

DEUS JOGA DADOS?

de [Stephen W. Hawking](#)

<http://www.str.com.br/Scientia/dados.htm>

Esta palestra é sobre se podemos prever o futuro ou se ele é arbitrário e aleatório. Na antigüidade, o mundo deve ter parecido razoavelmente arbitrário. Desastres como enchentes ou doenças devem ter se parecido a acontecimentos sem aviso ou razão aparente. Pessoas primitivas atribuíram tais fenômenos naturais a um panteão de deuses e deusas, que comportavam-se de forma caprichosa e mágica. Não havia meio de prever o que eles fariam, e a única esperança era ganhar favores em troca de presentes ou ações. Muitas pessoas ainda assumem parcialmente esta crença, e tentam fazer um pacto com a sorte. Elas se oferecem a fazer certas coisas, se ganharem uma nota A em um curso, ou passarem no seu teste de direção.

Gradualmente, entretanto, as pessoas devem ter notado certas regularidades no comportamento da natureza. Estas regularidades eram muito óbvias no movimento dos corpos celestes através do céu. Então a astronomia foi a primeira ciência a ser desenvolvida. Ela foi posta sobre uma base matemática firme por Newton, mais de 300 anos atrás, e ainda usamos a sua teoria da gravidade para prever o movimento de quase todos os corpos celestes. Seguindo o exemplo da astronomia, foi descoberto que outros fenômenos naturais também obedeciam leis científicas definidas. Isto levou à idéia do determinismo científico, que parece ter sido expressa publicamente pela primeira vez pelo cientista francês Laplace. Gostaria de citar para vocês as palavras originais de Laplace, então pedi a um amigo para procurá-las. Elas estão em francês, é claro, não que eu pense que isto seria algum problema para esta assistência. Mas o problema é que Laplace era como Prewst, pois escrevia frases de extensão e complexidade incomuns. Então decidi parafrasear as citações. Com efeito, o que ele disse foi que, se em um dado momento, soubermos as posições e as velocidades de todas as partículas no universo, então poderíamos calcular o seu comportamento em qualquer outro tempo, no passado ou no futuro. Há uma história, provavelmente apócrifa, de que quando Laplace foi perguntado por Napoleão sobre como Deus se encaixava neste sistema, ele respondeu, 'Senhor, eu não precisei desta hipótese.' Não acho que Laplace estivesse afirmando que Deus não existisse. Somente que ele não intervém para quebrar as leis da Ciência. Esta deve ser a posição de todo cientista. Uma lei científica não é uma lei científica se ela somente se aplica quando algum ser sobrenatural decide deixar as coisas funcionarem e não intervir.

A idéia de que o estado do universo em um dado momento determina o estado em todos os outros tempos, sempre foi um princípio central da ciência, desde o tempo de Laplace. Ela implica que



podemos prever o futuro, ao menos em princípio. Na prática, entretanto, nossa habilidade para prever o futuro é severamente limitada pela complexidade das equações, e o fato de que elas freqüentemente apresentam uma propriedade chamada caos. Como os que viram Jurassic Park sabem, isto significa que um pequeno distúrbio em um lugar pode causar uma grande mudança em outro. Uma borboleta batendo suas asas pode provocar chuva no Central Park, Nova Iorque. O problema é que o fenômeno não é reproduzível. Da próxima vez que a borboleta bater as suas asas, uma porção de outras coisas serão diferentes, que também influenciarão o tempo. É por isto que as previsões do tempo são tão imprecisas.

Apesar destas dificuldades práticas, o determinismo científico permaneceu o dogma oficial ao longo do século XIX. Entretanto, no século XX, houve dois avanços que mostram que a visão de Laplace, de uma previsão completa do futuro, não pode ser alcançada. O primeiro destes avanços foi o que é chamado de mecânica quântica. Ela foi apresentada pela primeira vez em 1900, pelo físico alemão Max Planck, como uma hipótese ad hoc, para resolver um notável paradoxo. De acordo com as idéias

clássicas do século XIX, que vinham de Laplace, um corpo quente, como um pedaço de metal vermelho e quente, deveria liberar radiação. Ele perderia energia em ondas de rádio, infra-vermelho, luz visível, ultravioleta, raios x, e raios gama, todos à mesma taxa. Isto não somente significaria que todos morreríamos de câncer de pele, mas também que tudo no universo estaria à mesma temperatura, o que é claramente falso. Entretanto, Planck mostrou que se poderia evitar este desastre se se desistisse da idéia de que a quantidade de radiação poderia ter qualquer valor, e disse, ao contrário, que a radiação vinha somente em pacotes ou quanta de um certo tamanho. É um pouco como dizer que você não pode comprar açúcar no supermercado em qualquer quantidade, mas somente em pacotes de um quilograma. A energia nos pacotes ou quanta é maior para raios ultravioleta e raios x. É por isto que não sofremos queimaduras de um copo de café.



Planck considerou a idéia dos quanta somente como um truque matemático, não tendo nenhuma realidade física, o que quer que isto signifique. Entretanto, os físicos começaram a encontrar outros comportamentos que poderiam ser explicados somente em termos de quantidades tendo valor discretos, ou quantizados, ao invés de continuamente variáveis. Por exemplo, seria descoberto que partículas elementares se comportavam como peões, girando ao redor de um eixo. Mas a velocidade de giro (spin) não podia ter qualquer valor. Ele tinha que ser algum múltiplo de uma unidade básica. Porque esta unidade é muito pequena, não se nota que um pião normal na verdade desacelera em uma rápida seqüência de passos discretos, ao invés de um processo contínuo. Mas para peões tão pequenos quanto átomos, a natureza discreta do spin é muito importante.

Algum tempo se passou antes que as pessoas percebessem as implicações deste comportamento quântico para o determinismo. Foi somente em 1926 que Werner Heisenberg, outro físico alemão, afirmou que não se poderia medir tanto a posição quanto a velocidade de uma partícula com exatidão. Para ver onde está a partícula, deve-se incidir luz sobre ela. Mas, pelo trabalho de Planck, não se pode usar uma quantidade de luz arbitrariamente pequena. Deve-se utilizar ao menos um quantum. Isto causará um distúrbio na partícula e mudar a sua velocidade de uma maneira que não pode ser prevista. Para medir a posição da partícula de forma acurada, você terá que usar luz de pequeno comprimento de onda, como ultravioleta, raios x, ou raios gama. Mas, novamente, de acordo com o trabalho de Planck, os quanta destas formas de luz têm energias maiores do que a da luz visível. Então elas perturbarão mais a velocidade da partícula. É uma situação sem vitória possível: quanto mais acuradamente se tenta medir a posição da partícula, menos acuradamente se pode saber a velocidade, e vice-versa. Isto é resumido no Princípio da Incerteza que Heisenberg formulou; a incerteza na posição de uma partícula vezes a incerteza na sua velocidade é sempre maior do que uma quantidade chamada constante de Planck, dividida pela massa da partícula.

Princípio da Incerteza

$$(\text{incerteza na posição}) \times (\text{incerteza na velocidade}) \times \text{massa}$$

é maior que h

Constante de Planck

A visão de Laplace do determinismo científico envolvia saber as posições e velocidades das partículas no universo, em um instante de tempo. Logo, ela foi seriamente minada pelo princípio da Incerteza de Heisenberg. Como se poderia prever o futuro, quando não se poderiam medir precisamente tanto as posições quanto as velocidades das partículas no presente? Não importa a potência do seu computador, se você entrar com dados ruins, você terá previsões ruins na saída.

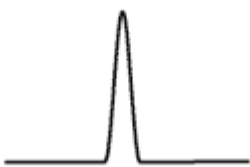


Einstein estava muito descontente com esta aparente aleatoriedade na natureza. Seus pontos de vista foram resumidos em sua frase famosa, 'Deus não joga dados'. Parece que ele sentiu que a incerteza era somente provisória: mas havia uma realidade subjacente, na qual as partículas teriam posições e velocidades bem definidas, e evoluiriam de acordo com leis determinísticas, no espírito de Laplace. Esta realidade poderia ser conhecida para Deus, mas a natureza quântica da luz nos impediria de ver, a não ser em espelho e de modo

confuso.

A visão de Einstein era o que chamaríamos agora de teoria de variável escondida. Teorias de variável escondida podem parecer a maneira mais óbvia de incorporar o Princípio da Incerteza na física. Elas formam a base do quadro mental do universo assumido por muitos cientistas e quase todos os filósofos da ciência. Mas estas teorias de variável escondida podem estar erradas. O físico britânico John Bell, que morreu recentemente, inventou um teste experimental que distinguiria teorias de variável escondida. Quando o experimento foi cuidadosamente executado, os resultados foram inconsistentes com variáveis escondidas. Portanto parece que mesmo Deus é limitado pelo Princípio da Incerteza, e não pode saber tanto a posição quanto a velocidade de uma partícula. Então Deus realmente joga dados com o universo. Todas as evidências sugerem que ele é um jogador inveterado, que joga dados em todas as ocasiões possíveis.

Função de Onda de Grande Pico



Outros cientistas foram muito mais rápidos do que Einstein para modificar a visão clássica do determinismo do século XIX. Uma nova teoria, chamada mecânica quântica, foi apresentada por Heisenberg, o austríaco Erwin Schroedinger, e o físico britânico Paul Dirac. Dirac antecedeu o meu predecessor como Professor Lucasiano em Cambridge. Ainda que a mecânica quântica tenha estado por aí por quase 70 anos, ela geralmente ainda não é entendida ou apreciada mesmo por aqueles que a usam para fazer cálculos.

Mas isto deveria nos preocupar a todos, porque é um quadro completamente diferente do universo físico, e da realidade mesma. Na mecânica quântica, as partículas não têm posições e velocidades bem definidas. Ao contrário, elas são representadas pelo que é chamado função de onda. Trata-se um número em cada ponto do espaço. A amplitude da função de onda dá a probabilidade de que a partícula seja achada naquela posição. A taxa com a qual a função de onda varia de ponto a ponto dá a velocidade da partícula. Isto indicará que a incerteza na posição é pequena. Mas a função de onda variará muito rapidamente perto do pico, aumentando de um lado, diminuindo do outro. Portanto a incerteza na velocidade será grande. Similarmente, pode-se ter funções de onda onde a incerteza na velocidade é pequena, mas a incerteza na posição é grande.

Função de Onda



A função de onda contém tudo que se pode saber sobre a partícula, tanto sua posição quanto sua velocidade. Se sabe-se a função de onda em um instante, então seus valores em outros tempos são determinados pelo que é chamado de equação de Schroedinger. Portanto, ainda se tem um tipo de determinismo, mas não é do tipo que Laplace vislumbrou. Ao invés de ser capaz de prever as posições e velocidades das partículas, tudo o que podemos prever é a função de onda. Isto significa que podemos prever somente a metade do que poderíamos, de acordo com a visão clássica do século XIX.

Ainda que a mecânica quântica leve à incerteza, quando tentamos prever tanto a posição quanto a velocidade, ela ainda nos permite prever, com certeza, uma combinação de posição e velocidade. Entretanto, mesmo este grau de certeza parece estar ameaçado pelos mais recentes avanços. O problema surge porque a gravidade pode deformar tanto o espaço-tempo que podem haver regiões que não observamos.

Curiosamente, o próprio Laplace escreveu um artigo em 1779 sobre como algumas estrelas poderiam ter um campo gravitacional tão forte que a luz não pudesse escapar, mas seria arrastada de volta à estrela. Ele até calculou que uma estrela com a mesma densidade do sol, mas duzentas e cinquenta vezes o seu tamanho, teria esta propriedade. Mas ainda que Laplace possa não ter percebido, a mesma idéia tinha sido apresentada 16 anos antes por um homem de Cambridge, John Mitchell, em um artigo na Philosophical Transactions of the Royal Society. Tanto Mitchell quanto Laplace pensaram na luz como sendo constituída de partículas, parecidas com balas de canhão, que poderiam ser desaceleradas pela gravidade, e forçadas a cair de volta na estrela. Mas um experimento famoso, executado por dois americanos, Michelson e Morley em 1887, mostrou que a luz sempre viaja à velocidade de cento e oitenta e seis mil milhas por segundo, não importando de onde tenha vindo. Como então poderia a gravidade desacelerar a luz, e fazê-la cair de volta?

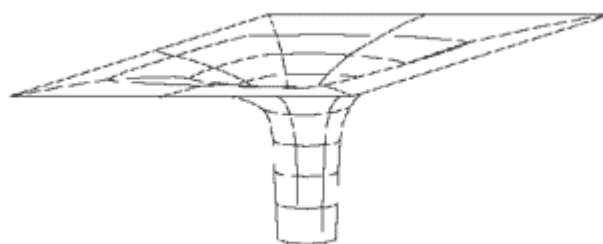
Isto era impossível, de acordo com as idéias então aceitas de espaço e tempo. Mas em 1915, Einstein apresentou a sua revolucionária Teoria Geral da Relatividade. Nela, espaço e tempo não eram mais entidades separadas e independentes. Ao invés disto, eles eram somente diferentes direções em um único objeto chamado espaço-tempo. Este espaço-tempo não era plano, mas



deformado e encurvado pela matéria e energia nele contidas. Para entender isto, considere uma superfície de borracha com um peso nela colocado, para representar a estrela. O peso formará uma depressão na borracha, e por sua causa a superfície perto da estrela será curva, ao invés de plana. Se rolarmos bolas de gude na superfície de borracha, suas trajetórias serão curvas, ao invés de linha retas. Em 1919,

uma expedição britânica na África Ocidental observou a luz de estrelas distantes que passou perto do sol durante um eclipse. Eles descobriram que as imagens das estrelas foram deslocadas levemente de suas posições normais. Isto indicou que as trajetórias da luz das estrelas tinham sido desviadas pelo espaço-tempo curvo perto do sol. A Relatividade Geral estava confirmada.

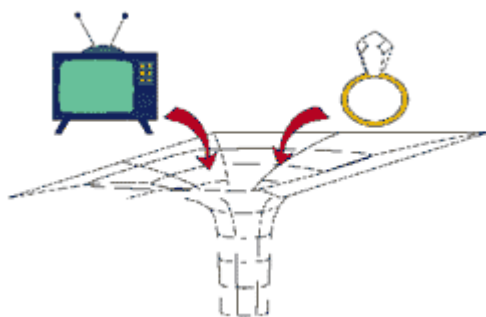
Considere agora colocar pesos mais e mais pesados e concentrados na superfície de borracha. Eles irão formar uma depressão na superfície cada vez maior. Finalmente, em um peso e tamanho críticos, eles farão um buraco sem fundo na superfície, onde as partículas podem cair, mas nada pode ser retirado.



O que acontece no espaço-tempo, de acordo com a Relatividade Geral, é bem parecido.

Uma estrela encurvará e distorcerá o espaço-tempo perto dela, mais e mais quanto mais massiva e compacta for a estrela. Se uma estrela massiva, que queimou seu combustível nuclear, esfria e se encolhe abaixo de um tamanho crítico, ela formará literalmente um buraco sem fundo no espaço-tempo, de onde a luz não pode sair. A tais objetos foi dado o nome de Buracos Negros, pelo físico americano John Wheeler, que foi um dos primeiros a reconhecer a sua importância, e os problemas que levanta. O nome pegou rápido. Para os americanos, sugeria algo escuro e misterioso, enquanto que para os britânicos havia a ressonância adicional do Buraco Negro de Calcutá. Mas os franceses, sendo franceses, viram um significado mais *risqué*. Por anos, eles resistiram ao nome, *trou noir*, dizendo que era obsceno. Mas era um pouco como tentar resistir ao *le weekend*, e outros *franglais*.¹

Ao final, tiveram que desistir. Quem pode resistir a um nome tão vencedor?



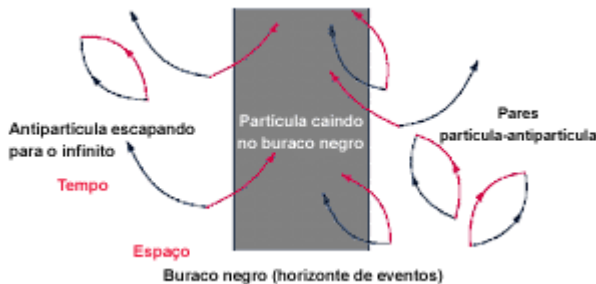
Agora, temos observações que indicam buracos negros em vários objetos, de sistemas estelares binários ao centro das galáxias. Então, hoje é geralmente aceito que buracos negros existem. Mas, além de seu potencial para a ficção científica, qual é o seu significado para o determinismo? A resposta está em um adesivo que eu tinha na porta do meu escritório: Buracos Negros Estão Fora do Alcance. Não somente as partículas e os astronautas azarados que caem dentro de um buraco negro nunca mais voltam, mas também a informação que eles carregam é perdida para sempre, ao menos da

nossa região do universo. Você pode jogar aparelhos de televisão, anéis de diamante, ou mesmo seus piores inimigos dentro de um buraco negro, e tudo que o buraco negro recordará é a massa total, e o estado de rotação. John Wheeler cunhou isto como, 'Um Buraco Negro não Tem Cabelos.' Para os franceses, isto somente confirmou suas suspeitas.

Desde que se pensasse que os buracos negros continuariam a existir para sempre, esta perda de informação não parece importar muito. Poderia dizer-se que a informação ainda existia dentro do buraco negro. Acontece que não se pode dizer o que é, do lado de fora. Entretanto, a situação mudou quando eu descobri que os buracos negros não são completamente negros. A mecânica quântica faz com que eles emitam partículas e radiação a uma taxa constante. Este resultado veio como uma total surpresa para mim, e para todos os outros. Mas, pensando após o fato ocorrido, deveria ter sido óbvio. O que pensamos como espaço vazio não é realmente vazio, mas é preenchido com pares de partículas e antipartículas. Estas aparecem juntas em algum ponto do espaço e tempo, movem-se separadamente, e então juntam-se e aniquilam-se. Estas partículas e antipartículas ocorrem porque um campo, tais como os campos que transmitem luz ou gravidade, não podem ser exatamente zero. Isto significaria que o valor do campo teria tanto uma posição exata (no zero) e uma velocidade ou taxa de mudança exata (também zero). Isto seria contra o Princípio da Incerteza, simplesmente porque uma partícula não pode ter tanto uma posição exata quanto uma velocidade exata. Então todos os campos devem ter as chamadas flutuações de vácuo. Devido ao comportamento quântico da natureza, pode-se interpretar estas flutuações de vácuo em termos de partículas e antipartículas, como descrevi.



Estes pares de partículas ocorrem para todas as variedades de partículas elementares. Elas são chamadas partículas virtuais, porque ocorrem mesmo no vácuo, e não podem ser medidas diretamente por detectores. Entretanto, os efeitos indiretos das partículas virtuais, ou flutuações de vácuo, tem sido observadas em numerosos experimentos, e sua existência confirmada.



Se há um buraco negro por perto, um membro de um par partícula antipartícula pode cair dentro do buraco, deixando o outro membro sem um parceiro com o qual aniquilar-se. A partícula abandonada pode igualmente cair dentro do buraco, mas também pode escapar para uma grande distância do buraco, onde se tornará uma partícula real, que pode ser medida por um detector. Para alguém longe do buraco negro, ela parecerá ter sido emitida pelo buraco. Esta explicação de como os

buracos negros não são tão negros torna claro que a emissão dependerá do tamanho do buraco negro, e da taxa à qual ele está rotando. Mas uma vez que os buracos negros não têm cabelos, na frase de Wheeler, a radiação será do contrário independente do que foi ao buraco. Não importa se você jogar aparelhos de televisão, anéis de diamante, ou seus piores inimigos dentro do buraco negro. O que volta para fora será o mesmo.

Então, o que tudo isto tem a ver com determinismo, que é o suposto assunto desta palestra? O que isto mostra é que há muitos estados iniciais, contendo aparelhos de televisão, anéis de diamantes, e até pessoas, que evoluem para o mesmo estado final, ao menos do lado de fora do buraco negro. Mas na visão de Laplace do determinismo, havia uma correspondência um a um entre os estados iniciais e os estados finais. Se você soubesse o estado do universo em algum instante do passado, você poderia prevê-lo no futuro. Similarmente, se você o conhecesse no futuro, poderia calcular como ele deveria ter sido no passado. O advento da teoria quântica nos anos 20 reduziu a extensão do que se poderia prever pela metade, mas ainda deixou uma correspondência um a um entre os estados do universo em tempos diferentes. Se alguém soubesse a função de onda em um instante, poderia calculá-la em qualquer outro tempo.

Com buracos negros, entretanto, a situação é um pouco diferente. Acaba-se com o mesmo estado fora do buraco, seja o que for que se tenha jogado para dentro, uma vez que tenha alguma massa. Portanto não há uma correspondência um a um entre o estado inicial e o estado final, tanto fora quanto dentro do buraco negro. Mas o ponto importante é que a emissão de partículas e radiação

pelo buraco negro causará a perda de massa do buraco negro, que ficará menor. Finalmente, parece que o buraco negro diminuirá para massa zero, e desaparecerá totalmente. O que, então, acontecerá com todos os objetos que caíram dentro do buraco, e todas as pessoas que nele se jogaram ou foram jogadas? Elas não podem sair novamente, porque não há massa ou energia suficiente no buraco negro para mandá-los para fora novamente. Eles podem passar para outro universo, mas isto não é algo que fará nenhuma diferença para aqueles de nós suficientemente prudentes para não se jogar em um buraco negro. Mesmo a informação sobre o que caiu no buraco não poderia sair novamente quando o buraco finalmente desaparecesse. Informação não pode ser transportada sem um custo, como aqueles de vocês que têm conta de telefone sabem. Informação requer energia para ser transportada, e não haverá energia sobrando quando o buraco negro desaparecer.

O que tudo isto significa é que a informação será perdida de nossa região do universo quando buracos negros são formados, e então evaporar. Esta perda de informação significará que podemos prever menos ainda do que pensávamos, de acordo com a teoria quântica. Na teoria quântica, não se pode prever com certeza tanto a posição quanto a velocidade de uma partícula. Mas ainda há uma combinação de posição e velocidade que pode ser prevista. No caso de um buraco negro, esta predição definitiva envolve ambos os membros de um par de partículas. Mas podemos medir somente a partícula que sai. Não há maneira mesmo em princípio de medirmos a partícula que cai no buraco. Então, até onde sabemos, ela poderia estar em qualquer estado. Isto significa que não podemos fazer nenhuma previsão definitiva sobre a partícula que escapa do buraco. Mas não há combinação de posição e velocidade de somente uma partícula que possamos prever definitivamente, porque a velocidade e a posição dependerão da outra partícula, que não observamos. Portanto parece que Einstein estava duplamente errado quando disse, Deus não joga dados. Não somente Deus definitivamente joga dados, mas Ele algumas vezes nos confunde jogando-os onde eles não podem ser vistos.

Deus às vezes joga dados onde não podem ser vistos



Muitos cientistas são como Einstein, ao ter uma profunda ligação emocional com o determinismo. Diferentemente de Einstein, eles aceitaram a redução em nossa habilidade de prever que a teoria quântica trouxe. Mas isto foi o bastante. Eles não gostaram da redução adicional que os buracos negros parecem implicar. Então eles tem afirmado que a informação na verdade não é perdida nos buracos negros. Mas não foram capazes de achar nenhum mecanismo que retornaria a informação. É apenas uma esperança pífia de que o universo seja determinístico, da forma como Laplace pensou. Sinto que estes cientistas não aprenderam a lição da história. O universo não se comporta de acordo com nossas idéias pré-concebidas. Ele continua a nos surpreender.

Alguém pode pensar que importaria muito se o determinismo entrasse em colapso perto de buracos negros. Estamos quase com certeza a pelos menos poucos anos-luz de um buraco negro de qualquer tamanho. Mas o Princípio da Incerteza implica que todas as regiões do espaço deveriam estar cheias de minúsculos buracos negros virtuais, que aparecem e desaparecem de novo. Pode-se pensar que partículas e informação poderiam cair nestes buracos negros, e serem perdidas. Como estes buracos negros são muito pequenos, uns cem trilhões de trilhões de vezes menor do que o núcleo de um átomo, a taxa com que a informação seria perdida seria muito baixa. É por isto que as leis da ciência parecem determinísticas, com muito boa aproximação. Mas em condições extremas, como no jovem universo, ou em colisões de alta energia entre partículas, poderia haver perda considerável de informação. Isto levaria à imprevisibilidade na evolução do universo.

“Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d’ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l’Analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grand corps de l’univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l’avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.”

Pierre Simon de Laplace
Introduction à la Théorie Analytique des Probabilités

Para resumir, o assunto do qual estive falando é se o universo evolui de maneira arbitrária ou se ele é determinístico. A visão clássica, apresentada por Laplace, era de que o movimento futuro das partículas estava completamente determinado, sabendo-se suas posições e velocidades em um instante. Esta visão teve que ser modificada quando Heisenberg apresentou o seu Princípio da Incerteza, que dizia que não se poderia

conhecer ao mesmo tempo a posição e a velocidade acuradamente. Entretanto, ainda era possível prever uma combinação de posição e velocidade. Mas mesmo esta previsibilidade limitada desapareceu quando os efeitos dos buracos negros foram considerados. A perda de partículas e informação nos buracos negros significava que as partículas que saíam eram aleatórias. Poderia calcular-se probabilidades, mas nenhuma previsão definitiva. Portanto, o futuro do universo não está completamente determinado pelas leis da ciência e seu estado presente, como Laplace pensou. Deus ainda tem alguns truques.

Isto é tudo o que tenho a dizer por agora. Obrigado pela atenção.

Nota do Tradutor

1 - *Weekend*, palavra da língua inglesa que significa *final de semana*, foi incorporado ao francês como um estrangeirismo. *Franglais* é uma composição entre as palavras francesas *français* (francês) e *anglais* (inglês). O autor está se referindo à notória resistência dos franceses à hegemonia da língua inglesa. [Voltar](#)