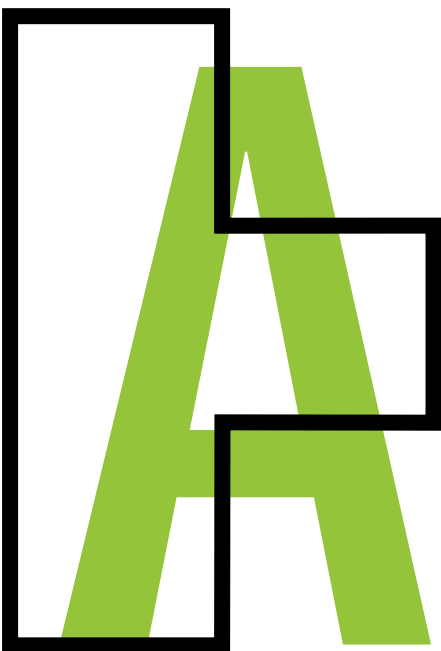


ALBERTO SAA

A unificação das interações da natureza:

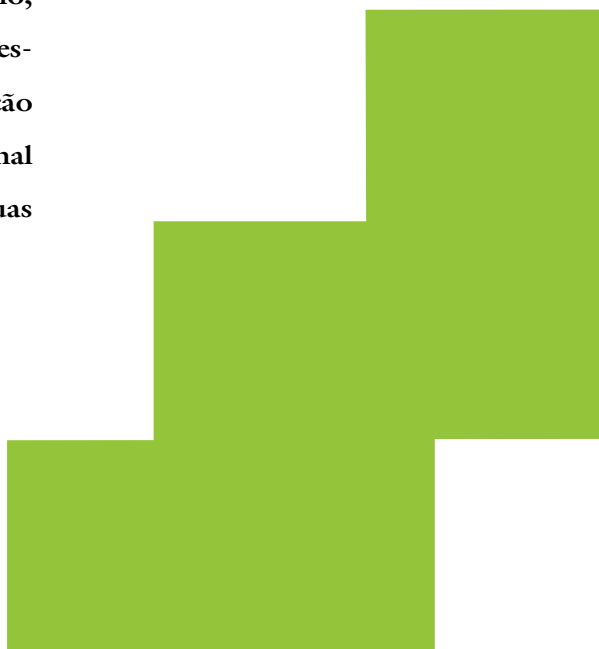
o projeto inacabado de Einstein

ALBERTO SAA
é professor da Unicamp.



Albert Einstein teve uma vida científica profícua. Publicou vários textos e trabalhos além dos três artigos que definiram 1905 como o *annus mirabilis*, o mote das comemorações deste Ano Mundial da Física. Foi na década de 20, então já amplamente reconhecido como um gênio, que Einstein publicou suas primeiras especulações sobre uma possível unificação das teorias eletromagnética e gravitacional num mesmo arcabouço geométrico. Suas

motivações para propor uma descrição única para teorias com fenomenologia e bases teóricas tão distintas como o eletromagnetismo e a gravitação eram, praticamente, de cunho estético. Outra unanimidade sobre Einstein é que ele foi o maior dos estetas da física moderna, talvez de toda a física. O *sonho* da unificação de Einstein tem motivado e mobilizado um enorme número de seguidores nessa tarefa, que se tornou muito mais complexa com o passar dos anos e com o refinamento de nosso conhecimento a respeito das interações fundamentais. Uma considerável parcela dos físicos teóricos atuais ainda se dedica a perseguir a chamada *teoria do tudo*, a qual, infelizmente, continua em um contexto onírico.



Antes de passarmos a descrever os esforços de Einstein e a sorte de seus sucessores nesse empreendimento, convém destacarmos o maior de seus predecessores. Trata-se de James Clerk Maxwell, o gigante de Cambridge no século XIX. A teoria eletromagnética de Maxwell descreve, numa estrutura formal única, os fenômenos elétricos e magnéticos. Antes de Maxwell, tais fenômenos eram descritos por uma série de leis empíricas e fenomenológicas distintas. Seu contemporâneo Michael Faraday já havia descrito as leis da indução eletromagnética, as quais descreviam como um campo magnético variável podia induzir um campo elétrico e, conseqüentemente, uma corrente elétrica em um circuito próximo. Faraday já havia também introduzido o fundamental conceito de *campo*: o conjunto das hipotéticas linhas de força que preenchem o espaço e seriam

responsáveis pelos fenômenos elétricos e magnéticos. Porém, foi somente com a teoria eletromagnética de Maxwell que os campos responsáveis pelos fenômenos elétricos e magnéticos foram efetivamente unificados. Pragmaticamente, isso significa que os campos elétricos e magnéticos passaram a ser descritos numa mesma estrutura formal, isto é, passaram a ser descritos por um mesmo conjunto de quantidades (o campo *eletromagnético*), que satisfazem um certo conjunto de equações matemáticas. Este é o exemplo, por excelência, de uma unificação de teorias físicas. Várias são as vantagens da teoria unificada sobre as anteriores. Pode-se afirmar que a unificação de teorias seria uma tendência natural na ciência, compatível com o princípio da navalha de Occam, argumento heurístico segundo o qual, dentre várias possíveis descrições de um fenômeno, deve-se preferir a que envolve o menor número de hipóteses. Porém, sendo a física uma ciência experimental, a verdadeira vantagem de uma teoria unificada viria de sua capacidade de fazer novas previsões testáveis. E foi por isso, e não por argumentos estéticos nem reducionistas, que a teoria eletromagnética de Maxwell foi aceita e se transformou num dos pilares fundamentais da física. A descrição de Maxwell previa novas formas de interação entre os campos elétricos e magnéticos. Por exemplo, sob determinadas situações, ondas eletromagnéticas, isto é, campos elétricos e magnéticos intimamente relacionados que se propagam no espaço, podiam ser geradas e irradiadas. A teoria de Maxwell fazia previsões precisas a respeito dessas ondas, como, por exemplo, sua velocidade de propagação. Essas ondas eletromagnéticas irradiadas (*ondas de rádio*) foram produzidas e detectadas logo a seguir pelo físico alemão Heinrich Hertz. Todas as previsões de Maxwell foram verificadas. Em particular, a velocidade de propagação das ondas de rádio prevista por Maxwell foi verificada experimentalmente. Para grande surpresa na época, era muito próxima da velocidade da luz, então já conhecida com razoável precisão, possibilitando algumas especulações, as quais só se verificariam

James Clerk Maxwell nasceu em Edimburgo, Escócia, em 1831 e morreu em Cambridge, Inglaterra, em 1879. Formou-se inicialmente em Edimburgo e, depois, em Cambridge, onde desenvolveu toda a sua carreira científica. Suas principais contribuições foram no eletromagnetismo, na ótica e na teoria cinética dos gases e termodinâmica. Maxwell foi o pioneiro em sugerir o caráter eletromagnético da luz. Com as medições precisas da velocidade da luz feitas logo a seguir, suas previsões foram verificadas e são consideradas como um dos grandes triunfos da física do século XIX. Em 1931, no centenário de nascimento de Maxwell, Einstein afirmou a respeito de sua obra: "a mais profunda e frutífera que a física vivenciou desde os tempos de Newton".

completamente no século XX, sobre o caráter eletromagnético da luz.

O sucesso da teoria eletromagnética de Maxwell demonstra que a busca de teorias unificadas está longe de ser um empreendimento fútil. A unificação de duas teorias plenamente satisfatórias em sua época (a teoria dos fenômenos elétricos e a dos fenômenos magnéticos) deu origem a uma outra teoria com previsões novas e inesperadas, que puderam ser testadas e comprovadas. Além disso, possibilitou especulações teóricas (natureza eletromagnética da luz) que motivaram uma série de outros estudos que culminaram, no século XX, no conceito do *fóton* e de uma nova teoria sobre a natureza da luz. Se não fosse pelo trabalho eminentemente teórico de Maxwell, todos esses desenvolvimentos, indubitavelmente, sofreriam um atraso considerável.

No início dos anos 20, o conhecimento a respeito das interações fundamentais da natureza era muito mais avançado do que na época de Maxwell. Sua teoria eletromagnética continuava válida, como continua até hoje, para efeitos macroscópicos. O mundo microscópico, porém, sofrera uma revolução na virada do século (que se concretizara, de fato, no *annus mirabilis* de 1905) que culminara na mecânica quântica. A teoria de Maxwell não descrevia bem os fenômenos em escalas atômicas, e toda uma nova teoria fora construída. Além da revolução no mundo microscópico, houvera uma outra, no mundo mais macroscópico possível, que foi a relatividade geral, proposta por Einstein na década de 10. A relatividade geral é uma teoria da gravitação. Eletromagnetismo e gravitação eram as duas *interações fundamentais* da natureza conhecidas no primeiro quarto do século XX. Com elas, ou com suas versões quânticas (1), isto é, modificações à luz da mecânica quântica necessárias para a descrição do mundo microscópico, era possível descrever todos os fenômenos conhecidos, desde observações astronômicas até fenômenos atômicos. A relatividade geral de Einstein romperia com o paradigma newtoniano para a descrição das interações gravitacionais. A teoria newtoniana é uma teoria de ação a

Guilherme Occam (Willian of Ockhan) foi um frade franciscano, filósofo e lógico, alcu-nhado Doctor Invincibilis. Nasceu em Ockhan, Inglaterra, em 1288, morreu em Munique, Alemanha, em 1348. A ele é atribuído o princípio da navalha de Occam: "Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem", literalmente: "Entidades não devem ser multiplicadas além do necessário". A navalha de Occam tem várias formulações diferentes. Nas ciências experimentais, quase sempre tacitamente, é comum se admitir que, havendo duas explicações para um mesmo fato, a mais simples deve ser preferida. Simples, nesse contexto, quase sempre se refere a uma explicação envolvendo um menor número de hipóteses. Einstein também tinha sua versão: "Do the simplest thing possible, but no simpler".

distância, propõe que dois corpos distantes podem interagir por intermédio de uma força universal proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. A ação é *instantânea*, a teoria newtoniana não acomoda fenômenos envolvendo propagação de ondas, como a teoria de Maxwell. A incompatibilidade da ação instantânea com os fundamentos da relatividade especial de 1905 levou Einstein a propor uma nova teoria para a gravitação, desencadeando na relatividade geral de 1915.

A teoria de gravitação de Einstein, porém, emergiu como algo completamente novo, com pouca ou nenhuma relação com a teoria de Maxwell. A relatividade geral está baseada na hipótese, ligada à igualdade entre massa inercial e gravitacional, de que um campo gravitacional homogêneo é

1 Na verdade, somente o eletromagnetismo tinha versão quântica. A gravitação é irrelevante nos fenômenos atômicos em questão na época. Ainda hoje não se conhece uma teoria microscópica consistente para a gravitação; como veremos, parece ainda longínqua uma unificação entre mecânica quântica e relatividade geral.

Theodor Kaluza (1885-1954), físico polonês, em 1919 teria já observado que uma versão em cinco dimensões da relatividade geral poderia acomodar o eletromagnetismo. Teria comunicado pessoalmente a Einstein sua descoberta. Este, após inicialmente mostrar pouco interesse, incentivou Kaluza a publicar seus resultados, que foram apresentados pelo próprio Einstein, em 1921, na Academia de Ciências da Prússia.

Foi o físico sueco Oskar Klein (1894-1977) quem resolveu o problema da dimensão espacial extra do modelo de Kaluza, sugerindo que esta podia ser compacta e muito pequena, imperceptível para efeito de medições.

Provando que as boas idéias são perenes, os modelos de Kaluza-Klein foram retomados recentemente no contexto da gravitação quântica.

indistinguível dos fenômenos observados de um referencial acelerado. Assim, não existiria maneira de se distinguir entre experimentos realizados na superfície da Terra e outros realizados no espaço distante, porém numa espaçonave em movimento uniformemente acelerado com aceleração igual a g . Ou, ainda, os efeitos da atração gravitacional na superfície da terra poderiam ser *anulados* por uma escolha adequada de referencial: num referencial em queda livre, por exemplo, os efeitos não-inerciais contrabalançam os gravitacionais e tem-se a sensação de ausência de peso. A relatividade geral implementa todos esses conceitos de maneira geométrica. A gravitação se manifesta alterando propriedades geométricas do espaço (2) de tal maneira que as trajetórias de corpos gravitantes

livres deixam de ser linhas retas e passam a ser as órbitas observadas. A relatividade geral é, portanto, uma teoria do espaço e do tempo que explicava (e explica) satisfatoriamente todos os fenômenos observados. Na teoria de Maxwell espaço e tempo são ingredientes externos, independentes. Os campos eletromagnéticos se propagam no tempo e no espaço, porém nada dizem ou causam sobre eles. Na relatividade geral, por outro lado, espaço e tempo são quantidades dinâmicas, dependentes, sujeitas a previsões. São evidentes as enormes diferenças conceituais, matemáticas e físicas entre as duas teorias, e Einstein não se mostrou disposto a abrir mão da descrição geométrica da gravitação.

Especular sobre os motivos que levaram Einstein a procurar uma teoria que unificasse gravitação e eletromagnetismo não é tarefa das mais simples. Exigiria uma pesquisa rigorosa em textos originais da época a fim de se recriar o ambiente que então se vivia. Porém, como Einstein quase sempre trabalhava de maneira completamente independente, é ainda mais difícil tentar entender suas motivações entendendo-se as preocupações de seu tempo. Podemos, contudo, especular quais seriam as vantagens de uma teoria bem-sucedida, como foi a de Maxwell em seu tempo, neste contexto. A descrição do campo eletromagnético como um fenômeno de espaço-tempo, obedecendo a um certo conjunto de equações matemáticas contendo as equações da relatividade geral, seria um avanço em consonância com a navalha de Occam: poderíamos prescindir das hipóteses a respeito do campo eletromagnético; ele seria, em essência, uma outra manifestação do espaço-tempo. Porém, para um físico, a possibilidade de fazer novas previsões é a mais sedutora das vantagens de uma nova teoria. Quantas interações completamente desconhecidas entre o eletromagnetismo e a gravitação poderiam estar escondidas numa nova teoria unificada descrevendo um espaço-tempo gravitoeletromagnético? Quantas outras especulações a respeito da natureza do espaço e do tempo poderiam surgir a partir de previsões dessa teoria?

2 Na verdade, espaço-tempo. Espaço e tempo passaram a ser indissociáveis com a relatividade especial.

Não há como um físico evitar as comparações com o eletromagnetismo de Maxwell e não vibrar com as possíveis previsões e novas descobertas advindas de uma descrição unificada do eletromagnetismo e da gravitação.

Einstein não teve sucesso em sua busca por essa teoria unificada. Trabalhou quase em solitário por mais de trinta anos, praticamente até a sua morte. Teve poucos colaboradores nesse empreendimento, muito provavelmente por estar, uma vez mais, muito à frente do seu tempo. Todas as propostas de descrição geométrica para o eletromagnetismo, algumas em co-autoria com o grande Erwin Schrödinger, falharam pelos mais diversos motivos. Uma delas, porém, merece destaque especial. Em 1921, Theodor Kaluza, um físico polonês, mostrou que a relatividade geral poderia acomodar a teoria de Maxwell com algumas modificações um tanto excêntricas à primeira vista. Admitindo-se que o espaço-tempo tenha cinco dimensões (4 espaciais + 1 temporal), e não quatro (3 + 1) como nossa experiência cotidiana sugere, e que ele obedeça a uma versão generalizada das equações de Einstein da relatividade geral, tem-se uma teoria capaz de descrever simultaneamente, para seres que vivam *efetivamente* num sub-espaço de (3 + 1) dimensões, a relatividade geral, o eletromagnetismo e um novo campo desconhecido! Essa não é, porém, uma unificação aceitável. Não há como explicar, sem outras hipóteses arbitrárias, a quarta dimensão espacial, em claro desacordo com nossa experiência cotidiana. Foi o físico sueco Oskar Klein quem, em 1926, mostrou como vencer o problema posto pela quarta dimensão espacial. Podia se admitir, sem prejuízo para as previsões da teoria, que ela era *compacta* e muito pequena. Para efeitos macroscópicos essa teoria teria, efetivamente, 3 dimensões espaciais e não quatro, da mesma maneira que um canudo de refrigerante, apesar de ser uma superfície bidimensional, se visto de longe, parece efetivamente um objeto unidimensional. Nascia assim a teoria de Kaluza-Klein. Porém, ela não se estabeleceu como uma teoria unificada interessante. O motivo é

Sheldon L. Glashow (1932, EUA), S. Weinberg (1933, EUA) e A. Salam (1926-1996, Paquistão) foram os responsáveis pela unificação das teorias eletromagnética e fraca, recipientes, por esse feito, do Prêmio Nobel de Física de 1979. Os três, de maneira independente, construíram, nos anos 60, uma teoria de *gauge* para a descrição da interação fraca, estabelecendo que ela, de fato, tinha a mesma natureza da eletromagnética. Os trabalhos de t'Hooft e Veltman, no início dos anos 70, estabeleceram a consistência quântica da teoria eletrofraca, abrindo as portas para os trabalhos que culminaram com a detecção das partículas Z^0 , W^+ e W^- nos anos 80 pela equipe de C. Rubbia e S. Van der Meer, no Cern. Rubbia e van der Meer receberam o Prêmio Nobel em 1984, t'Hooft e Veltman, em 1999.

O nome de Abdus Salam está também imortalizado em seu Centro de Física Teórica, em Trieste, Itália. Fundado em 1964, pelo próprio Salam, como um centro de estudos internacional sob os auspícios da Unesco, da Agência Internacional de Energia Atômica e do governo da Itália, o centro floresceu e se destaca hoje pelo papel predominante no desenvolvimento científico dos países do Terceiro Mundo.

que ela era *completamente equivalente* à relatividade geral e ao eletromagnetismo de Maxwell, incapaz, portanto, de fazer qualquer previsão nova, algo inaceitável para qualquer teoria física. Além disso, envolvia um novo campo espúrio, sem nenhuma interpretação na época. Como o

exemplo da teoria de Kaluza-Klein mostra, nem sempre uma unificação de teorias num mesmo formalismo leva a um salto qualitativo de conhecimento.

Einstein morreu em 1955, sem vivenciar os frutos obtidos a partir da busca da teoria unificada iniciada por ele. O interesse por uma unificação renasceu alguns anos após a morte de Einstein. A física, porém, havia evoluído muito desde os anos 20. Um nível de compreensão mais profundo na natureza fora atingido e a resposta para a pergunta “quantas são as interações fundamentais da natureza?” não era mais duas, como nos anos 20, mas, sim, quatro. Além da gravitação e do eletromagnetismo, no início dos anos 60 se conhecia bem duas outras interações fundamentais no mundo microscópico: a chamada interação forte, de curtíssimo alcance, responsável pela coesão dos núcleos atômicos; e a chamada interação fraca, envolvida no processo de decaimento radioativo beta. Do ponto de vista teórico, a estrutura das chamadas teorias de *gauge* (3), desenvolvidas no início dos anos 50 por C. N. Yang e R. Mills, começavam a ser elucidadas. O eletromagnetismo é uma teoria de *gauge* em particular, talvez a mais simples, caracterizada pelo grupo (4) de simetrias abeliano $U(1)$. O grupo $U(1)$ é um grupo contínuo com um único parâmetro, o que implica que há um único tipo de *fóton*, partícula microscópica sem massa associada

ao campo eletromagnético. Um dos grandes resultados da física da segunda metade do século XX foi a unificação das interações eletromagnéticas e fracas, na que ficou conhecida como teoria eletrofraca. Os nomes associados a esse grande avanço são os de S. L. Glashow, A. Salam e S. Weinberg. A teoria eletrofraca cumpriu com tudo que se esperava de uma teoria unificada, nos moldes do que ocorrera cem anos antes com o eletromagnetismo de Maxwell. A teoria eletrofraca descreve os fenômenos eletromagnéticos e fracos por meio de uma teoria de *gauge* baseada em um grupo maior, o $SU(2) \times U(1)$ (5). O *fóton* está acomodado no setor da teoria correspondente ao grupo $U(1)$. Daí, infere-se que as partículas microscópicas associadas à interação fraca, equivalentes do *fóton* para o campo de força fraca, devem estar acomodadas no setor correspondente ao grupo $SU(2)$. Como esse grupo é um grupo contínuo a três parâmetros, esperam-se três tipos diferentes dessas partículas. Assim como os *fótons*, essas partículas não devem ter massa. Porém, o fato de a interação fraca ser de curto alcance exige que essas partículas tenham alguma massa. A solução para esse dilema ficou conhecida como mecanismo de quebra espontânea de simetria: os *fótons* e os três tipos de partículas associadas ao grupo $SU(2)$ interagem com um quarto campo, chamado campo de Higgs, de tal maneira que, para certas energias, as partículas associadas ao grupo $SU(2)$ comportam-se como se fossem três partículas massivas, as chamadas: Z^0 , W^+ e W^- . Essas partículas foram detectadas nos anos 80 no Cern, na Suíça, e as previsões da teoria eletrofraca foram todas confirmadas.

A interação forte também é descrita, como mostrou o americano Murray Gell-Mann, por uma teoria de *gauge*, nesse caso, com o grupo não-abeliano $SU(3)$. Como esse é um grupo contínuo a oito parâmetros, esperam-se oito tipos diferentes de partículas sem massa associada à interação forte. Estes são os chamados *glúons*, e as previsões dessa teoria, chamada cromodinâmica quântica, estão em pleno acordo com todos os experimentos realizados até

3 Do inglês: padrão, escala de medida. Usa-se também em português a expressão teoria de calibre. São caracterizadas por certas simetrias especiais e baseadas num formalismo matemático que generaliza a teoria de Maxwell.

4 “Grupo” é um conceito matemático abstrato fundamental na física de partículas. Basicamente, corresponde a um conjunto de elementos e uma operação, definida sobre esse conjunto, satisfazendo algumas propriedades bastante gerais. Todos os grupos citados aqui possuem representações em termos de matrizes, sendo a operação do grupo a simples multiplicação matricial. $SU(N)$, por exemplo, representa o grupo formado pelas matrizes unitárias complexas $N \times N$. Pode-se mostrar que um elemento de $SU(N)$ é caracterizado por $N^2 - 1$ parâmetros livres.

5 Esse produto deve ser entendido como um grupo composto por elementos formados por pares de elementos, sempre um do grupo $U(1)$ e outro do $SU(2)$.

Murray Gell-Mann (1929), físico americano, mostrou que a profusão de partículas geradas nas reações nucleares podia ser organizada em um modelo com grupo de simetria $SU(3)$. As partículas associadas ao campo das interações fortes podiam ser classificadas em 8 tipos, a mesma quantidade de geradores de $SU(3)$. Nasceram os *quarks*, os glúons e a cromodinâmica quântica. Gell-Mann recebeu, por essa descoberta, o Prêmio Nobel em 1969.

agora. Pode-se dizer, então, que as três interações relevantes no mundo microscópico estão unificadas num único formalismo de *gauge*. Esse é o chamado modelo padrão da física de partículas, o qual tem como grupo de *gauge* o produto $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, além do mecanismo de quebra espontânea de simetria que garante que, para certas energias, as três partículas associadas ao setor $SU(2)$ comportam-se como se fossem massivas. As chamadas teorias de grande-unificação propõem outros grupos de *gauge*, como, por exemplo, $SU(5)$, e outros mecanismos de quebra espontânea de simetria para garantir que, nas escalas de energia adequada, o modelo se comporte como o bem-sucedido modelo padrão $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. As teorias de grande-unificação ainda são, contudo, consideradas especulativas.

A única interação fundamental que ainda resiste a qualquer unificação é a gravitação. O maior problema agora não é a formulação geométrica da relatividade geral (desde os anos 60 existem vários formalismos de *gauge* para a relatividade geral), mas sua aparente incompatibilidade com a mecânica quântica. Falta-nos, para completar o quadro sonhado por Einstein, da unificação das interações fundamentais, uma teoria quântica da gravitação. Não há nenhum dado experimental sobre a natureza da interação gravitacional nas escalas microscópicas. Os únicos indícios vêm de algumas previsões e, principalmente, das falhas da relatividade geral: as singularidades, tanto a inicial (o *big-bang*) como as associadas ao colapso gravitacional (buracos negros). Nessas situações extremas, a

relatividade geral deve ser substituída por uma teoria mais completa, válida em escalas microscópicas, e tais singularidades devem ser eliminadas.

Ainda não há, sequer, teorias candidatas a descrever os fenômenos quânticos da gravitação. Uma das únicas teorias candidatas aparentemente livre de inconsistências é a chamada teoria de cordas. Em seu estágio atual, talvez devesse ser considerada uma prototeoria, pois ainda não está em condições de fazer previsões. Porém, uma série de resultados preliminares extremamente promissores tem mantido um número considerável de pesquisadores nessa área. As modernas teorias de cordas nada têm a ver com sua ancestral dos anos 60, proposta para explicar alguns fenômenos da interação forte. A teoria de cordas teve um grande impulso nos anos 70 e 80, com a inclusão do conceito de supersimetria e, principalmente, com os resultados que estabeleceram sua consistência quântica se formulada sobre um espaço-tempo que satisfizesse as equações de Einstein da relatividade geral, sugerindo sua relevância para a descrição de um regime quântico da gravitação. Curiosamente, os espaços-tempos das teorias de cordas são, em geral, de dimensão maior do que quatro, ressuscitando as teorias de Kaluza-Klein.

Vários modelos foram inspirados nos resultados parciais das teorias de cordas. Algumas de suas previsões, notadamente as ligadas à supersimetria e às possíveis dimensões extras do espaço-tempo, poderão ser testadas num futuro próximo. Algumas grandes surpresas podem estar sendo reservadas para o centenário da relatividade geral...