

Próxima paragem: Gravitação Quântica

Orfeu Bertolami¹, Ricardo Schiappa²

¹Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

²Departamento de Matemática, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

orfeu.bertolami@fc.up.pt¹, ricardo.schiappa@tecnico.ulisboa.pt²

Resumo

A abrangência da Mecânica Quântica na descrição dos fenómenos físicos a pequenas e muito-pequenas escalas, sugere que também os fenómenos gravitacionais—pelo menos no contexto das mais diminutas distâncias ou das mais elevadas energias—devem incorporar os princípios basilares daquela teoria. Esta síntese, genericamente designada por gravitação quântica, deve admitir, no seu limite de escalas macroscópicas e baixas energias, a descrição do espaço-tempo por meio da sua curvatura tal como proposto pela Teoria da Relatividade Geral por Einstein em 1915. Exemplos de concretizações desta alusiva descrição teórica incluem, entre outras propostas, a teoria de cordas quânticas e o programa de quantização segundo variáveis de lacetes. Espera-se que, por meio da gravitação quântica, seja possível resolver o problema das singularidades de buracos negros e do Big Bang, e assim vir a entender os processos físicos que ocorrem quando atravessamos o horizonte de acontecimentos de um buraco negro ou que tiveram lugar nos primeiríssimos instantes da história do Universo ($\sim 10^{-44}$ segundos).

Introdução

Um dos problemas mais desafiantes da física contemporânea diz respeito à compatibilidade entre as teorias físicas de maior abrangência construídas ao longo do século XX, nomeadamente a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade Geral. A primeira destas teorias descreve fenómenos em escalas microscópicas, que se podem estender a dimensões macroscópicas, mas cuja validade descritiva típica vai das moléculas até às partículas elementares. A diversidade da fenomenologia abrangida por esta teoria é vastíssima. Por sua vez, a teoria da Relatividade Geral descreve fenómenos de natureza gravitacional por meio da curvatura do espaço-tempo. O domínio de abrangência da Relatividade Geral inclui desde fenómenos subtis no Sistema Solar, tais como o avanço da precessão secular do periélio do planeta Mercúrio, até a própria evolução do Universo como um todo.

Conceptualmente, a Mecânica Quântica repousa sobre os factos essenciais associados à dualidade partícula-onda e à impossibilidade de se determinar com precisão arbitrária simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula microscópica (o chamado “Princípio de Incerteza” de Heisenberg). Estas propriedades decorrem da inevitável interação entre a instrumentação de observação e a partícula a observar, que por sua vez determina o seu carácter corpuscular ou ondulatório e altera

simultaneamente a sua posição e velocidade. O limite na precisão com a qual medidas de posição e velocidade podem ser realizadas é determinado pelo quantum fundamental introduzido por Planck, $h = 6,62607 \times 10^{-34}$ J s.

Presumivelmente, dada a universalidade dos princípios da Mecânica Quântica, uma teoria da gravitação que descreva fenómenos a distâncias microscópicas deve ser necessariamente compatível com aqueles princípios. Uma forma natural para atingir esta compatibilidade é através da hipótese de que o grau de liberdade fundamental da gravitação, o gravitão, seja quântico. O gravitão é a componente dinâmica da gravitação, a excitação gravitacional para além da geometria curva subjacente de uma região do espaço-tempo.

Na verdade, questões relativas à necessidade de considerar os campos fundamentais como objetos quânticos, foram tema de discussão pelos pioneiros da Mecânica Quântica, por exemplo aquando do tratamento de campos eletromagnéticos de partículas carregadas. Conclui-se então que a descrição quântica das partículas exige uma abordagem quântica compatível também para os respetivos campos. Esta descrição deu eventualmente origem à Teoria Quântica dos Campos e, em particular, à Eletrodinâmica Quântica. A Teoria Quântica dos Campos compatibiliza os Princípios da Relatividade Restrita de Einstein com os da Mecânica Quântica.

Por sua vez, acredita-se que a síntese que se procura entre a gravitação e a Mecânica Quântica poderá estabelecer a completude que a Teoria da Relatividade Geral não tem, dado que a descrição da gravitação em termos da curvatura do espaço-tempo contem singularidades diversas, pontos ou regiões no espaço-tempo onde as grandezas físicas divergem, ou seja, tornam-se infinitas. Tais singularidades são ubíquas na Relatividade Geral (ver, por exemplo, a Ref. [1]) e surgem, por exemplo, no contexto dos buracos negros e aquando do Big Bang que deu origem ao espaço-tempo que é, com toda a matéria e energia nele contida, o nosso Universo. Esta putativa síntese possibilitará uma unificação de todas as interações fundamentais da Natureza dado que as outras três Interações fundamentais, a nuclear forte, a nuclear fraca e a eletromagnética são todas bem descritas pela Teoria Quântica de Campos. A teoria resultante dessa unificação é por vezes designada por “Teoria de Tudo”. Apesar de existir na Física uma bem sedimentada tradição asso-

ciada às teorias de unificação (ver, por exemplo as Refs., [2,3]), não é completamente claro quais as direções que devem nortear a teoria da gravitação quântica — sendo um obstáculo o facto de todas as Teorias de Campo serem formuladas tendo como subjacente um espaço-tempo clássico. Os argumentos apresentados acima sugerem que a gravitação deve ser também ela compatível com a Mecânica Quântica (há argumentos no sentido oposto, ver a referência [4] e outras ali mencionadas). Outra questão a dirimir diz respeito à propagação dos grávitões num espaço-tempo subjacente (clássico ou não) e sob que condições estes graus de liberdade podem ser considerados como quanta do campo gravitacional. É relativamente consensual a necessidade de se considerar seriamente a natureza quântica do grávitão, dado que uma conclusão incontroversa é a de que uma aproximação semi-clássica da teoria de Einstein, na qual o termo de fonte de matéria das equações de campo de Einstein corresponde ao valor esperado no vácuo do tensor de energia-momento de campos quânticos, não é consistente com a Mecânica Quântica [5], ainda que seja satisfatória enquanto teoria efetiva válida em escalas de energia mais baixas do que a característica da teoria da gravitação quântica [6]. Contudo, é no mínimo intrigante o facto de que a utilização direta dos instrumentos teóricos da Teoria Quântica de Campos como, por exemplo, as regras de comutação a se aplicar ao grávitão e ao seu momento canonicamente conjugado, seja dependente do espaço-tempo subjacente, o que não é satisfatório, e exige uma escolha específica das superfícies do tipo tempo necessárias para se construir a desejada descrição quântica (ver, por exemplo, a Ref. [7]). Mas o golpe fatal à pretensão de promover o grávitão enquanto grau de liberdade quântico como nos campos fundamentais das outras teorias fundamentais, os campos de calibre (gauge), é que gráficos de Feynman envolvendo loops de grávitões dão origem a quantidades infinitas que não são removíveis como os das Teorias Quânticas de Campos consistentes. Na verdade, estas ferramentas indicam que qualquer abordagem da gravitação nestes termos não pode dar origem a teorias de campo consistentes. O termo técnico distintivo de teorias nestas condições, é que não são renormalizáveis, o que significa que as quantidades infinitas não podem ser removidas e que respostas finitas não podem ser obtidas e confrontadas com a experimentação.

Dadas estas dificuldades, as abordagens de gravitação quântica mais desenvolvidas até ao presente, a teoria das cordas quânticas [8] e o programa de quantização através das variáveis de lacete [9,10], partem de pressupostos relativamente distintos dos da Teoria da Relatividade Geral. Nestas propostas, o grávitão surge como um grau de liberdade quântico enquanto elemento emergente no contexto destas teorias e não como ponto de partida. Na teoria das cordas quânticas, o grávitão, e também o dilatão, um campo escalar fundamental, e um campo tensorial anti-simétrico, entre outros campos, correspondem aos modos de vibração sem massa das cordas fechadas. Neste contexto, os problemas acima mencionados da abordagem direta da teoria quântica de campos ao grávitão da Relatividade Geral, são contornados uma vez que interações que na Relatividade Geral são pontuais, passam a ser naturalmente estendidas pela própria natureza das interações entre as cordas fechadas. Esta natureza estendida resolve também a dificuldade associada às

singularidades da Relatividade Geral. A teoria das cordas quânticas será discutida mais detalhadamente abaixo.

Por sua vez, no programa de quantização através das variáveis de lacete, a gravitação é rescrita como uma teoria de calibre e o campo de calibre apropriadamente integrado ao longo de um caminho fechado (um “lacete”), a holonomia, é o objeto fundamental do formalismo [9,10]. Estes lacetes funcionam como elementos basilares da discretização da geometria e assim as singularidades são evitadas. Espera-se que o grávitão possa surgir aqui também no limite semi-clássico da teoria, pese embora após um conjunto razoavelmente extenso de hipóteses.

Mas antes de estender a discussão, tentemos estimar a escala típica dos processos que estivemos a discutir. Esta escala pode ser obtida considerando que a dimensão característica da teoria gravitacional deve ser da ordem do comprimento de onda típico de uma partícula, um conceito puramente quântico. Podemos avançar com duas escalas características: a do mais simples dos buracos negros, um buraco negro de Schwarzschild com massa M , cujo raio do horizonte de acontecimentos é dado por $R_{\text{Sch}} = 2GM/c^2$, onde G é a constante da gravitação universal de Newton e c a velocidade da luz no vácuo; o comprimento de onda de Compton, que corresponde ao comprimento de onda de de Broglie de uma partícula de massa M , e velocidade igual à velocidade da luz, $\lambda = \hbar/Mc$, onde $\hbar = h/2\pi$; igualando o comprimento de onda de Compton com $R_{\text{Sch}}/2$, resolvendo para a massa e multiplicando por c^2 , obtemos a chamada energia de Planck:

$$M_p c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G}} \simeq 1,2 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

ou seja, uma energia que corresponde a cerca de 19 ordens de grandeza maior que a massa/energia de repouso do protão! A distância associada a esta massa pode ser imediatamente estimada e é dada por:

$$L_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \simeq 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

uma distância muitas ordens de grandeza menor que a menor das dimensões escrutinadas pelo mais potente acelerador de partículas da atualidade, o LHC (*Large Hadron Collider*) do CERN (Centro Europeu de Investigação Nuclear), cerca de 10^{-20} m. Naturalmente, as escalas dos efeitos gravitacionais quânticos são, no presente, inacessíveis à experimentação.

Ainda antes de discutirmos as interações fundamentais da Natureza e da teoria de cordas quânticas, há que frisar que naturalmente a teoria da gravitação quântica ou “Teoria de Tudo” não pode ser um sistema puramente axiomático de algoritmos computacionais—um problema subjacente à formulação matemática de qualquer teoria física, mas que aqui ganha uma magnitude especial se aceitarmos que de facto estamos a construir uma “teoria de tudo”. Se assim o fosse, a teoria não poderia ser consistente e completa simultaneamente devida à indecidibilidade descrita no Teorema de Gödel, à impossibilidade de determinação da consistência interna de um sistema computacional segundo o Teorema de Tarski, e à incompletude computacional estabelecida pelo Teorema de Chaitin [11]. Naturalmente, estas

dificuldades poderiam sugerir que a teoria da gravitação quântica exigiria uma “meta-teoria” que suporte a sua consistência e validade [11]. Contudo, em nossa opinião, a teoria da gravitação quântica, aliás tal como qualquer outra teoria quântica que descreva fenômenos desde a matéria condensada até à física de partículas, deve ser guiada sobretudo por argumentos de plausibilidade fenomenológica e, possivelmente, por cenários de mediação entre o comportamento quântico da gravitação e o comportamento semi-clássico a partir do qual surgem as propriedades associadas à curvatura do espaço-tempo. Estes cenários podem também ser absolutamente necessários dado que não é evidente o que se entende por espaço-tempo num contexto quântico (ou sequer se faz sentido usar o termo num contexto completamente quântico) e como neste contexto se evitam, por exemplo, o aparecimento de curvas fechadas do tipo tempo que dão origem a paradoxos de ordenação cronológica. Parece-nos mais plausível que exigências de consistência da teoria emergente (a Relatividade Geral e suas extensões) sejam mais satisfatórias que a necessidade de uma “meta-teoria” para resolver os problemas de consistência matemática interna da gravitação quântica.

Das Interações Fundamentais à Grande Unificação

Um dos objetivos da “Teoria de Tudo” é descrever por meio de uma única formulação as quatro interações fundamentais conhecidas (e é neste sentido que se usa a palavra “tudo”). Estas interações são os processos mais elementares e qualitativamente distintos por meio dos quais todos os fenômenos do mundo físico podem ser compreendidos. Abrangem a gravitação, o eletromagnetismo, a interação nuclear forte (responsável pela coesão do núcleo atômico), e a interação nuclear fraca (intermediária de processos tais como o decaimento de neutrões livres). A propriedade ontológica que identifica uma interação e transmite os seus efeitos no espaço-tempo é designada por carga. A carga da interação gravitacional é a energia, de modo que todas as partículas necessariamente sentem o sutilíssimo efeito da gravitação. A carga do eletromagnetismo é a carga elétrica, a carga da interação nuclear forte é denominada “cor”, e a carga da interação nuclear fraca corresponde à propriedade denominada “isospin fraco” que somada à carga elétrica dá origem à “hiper-carga” da teoria eletrofraca unificada. Outras propriedades das interações são o alcance, que corresponde à distância para além da qual o efeito de uma interação se torna desprezável, e a intensidade relativa com que as interações se manifestam a uma energia padrão. Esta é determinada pelas constantes de acoplamento, definidas através da relação $\alpha = g^2/4\pi\hbar c$, onde g é a intensidade da carga correspondente a cada uma das interações. No Quadro I, são apresentadas as principais propriedades das interações fundamentais.

Acredita-se que a descrição teórica das interações é realizada no contexto da já referida Teoria Quântica dos Campos. Neste contexto, as vibrações ou ondas, que são o vetor de influências numa teoria de campo não-quântica, tem associadas a si partículas. Estas últimas são as partículas intermediárias específicas a cada uma das interações, como se apresenta no Quadro I.

Os desenvolvimentos teóricos, especialmente nas décadas de 60, 70 e 80 do século passado, permitiram obter descrições

consistentes e experimentalmente verificáveis de Teorias de Campo Quânticas das interações não-gravitacionais (ver, por exemplo, a Ref. [12]). Estas teorias são dotadas de simetrias ditas de calibre, que não correspondem a simetrias do espaço-tempo, tais como a translação e a rotação, mas a invariâncias sob rotações num espaço interno abstrato. O princípio de invariância sob transformações de calibre permite alcançar a descrição matemática unificada das interações fundamentais. Neste contexto, a teoria quântica do eletromagnetismo, a eletrodinâmica quântica (EDQ) - corresponde a invariância sob o grupo unitário de um parâmetro, $U(1)$, e a manifestação física quinta-essencial desta simetria é a conservação da carga elétrica e a dependência do acoplamento eletromagnético com a energia. A teoria das interações fortes, ou cromodinâmica quântica (CDQ), é obtida por meio da invariância sob o grupo especial unitário, $SU(3)$, associado à existência de três “cores” distintas. No que refere às interações fracas, o formalismo das teorias de calibre convergiu no sentido de que a desejada teoria deveria necessariamente conter a eletrodinâmica quântica! O modelo resultante, que é hoje designado como Modelo Padrão das Partículas Elementares (MP), corresponde a uma teoria de calibre invariante sob a ação do grupo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ e coloca a questão da unificação das interações fundamentais como uma hipótese de trabalho necessária para se atingir a simplicidade conceptual que se encontra sob a riqueza fenomenológica da Natureza. Sob este prisma, a unificação das interações vai muito para além de um sentido puramente estético e enquadra-se na tradição cultural das grandes construções intelectuais que são eminentemente unificadoras [2,3]. Como veremos este é um dos aspetos mais sedutores da teoria de cordas quânticas.

O MP acomoda todas as partículas elementares conhecidas e as interações não-gravitacionais entre elas. As partículas elementares estão agrupadas em “gerações” compostas de quarks (partículas com cargas de cor e carga elétrica fracionária em relação à carga do eletrão, as quais se agrupam em tríades para formar o próton e o neutrão) e de leptões como o eletrão, o múon e a partícula tau e os respetivos neutrinos. No Quadro II, o conteúdo das gerações de partículas elementares é apresentado, assim como a configuração destas em termos das simetrias do MP.

Uma propriedade fundamental das interações conhecidas por meio da Teoria Quântica de Campos é que as suas constantes de acoplamento variam com a escala de energia considerada. É possível determinar que a uma escala de energia consideravelmente elevada, cerca de 10^{16} GeV, as constantes de acoplamento das interações fortes e interações electrofracas convergem (ver Figura I). Em abono do rigor mencionemos que essa convergência só é exata se adicionarmos uma nova simetria às nossas interações, relacionando matéria com interações, ou férmions com bósons, e denominada de supersimetria, mas esse é todo um novo tópico sobre o qual não nos iremos debruçar em maior profundidade. Esta convergência sugere a existência de teorias de calibre que descrevem as interações do MP de forma unificada, as Teorias de Grande Unificação (TGU). Estas teorias são particularmente relevantes para se empreender o passo seguinte de unificação com a gravitação e têm importantes implicações a nível cosmológico uma vez que permitem

Interação	Carga	Intensidade +α	Partículas Intermediárias	Spin P. I.	Alcance (m)	Teoria Quântica
Nuclear Forte	“Cor”	10	Gluões	1	10 ⁻¹⁵	CDQ
Electromagnética	Eléctrica	1/137	Fotão	1	∞	EDQ
Nuclear Fraca	Isospin Fraco	10 ⁻¹⁰	Bosões W [±] e Z ⁰	1	10 ⁻¹⁸	MP
Gravitacional	Massa ou Energia	10 ⁻³⁸	Gravitão	2	∞	?

Nota: CDQ = Cromodinâmica Quântica; EDQ = Electrodinâmica Quântica;
MP = Modelo Padrão das Partículas Elementares.

Quadro 1 - Interações Fundamentais da Natureza

	Cromodinâmica Quântica (SU(3)) Fermiões com Cor (Quarks)	Fermiões sem Cor (Leptões)
Simetria Electrofraca SU(2) ⊗ U(1)	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $u_R, d_R; u_R, d_R; u_R, d_R$	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$ e_R^-
Simetria Electrofraca SU(2) ⊗ U(1)	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$ $c_R, s_R; c_R, s_R; c_R, s_R$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$ μ_R^-
Simetria Electrofraca SU(2) ⊗ U(1)	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$ $t_R, b_R; t_R, b_R; t_R, b_R$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$ τ_R^-

Quadro 2 - Gerações de Partículas Elementares - Fermiões

Bosões Intermediários Electrofracos	γ, W^+, W^-, Z^0	(sem cor)
Bosões Intermediários Interação Forte	$G_1, ..., G_8$ (Gluões)	(com cor)
Bosões de Higgs	H	(sem cor)

Quadro 3 - Partículas Elementares - Bosões

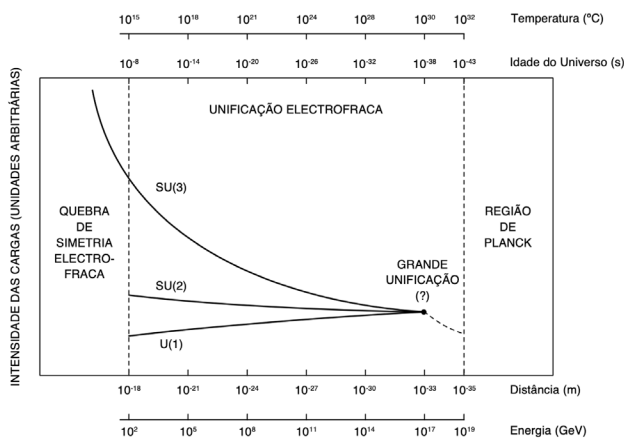


Figura 1 - Evolução das constantes de acoplamento em função da escala de energia

a violação de simetrias, tais como a associada ao número bariónico e à conjugação de carga e paridade (simetria CP) que, por sua vez, admite a conceção de cenários que podem explicar a observada predominância da matéria sobre a antimatéria no Universo. As TGU permitem, também, entender a observada isotropia e homogeneidade, bem como a ausência de curvatura do espaço em largas escalas, uma vez que estas teorias são dinamicamente compatíveis, quando consideradas em conjunto com uma simetria possível, mas ainda não observada, entre bósons e férmions, a mencionada supersimetria, com um período de expansão exponencialmente acelerada do Universo nos seus primórdios, a inflação. Contudo, apesar destes aspetos encorajadores, as TGU contêm dificuldades essenciais e é neste contexto que as teorias de cordas quânticas são particularmente relevantes, muito especialmente quando consideradas em conjunto com a supersimetria.

Teoria das Cordas Quânticas

Dito tudo isto ainda não dissemos ao certo no que consiste a teoria de cordas. Como muitas vezes em ciência, a história aqui foi tudo menos linear. Durante os anos 70 do século passado a ciência debruçava-se em como entender a força nuclear forte. Ao contrário das outras forças já descritas quanticamente (electromagnética e força nuclear fraca), a força forte tinha a estranha de propriedade de crescer com a distância entre as cargas—ao invés de decrescer como nos parece mais intuitivo e familiar. Uma forma de tentar explicar esse fenómeno, hoje em dia dito de “liberdade assintótica” (pois as cargas comportam-se como livres a altas energias), era moldar essa interação como que através de uma mola ou de um elástico. Uma “corda relativista” com uma carga em cada extremidade, que quando esticada iria resistir à separação entre cargas (devido à tensão natural da corda), mas que quando não esticada não iria produzir grande força entre os seus extremos. Essa ideia tinha alguma base experimental nas chamadas “trajetórias de Regge” (lineares) para diversas partículas de natureza hadrónica. Mas acabou por não vingar por duas razões: a primeira, pela descoberta da já mencionada Cromodinâmica Quântica que se revelou ser a teoria correta das interações fortes experimentalmente. A segunda, devido ao espectro de excitações quânticas das nossas “cordas relativistas”, que se parecia não adequar à descrição das partículas de natureza forte.

Quando pensamos nestas “cordas relativistas” podemos imaginar que elas são de dois tipos: abertas (com extremidades) ou fechadas (sem extremidades). E para cada um destes tipos podemos tentar quantizar a corda e calcular o seu espectro de excitações quânticas. Um pouco como perguntar que tipo de notas podemos tocar com uma corda de um violino, decompondo-as em harmónicas. Ora o espectro tanto das cordas abertas como das cordas fechadas era muito rico, incluindo partículas sem massa, e torres infinitas de partículas muito massivas. No espectro sem massa, as cordas abertas incluíam partículas de força, como um fóton ou um glúon, o que era positivo à luz do seu possível uso para moldar as interações fortes. Mas as cordas fechadas eram mais curiosas: no seu espectro sem massa elas incluíam uma partícula elementar de spin 2. Ora a única partícula elementar de spin 2 que pensamos existir na natureza é o gravitão! Como anos mais tarde disse Edward Witten, esta

foi a primeira previsão experimental da teoria de cordas: que deve existir um gravitão! Neste contexto, e perante a emergência da Cromodinâmica Quântica como melhor explicação das interações fortes, a ciência perguntou se as cordas eram apenas uma curiosidade matemática, ou, antes, pela sua previsão do gravitão, se poderiam ser algo mais e moldar uma eventual gravitação quântica. Para isso, teria de ser possível quantizar uma corda relativista, sem deparar com os problemas de renormalização mencionados anteriormente, que surgem quando se tenta quantizar diretamente a Relatividade Geral.

As primeiras tentativas de quantizar a nossa corda relativista depararam com dois problemas técnicos. O primeiro, aquilo que se chama de uma “instabilidade taquiónica”: o ponto em torno do qual estamos a tentar quantizar a teoria era um ponto naturalmente instável (como que um máximo de um potencial, ao invés de um mínimo) e não adequado ao procedimento. A solução pragmática encontrada para este problema foi o de juntar uma nova simetria, a já mencionada supersimetria, que relaciona excitações bosónicas (de “força”) com excitações fermiónicas (de “matéria”), e que resolvia imediatamente o problema dos taquíões: por força desta supersimetria a quantização ocorre sempre num “mínimo do potencial”. O segundo problema era ainda mais técnico, e tinha a ver com aquilo a que se chama uma “anomalia”: certas simetrias que observávamos na formulação clássica da teoria, e que gostaríamos de observar também na formulação quântica da teoria, eram destruídas pelo processo de quantização. Isto era um fenómeno familiar em teoria quântica do campo, inclusive com previsões experimentais na famosa anomalia de Adler-Bell-Jackiw, mas não se sabia como resolver este problema em teoria de cordas. Note-se que ambos estes problemas, sendo naturais, eram de alguma forma “conservadores”: se o Universo tiver natureza quântica no seu nível mais fundamental, não existe realmente razão nenhuma para acreditar que o processo de “quantização” possa existir sempre, ou sequer que seja natural. Contudo, a ciência gosta de prosseguir em passos pequenos sob terreno familiar, pelo que estas eram as principais questões no final dos anos 70 quando a teoria de cordas foi parcialmente posta de parte—suplantada pela Cromodinâmica Quântica nas interações fortes, e aparentemente não suscetível ao procedimento de quantização para poder descrever o desejado gravitão quântico.

Na “primeira revolução das cordas” nos anos 80, a quantização foi finalmente resolvida ao serem descobertas 5 tipos de supercordas (cordas supersimétricas) que eram livres de anomalias [13]. Podiam ser quantizadas e descreviam a gravitação quântica sem aparentemente tais problemas de renormalização. Apenas tinham dois “problemas”: eram supersimétricas (uma simetria que embora observada em certos sistemas experimentais de matéria condensada, ainda não foi observada em física de partículas) e viviam em 10 dimensões de espaço-tempo plano (quando todos nós apenas observamos 4!). Os anos 80 viram uma enorme explosão de investigação em teoria de supercordas, como a tão procurada “Teoria de Tudo” descrevendo não só a gravitação quântica, mas também todas as interações da natureza (sendo todas as diferentes partículas de força e de matéria uma sinfonia de diferentes notas, diferentes oscilações, diferentes harmónicas destas cordas microscópicas). As 10 dimensões não seriam um problema se em vez de considerarmos

teoria de cordas em 10 dimensões planas, considerássemos a teoria em 4 dimensões planas e 6 dimensões compactificadas microscopicamente (naquilo que se chama um espaço de Calabi-Yau). E a supersimetria não seria um problema se conseguíssemos encontrar um “vácuo”, uma compactificação, onde ela fosse quebrada e tudo o que restasse fosse o MP [14]. Diferentes espaços de Calabi-Yau deram lugar a diferentes teorias de baixas energias, ora mais parecidas com o mundo real, ora menos parecidas com o mundo real, a vasta maioria ainda muito supersimétricas, e nenhuma com o MP. Onde se escondia esta teoria? Os anos 90 revelaram que encontrar o MP através deste procedimento não seria fácil: o número de possíveis espaços de Calabi-Yau a procurar estaria na ordem dos 10^{500} ! Esta descoberta fez surgir alguma crítica—sobre o poder preditivo da teoria: como seleccionar essa compactificação?—mas do nosso ponto de vista uma crítica algo injustificada: também não existe nenhuma equação para o raio do planeta Terra ou da sua órbita em torno do Sol, ou para o raio dessa nossa própria estrela. Existem igualmente inúmeras possibilidades, todas ditadas de forma ambiental. No “multiverso” assim também muitos diferentes vácuos podem coexistir!

Uma crítica que, contudo, acompanhamos tinha a ver com o facto de todos os cálculos referidos serem cálculos perturbativos. O que isto quer dizer é que consideramos a teoria com uma força de interação muito fraca, e depois, perturbativamente, incrementalmente, pouco a pouco, fazemos essa força crescer para tentar estudar fenómenos onde as interações têm maior intensidade. Este é um procedimento que se tem concretizado em inúmeros resultados positivos praticamente desde o nascimento da Mecânica Quântica, e que ganhou um papel central no edifício quântico no contexto das diversas teorias de campo. Mas nem sempre é a forma mais adequada de estudar um fenómeno quântico, sendo algo limitado nas nossas já familiares interações fortes. Nestas, a ciência tinha já saltado para outros procedimentos, os mais profícuos de natureza computacional numérica. No que poderia consistir o estudo não-perturbativo de teoria de cordas? Esta pergunta foi respondida em grande parte com a “segunda revolução das cordas” dos anos 90, onde inicialmente se descobriram duas coisas fundamentais. A primeira, que a teoria de cordas não era uma teoria de cordas! Tínhamos toda uma lista de objetos “estendidos” para além das cordas: membranas, membranas com três dimensões, membranas com quatro dimensões, por aí fora, e incluindo ainda membranas em zero dimensões—sim!, incluindo ainda partículas (de natureza especial). A segunda, que aquelas 5 teorias de supercordas especiais que eram livres de anomalias, não passavam de aspetos diferentes de uma única teoria! Como descoberto por Edward Witten [15], estas 5 teorias não eram teorias especiais, mas “cantos” especiais de uma teoria única (ainda sem nome definido, mas por vezes chamada de “teoria M” para “Mãe” ou “Membrana” ou “Matriz”). Estes resultados foram particularmente significativos quando temos em mente a busca de uma “teoria de tudo”. Não estamos em busca de 5 teorias de tudo, mas, idealmente, se de facto podemos entender o Universo, estamos em busca de apenas uma. E todos estes objetos “estendidos” eram absolutamente fundamentais para verificar essa unicidade.

Mas a revolução das cordas dos anos 90 estava apenas a começar. Em meados dos anos 90, Andrew Strominger e Cumrun

Vafa usaram estas “D-branas” (o nome dado às nossas membranas com dimensões diversas) para descrever de forma microscópica, de forma quântica, buracos negros [16]. Este era um puzzle que existia desde os anos 70. Ao estudar buracos negros semi-clássicos, dito de outra forma, ao estudar teoria quântica dos campos não num espaço-tempo plano mas num espaço-tempo de buraco negro, Stephen Hawking descobriu várias curiosidades sobre estes objetos astrofísicos. Talvez a mais famosa seria que os buracos negros não são assim tão negros: na realidade radiam (a chamada radiação de Hawking) e logo têm uma temperatura associada [17]. Mas se têm natureza térmica, então é natural aceitar que também têm natureza termodinâmica—em particular, uma entropia. Ora o que Bekenstein e Hawking descobriram foi que essa entropia era proporcional à área do horizonte de acontecimentos—logo, que essa entropia era um número gigantesco. Mas a Relatividade Geral diz-nos que os buracos negros são, de alguma forma, objetos extremamente simples, caracterizados pela sua massa, carga elétrica, e momento angular. Então do que são realmente feitos os buracos negros quânticos, por forma a dar origem à gigantesca entropia de Bekenstein e Hawking? O que Strominger e Vafa nos explicaram foi que os buracos negros quânticos são “feitos de D-branas” e que a previsão da teoria de cordas para a entropia de certo tipo de buracos negros estava em perfeito acordo com o que seria de esperar da Relatividade Geral! Esta foi talvez a descoberta mais significativa a colocar a teoria de cordas como a principal teoria no caminho para a gravitação quântica, ao conseguir fazer um cálculo que nenhuma outra alternativa ainda conseguiu.

Mas a grande revolução ainda estava por acontecer, tendo surgido um par de anos depois por intermédio de Juan Maldacena [18], que olhou de forma unificada para todas estas questões que temos vindo a discutir. Os buracos negros de Strominger e Vafa são buracos negros algo especiais, com massa e com carga. Quando nos aproximamos do seu horizonte de acontecimentos, a geometria do espaço-tempo é curva, e conforme estamos muito perto do horizonte essa curvatura é como que a de um cilindro infinito. Se considerarmos apenas a física em torno do horizonte, nesse “cilindro infinito”, e nos esquecermos do resto, então a geometria do espaço-tempo em consideração simplifica-se – ao invés de um espaço-tempo de um buraco negro massivo e carregado, temos apenas aquilo a que se chama um espaço-tempo de anti-de Sitter (AdS). Podemos pensar nesta geometria como uma caixa cilíndrica infinita. Esta é uma analogia bastante curiosa, pois também quando aprendemos Mecânica Quântica talvez o primeiro problema que tentamos resolver, e que nos explica tanto sobre a própria teoria, é o poço de potencial infinito. O que Maldacena pergunta é que se os buracos negros são feitos de D-branas, por um lado, e se, por outro lado, perto do seu horizonte de acontecimentos podemos “desacoplar” a maior parte da geometria e nos focarmos sobre essa caixa cilíndrica infinita que é o espaço-tempo de AdS, então qual é o limite análogo do lado das nossas D-branas microscópicas? A resposta já tinha sido dada por Witten, sendo esse limite uma espécie de cromodinâmica quântica. Vamos ser rigorosos: em abono da verdade, esse limite não é cromodinâmica quântica, é uma versão supersimétrica que não exhibe confinamento mas antes uma simetria de invariância de escala, por vezes dita simetria “conforme”, e chama-se muitas vezes uma Teoria do Campo

Conforme (CFT). Mas do ponto de vista divulgativo podemos aproximar essa teoria como se fosse uma cromodinâmica quântica, e assim Maldacena conjectura que, uma vez que aceitamos que os buracos negros são feitos de D-branas, temos também de aceitar que, no limite de desacoplamento, a gravitação em AdS tem que ser equivalente à cromodinâmica do tipo CFT. Isto ficou conhecido como a correspondência AdS/CFT. Agora, há dois aspetos muito importantes a salientar. O primeiro, que o espaço-tempo de AdS vive em 5 dimensões, enquanto que a cromodinâmica do tipo CFT vive apenas em 4 dimensões (vive na fronteira do nosso cilindro infinito, logo numa dimensão menos do que a dimensão original). Assim, estamos a relacionar teorias que vivem em dimensões distintas. O segundo, que a teoria em AdS é uma teoria de gravitação, enquanto que a cromodinâmica do tipo CFT é uma teoria sem gravitação. Assim, estamos a descrever uma teoria gravitacional usando apenas teoria do campo usual!

É importante refletirmos para perceber o alcance do que acabámos de descrever. Primeiro, a ironia do destino do ponto de vista histórico. A teoria de cordas surge nos anos 70 para descrever as interações fortes mas falha nesse propósito. É então reinterpretada como uma teoria de gravitação quântica, e inicia uma longa jornada científica que, quase 30 anos depois, nos diz que compreender gravitação quântica em AdS é equivalente a perceber (algum tipo de) interações fortes ou, vice-versa, que perceber (algum tipo de) interações fortes é equivalente a compreender gravitação quântica em AdS. As cordas regressam para responder de forma positiva à questão inicial! De forma positiva, e também muito estranha: elas explicam as interações fortes através de gravitação quântica em dimensões superiores! A segunda, que as teorias de gravidade quântica não são teorias de campo no sentido habitual, pois existe uma alteração de dimensão entre o espaço-tempo de AdS, que vive em 5 dimensões, e a teoria de campo que descreve gravitação quântica em AdS, a CFT, que vive em 4 dimensões. Esta alteração de dimensão é aquilo que se chama de princípio holográfico e que pode ser uma propriedade fundamental de gravitação quântica: os graus de liberdade de um sistema gravitacional quântico não vivem no interior do espaço-tempo que queremos descrever, mas na sua fronteira, sendo o desenrolar das interações gravitacionais quânticas nesse espaço-tempo como que um holograma do ponto de vista da teoria na fronteira. Finalmente, um ponto absolutamente fundamental no que diz respeito à existência de alternativas teóricas para descrever a gravidade quântica. Será de esperar que, com o desenrolar do tempo, algumas—se não a maior parte—dessas alternativas sejam condenadas ao esquecimento. Esse é o natural caminho da ciência. Mas, independentemente da teoria das cordas ser a “Teoria de Tudo” ou não, enquanto a teoria quântica do campo usual estiver connosco, também estará a teoria de cordas, uma vez que a correspondência AdS/CFT nos certifica que elas são diferentes aspetos da mesma coisa! Aqui percebemos que a revolução em curso pode ser ainda maior: se não percebemos bem o que significa quantizar a gravitação, por esta ser dada por uma teoria de campo em dimensão mais baixa, também é certo que, vice-versa, não podemos realmente perceber bem o que é uma teoria quântica do campo, por esta ser dada por uma teoria de cordas que inclui a gravidade em dimensão mais alta. Há todo um mundo quântico por descobrir!

A correspondência AdS/CFT está em vias de completar 30 anos. O artigo de Maldacena é o artigo de física teórica de altas energias mais citado da história, a caminho das 22 mil citações. Mas todos os dias são dias de novas descobertas e de melhor perceber todas as verdadeiras consequências de teoria de cordas, de holografia, da correspondência AdS/CFT, e de como finalmente vir a compreender a gravitação quântica em toda a sua plenitude e virmos a coroar esta longa caminha científica com a desejada “Teoria de Tudo”.

Mas existem ainda inúmeros aspetos em aberto. Do lado fenomenológico, o nosso Universo não é um espaço-tempo do tipo AdS, é algo ao mesmo tempo muito diferente e muito parecido. O espaço-tempo AdS é caracterizado por ter uma constante cosmológica (um termo “constante” que podemos adicionar às equações de Einstein, e que o próprio ora achava boa ideia ora não achava boa ideia) e essa constante cosmológica é negativa. Isso não se verifica no nosso Universo, onde tudo indica que sim, existe uma constante cosmológica, mas que esta é positiva. Numa fase inflacionária, após o Big Bang, o nosso Universo seria assim um espaço-tempo do tipo de Sitter (dS)—ao invés de um cilindro, uma esfera. Acontece que em teoria de cordas é relativamente difícil encontrar soluções do tipo dS, e nesse aspecto ainda não temos uma resposta ao mesmo nível do que acontece com AdS. Uma possibilidade é estudar gravitação quântica em AdS do ponto de vista não-perturbativo, incluindo uma constante cosmológica que podemos variar, e tentar torná-la positiva através de procedimentos técnicos como “continuação analítica”. É pouco claro se esse procedimento virá ou não a conduzir a novos discernimentos físicos sobre gravitação quântica em dS, e a fase inflacionária do nosso Universo. Do lado teórico, a “desconstrução” do espaço-tempo enquanto teatro fundamental das operações está apenas a começar. Uma analogia interessante tem a ver com a vida de um peixe no oceano. Um peixe relativamente inteligente até poderia descobrir as equações que governam o fluido no qual esse peixe existe, as equações de Navier-Stokes. Mas a comunidade científica do cardume rapidamente descobriria que quantizar as equações de Navier-Stokes não a iria levar a lado nenhum, e perceber a natureza quântica do oceano teria que necessitar de novas ideias. Através da física estatística o nosso cardume científico eventualmente poderia descobrir a natureza molecular e atômica da água, e perceber que o fluido em que vivem não é mais que uma aproximação, válida no limite termodinâmico, de uma realidade mais fundamental—e onde a palavra “fluido” nem sequer tem sentido. Através de AdS/CFT já percebemos que alguma parte do espaço-tempo também não deve fazer grande sentido de um ponto de vista fundamental: do lado da CFT, a dimensão extra de AdS é vista como se fosse uma escala energética. Existem ainda propostas para perceber essa dimensão extra como que associada a entrelaçamento quântico do lado da teoria do campo. Mas deveríamos um dia conseguir fazer isto para todo espaço-tempo; encontrar os “átomos” do espaço-tempo da mesma forma que o cardume científico conseguiu encontrar o hidrogénio e o oxigénio. Esse é o caminho a percorrer.

Conclusões

Qualquer que seja a sua formulação final, a teoria que capturar os aspetos quânticos da gravitação, tem potencialmente dentro de si os elementos fundamentais para responder às questões que são o nó górdio da física contemporânea: como abordar a gravitação de modo a colocá-la no contexto das descrições que abarcam as outras interações fundamentais por meio da Teoria Quântica de Campos?; será o esquema resultante uma “Teoria de Tudo”?; qual o papel dos objetos extensos, cordas, membranas, etc, nesta teoria e como estes podem resolver problemas fundamentais como o das singularidades e dos infinitos das teorias quântica dos campos?; qual a física estatística subjacente ao espaço-tempo enquanto limite termodinâmico?. E, para além destas questões técnicas, quais serão as bases desta teoria que evitarão que seja um sistema axiomático formal e que concretamente impulse a resolução de problemas que no contexto do Universo primitivo e dos buracos negros possam ter implicações fenomenológicas verificáveis e refutáveis?

Estamos ainda muito longe de responder a estas questões, mas algumas ilações podem ser retiradas das tentativas já desenvolvidas. No contexto da teoria de cordas quânticas, parecem-nos incontroverso afirmar que é vital que a teoria apresente um conjunto finito enumerável de estados fundamentais e que estes reproduzam o Universo quadridimensional em expansão acelerada e com uma constante cosmológica compatível com os valores que se inferem das observações. Seria extremamente interessante que a “Teoria de Tudo” resultante pudesse conter também elementos para abordar os aspetos não-perturbativos no contexto da teoria quântica de campos.

Finalmente, não nos parece absolutamente necessário que esteja na “Teoria de Tudo” a chave para a resolução de questões associadas à perda de coerência quântica [19] e que o “colapso” da putativa função de onda do Universo (ver, por exemplo, Refs. [20,21]) tenha uma origem gravitacional. Estas questões já estão presentes em contextos quânticos não-gravitacionais, e têm visto muitos desenvolvimentos ao longo dos anos—desde a perda de coerência quântica até ao “darwinismo” quântico, passando pela recente hipótese de medição-equilibrada, que colocam todas estas questões no contexto adequado de Mecânica Quântica Estatística de muitos-corpos, e lhes dão respostas já bastante completas [22]. Assim sendo, em nossa opinião, estas questões dizem respeito, como já o afirmamos acima, à harmonização da “Teoria de Tudo” com a descrição não quântica da gravitação. No contexto do Universo primitivo, tal implica, como já o dissemos, na compatibilidade com a inflação cosmológica.

Os autores agradecem a Alex Bernardini pela leitura crítica do manuscrito.

Referências

- [1] Stephen W. Hawking e Roger Penrose, "A Natureza do Espaço e do Tempo", (Gradiva 1996).
- [2] S. Weinberg, "Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature" (Vintage Books 1994).
- [3] O. Bertolami, "The Spirit of Unification: The Wei of Physics", arXiv:1005.2918 [physics.hist-ph] (2010).
- [4] J. Oppenheim "Is it time to rethink quantum gravity?", arXiv:2310.12221v1 [gr-qc] (2023).
- [5] M. J. Duř, "Inconsistency Of Quantum Field Theory In Curved Space-Time", in Quantum Gravity II: A Second Oxford Symposium, edited by C. J. Isham, R. Penrose, and D. W. Sciama (Clarendon, Oxford 1981).
- [6] J. F. Donoghue, "General Relativity as an Effective Field Theory: The Leading Quantum Corrections", Phys. Rev. D 50, 3874 (1994); arXiv:gr-qc/9405057.
- [7] E. Álvarez, "Quantum Gravity", arXiv:gr-qc/0405107 (2004).
- [8] M.B. Greene, J.H. Schwarz, E. Witten, "Superstring Theory", (Cambridge University Press 1987).
- [9] C. Rovelli, "Quantum Gravity" (Cambridge Monographs on Mathematical Physics 2004).
- [10] T. Thiemann, "Modern Canonical Quantum General Relativity", (Cambridge University Press 2007).
- [11] M. Faizal, L.M. Krauss, A. Shabir, F. Marino, B. Pourhassan, "Quantum gravity cannot be both consistent and complete", arXiv: 2505.11773 [gr-qc] (2025).
- [12] M.D. Schwartz, "Quantum Field Theory and the Standard Model", (Cambridge University Press 2014).
- [13] M.B. Green, J.H. Schwarz, "Anomaly Cancellation in Supersymmetric D=10 Gauge Theory and Superstring Theory", Phys. Lett. B149, 117 (1984).
- [14] P. Candelas, G.T. Horowitz, A. Strominger, E. Witten, "Vacuum Configurations for Superstrings", Nucl. Phys. B258, 46 (1985).
- [15] E. Witten, "String Theory Dynamics in Various Dimensions", Nucl. Phys. B443, 85 (1995).
- [16] A. Strominger, C. Vafa, "Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy", Phys. Lett. B379, 99 (1996).
- [17] S.W. Hawking, "Particle Creation by Black Holes", Commun. Math. Phys. 43, 199 (1975).
- [18] J.M. Maldacena, "The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity", Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998).
- [19] Wojciech H. Zurek, "Decoherence and the transition from quantum to classical - REVISITED", arXiv: quant-ph/0306072.
- [20] J.B. Hartle, S.W. Hawking, "Wave function of the Universe", Phys. Rev. D 28, 2960-2975 (1983).
- [21] O. Bertolami, "Seeding the vacuum with entropy: the Chaplygin-like vacuum hypothesis", Class. Quant. Grav. 40, 7, 177002 (2023).
- [22] E. Schwarzhans, F.C. Binder, M. Huber, M.P.E. Lock, "Quantum Measurements and Equilibration: the Emergence of Objective Outcomes via Entropy Maximisation", e-Print: 2302.11253 [quant-ph].



Orfeu Bertolami nasceu em São Paulo, Brasil, em 1959. Graduado em Física pela Universidade de São Paulo em 1980, obteve o mestrado no Instituto de Física Teórica em São Paulo em 1983, o Grau Avançado em Matemática em 1984 e o doutoramento em Física Teórica em 1987, respetivamente nas Universidades de Cambridge e Oxford no Reino Unido. Desenvolveu atividades de investigação no Institut für Theoretische Physik em Heidelberg (1987–1989), no CERN (1993–1995) em Genebra, na secção de Turim do Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (1994) e na Universidade de Nova Iorque (1999). Foi professor no Departamento de

Física do Instituto Superior Técnico (1991–2010), e é Professor Catedrático no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Publicou mais de quatro centenas artigos científicos, em livros, jornais, atas de conferências, mais de 230 dos quais em revistas especializadas com arbitragem nas áreas da astrofísica, cosmologia, física e propulsão espacial, gravitação clássica e quântica, teorias de cordas quânticas e sobre a física do Sistema Terrestre. O seu livro mais recente "Fundamentos de Termodinâmica e Mecânica Estatística", foi publicado pela Universidade do Porto Press em 2025 e "Introdução à Relatividade Geral", será publicado pela mesma editora em 2026. Foi galardoado com o terceiro prémio da Gravity Research Foundation dos Estados Unidos em 1999, com o Prémio União Latina de Ciência em 2001, o Prémio Universidade Técnica de Lisboa/Santander Totta de excelência científica nas áreas de Biofísica e Física em 2007, e nomeado Outstanding Referee pela American Physical Society em 2013. Colaborou em projetos europeus no estudo da estrutura microscópica do espaço-tempo, da física da matéria escura e da energia escura, em problemas de física fundamental no espaço e sobre a física do Sistema Terrestre e das alterações climáticas em colaboração com o Stockholm Resilience Centre.



Ricardo Schiappa nasceu em Lisboa e cresceu nos seus arredores. Licenciou-se em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico em 1994 tendo vindo a doutorar-se 5 anos mais tarde, em 1999, pelo Massachusetts Institute of Technology nos Estados Unidos. Foi depois disso investigador de pós-doutoramento na Universidade de Harvard e Fellow no CERN. De regresso a Portugal ingressou de volta no Instituto Superior Técnico onde atualmente é Professor Catedrático em Física-Matemática. O seu trabalho de investigação revolve em torno de questões matemáticas não-perturbativas na formulação de teorias de gravitação quântica, em particular teoria de cordas, com especial ênfase nas relações

com a teoria da ressurgência e teorias de matrizes aleatórias. Ao longo dos anos foi cientista convidado em diversas instituições internacionais, incluindo o CERN, a Universidade de Genebra, a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, e a Universidade de Cambridge, bem como foi ou é investigador principal ou investigador participante em diversos projetos internacionais nestas áreas, financiados pela Swiss National Science Foundation, a European Science Foundation, e o European Research Council. Em 2011 foi Prémio Científico UTL/Santander-Totta, em 2017 selecionado para os destaques do Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, e em 2019 professor visitante distinguido no IHES em Paris.