

Teoria das supercordas

o limiar de uma nova física teórica

Élcio Abdalla

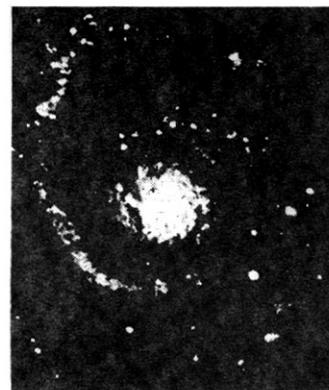
O entendimento do universo como um todo, a relação entre o macro e o microcosmos, e o entendimento da origem do universo são questões que passaram, no decorrer da história, da especulação filosófica para a investigação científica. A teoria das supercordas oferece possibilidades de explicação para estas e outras perguntas. Tal teoria poderá ser também a realização de uma solução do problema central da física teórica, que é a construção de uma teoria unificada para todas as interações elementares da natureza.

A teoria das supercordas contém previsões revolucionárias, como a existência de um grande número de novas partículas, novas dimensões além das três já conhecidas e do tempo, e a possibilidade de existência de uma nova forma de matéria no universo, com a qual só é possível contato através da gravitação.

No final do século passado, a física teórica era tida, por vários estudiosos, como um assunto praticamente terminado. Aqueles pensavam que as teorias, então existentes, poderiam descrever todos os fenômenos da natureza, bastando certa destreza no uso das mesmas. Ao redor da virada do século, o físico alemão Max Planck procurava explicar o fenômeno conhecido como radiação do corpo negro. Para isto postulou a existência de “quanta” fundamentais de energia. A solução de Planck para o problema deu origem à teoria dos quanta, ou mecânica quântica.

No caso da teoria de cordas, havendo a confirmação experimental desejada, a história acima poderá estar se repetindo. Em 1968 o físico italiano Gabriele Veneziano procurava explicar a teoria das interações fortes (forças nucleares) através de uma fórmula simples, dentro de uma teoria onde houvesse o máximo de simplicidade. Após a reinterpretação da fórmula de Veneziano por Y. Nambu, M. Goto, H. B. Nielsen e L. Susskind, aquela deu origem à teoria de cordas, que explicaremos logo mais. De fato, apesar das várias reinterpretções pelas quais a teoria passou, ela é baseada em fatos relativamente simples (apesar de vir a ser tecnicamente complicada). Além disto, tais reinterpretções e refinamentos levaram a teoria a um status tal que possa representar uma teoria geral unificada de todas as interações elementares. Necessários são, outrossim, os fatos experimentais capazes de elevar tal teoria a estabelecer-se definitivamente, com um grande poder de previsão experimental. A teoria geral unificada poderá, caso confirmada, estabelecer relações entre o microcosmos – as partículas elementares, e o macrocosmos – o universo e sua estrutura, assim como fornecer subsídios para um entendimento mais completo sobre a formação de nosso universo, e a origem do tempo cosmológico.

A fórmula de Veneziano, sob o ponto de vista teórico, é apenas a ponta de um enorme iceberg. Ela descreve a interação de objetos filamentosos cujo movimento é regido por uma generalização do movimento einsteiniano de uma partícula em uma geometria



ÉLCIO ABDALLA é professor do Instituto de Física da USP.

determinada. A descrição do movimento é dada por uma ação, que para a partícula é o espaço percorrido (L) da figura 1 e a cada partícula associamos um campo, enquanto que para a corda a ação passa a ser a área varrida (A) durante o seu movimento e as partículas correspondem aos modos normais de vibração da corda (ver figura 2). Choques entre tais objetos filiformes são descritos por uniões e separações de superfícies imersas em um espaço de dimensão arbitrária D como no exemplo da figura 3.

Conforme vemos na ilustração da figura 3, as cordas (que podem ser abertas ou fechadas) podem ser espalhadas, e naturalmente pode-se obter a formação de novos estados.

Um objeto extenso como a corda acomoda um número infinito de partículas. Este fato decorre da chamada dualidade onda-partícula em mecânica quântica, onde uma onda de determinada frequência pode ser associada a uma partícula, de modo que cada excitação da corda corresponderá a uma partícula. Em uma corda fechada, pode-se mostrar que há uma partícula de massa zero com as mesmas características do graviton, a partícula associada ao campo gravitacional.

Para entendermos o papel das cordas na construção de uma teoria unificada de todas as interações, devemos colocar primeiramente a estrutura geral das interações elementares.

Há quatro interações conhecidas na natureza: fraca, eletromagnética, forte e gravitacional. A interação fraca é a responsável pelos decaimentos radiativos, tendo sido a última das interações a ser descoberta pelo homem. Foi estudada por Enrico Fermi na década de 30, e deu origem à descoberta de uma nova partícula, o neutrino. O elétron e o seu neutrino são os léptons da primeira família (ver figura 4 para uma descrição das três famílias conhecidas). A interação eletromagnética é a melhor conhecida, descrevendo a interação elétrica e magnética, e a propagação luminosa. A interação forte (nuclear) é responsável pela estabilidade do núcleo atômico. O próton e o nêutron interagem fortemente, mas não são partículas elementares, e sim formados pelos chamados quarks, ligados entre si pela força forte. A fonte da interação fraca é chamada sabor, e a da força forte é a cor. Lembremos que a fonte do eletromagnetismo é a carga elétrica. A gravitação tem como fonte a massa, e é descrita pela teoria da relatividade geral.

A física das partículas elementares procura teorias que descrevam de maneira uniforme todas as interações acima, o que constitui um problema complexo. A própria definição de uma teoria geral de partículas e campo quantizados é um projeto de difícil execução, e um pequeno histórico nos será útil.

No início do século, duas novas teorias foram descobertas e comprovadas experimentalmente. Uma delas foi a teoria quântica, que abriu as portas ao mundo microscópico. A constante fundamental desta teoria é a constante de Planck, \hbar , que, por ser muito pequena ($\hbar = 6,6 \times 10^{-34}$ j.s.), implica que a teoria só modifica as previsões da teoria clássica (mecânica de Newton) nos domínios microscópicos – tipicamente dimensões atômicas e moleculares, ou menores. Por outro lado, também no início do século uma outra teoria revolucionária estava sendo formulada: a teoria da relatividade. Sua constante fundamental é a velocidade da luz, c , que é muito grande ($c = 300.000$ km/s), e modifica as previsões da mecânica de Newton apenas para objetos muito velozes.

A compatibilização da teoria da relatividade com a teoria da gravitação leva à teoria da relatividade geral, ou teoria de gravitação de Einstein.

A mecânica quântica não-relativística, ou seja, no domínio dos objetos não muito velozes, foi muito bem-sucedida, descrevendo, por exemplo, com grande acuidade, as radiações atômicas, problema insolúvel no domínio da física clássica. No entanto, a descrição completa dos fenômenos naturais só se daria em uma teoria quântica relativística. Esta teoria foi de início formulada por P.A.M. Dirac em 1928 para o elétron. A formulação de Dirac previa a existência de um novo tipo de matéria, com as mesmas características e carga oposta à usual. A princípio pensou-se que tal nova partícula fosse simplesmente o próton, o que provou-se errôneo. Era na verdade o que chamamos anti-matéria; o antielétron foi logo descoberto e chamado de pósitron. Tal teoria, com todas as suas conseqüências no domínio da eletrodinâmica foi completada por R. P. Feynman em 1948, recebendo o nome de eletrodinâmica quântica (EDQ), sendo ainda hoje objeto de estudo. O sucesso da EDQ é enorme, tendo previsões com até dez casas decimais de precisão em relação aos dados experimentais conhecidos, como, por exemplo, o fator giromagnético anômalo do elétron (de fato, pode-se dizer que neste domínio a teoria passou à frente da experiência).

No entanto, conforme vimos, a EDQ não é a única interação da natureza. A teoria

quântica relativística – ou teoria de campos, começou a ser formulada para as outras interações.

A interação fraca teve sua primeira versão teórica formulada em 1937 por Enrico Fermi. Há vários pontos deficientes na teoria de Fermi. Em particular ela não é compatível com a teoria de probabilidades, conceito fundamental da mecânica quântica. Este e outros problemas foram resolvidos com a formulação de uma teoria que unificasse as interações eletromagnética e fraca, a chamada teoria eletrofraca de Steve Weinberg e Abdus Salam.

Teorias unificadas são baseadas na idéia de quebra espontânea de simetrias. Uma lei de simetria na física é definida por um conjunto de leis de transformações que não mudam as quantidades relevantes da teoria. Este conjunto de leis de transformação forma uma estrutura matemática chamada grupo. Assim, por exemplo, o fato do espaço ser isotrópico está associado a uma simetria de rotação, caracterizada por um grupo $O(3)$. A simetria de translação está associada ao grupo de Poincaré. Teorias tais que tenham as mesmas leis definidoras em sua imagem especular são invariantes pela simetria de paridade. A cada simetria das leis da física está associada uma quantidade conservada. À simetria de rotação está associada a conservação do momento angular. À simetria de translação no espaço está associada a conservação do momento (ou lei da inércia). À simetria temporal associa-se a conservação da energia. Há várias simetrias das leis da natureza. As equações de Maxwell do eletromagnetismo possuem uma simetria chamada simetria de *gauge* (calibre), com grupo $U(1)$ à qual se associa a conservação da carga. As simetrias de calibre têm uma interpretação geométrica e estão associadas às teorias fundamentais de interações.

A idéia de quebra espontânea de simetria é fisicamente simples. Tomemos como exemplo um material suscetível ao magnetismo. A uma temperatura muito alta, um meio material é isotrópico, sendo equivalente olhar para qualquer direção do espaço. O grupo de simetrias é o de rotação em torno de qualquer eixo, em matemática chamado $O(3)$. No entanto, ao baixarmos a temperatura, haverá um instante a partir do qual formar-se-á espontaneamente uma ordem no material, que passa a ter propriedades magnéticas, e ele se torna um ímã. Desta forma aparece uma direção privilegiada no espaço, e só há isotropia em torno do eixo magnético. Diz-se que o grupo de simetria é agora $O(2)$. Houve uma quebra espontânea denotada por $O(3) \rightarrow O(2)$.

Em teorias de campos aplica-se a mesma idéia. A temperaturas muito altas há uma máxima simetria de calibre, num espaço interno caracterizado por diferentes tipos de cargas. Quando a temperatura abaixa, o equivalente ao congelamento, nesta teoria, é a geração de massa para os mediadores da interação (os “fótons” da teoria). Sendo massivos, eles se tornam menos efetivos, no sentido de se tornarem de curto alcance e mais fracos. É por isto que a interação fraca é mais fraca que a eletromagnética. Os mediadores das interações fracas, que corresponderiam aos fótons luminosos destas interações são chamados W^+ , W^- e Z^0 e foram medidos no início desta década no Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (CERN) em Genebra, Suíça, pelo grupo do prof. Carlo Rubbia, num enorme acelerador realizado graças a um invento do holandês S. van der Meer. A quebra de simetria acima descrita é denotada por $SU(2) \times U(1)_y \rightarrow U(1)_{EM}$.

O sucesso de tal unificação levou à formulação, por vários autores, de uma teoria grande unificada (TGU) incluindo as interações fortes. Supõe-se um grupo de simetria

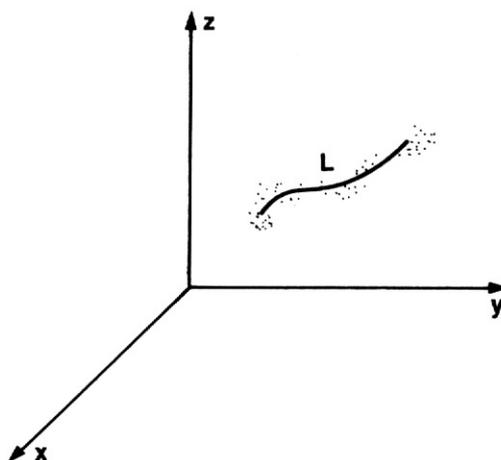


Figura 1 – Um ponto material descreve uma trajetória no espaço-tempo. A ação que descreve a dinâmica da partícula é proporcional ao espaço percorrido: $S = -mL$, onde m é a massa. A dinâmica correspondente é a mecânica relativística.

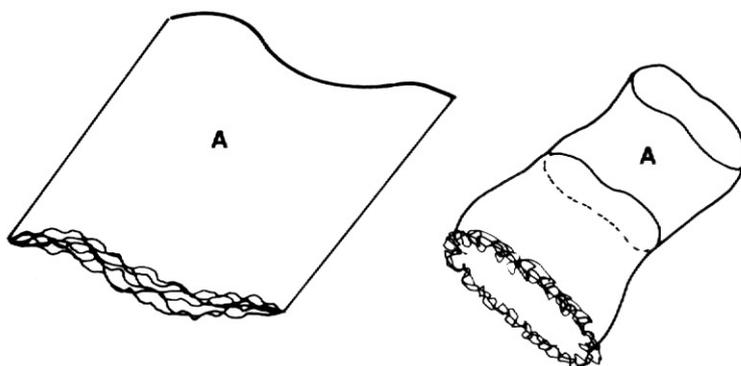


Figura 2 – Uma corda aberta descreve uma trajetória, definindo uma área no espaço-tempo. A ação é proporcional à área: $S = -TA$, onde T é a tensão da corda. As excitações tipo onda correspondem às partículas elementares da teoria.

Figura 3 – Cordas abertas (a) ou fechadas (b) interagem, formando estados ligados, e partindo-se posteriormente. No exemplo (b) há emissão de uma terceira corda, que corresponde a um processo de irradiação.

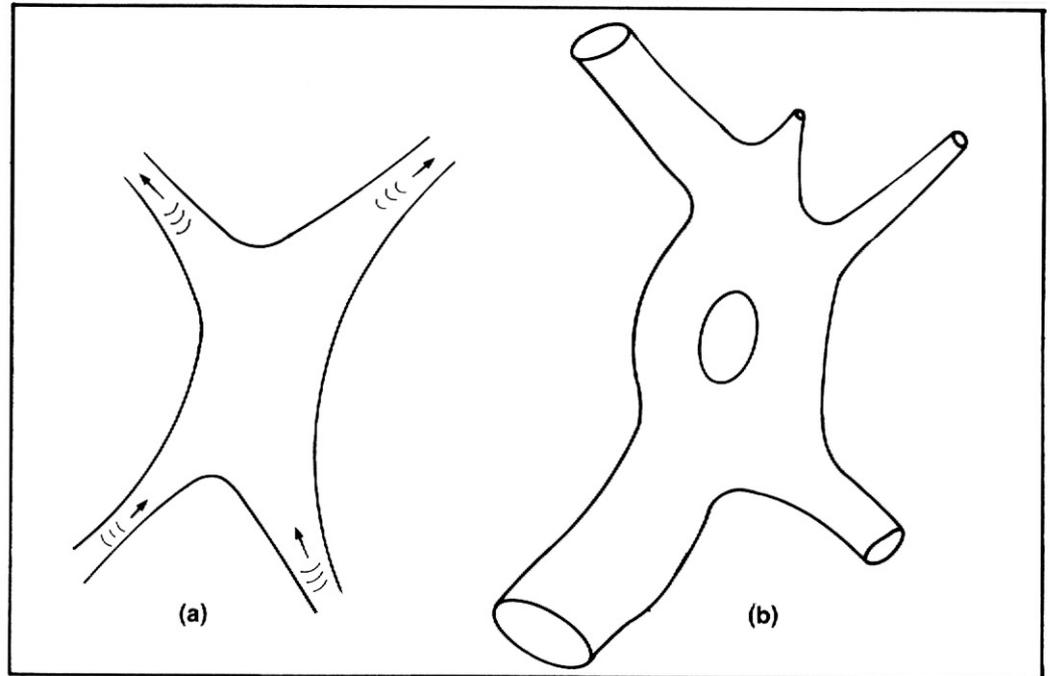


Figura 4 – Mostra as famílias de partículas elementares. A mais conhecida é a primeira. Neste caso, os hadrons, os quarks u e d são os formadores do próton e do nêutron. O elétron e seu neutrino completam a primeira família.

		FAMÍLIAS		
FÉRMIONS	com carga de cor (quarks)	u (<i>up</i>) d (<i>down</i>)	c (<i>charm</i>) s (<i>strange</i>)	t (<i>top</i>) b (<i>bottom</i>)
	nêutrons em carga de cor (léptons)	ν_e	ν_μ	ν_τ
		e^-	μ^-	τ^-

BÓSONS	de gauge eletrofraco	γ (fóton) $W^+ W^- Z^0$
	de gauge forte (gluons)	$\gamma^a a = 1, \dots, 8$
	de Higgs	H

de calibre suficientemente grande, que englobe todos os anteriores, de modo que com o resfriamento sucessivo chega-se à simetria relativa às três interações conhecidas. Há previsões que vão sendo testadas experimentalmente, e há uma grande expectativa pelos resultados. O principal deles é a previsão do tempo de decaimento do próton, cuja vida média prevista, dependendo da teoria, é grande (da ordem de 10^{33} anos ou mais) mas é finita.

Neste ponto podemos colocar uma questão de relevância, no que concerne à temperatura de que se fala acima. De fato, tal temperatura é real e procede do seguinte. Quando Einstein propôs a teoria geral da relatividade, ele verificou que há soluções de suas equações para o universo, que não são estáticas, mas sim demonstram uma evolução: o universo evolui de uma grande explosão inicial, que seria mais tarde chamada de *big-bang*, ou grande explosão. Inicialmente Einstein considerara tal solução errada, pois supusera um universo estável, com galáxias fixas. Einstein tentou modificar suas equações introduzindo o chamado termo cosmológico para estabilizar a solução. No entanto, o astrônomo E. Hubble observou que o universo está em contínua expansão; as estrelas estão se afastando a uma velocidade tanto maior quanto maior a distância até nós. É como se estivéssemos sobre uma bexiga de borracha que estivesse sendo inflada. Toda esta expansão foi originada de uma explosão presumivelmente ocorrida há cerca de 15 a 20 bilhões de anos. Pode-se calcular a temperatura do universo a cada instante, como na figura 5, que mostra quais os principais fatos característicos da evolução cósmica.

Há um fato marcante, todavia, que não pode passar despercebido. Foi a própria interação gravitacional – solução das equações da relatividade geral, que nos levou às conclusões acima sobre a evolução cósmica. No entanto, ainda não temos uma teoria gravitacional compatível com a mecânica quântica! De fato, todas as tentativas de se construir uma teoria quântica de gravitação esbarraram no problema dos chamados infinitos de teorias de campos: a interação gravitacional, sendo excessivamente não-linear, leva a um número cada vez maior de indefinições na própria teoria. Acontece que a inclusão da teoria gravitacional no esquema de campo unificado, conforme descrevemos anteriormente, não pode ser realizada sem idéias novas. Um elemento essencial no esquema é uma nova simetria das partículas elementares: a supersimetria.

A supersimetria relaciona duas grandes classes de partículas elementares: os bósons e os férmions. Estes dois tipos de partículas são caracterizados pelo valor de *spin*, que mede a capacidade intrínseca de rotação da partícula. De acordo com a mecânica quântica, o *spin* tem valores muito bem definidos, e deve ser um número inteiro ou semi-inteiro em unidades de \hbar , a constante fundamental da mecânica quântica. Quando tal número for inteiro, temos um bóson e quando semi-inteiro, temos um férmion. As duas classes têm características completamente diferentes. Os bósons tendem a se juntar, formando conglomerados. São exemplos de bósons os mediadores de interações, como o fóton, o graviton, o W^\pm e o Z^0 . Por outro lado, os férmions tendem a se separar, de modo que dois férmions idênticos nunca ocupam o mesmo estado. São férmions o próton, o nêutron e o elétron. As diferenças acima são responsáveis por efeitos tais como a superfluidez.

T [Gev]	t (seg)	
		Supercordas (10 dimensões)
10^{19}	10^{-44}	{ Tempo de Planck Gravidade forte; Supergravitação
10^{15}	10^{-36}	{ Quebra da Grande Unificação $SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times SU(1)$ Síntese de Bárions
⋮	⋮	
		Partículas supersimétricas Quebra da supersimetria
10^2	10^{-10}	Quebra de $SU(2) \times U(1)$ $\langle \phi \rangle \neq 0$, W^\pm , Z com massa
10^0	10^{-6}	Quarks, hadrons QCD confina os quarks: formam-se os prótons e nêutrons
10^{-4}	10^2	Síntese de Hélio
10^{-9}	10^{12}	Átomos
	10^{16-17}	Formação de galáxias
3→6	10^{17}	Hoje
	10^{38}	Decaimento do próton
	⋮	
		Universo frio

Figura 5 – Temos a evolução temporal dos vários eventos do universo. A evolução pode ser parametrizada tanto pelo tempo como pela temperatura (ou nível de energia por partícula) do universo.

A supersimetria é necessária para a descrição da teoria grande unificada, mesmo sem gravitação. Basta olharmos a figura 5, que mostra as diferentes ordens de grandeza das temperaturas características dos vários fatos históricos cosmológicos. Tal figura está relacionada com a próxima, a figura 6, que mostra a força de cada interação como função da energia.

Tais figuras mostram os níveis de energia (temperatura) onde uma nova qualidade de física acontece. Note-se que tais níveis são muito diferentes. De fato, a unificação de todas as interações se dá a uma energia de 10^5 Gev (1 Gev = 1 bilhão de elétron volts $\sim 10^{13}$ K), enquanto a transformação da teoria eletrofraca em eletromagnética e fraca se dá a 100 Gev ($T \sim 10^{15}$ K). Tal diferença só pode ser explicada através da supersimetria. Notemos que diferentes escalas de energia são essenciais em nosso universo, onde eventos rápidos como o tempo característico de uma reação química usual são enormemente menores que o tempo característico da vida do próton. No entanto, a supersimetria prevê um número enorme de novas partículas, as companheiras supersimétricas das partículas conhecidas. Ao mesmo tempo, a supersimetria estabiliza a interação gravitacional, no sentido de eliminar várias indefinições da teoria quântica. A supersimetria nasceu, de fato, da velha teoria de cordas, mas tornou-se uma simetria independente, tendo sido aplicada diretamente na teoria de campos quantizados. Mas voltou a ser aplicada em teoria de cordas. Foram P. Ramond, A. Neveu e J.H. Schwarz que descobriram as cordas fermiônicas, ou cordas com *spin*, que tinham uma estranha simetria, na época chamada de *supergauge*.

Uma reinterpretação das cordas com *spin* foi feita pelos físicos F. Gliozzi, J. Scherk e D. Olive, que deu origem à moderna teoria de supercordas. As teorias de cordas estão no limite da inconsistência. A natureza parece escolher caminhos bastante complicados (e ao mesmo tempo ricos!). Dizemos isto porque, de uma maneira geral, estas teorias não são bem definidas, havendo incompatibilidade da teoria com exigências tais como causalidade, ou independência da física em relação ao observador. Isto leva a severos vínculos sobre a teoria. Em particular o espaço-tempo só pode ter 26 dimensões na corda bosônica ou 10 dimensões na corda supersimétrica, sendo esta última bem mais interessante do ponto de vista da fenomenologia física. A construção teoricamente mais interessante é de uma teoria de cordas onde metade das excitações está em um universo de 10 dimensões e a outra metade está num espaço de 26 dimensões, sendo por isto chamada de corda heterótica.

Conforme vimos, as teorias de cordas são bastante complicadas, e devem descrever um mundo bastante complexo. As teorias de cordas passaram a ter grande importância após alguns graves testes pelos quais passaram. A teoria deve descrever um mundo onde não haja simetria de paridade, ou seja, um processo físico olhado no espelho não po-

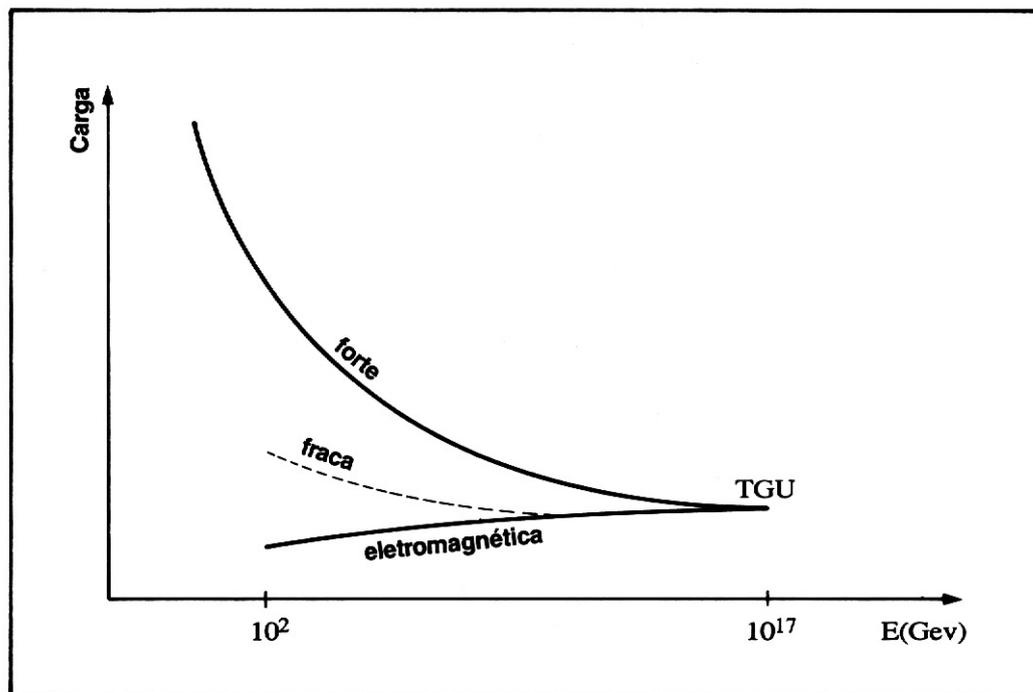


Figura 6 – Na figura 6 vemos como as várias cargas variam com a energia. Há um ponto onde todas as cargas coincidem. Tal ponto corresponde à teoria grande unificada.

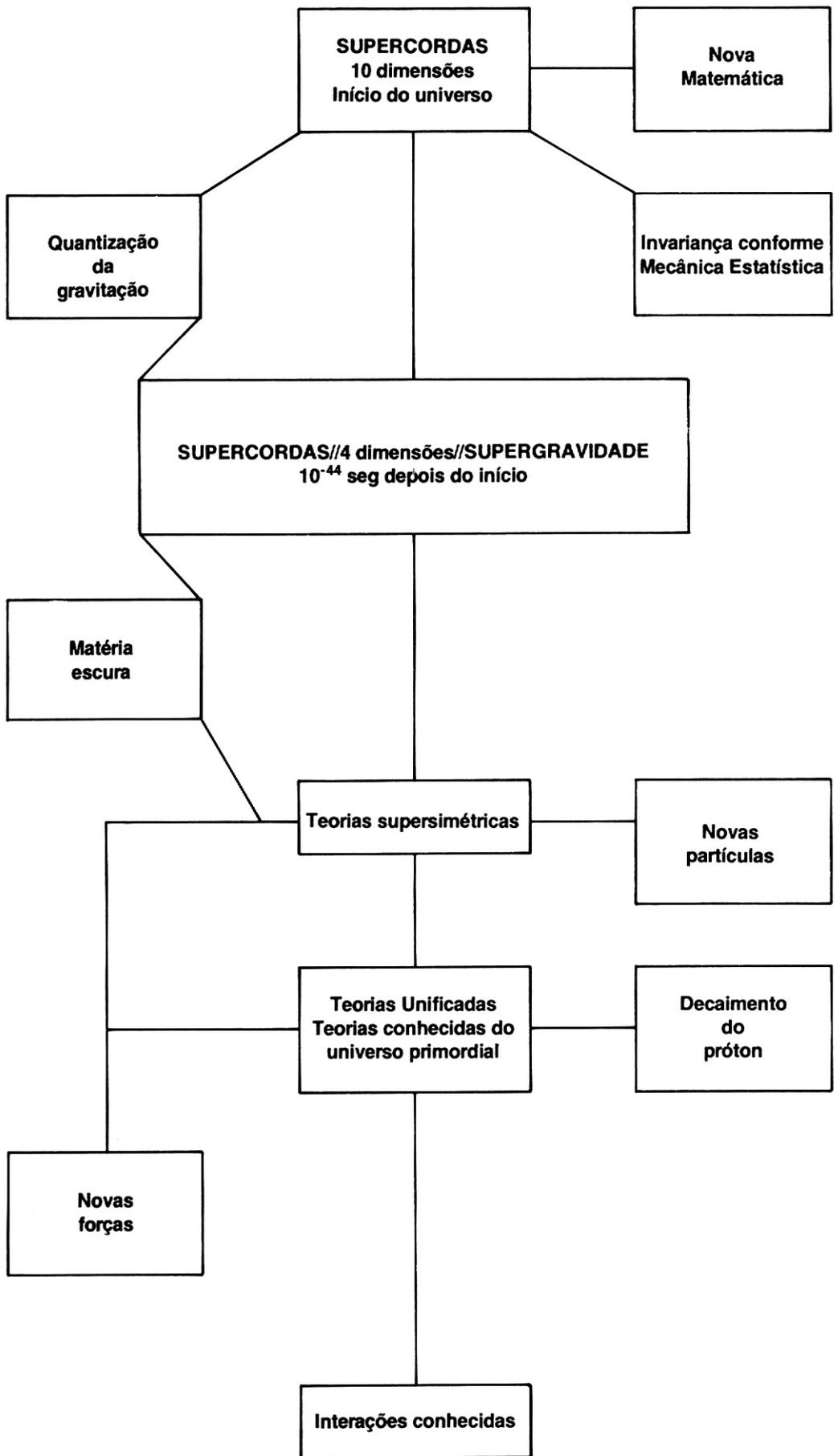


Figura 7 –
As conseqüências da teoria de supercordas podem ser esquematizadas no esquema mostrado na figura 7.

de ser confundido com um processo físico realista. No entanto as teorias acima, chamadas quirais, têm graves incompatibilidades com a mecânica quântica. A conservação da carga e do momento sofrem anomalias quânticas. Foi em 1982 que M. Green e J.H. Schwarz mostraram que o cancelamento de tais anomalias fixa o grupo de simetria de calibre da teoria, que deve ser $SO(32)$, ou melhor ainda $E_8 \otimes E_8$, que são muito complicados, mas que são exatamente os grupos que aparecem na corda heterótica, construída em 1985 por D. Gross, J. Hawey, E. Martinec e R. Rohm.

O problema é que a teoria está definida em dez dimensões (nove espaciais e uma temporal) enquanto a realidade é quadridimensional (três dimensões espaciais e uma temporal). Situação semelhante foi estudada na década de 20 por Th. Kaluza e O. Klein, que desenvolveram a teoria Kaluza-Klein, numa tentativa de unificar as teorias eletromagnética e gravitacional clássicas, através da introdução de uma quinta dimensão. As dimensões extras devem de uma maneira geral compactificar-se tornando-se pequenas demais para a percepção, e seu único resquício fica na interação das partículas elementares. Quando Kaluza lançou sua idéia houve séria resistência. Há pouco a idéia foi revivida, primeiro no contexto de supergravitação, e agora em teorias de supercordas, onde as seis dimensões extras (no caso da corda supersimétrica) devem se compactificar. Um ponto muito importante é a inclusão imediata da teoria da gravitação. No limite pontual da teoria de cordas, uma teoria de supergravidade emerge. Dizemos que é o estado fundamental da supercorda, com um número grande de partículas de massa igual a zero. Estas partículas adquirem massa num processo semelhante ao da quebra de simetria. Estas são as partículas comuns na natureza. Mas há outros estados massivos, com massas muito grandes para serem observadas com os métodos atuais. Segundo a teoria, há 8.064 estados sem massa (ou de massa quase zero) e 18.883.584 estados no primeiro nível excitado. O número de estados cresce muito com o nível. Aparecem vários estados também no processo de compactificação de dez para quatro dimensões.

A teoria de supercordas parece hoje inacessível aos fatos experimentais. Assim, estamos num tempo de maturação da teoria esperando que a experiência comprove ou não esta teoria, ou indique novos caminhos a serem seguidos. De qualquer modo há espaço para várias perguntas, e até mesmo especulações. É claro que há limites severos para respostas, já que a teoria repousa sobre uma matemática nova extremamente complicada, que ainda está em formação. De fato, físicos e matemáticos têm desenvolvido a estrutura matemática em conjunto. De todo modo, um número grande de novas partículas e, portanto, novos mediadores de interações, podem acomodar novos tipos de interações. Tem havido alguma especulação sobre uma possível quinta interação ou quinta força, que poderia ter respaldo na teoria de supercordas.

A imagem do universo também deverá sofrer mudanças dentro da teoria. O instante primordial teria sido regido por uma teoria em dez dimensões, de modo que o processo de compactificação teria força determinante em nosso universo. Em particular, o número de famílias de partículas elementares está determinado por este processo. Uma vez conhecido, teríamos informações suficientes para descrever o processo subsequente. Também no caso da simetria do universo ser do tipo $E_8 \otimes E_8$, temos dois tipos de matéria, uma delas, a que vemos à nossa volta, associada ao primeiro E_8 , e uma outra associada ao segundo E_8 , dita matéria escura, que só interage conosco através da força gravitacional.

De fato, há no universo o que chamamos matéria faltando, pois a matéria (luminosa) que observamos é bem menor que a matéria necessária para explicarmos fatos ligados à teoria da gravitação. É claro que isto não constitui prova para a teoria, já que se pode propor explicações alternativas, mas há possibilidade de concordância com os fatos conhecidos.

Outros desenvolvimentos teóricos foram possíveis com a teoria de supercordas, em particular alguns deles importantes em teorias de matéria condensada^(*). Mas é importante que a teoria tenha confirmação experimental em seu contexto original. Tal desenvolvimento teria, como pudemos ver, um caráter revolucionário em física teórica, com mudanças de interpretação tão grandes quanto aquelas dadas pela teoria da relatividade. É o que chamamos o limiar de uma nova física, à qual já se convencionou chamar de pós-moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GREEN, M. B., SCHWARZ, J. H. e WITTEN. *Superstring theory*. New York, Cambridge University Press, 1987.
SCHWARZ, J. H. *The first 15 years of superstring theory*. World Scientific, 1985.
GREEN, M. B. *Superstrings*, *scientific American*. Setembro, 1986.

A relação da teoria de cordas com outras teorias, assim como suas consequências é mostrada na figura 7.