1 e 2*. Cambridge Univ. Press, 1998.

QUIGG, C., “*Gauge Theories of the Strong, Weak And Electromagnetic Interaction*”, Front. Phys. 56, 1 (1983).

SHMATOV, S.; *Search for Extra Dimensions with Atlas and CMS Detectors at the LHC*, arXiv:0707.0470 [hep-ex].

WEINBERG, S., *Phenomenological Lagrangians*, Physica A, 96, 327, 1979.

