

Entrelaçamento quântico

O **entrelaçamento quântico** (ou **emaranhamento quântico**, como é mais conhecido na comunidade científica) é um fenômeno da [mecânica quântica](#) que permite que **dois** ou mais objetos estejam de alguma forma tão ligados que um objeto não possa ser corretamente descrito sem que a sua contra-parte seja mencionada - mesmo que os objetos possam estar espacialmente separados por milhões de anos-luz. Isso leva a correlações muito fortes entre as propriedades físicas observáveis das diversas partículas subatômicas. O entrelaçamento quântico foi chamado de "ação fantasmagórica à distância" por [Albert Einstein](#), que acreditava ser um evento impossível, sob as leis da [mecânica quântica ortodoxa](#).^{[1][2]}

Essas fortes correlações fazem com que as medidas realizadas numa delas pareçam estar a influenciar instantaneamente à outra com a qual ficou entrelaçada, e sugerem que alguma influência estaria a propagar-se instantaneamente, apesar da separação entre eles. Mas o entrelaçamento quântico não permite a transmissão a uma velocidade superior à da [velocidade da luz](#), porque nenhuma informação útil pode ser transmitida desse modo. Só é possível a transmissão de informação usando um conjunto de estados entrelaçados em conjugação com um canal de informação clássico - aquilo a que se chama o [teletransporte quântico](#). Isto dá a entender que tudo está conectado por "[forças](#)" que não vemos e que permanecem no [tempo](#), ou estão fora do sistema que denominamos, entendemos ou concebemos como sistema temporal.

O entrelaçamento quântico é a base para tecnologias emergentes, tais como [computação quântica](#), [criptografia quântica](#) e tem sido usado para experiências como o [teletransporte quântico](#). Ao mesmo tempo, isto produz alguns dos aspectos teóricos e [filosóficos](#) mais perturbadores da teoria, já que as correlações previstas pela mecânica quântica são inconsistentes com o princípio intuitivo do [realismo local](#), que diz que cada partícula deve ter um estado bem definido, sem que seja necessário fazer referência a outros sistemas distantes. Os diferentes enfoques sobre o que está a acontecer no processo do entrelaçamento quântico dão origem a diferentes interpretações da mecânica quântica.

Teorema de Bell

De acordo com a mecânica quântica, o *spin* de um [elétron](#) não pode ser conhecido com antecedência e ainda ser perfeitamente correlacionado com o outro. [Einstein](#), em particular, não gostava dessa ideia porque ela dava a entender que a informação poderia ser enviada a partir de um elétron para o outro instantaneamente – quebrando uma regra que diz que nada pode viajar mais rápido do que a velocidade da luz. Em vez disso, a suposição de Peter Mosley, da Universidade de Bath, é a de que havia [variáveis ocultas](#) codificadas em cada elétron que poderiam determinar o resultado se nós conseguíssemos acessá-las.^[3]

Na década de 1960, o cientista norte-irlandês [John Bell](#) veio com um método para testar a teoria de Einstein. A chamada [desigualdade de Bell](#) é satisfeita apenas se as ações em um local não puderem afetar outro lugar instantaneamente e os resultados das medições forem bem definidos de antemão – algo apelidado de “realismo local”. Bell mostrou, teoricamente, que o emaranhamento quântico violaria sua teoria da desigualdade, mas teorias realistas contendo as variáveis ocultas, não. Isso ocorre porque a ligação entre partículas emaranhadas é mais forte do que Einstein queria acreditar. Então, se a correlação medida entre pares de partículas de um experimento fosse acima de um determinado limiar, seria inconsistente com variáveis ocultas e a teoria do emaranhamento quântico estaria correta.^[3]

Emaranhamento quântico de uma única partícula

O emaranhamento quântico de uma única partícula foi demonstrado por uma equipe da [Universidade Griffiths](#). Usando uma técnica chamada “Homodyne Detection”, eles dividiram um único [fóton](#) entre dois laboratórios e testaram se a medição de uma parte alterava o status da outra. Dessa forma, verificaram a ocorrência do emaranhamento.^[4]

Na teoria, o emaranhamento acontece quando duas partículas continuam conectadas apesar de estarem separadas. Dessa forma, o que acontece em uma partícula é refletido na outra. Por exemplo, um [spin](#) no sentido horário na primeira partícula será equivalente a um spin no sentido anti-horário na segunda, com o spin combinado das duas sendo zero. No entanto, medir uma partícula pode ser uma ação sobre ela, que, por sua vez, afetaria a outra partícula.

Então seria impossível saber se a ação na segunda partícula é um resultado do entrelaçamento ou da medição.^[5]

Mas existia a possibilidade do entrelaçamento quântico acontecer com uma única partícula. Se um único fóton for dividido em duas partes de [pacote de onda](#) ainda conectadas, essa conexão é considerada um entrelaçamento. No entanto, a partícula em si nunca é detectada em mais de um lugar - quando medida, sua [função de onda](#) entra em colapso. Isso foi descrito por Albert Einstein há 80 anos em um artigo e se tornou conhecido como o [paradoxo EPR](#). A conclusão era que o entrelaçamento de uma única partícula seria impossível, ou que as definições da realidade física vindas da mecânica quântica estavam erradas.^[5]

A equipe da Universidade de Griffiths verificou quantitativamente a "ação fantasmagórica" de Einstein, ao violar uma desigualdade de [Einstein-Podolsky-Rosen](#) em $0,042 \pm 0,006$. O experimento também verificou o emaranhamento do fóton único dividido, mesmo quando um lado não é confiável.^[4]

Entrelaçamento quântico de mais de uma partícula

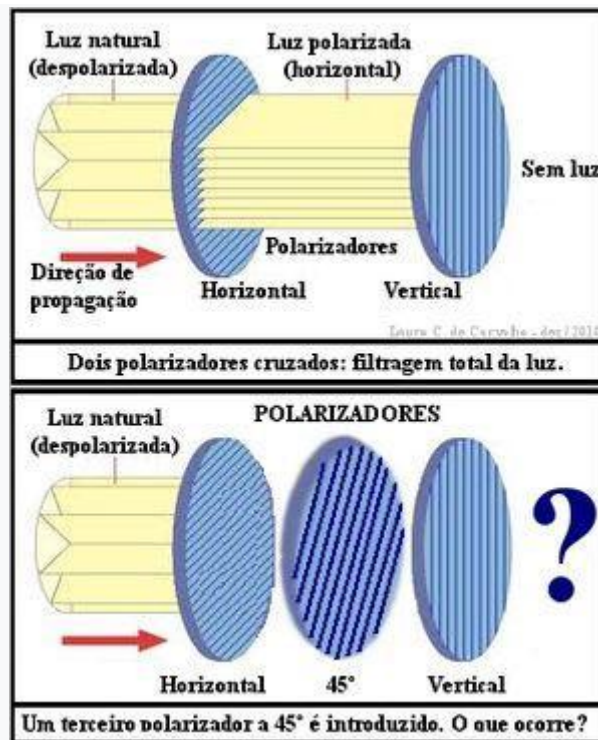
Uma equipe da [Universidade de Ciência e Tecnologia da China](#) (USTC) conseguiu entrelaçar 18 [qubits](#) em apenas seis [fótons](#) conectados^[6]. Isso é um número sem precedentes de três qubits por fóton e um registro do número de qubits vinculados uns aos outros por meio do entrelaçamento quântico^[7].

Referências

1. ↑ [«Emaranhamento quântico cria novo estado da matéria | Scientific American Brasil | Nastari Editores»](#). [www2.uol.com.br](#). Consultado em 17 de maio de 2018
2. ↑ [«O Universo é quântico \(página 6\)»](#). [cftc.cii.fc.ul.pt](#). Consultado em 17 de maio de 2018
3. ↑ [Ir para:a b «Emaranhamento quântico finalmente é provado»](#). HypeScience. 3 de dezembro de 2015
4. ↑ [Ir para:a b Fuwa, Maria; Takeda, Shuntaro; Zwierz, Marcin; Wiseman, Howard M.; Furusawa, Akira \(24 de março de 2015\). «Experimental proof of nonlocal wavefunction collapse for a single particle using homodyne measurements». Nature Communications \(em inglês\). 6 \(1\). ISSN 2041-1723. doi:10.1038/ncomms7665](#)
5. ↑ [Ir para:a b «Pesquisadores demonstram o entrelaçamento quântico entre uma partícula - e provam que Einstein estava errado»](#). [revistagalileu.globo.com](#)

6. ↑ Letzter, LiveScience, Rafi. «[Chinese Researchers Achieve Stunning Quantum-Entanglement Record](#)». Scientific American (em inglês)
7. ↑ Wang, Xi-Lin; Luo, Yi-Han; Huang, He-Liang; Chen, Ming-Cheng; Su, Zu-En; Liu, Chang; Chen, Chao; Li, Wei; Fang, Yu-Qiang (28 de junho de 2018). «[18-Qubit Entanglement with Six Photons' Three Degrees of Freedom](#)». Physical Review Letters. **120** (26). 260502 páginas. doi:[10.1103/PhysRevLett.120.260502](#)

Paradoxo EPR



Polarizadores cruzados. No primeiro caso, luz não polarizada é direcionada sobre dois polarizadores com eixos de polarização cruzados. Nenhuma luz atravessa os dois. Inserindo-se um terceiro polarizador com o eixo de polarização a 45° , o que obtém-se? Com certas considerações, esta questão remete ao mesmo problema da realidade adjacente a um estado emaranhado na mecânica quântica. Assumindo-se uma postura realista, não espera-se que luz atravessasse os três polarizadores. Entretanto a experiência fornece resultado contraditório.

Na mecânica quântica, o **paradoxo EPR** ou **Paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen** é um experimento mental que questiona a natureza da previsão oriunda da teoria quântica de que o resultado de uma medição realizada em uma parte do sistema quântico pode ter um efeito instantâneo no resultado de uma

medição realizada em outra parte, independentemente da distância que separa as duas partes. À primeira vista isto vai contra os princípios da [relatividade especial](#), que estabelece que a [informação](#) não pode ser transmitida mais rapidamente que a [velocidade da luz](#). ^{[Nota 1][1]}

O EPR surgiu em meio a um contexto histórico onde buscava-se, em vista das predições da mecânica quântica, a compreensão da realidade adjacente a uma partícula descrita por um [estado emaranhado](#). Havia três correntes quanto à questão: a realista, que dava existência real à partícula mesmo quando esta encontra-se descrita pelo estado emaranhado — imediatamente antes da realização de uma medida e do colapso da função de onda, portanto, ^[Nota 2] a ortodoxa, que afirmava não havia uma realidade adjacente ao estado emaranhado, estando a partícula simultaneamente em todos os estados do emaranhamento até o ato da medida — da redução da função de onda — que obrigava a partícula a "decidir-se" por um estado específico, ^[Nota 3] e a agnóstica, que recusava-se a apresentar uma resposta ao impasse. ^[Nota 4]

"EPR" vem das iniciais de [Albert Einstein](#), [Boris Podolsky](#), e [Nathan Rosen](#), os três defensores do ponto de vista realista que apresentaram este experimento mental em um trabalho em [1935](#) no intuito de demonstrar que a mecânica quântica não é uma teoria física completa, faltando à função de onda que descreve o estado emaranhado o que eles chamaram de "variáveis ocultas" — com as quais seria possível restaurar-se a explicação estritamente realista que defendiam. É algumas vezes denominado como **paradoxo EPRB** devido a [David Bohm](#), que converteu o experimento mental inicial em algo próximo a um experimento viável.

O EPR é um [paradoxo](#) no seguinte sentido: tomando-se a mecânica quântica e a ela adicionando-se uma condição aparentemente razoável — tal como "[localidade](#)", "[realismo](#)" ou "[inteireza](#)" — presentes em outras teorias como a clássica ou relativística, obtém-se uma [contradição](#). Porém, a mecânica quântica por si só não apresenta nenhuma inconsistência interna, tão pouco deixa indícios de como estas poderiam sugerir; também não contradiz a teoria relativística ou mesmo a mecânica clássica; e mais, implica esta última no limite macroscópico — quando tem-se agregados de numerosas partículas.

Como um resultado de desenvolvimentos teóricos e experimentais seguintes ao trabalho original da EPR — a destacar o [Teorema de Bell](#) e os resultados experimentais oriundos da investigação deste — demonstrou-se que se a visão realista estivesse correta ela

implicaria não apenas a mecânica quântica como uma teoria incompleta mas sim como um teoria completamente incorreta, e por outro lado, se a mecânica quântica estivesse correta, então nenhuma variável oculta seria capaz de salvar a teoria da não-localidade que Einstein considerava tão absurda. Com a posição agnóstica inviabilizada, restava decidir-se pela posição realista ou ortodoxa.

Em vistas dos resultados experimentais oriundos, entre outros, de investigações quanto à desigualdade de Bell, a maioria dos físicos atuais concorda que o paradoxo EPR é decidido a favor de que tanto a mecânica quântica quanto a essência da natureza em si estão além dos limites da [Física Clássica](#) e da [Relatividade Restrita](#); e não a favor de que teoria quântica seja uma teoria incompleta, falha ou mesmo incompatível com a descrição da natureza em sua essência mais profunda. Os dados experimentais até o momento decidem a favor da compreensão ortodoxa do estado emaranhado (a chamada [interpretação de Copenhagen](#)), portanto. Razoável esforço da comunidade de físicos tem sido despendido desde então no intuito de elaborar-se uma [teoria quanto-relativística](#) que possibilite uma descrição mais acurada da natureza do que a fornecida pelas duas teorias quando em suas formas independentes.

Descrição do paradoxo

O paradoxo EPR apóia-se nos postulados da relatividade e em um fenômeno predito pela mecânica quântica e conhecido como [entrelaçamento quântico](#), que mostra que medições realizadas em partes separadas de um sistema quântico influenciam-se mutuamente. Este efeito é atualmente conhecido como "[comportamento não local](#)" (ou, coloquialmente, como "estranheza quântica"). De forma a ilustrar isto, considere a seguinte versão simplificada do experimento mental EPR devido a Bohm.

Medições em um estado de entrelaçamento

Tem-se uma fonte emissora de pares de elétrons, com um elétron enviado para o destino *A*, onde existe uma observadora chamada Alice, e outro enviado para o destino *B*, onde existe um observador chamado Bob. De acordo com a mecânica quântica, podemos arranjar nossa fonte de forma tal que cada par de elétrons emitido ocupe um [estado quântico](#) conhecido como [spin singleto](#). Isto pode ser visto como uma [superposição quântica](#) de dois estados; sejam

eles I e II. No estado I, o elétron *A* tem [spin](#) apontado para cima ao longo do eixo z ($+z$) e o elétron *B* tem seu spin apontando para baixo ao longo do mesmo eixo ($-z$). No estado II, o elétron *A* tem spin $-z$ e o elétron *B*, $+z$. Portanto, é impossível associar qualquer um dos elétrons em um spin singleto, com um estado definido de spin. Os elétrons estão, portanto, no chamado [entrelaçamento](#).

Alice mede neste momento o spin no eixo z . Ela pode obter duas possíveis respostas: $+z$ ou $-z$. Suponha que ela obteve $+z$. De acordo com a mecânica quântica, o estado quântico do sistema [colapsou](#) para o estado I (diferentes [interpretações da mecânica quântica](#) têm diferentes formas de dizer isto, mas o resultado básico é o mesmo). O estado quântico determina a probabilidade das respostas de qualquer medição realizada no sistema. Neste caso, se Bob a seguir medir o spin no eixo z , ele obterá $-z$ com 100% de certeza. Similarmente, se Alice obtiver $-z$, Bob terá $+z$.

Não há, certamente, nada de especial quanto à escolha do eixo z . Por exemplo, suponha que Alice e Bob agora decidam medir o spin no eixo x . De acordo com a mecânica quântica, o estado do spin singleto deve estar exprimido igualmente bem como uma superposição dos estados de spin orientados na direção x . Chamemos tais estados de Ia e IIa. No estado Ia, o elétron de Alice tem o spin $+x$ e o de Bob, $-x$. No estado IIa, o elétron de Alice tem spin $-x$ e o de Bob, $+x$. Portanto, se Alice mede $+x$, o sistema colapsa para Ia e Bob obterá $-x$. Por outro lado, se Alice medir $-x$, o sistema colapsa para IIa e Bob obterá $+x$.

Em mecânica quântica, o spin x e o spin z são "observáveis incompatíveis", que significa que há um [princípio da incerteza de Heisenberg](#) operando entre eles: um estado quântico não pode possuir um valor definido para ambas as variáveis. Suponha que Alice meça o spin z e obtenha $+z$, com o estado quântico colapsando para o estado I. Agora, ao invés de medir o spin z também, suponha que Bob meça o spin x . De acordo com a mecânica quântica, quando o sistema está no estado I, a medição do spin x de Bob terá uma probabilidade de 50% de produzir $+x$ e 50% de $-x$. Além disso, é fundamentalmente impossível prever qual resultado será obtido até o momento que Bob realize a medição.

Incidentalmente, embora tenhamos usado o spin como exemplo, muitos tipos de quantidades físicas — que a mecânica quântica denomina como "observáveis" — podem ser usados para produzir entrelaçamento quântico. O artigo original de EPR usou

o [momento](#) como observável. Experimentos atuais abordando o contexto de EPR frequentemente usam a [polarização](#) de [fótons](#), porque são experiências mais fáceis de se preparar e medir.

Realidade e integridade

Introduziremos agora dois novos conceitos usados por Einstein, Podolsky e Rosen, que são cruciais em seu ataque à mecânica quântica: (i) os *elementos da realidade física* e (ii) a *integridade de uma teoria física*.

Os autores não se referem diretamente ao significado [filosófico](#) de um "elemento da realidade física". Ao invés disso, assumem que se o valor de qualquer quantidade física de um sistema pode ser predito com absoluta certeza antes de se realizar uma medição ou, em outras palavras, perturbando-o, então tal valor corresponde a um elemento da realidade física. Note que o oposto não é necessariamente verdadeiro; poderia haver outros caminhos para existir elementos da realidade física, mas isto não afeta o argumento.

A seguir, EPR definiu uma "teoria física completa" como aquela na qual cada elemento da realidade física tem relevância. O objetivo deste artigo era mostrar, usando estas duas definições, que a mecânica quântica não é uma teoria física completa.

Vejamos como estes conceitos se aplicam para o experimento mental acima. Suponha que Alice decida medir o valor do spin no eixo z (chamemo-no de spin z). Depois de Alice realizar sua medição, o spin z do elétron de Bob é definitivamente conhecido, de forma que torna-se um elemento da realidade física. De modo similar, se Alice decide medir o spin no eixo x , o spin x do elétron de Bob torna-se um elemento da realidade física logo após a medição por Alice.

Vimos que um estado quântico não pode possuir um valor definido para ambos eixos, x e z . Se a mecânica quântica é uma teoria física completa no sentido dado acima, os spin x e z não podem ser elementos da mesma realidade ao mesmo tempo. Isto significa que a decisão de Alice — de escolher se faz a medição no eixo x ou z — tem um efeito instantâneo nos elementos da realidade física na localidade de Bob. Contudo, isto viola outro princípio, o da *localidade*.

Localidade no experimento EPR

O princípio da localidade estabelece que processos físicos ocorrendo em um determinado lugar não devem ter um efeito imediato em elementos da realidade em outro local. À primeira vista, isto parece ser uma presunção aceitável, já que parece ser uma consequência da [relatividade especial](#), que estabelece que a [informação](#) nunca pode ser transmitida mais rapidamente que a [velocidade da luz](#) sem violar o princípio da [causalidade](#). É uma crença geral que qualquer teoria que viole o princípio da causalidade deve possuir uma inconsistência interna.

Ou seja, a mecânica quântica viola o princípio da localidade, mas não o princípio da causalidade. A causalidade é preservada porque não há forma de Alice transmitir mensagens (isto é, informação) a Bob pela interferência na escolha do eixo. Qualquer que seja o eixo que ela use, a probabilidade é de 50% de se obter "+" e 50% de se obter "-", de forma completamente [aleatória](#); de acordo com a mecânica quântica, é fundamentalmente impossível para ela influenciar o resultado que ela obterá. Além disso, Bob é somente capaz de realizar sua medição uma única vez: há uma propriedade fundamental da mecânica quântica, conhecida como o "[teorema anticlonagem](#)", que torna impossível a Bob fazer um milhão de cópias do elétron por ele recebido, realizar uma medição de spin em cada elétron, e estudar a distribuição estatística dos resultados. Portanto, na única medição que lhe é permitido fazer, há uma probabilidade de 50% de obter "+" e 50% de "-", independente se o eixo escolhido está alinhado de acordo com o de Alice.

Porém, o princípio da localidade apóia-se muito na intuição, e Einstein, Podolsky e Rosen não puderam abandoná-la. Einstein brincou, dizendo que as previsões na mecânica quântica eram "[estranhas ações a distância](#)". A conclusão que eles esboçaram era a de que a mecânica quântica não é uma teoria completa.

Deve-se notar que a palavra [localidade](#) tem vários significados na Física. Por exemplo, na [teoria quântica de campos](#), "localidade" significa que os campos quânticos em diferentes pontos no espaço não interagem entre si. Porém, teorias de campo quântico que são "locais" neste sentido violam o princípio da localidade como definido por EPR.

Resolvendo o paradoxo

Variáveis ocultas

Há vários possíveis caminhos para se resolver o paradoxo EPR. Um deles, sugerido por EPR, é que a mecânica quântica, a despeito do seu sucesso em uma ampla variedade de contextos experimentais, é ainda uma teoria incompleta. Em outras palavras, há ainda uma teoria natural a ser desvendada, à qual a mecânica quântica age no papel de uma aproximação estatística (uma excelente aproximação, sem dúvida). Diferente da mecânica quântica, esta teoria mais completa conteria variáveis correspondentes a todos os "elementos da realidade". Deve haver algum mecanismo desconhecido atuando nestas variáveis de modo a ocasionar os efeitos observados de "não-comutação dos observáveis quânticos", isto é, o princípio da incerteza de Heisenberg. Tal teoria é conhecida como [teoria das variáveis ocultas](#).

Para ilustrar esta ideia, podemos formular uma teoria de variável oculta bem simples para o experimento mental anterior. Supõe-se que o estado do spin singleto emitido pela fonte é na verdade uma descrição aproximada do "verdadeiro" estado físico, com valores definidos para o spin z e o spin x . Neste estado "verdadeiro", o elétron que vai para Bob sempre tem valor de spin oposto ao do elétron que vai para Alice, mas, por outro lado, os valores são completamente aleatórios. Por exemplo, o primeiro par emitido pela fonte poderia ser "(+z, -x) para Alice e (-z, +x) para Bob", o próximo par "(-z, -x) para Alice e (+z, +x) para Bob", e assim por diante. Dessa forma, se o eixo de medição de Bob estiver alinhado com o de Alice, ele necessariamente obterá sempre o oposto daquilo que Alice obtiver; por outro lado, ele terá "+" e "-" com a mesma probabilidade.

Assumindo que restrinjamo-nos a medir nos eixos z e x , a teoria de variáveis ocultas é experimentalmente indistinguível da mecânica quântica. Na realidade, certamente, há um (incontável) número de eixos nos quais Alice e Bob podem realizar suas medições, de forma que haverá infinito número de variáveis ocultas independentes! Contudo, isto não é um problema sério; apenas formulamos uma teoria de variáveis ocultas muito simplista; uma teoria mais sofisticada poderia "consertá-la". Ou seja, ainda há um grande desafio por vir à ideia de variáveis ocultas.

Desigualdade de Bell

Em [1964](#), [John Bell](#) mostrou que as previsões da mecânica quântica no experimento mental de EPR são sempre ligeiramente diferentes das previsões de uma grande parte das teorias de variáveis ocultas. Grosseiramente falando, a mecânica quântica prediz uma [correlação](#) estatística ligeiramente mais forte entre os resultados obtidos em diferentes eixos do que o obtido pelas teorias de variáveis ocultas. Estas diferenças, expressas através de [relações de desigualdades](#) conhecidas como "desigualdades de Bell", são em princípio detectáveis experimentalmente. Para uma análise mais detalhada deste estudo, veja [teorema de Bell](#).

Depois da publicação do trabalho de Bell, inúmeros experimentos foram idealizados para testar as desigualdades de Bell (como mencionado acima, estes experimentos geralmente baseiam-se na medição da [polarização de fótons](#)). Todos os experimentos feitos até hoje encontraram comportamento similar às previsões obtidas da mecânica quântica padrão.

Porém, este campo ainda não está completamente definido. Antes de mais nada, o teorema de Bell não se aplica a todas as possíveis teorias "realistas". É possível construir uma teoria que escape de suas implicações e que são, portanto, indistinguíveis da mecânica quântica; porém, estas teorias são geralmente *não-locais* — parecem violar a causalidade e as regras da relatividade especial. Alguns estudiosos neste campo têm tentado formular teorias de variáveis ocultas que exploram brechas nos experimentos atuais, tais como brechas nas hipóteses feitas para a interpretação dos dados experimentais. Todavia, ninguém ainda conseguiu formular uma teoria realista localmente que possa reproduzir todos os resultados da mecânica quântica.

Implicações para a mecânica quântica

A maioria dos físicos atualmente acredita que a mecânica quântica é correta, e que o paradoxo EPR é somente um "paradoxo" porque a intuição clássica não corresponde à realidade física. Várias conclusões diferentes podem ser esboçadas a partir desta, dependendo de qual [interpretação de mecânica quântica](#) se use. Na velha [interpretação de Copenhague](#), conclui-se que o princípio da localidade não se aplica e que realmente ocorrem [colapsos da função de onda](#). Na [interpretação de muitos mundos](#), a localidade é preservada, e os efeitos da medição surgem da separação dos observadores em diferentes "históricos".

O paradoxo EPR aprofundou a nossa compreensão da mecânica quântica pela exposição de características não-clássicas do processo de [medição](#). Antes da publicação do paradoxo EPR, uma medição era freqüentemente visualizada como uma perturbação física que afetava diretamente o sistema sob medição. Por exemplo, quando se media a posição de um elétron, imaginava-se o disparo de uma luz nele, que afetava o elétron e que produzia incertezas quanto a sua posição. Tais explicações, que ainda são encontradas em explicações populares de mecânica quântica, foram revisadas pelo paradoxo EPR, o qual mostra que uma "medição" pode ser realizada em uma partícula sem perturbá-la diretamente, pela realização da medição em uma partícula entrelaçada distante.

Tecnologias baseadas no entrelaçamento quântico estão atualmente em desenvolvimento. Na [criptografia quântica](#), partículas entrelaçadas são usadas para transmitir sinais que não podem ser [vazados](#) sem deixar traços. Na [computação quântica](#), partículas entrelaçadas são usadas para realizar cálculos em paralelo em computadores, o que permite que certos cálculos sejam realizados mais rapidamente do que um computador clássico jamais poderia fazer.

Notas

1. ↑ Em verdade a mecânica quântica não implica violação dos princípios da relatividade mesmo no caso do EPR visto que "Influências causais [subentendido aqui informação que estabeleça relação de causa e efeito, energia ou mesmo matéria] não podem propagar-se mais rápido que a velocidade da luz", mesmo no âmbito da mecânica quântica. Para mais informações, vide: Griffith, David J. - Introduction to Quantum Mechanics - pág.: 381, entre outras.
2. ↑ Conforme Espagnant colocou: "a posição [no contexto o estado] da partícula nunca foi indeterminado, mas sim apenas desconhecido pelo experimentador."
3. ↑ Nas palavras de Jordan: "A observação não apenas distorce o que está a se medir, ela produz o que se está a medir... Nós compelimos a partícula a assumir uma posição definitiva [entende-se no contexto um estado específico do emaranhamento]."
4. ↑ Nas palavras de Pauli: "Não se deve queimar a cabeça se algo sobre o qual não se pode saber nada a respeito existe sempre." Para maiores detalhes quanto às citações consulte:

Griffith, David J. - Introduction to Quantum Mechanics - pág.: 4, entre outras.

Referências

1. ↑ Griffith, David J. - Introduction to Quantum Mechanics - Printice Hall - 1994 - [ISBN 0-13-124405-1](#).

Teorema de Bell

O **teorema de Bell** é o legado mais importante do físico teórico [John Bell](#), publicado em 1964,^[1] que estabelece uma distinção absoluta entre a [mecânica quântica](#) e a [mecânica clássica](#), ou seja, não existe regime de [variáveis ocultas](#) locais que possam reproduzir todos os resultados da mecânica quântica.

Na realidade, o teorema de Bell consiste em uma classe de [desigualdades](#), uma das quais foi demonstrada por John Bell, que no meado dos anos 60 examinou criticamente a proposta apresentada por [von Neumann](#) da não-existência de variáveis ocultas.

Bell mostrou que a hipótese do realismo local, ou seja,

1. que uma partícula possui valores definitivos que não dependem do processo de observação e
2. que a velocidade de propagação dos efeitos físicos é finita não é compatível com a mecânica quântica.

O teorema de Bell ofereceu uma forma de quantificar alguns conceitos associados com o [paradoxo EPR](#) e permitiu por fim os testes experimentais de rede quântica versus [realismo local](#). Foi comprovado pela primeira vez em 1972 por John Clauser, de Berkeley.

Implicações da violação da desigualdade de Bell

O fenômeno do [entrelaçamento quântico](#) que está por trás da violação da desigualdade de Bell é um dos elementos da [física quântica](#) que não pode ser representado em qualquer outra visão clássica da física; outros elementos não clássicos são a [complementaridade](#) e o [colapso da função de onda](#). O problema

da [interpretação da mecânica quântica](#) busca prover uma visão satisfatória deste elementos.

Teorema de Bell, portanto, aplica-se apenas com os resultados estatísticos de muitas provações do experimento. Simbolicamente, a correlação entre os resultados de um único par pode ser representada como "+1" para uma correspondência, ou "-1" para uma não-correspondência.

Ao medir o "spin" dessas partículas entrelaçadas ao longo de eixos paralelos sempre resultará em idênticos (i.e., perfeitamente correlacionados) resultados, medição em direções perpendiculares terá apenas uma chance de 50% de correspondência (ou seja, terá uma probabilidade de 50% de um resultado não-correlacionado).

Tabela de casos básicos						
Mesmo eixo	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	...	Par n
Alice , 0°	+	–	–	+	...	+
Bob , 0°	+	–	–	+	...	+
Correspondência:	(+1	+1	+1	+1	...	+1) / n = +1
(100% idêntico)						
Eixos ortogonais	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4	...	Par n
Alice , 0°	+	–	+	–	...	–
Bob , 90°	–	–	+	+	...	–
Correspondência:	(–1	+1	+1	–1	...	–1) / n = 0
(50% idêntico)						

Alguns defensores da ideia das variáveis ocultas preferem aceitar a opinião de que estes experimentos são controlados de fora por variáveis ocultas locais. Eles estão prontos para abrir mão da localidade, explicando a violação da desigualdades de Bell por meio de uma [teoria de variáveis ocultas](#) não locais, na qual a partículas trocam informação a respeito de seus estados. Esta é a base do [interpretação de Bohm](#) da mecânica quântica. Isto entretanto, requereria que por exemplo, que todas as partículas do universo fossem capazes de instantaneamente trocar informações com todas as outras.

Finalmente, um sub-produto das conseqüências das desigualdades de Bell é a [asserção contra-factual](#). Esta derivação refere-se a várias propriedade objetivas que não podem ser todas medidas para qualquer partícula dada, desde que a ação de realizar a medição muda o seu estado. Em relação ao realismo local esta dificuldade é prontamente transposta, tão logo se assuma que a

fonte é estável, produzindo a mesma distribuição estatística de todos os estados para todos sub-experimentos. Se esta suposição é tida como injustificável, por consequência, podemos arguir que a desigualdade de Bell é não comprovada. Na [interpretação de muitos-mundos de Everett](#), a suposição da asserção contra-factual é abandonada, esta interpretação assume que o universo se divide para muitos observadores diferentes, cada um dos quais realiza uma medição para uma observação diferente. Portanto a interpretação de muitos mundos pode ser aderente as propriedades do [realismo filosófico](#) e ao [princípio da localidade](#) e não viola as condições de Bell.

Referências

1. [↑](#) Leite Vieira, Cásio. *«Há 50 anos, o físico norte-irlandês John Bell (1928-90) chegou a um resultado que demonstra a natureza "fantasmagórica" da realidade no mundo atômico e subatômico.»*. Site Folha de S.Paulo. Consultado em 1 de dezembro de 2014

Teoria do absorvedor de Wheeler e Feynman

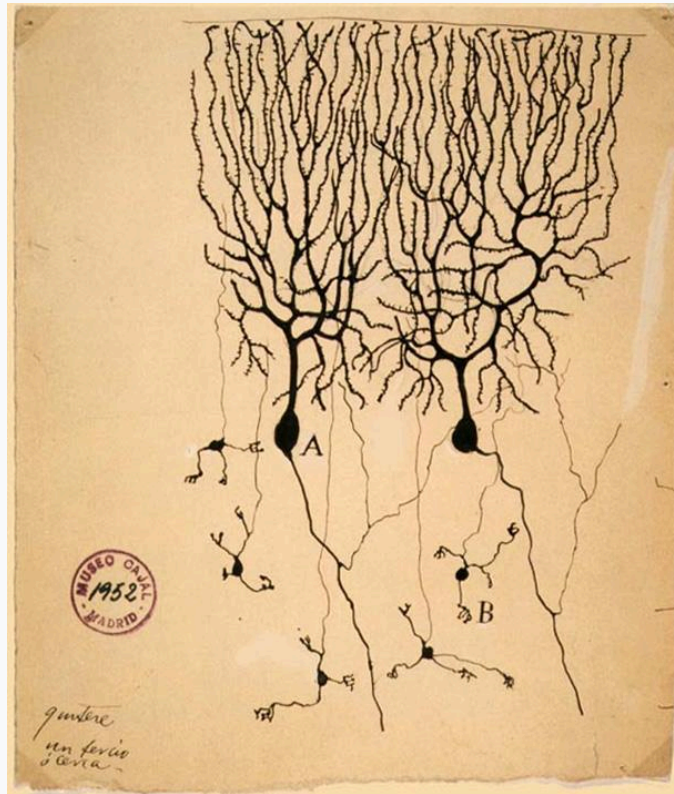
A teoria do absorvedor de Wheeler e Feynman, também chamada **teoria *time-symmetric***, **teoria do meio absorvente**^[1] ou **teoria de ação à distância de Wheeler e Feynman**,^[2] cujos criadores foram os [físicos Richard Feynman](#) e [John Archibald Wheeler](#), é uma interpretação da [eletrodinâmica](#) que parte da ideia de que uma solução para as equações de [campo eletromagnético](#) tem que ser simétrica em relação ao [inverso do tempo](#), tal como as próprias [equações de campo](#). A razão disso é principalmente a importância da [simetria T](#) na Física. De fato não há razão aparente para que tal simetria deva ser quebrada e, portanto, uma [direção do tempo](#) não tem privilégios em relação à outra. Assim, uma teoria que respeite essa simetria parece mais elegante do que teorias em que se tem que eleger arbitrariamente uma direção do tempo como preferida em relação às demais.

Outra ideia-chave remanescente do [princípio de Mach](#) e atribuída a [Hugo Tetrode](#) é a de que [partículas elementares](#) atuam sobre outras partículas elementares, que não elas próprias. Isso imediatamente remove o problema das [autoenergias](#).

Referências

- ↑ [Divergencias y singularidades en la escala de Compton](#). Rafael Andrés Alemañ Berenguer. Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 6, nº 4, dezembro de 2012, pág. 594-603.
- ↑ [Una Nota sobre Richard Feynman \(2\)](#). Ángel "Java" López en Blog.
- ↑ [Ir para: a b](#) R. A. Moore; T. C. Scott e M. B. Monagan (1987). «Relativistic, many-particle Lagrangean for electromagnetic interactions». *Phys. Rev. Lett.* **59** (5): 525–527. [Bibcode:1987PhRvL..59..525M](#). [doi:10.1103/PhysRevLett.59.525](#))
- ↑ R. A. Moore; T. C. Scott e M. B. Monagan (1988). «A Model for a Relativistic Many-Particle Lagrangian with Electromagnetic Interactions». *Can. J. Phys.* **66** (3): 206–211. [Bibcode:1988CaJPh..66..206M](#). [doi:10.1139/p88-032](#)
- ↑ T. C. Scott; R. A. Moore e M. B. Monagan (1989). «Resolution of Many Particle Electrodynamics by Symbolic Manipulation». *Comput. Phys. Commun.* **52** (2): 261–281. [Bibcode:1989CoPhC..52..261S](#). [doi:10.1016/0010-4655\(89\)90009-X](#)
- ↑ T. C. Scott (1986). «Relativistic Classical and Quantum Mechanical Treatment of the Two-body Problem». Dissertação de Mestrado em matemática, [Universidade de Waterloo](#), Canada (1986)
- ↑ T. C. Scott; R. A. Moore (1989). «Quantization of Hamiltonians from High-Order Lagrangians». *Univ. of Maryland. Nucl. Phys. B.* **6** (Proc. Suppl.): 455–457. [Bibcode:1989NuPhS...6..455S](#). [doi:10.1016/0920-5632\(89\)90498-2](#)
- ↑ R. A. Moore; T. C. Scott (1991). «Quantization of Second-Order Lagrangians: Model Problem». *Phys. Rev. A.* **44** (3): 1477–1484. [Bibcode:1991PhRvA..44.1477M](#). [doi:10.1103/PhysRevA.44.1477](#)
- ↑ R. A. Moore; T. C. Scott (1992). «Quantization of Second-Order Lagrangians: The Fokker-Wheeler-Feynman model of electrodynamics». *Phys. Rev. A.* **46** (7): 3637–3645. [Bibcode:1992PhRvA..46.3637M](#). [doi:10.1103/PhysRevA.46.3637](#)
- ↑ R. A. Moore; D. Qi e T. C. Scott (1992). «Causality of Relativistic Many-Particle Classical Dynamics Theories». *Can. J. Phys.* **70** (9): 772–781. [Bibcode:1992CaJPh..70..772M](#). [doi:10.1139/p92-122](#)
- ↑ T. C. Scott; D. Andrae (2015). «[Quantum Nonlocality and Conservation of momentum](#)». *Phys. Essays.* **28** (3): 374-385

Neurónio



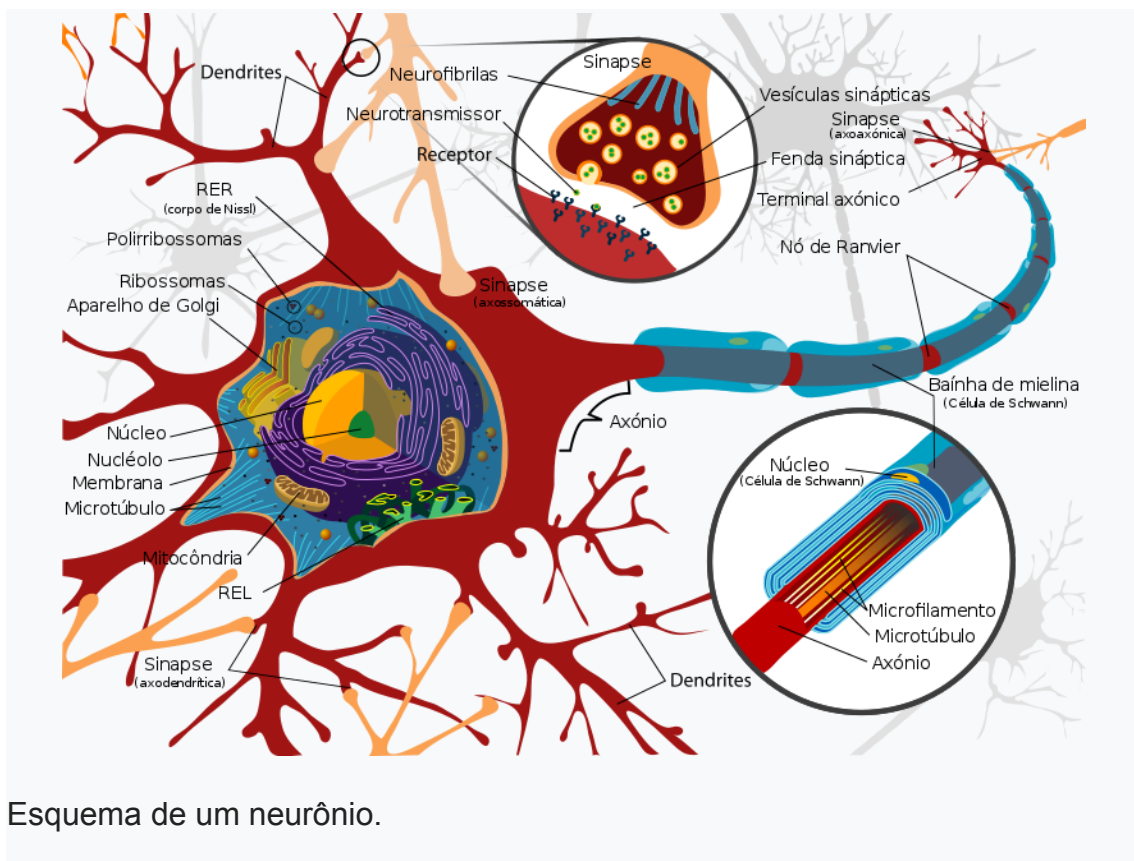
Neurônios do cerebelo de um pombo. Desenho de [Santiago Ramón y Cajal](#), 1899. Instituto Santiago Ramón y Cajal, Madrid, Espanha.

O **neurónio** (português europeu) ou **neurônio** (português brasileiro) é a célula do [sistema nervoso](#) responsável pela condução do impulso nervoso. Há cerca de 86 bilhões (até 20 de fevereiro de 2009 se especulava que havia 100 bilhões) de neurônios no sistema nervoso humano.^[1] O neurônio consiste em várias partes: [soma](#), [dendritos](#) e [axônio](#). A membrana que separa seu meio interno do externo é denominado de *membrana neuronal*, a qual é sustentada por um intrincado esqueleto interno - chamado de [citoesqueleto](#).

O neurônio pode ser considerado a unidade básica da estrutura do [cérebro](#) e do sistema nervoso.^[2] A membrana exterior de um neurônio toma a forma de vários ramos extensos chamados [dendritos](#), que recebem informação de outros neurônios, e de uma estrutura a que se chama um axônio que envia informação a outros neurônios. O espaço entre o dendrito de um neurônio e o terminal axonal de outro é o que se chama uma [fenda sináptica](#): os sinais são transportados através das sinapses por uma

variedade de substâncias químicas chamadas [neurotransmissores](#). O córtex cerebral é um tecido fino composto essencialmente por uma rede de neurônios densamente interligados tal que nenhum neurônio está a mais do que algumas sinapses de distância de qualquer outro neurônio.

Os neurônios recebem continuamente impulsos nas sinapses de seus dendritos vindos de milhares de outras células. Os impulsos geram ondas de corrente elétrica (excitatória ou inibitória, cada uma num sentido diferente) através do corpo da célula até a uma zona chamada a zona de disparo, no começo do axônio. É aí que as correntes atravessam a membrana celular para o espaço extracelular e que a diferença de voltagem que se forma na membrana determina se o neurônio dispara ou não.

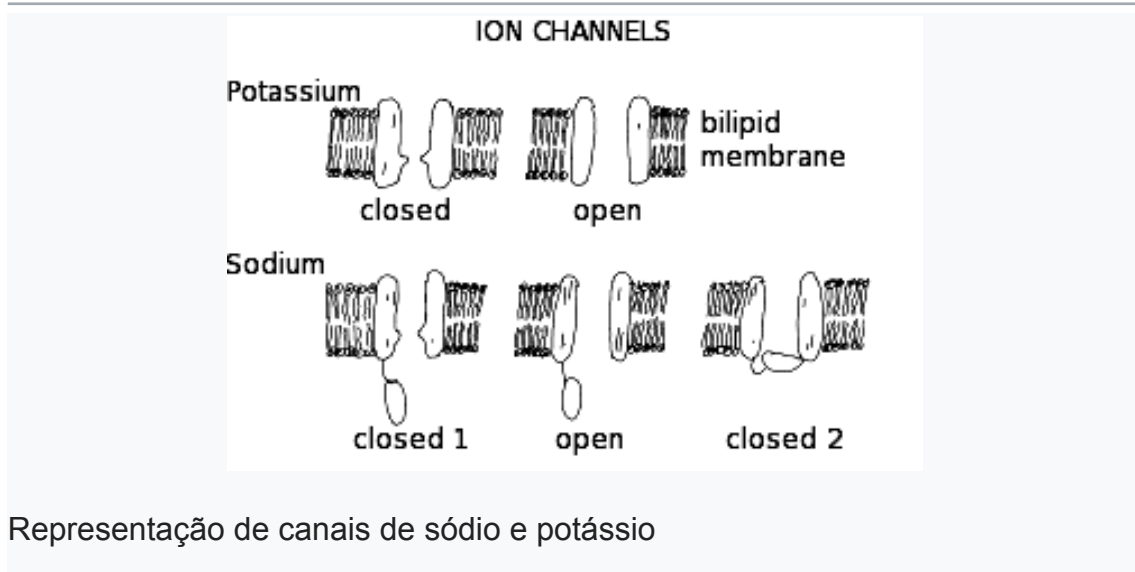


Esquema de um neurônio.

Os neurônios caracterizam-se pelos processos que conduzem impulsos nervosos para o corpo e do corpo para a célula nervosa. Os impulsos nervosos são reações físico-químicas que se verificam nas superfícies dos neurônios e seus processos. A cromatina nuclear é escassa, enquanto que o nucléolo é muito proeminente. A substância cromidial no [citoplasma](#) é chamada de substância de Nissl. À microscopia eletrônica mostra-se disposta em tubos estreitos recobertos de finos grânulos. Estudos histoquímicos e outros demonstraram-na constituída de nucleoproteínas. Estas

nucleoproteínas diminuem durante a atividade celular intensa e durante a cromatólise que se segue à secção de axônios.

O funcionamento do neurônio



Representação de canais de sódio e potássio

O neurônio é uma célula altamente especializada na transmissão de informações, na forma de impulsos nervosos. Os impulsos nervosos são fenômenos eletroquímicos que utilizam certas propriedades e substâncias da [membrana plasmática](#), que permitem que seja criado e transmitido um impulso elétrico.

Um neurônio em repouso é uma célula que possui uma diferença de voltagem entre o seu [citoplasma](#) e o [líquido extracelular](#). Esta diferença de voltagem é criada graças ao acúmulo seletivo de íons [potássio](#) (K^+) e [sódio](#) (Na^+), que ocorre pela ação de bombas que criam uma diferença de concentração. Esta diferença de concentração é controlada por canais de K^+ e de Na^+ , gerando uma tensão negativa (de $-58mV$ no interior de neurônios humanos), que pode variar entre espécies.

Este estado de equilíbrio (ou estado de polarização do neurônio) dura até o momento em que um potencial de ação abre os canais de K^+ e de Na^+ , alterando a concentração destes íons. Esta modificação gera um potencial positivo dentro do neurônio, chegando aos $+40mV$ ou mais (dependendo do organismo estudado). Este desequilíbrio gera um efeito cascata, que é o potencial de ação. Usualmente o potencial de ação inicia no começo no axônio (zona de disparo) e se propaga até as vesículas sinápticas, gerando a descarga de neurotransmissores.

Após ter ocorrido o potencial de ação, imediatamente os canais de K^+ e de Na^+ começam a restabelecer o equilíbrio anterior, com uma

tensão negativa no interior do neurônio e positiva fora dele. O neurônio precisa, então, de um brevíssimo tempo para reconstituir seu estado pré-descarga, e durante este tempo ele não consegue efetuar outro potencial de ação. Este período de latência chama-se período refratário. Logo em seguida, o neurônio adquire sua capacidade para efetuar outro potencial de ação, estabelecendo um ciclo.^[3]

Tipos de neurônios

Receptores ou sensitivos (aférentes)

São os neurônios que reagem a estímulos exteriores e que despertam a reação a esses estímulos, se necessário. A sua constituição é um pouco diferente dos outros dois tipos de neurônios. De um lado do axônio tem os sensores que captam os estímulos. Do outro lado possui os dendritos. O corpo celular localiza-se perto do axônio, estando ligado a este por uma ramificação do axônio, assumindo um pouco o aspecto de um balão.

Associativos ou Conectores ou Interneurônios

O grupo de neurônios mais numeroso. Como o nome indica, estes neurônios transmitem o sinal desde os neurônios sensitivos ao sistema nervoso central. Liga também neurônios motores entre si.

Neste tipo de neurônios o axônio é bastante reduzido, estando o corpo celular e os dendritos ligados diretamente à arborização terminal, onde se localizam os telodendritos.

Motores ou efetadores (eferentes)

Este tipo de neurônio tem a função de transmitir o sinal desde o sistema nervoso central ao órgão efector (que se move), para que este realize a ação que foi ordenada pelo encéfalo ou pela medula espinhal. Este é o neurônio que tem o aspecto mais familiar, que nós estamos habituados a ver nas gravuras.

Sinapse

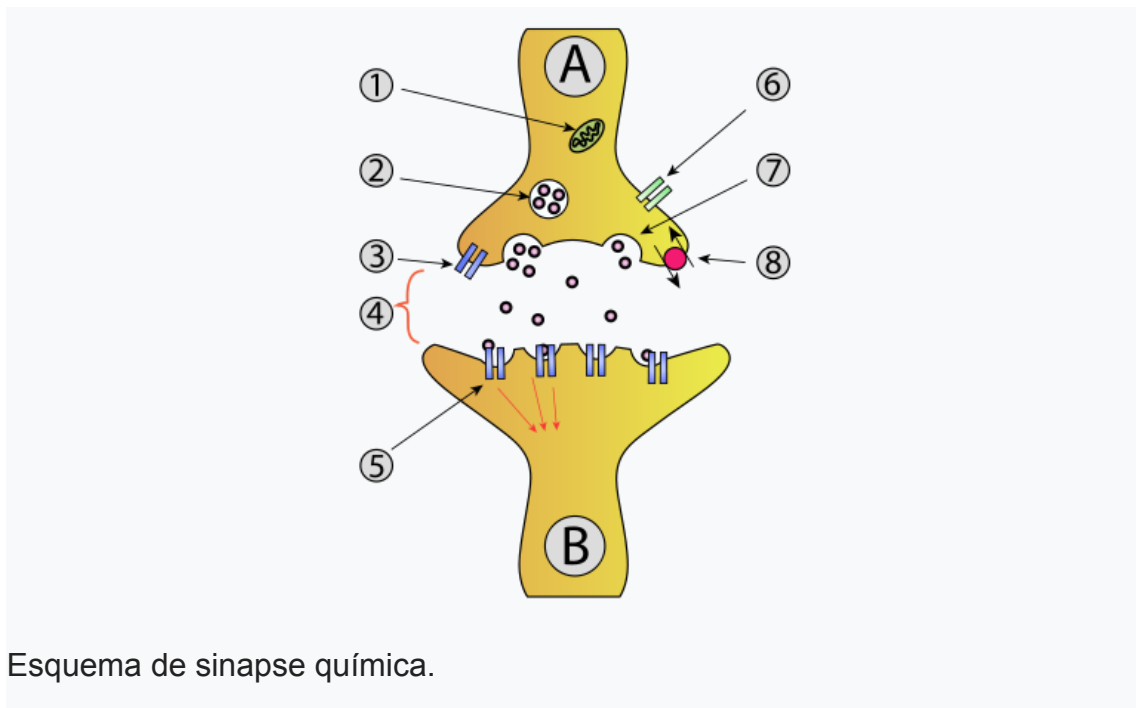
Sinapses nervosas são os pontos onde as extremidades de neurônios vizinhos se encontram e o estímulo passa de um neurônio para o seguinte por meio de mediadores químicos, os neurotransmissores. A sinapse é considerada uma estrutura formada por: membrana pré-sináptica, fenda sináptica e membrana

pós-ões nervosas chamadas axônios, usualmente com os dendritos de outro neurônio, mas pode haver contato com o corpo celular e mesmo com outros axônios (menos comum). O contato físico em sinapses químicas não existe realmente, pois há um espaço entre elas, denominado de [fenda sináptica](#), onde ocorre a ação dos neurotransmissores. Dos axônios, são liberadas substâncias(neurotransmissores), que atravessam a fenda e estimulam os receptores pós-sinápticos.

A literatura aponta a existência de dois tipos de sinapses neuronais: as sinapses químicas e as sinapses elétricas. Ambos os tipos de sinapses transmitem o potencial de ação para outros neurônios, diferindo apenas no mecanismo de comunicação (químico ou elétrico).

Tipos de sinapses

Químicas



Esquema de sinapse química.

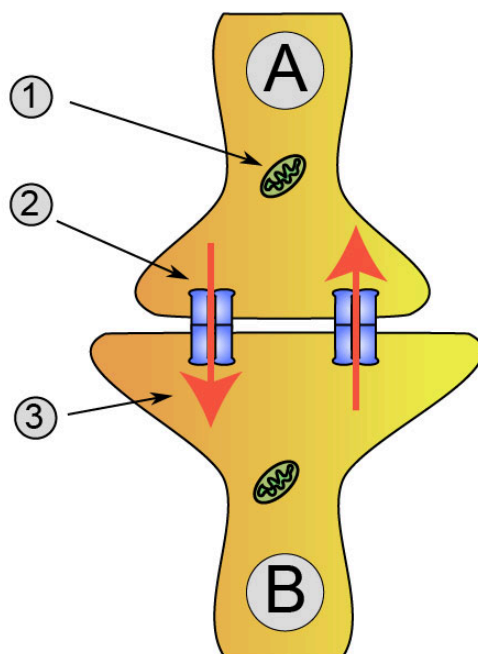
As sinapses químicas consistem na maioria das sinapses presentes no sistema nervoso. Ela consiste numa fenda presente entre o axônio do neurônio que está transmitindo a informação (neurônio pré-sináptico) e o neurônio que receberá uma descarga de neurotransmissores, o receptor (neurônio pós-sináptico).^[3]

Quando o [impulso nervoso](#) atinge as extremidades do [axônio](#), libertam-se para a fenda sináptica os neurotransmissores, que se ligam a receptores da [membrana](#) da [célula](#) seguinte,

desencadeando o impulso nervoso, que, assim, continua a sua propagação.

A chegada do impulso nervoso até o botão sináptico, que é a parte do neurônio pré-sináptico que irá liberar os neurotransmissores, provocará uma reação de liberação de vesículas sinápticas, carregadas com neurotransmissores. Estas substâncias passarão pela fenda sináptica atingindo sítios receptores dos dendritos dos neurônios pós-sinápticos, o que provavelmente irá gerar um potencial de ação provocando um impulso nervoso, que passará pelo corpo celular e prosseguirá até o axônio.

Elétricas



Esquema de sinapse elétrica.

Alguns neurônios comunicam-se através de sinapses menos comuns, que são as sinapses elétricas, que são junções muito estreitas entre dois neurônios. Estas junções comunicantes são constituídas por proteínas chamadas de conéxons, que permite uma continuidade entre as células e dispensa, em grande medida, o uso de neurotransmissores. Este tipo de sinapse reduz muito o tempo de transmissão do impulso elétrico entre os neurônios, sendo a ideal para comportamentos que exigem rapidez de resposta. Organismos como lagostins, que necessitam fugir com velocidade de predadores, possuem sinapses elétricas em vários circuitos.^[3]

Outros sistemas que se beneficiam com a sincronização de neurônios também utilizam este tipo de sinapse, como por exemplo neurônios do tronco encefálico, que controlam o ritmo da respiração e em populações de neurônios secretores de hormônios. Esta sincronização facilita a descarga hormonal na corrente sanguínea. Estas junções também chamadas de abertas estão em abundância no músculo cardíaco (discos intercalares) e músculo liso (corpos densos).

Atos voluntários e involuntários

Todas as ações que nós executamos são ordenadas pelo sistema nervoso central.

A maioria desses atos são devidamente planejados e feitos conscientemente, como, por exemplo, beber por um copo, escrever, ler, jogar, etc.

Contudo existem outros atos que simplesmente não são planejados antes de serem feitos. Por exemplo, se alguém agitar a mão de encontro à nossa cara, a reação instantânea é fechar os olhos. Se tocarmos em alguma coisa muito quente, o instinto é tirar a mão de imediato. Temos também para ser mais explícitos, o bater do nosso coração é um acto completamente automático.

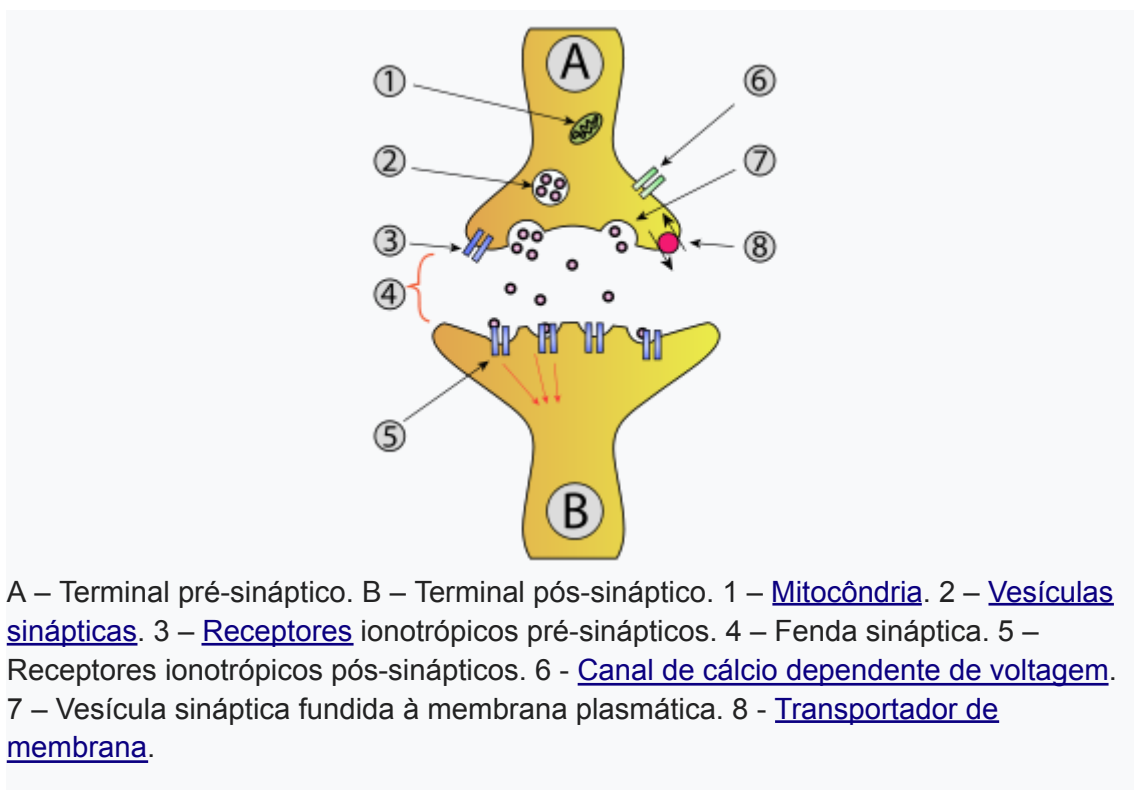
Esses são os chamados atos involuntários.

- Os atos voluntários, planejados e executados, são comandados pelo cérebro (**Sistema Nervoso Periférico Somático**).
- Os atos involuntários, que não são pensados antes de serem executados (instintos), são comandados pela medula espinal (**Sistema Nervoso Periférico Autônomo**).

Referências

1. ↑ **Funcionamento do Cérebro**. Disponível em: <<http://www.amattos.eng.br/Public/Redes/Redes-1.htm>>. Acesso em: 06/07/2011
2. ↑ <http://educacao.uol.com.br/ciencias/ult1686u29.jhtm> Unidade básica do sistema nervoso.
3. ↑ *Ir para: a b c* PURVES, Dale et al. **Neurociências**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed. 2010.

Sinapse



Sinapses são zonas ativas de contato entre uma terminação nervosa e outros [neurônios](#), [células musculares](#) ou [células glandulares](#). Do ponto de vista anatômico e funcional, uma sinapse é composta por três grandes compartimentos: membrana da célula pré-sináptica, fenda sináptica e membrana pós-sináptica. Os principais tipos de contato sináptico são: axo-somático (entre um axônio e o corpo celular), axo-dendrítico (entre um axônio e um dendrito), neuroefetor (entre a terminação nervosa e a [célula](#) efetora, fibra muscular lisa, fibra muscular cardíaca ou célula glandular), neuromuscular (entre a terminação nervosa e a fibra muscular esquelética).^[1]

Os neurônios nas sinapses

As [células nervosas](#) diferenciam-se das demais células do organismo por apresentarem duas propriedades especiais:

- 1) são capazes de conduzir sinais bioelétricos por longas distâncias sem que haja enfraquecimento do impulso ao longo de seu percurso;
- 2) por apresentarem conexões com células musculares (lisas e estriadas), glandulares e outras células nervosas. Estas conexões permitem que sejam produzidas respostas nos músculos cardíaco, liso e esquelético, glândulas exócrinas e neurônios pós-sinápticos através da liberação de substâncias químicas específicas denominadas de neurotransmissores.^{[2][3]}

Os neurônios dispõem-se em cadeias celulares de transmissão e processamento de informações. Um neurônio é composto por três partes: o corpo celular ou soma que é o “centro integrador” dos neurônios um axônio que conduz

informações de saídas; e dendritos, que são numerosas projeções ramificadas do corpo celular, recebem e transmitem impulsos nervosos. A forma, o número, e comprimento dos axônios e dendritos e o número de terminais pré-sinápticos (que podem variar de alguns poucos até em torno de 200.000) variam de um neurônio para outro. Estas diferenças fazem os neurônios de diferentes partes do sistema nervoso reagirem de maneira diversa a sinais sinápticos aferentes e executarem muitas funções distintas.^{[2][3]}

Cada sinapse tem duas partes: o terminal axônico da célula pré-sináptica e a membrana da célula pós-sináptica. Em um reflexo neuronal, a [informação](#) se transfere da célula pré-sináptica para a célula pós-sináptica. As células pós-sinápticas podem ser neurônios ou não. Na maioria das sinapses entre neurônios, os terminais axônicos pré-sinápticos estão próximos dos dendritos ou do corpo celular do neurônio pós-sináptico.^[3]

Tipos de sinapse

As sinapses podem ser **químicas** ou **elétricas**, em função do tipo de sinal que passará pela célula pré-sináptica e pós-sináptica. As sinapses químicas utilizam mediadores químicos, os [neurotransmissores](#), que medeiam o sinal químico de uma célula pré-sináptica passando pela fenda para uma célula pós-sináptica. As sinapses químicas são as mais utilizadas na transmissão de sinal no sistema nervoso central da espécie humana.^{[2][3]}

As **sinapses elétricas** transmitem informação instantaneamente de uma célula para outra, com transferência direta de corrente elétrica entre a célula pré-sináptica e a pós-sináptica. Elas são particularmente úteis quando a velocidade e a precisão na transmissão do impulso são fundamentais, como, por exemplo, no músculo cardíaco e no músculo liso.^{[2][4]}

Dentre as **sinapses químicas**, é possível classificarmos ainda 2 tipos morfológicos ao microscópio eletrônico.^[5]

- **Tipo I** - Apresentam vesículas de forma predominantemente arredondada, com alta densidade pós-sináptica e, segundo a visão clássica, são excitatórias, carregando o neurotransmissor [glutamato](#). Podem ser chamadas também de sinapses assimétricas.
- **Tipo II** - Apresentam vesículas de forma mais alongada, com menos densidade pós sináptica. Também segundo a visão clássica, são inibitórias, carregando o neurotransmissor [GABA](#). De forma lógica, são chamadas também de sinapses simétricas.

Publicações mais recentes vêm fornecendo novas visões em relação a função dos tipos morfológicos de sinapse, levando em consideração os tipos de receptores pós-sinápticos e o possível papel de sinapses simétricas como locais de comunicação transitória.^[6]

Neurotransmissores

Os neurotransmissores que possuem moléculas pequenas e de ação rápida são aqueles que induzem a resposta mais aguda ao sistema nervoso, como a transmissão de sinais sensoriais para o [encéfalo](#). Na maioria dos casos eles são sintetizados no [citossol](#) do terminal pré-sináptico. Alguns exemplos desses neurotransmissores

são [aminas](#) ([serotonina](#), [dopamina](#)), [aminoácidos](#) ([glicina](#), [glutamato](#)), [acetilcolina](#), [gasotransmissores](#) ([óxido nítrico](#), [sulfeto de hidrogênio](#), [monóxido de carbono](#)), dentre outros.^[2]

Os [neuropeptídeos](#) provocam ações mais prolongadas, como mudanças em longo prazo no número de receptores neuronais e provavelmente mudanças em longo prazo no número ou tamanho das sinapses. Eles não são sintetizados no citossol dos terminais pré-sinápticos, mas como partes integrais de grandes moléculas proteicas nos [ribossomos](#), localizados no corpo celular dos neurônios.^[2]

A formação de um neuropeptídeo é bem mais complexa do que de um neurotransmissor; por isso, é liberado com menor probabilidade do que de um neurotransmissor de pequena molécula. No entanto, a potência de um neuropeptídeo é cerca de mil vezes maior do que um neurotransmissor de pequena molécula.^[2]

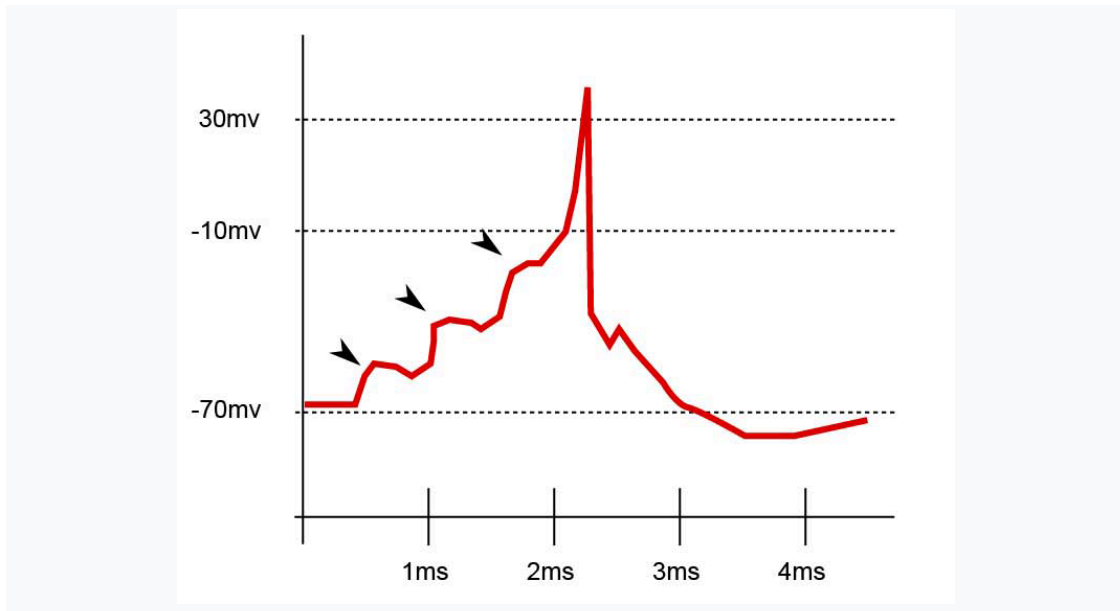
Terminal pré-sináptico: Liberação dos neurotransmissores para a fenda sináptica

O terminal pré-sináptico é separado do terminal pós-sináptico pela fenda sináptica. O terminal pré-sináptico possui dois tipos de estruturas internas para a função excitatória ou inibitória da sinapse: as vesículas transmissoras, que contêm os neurotransmissores, e a mitocôndria, que fornece energia necessária para sintetizar novas moléculas de neurotransmissores.^[2]

Quando a despolarização de um [potencial de ação](#) alcança o terminal pré-sináptico, a mudança no potencial de membrana dá início a uma sequência de eventos. A membrana do terminal axônico (terminal pré-sináptico) possui canais de cálcio controlados por voltagem que se abrem em resposta à despolarização da membrana. Como os íons cálcio são mais concentrados no líquido extracelular do que no citossol, eles se movem para dentro da célula. Quando os íons cálcio entram no terminal pré-sináptico, acredita-se que se liguem a proteínas especiais (proteínas do complexo [SNARE](#)) presentes em um sítio de liberação na superfície interna da membrana.

Esta ligação, por sua vez, provoca a fusão das vesículas na membrana dos sítios de liberação, permitindo que algumas vesículas contendo os neurotransmissores liberem seu conteúdo na fenda sináptica após cada potencial de ação. As moléculas do neurotransmissor se difundem através da fenda para se ligarem com receptores da célula pós-sináptica. Quando os neurotransmissores se ligam aos seus receptores, uma resposta é iniciada na célula pós-sináptica.^{[2][3]}

Ação dos neurotransmissores no terminal pós-sináptico



Iniciação de um potencial de ação em um neurônio

Os neurotransmissores são responsáveis pelos efeitos eletrofisiológicos excitatórios e inibitórios nas sinapses. Esses neurotransmissores ligam-se a um grande número de proteínas receptoras presentes na membrana do neurônio pós-sináptico, sendo que estas são formadas por combinação de várias subunidades – isso implica a provável existência de dezenas de receptores funcionalmente distintos para alguns neurotransmissores. As moléculas desses receptores possuem dois componentes importantes: um componente de ligação que se exterioriza, a partir da membrana, na fenda sináptica, e um componente ionóforo que atravessa toda a membrana pós-sináptica.

Esse componente ionóforo é subdividido em dois tipos: um canal iônico que permite a passagem de íons através da membrana, e um ativador de “segundo mensageiro”, que se projeta para o citoplasma da célula, e tem função de ativar substâncias localizadas no interior do neurônio pós-sináptico. ^{[2][3]}

Estes canais iônicos são de dois tipos: canais catiônicos, que permitem a passagem de íons sódio na maioria das vezes, e de íons potássio e/ou cálcio, em menores quantidades; e canais aniônicos, que permitem a passagem de íons cloreto e também de outros íons, em pequenas quantidades. Quando os canais catiônicos se abrem e ocorre a passagem de íons sódio, sua carga positiva provoca a excitação do neurônio, e quando ocorre a passagem de íons de cargas negativas com a abertura dos canais aniônicos, provoca a inibição do neurônio. As substâncias transmissoras provocam a abertura e fechamento desses canais – esse processo de abertura e fechamento ocorre em milésimos de segundos -, fornecendo meios para um controle muito rápido dos neurônios pós-sinápticos. ^{[2][3]}

O sistema químico dos receptores ativadores de “segundo mensageiro” possibilita excitação e inibição de efeito prolongado, sendo usado em funções

como a memória, por exemplo, que requerem mudanças prolongadas nos neurônios. Entre os diversos tipos de sistemas de segundos mensageiros, os mais comuns são um grupo de proteínas chamadas de [proteínas G](#). Elas estão ligadas a um receptor, e possuem três componentes: componente α , que é a porção ativadora da proteína, e os componentes β e γ , que estão ligados ao componente α . O componente α se desprende dos componentes β e γ durante a ativação por impulso nervoso, ficando livre para se mover no citoplasma da célula, podendo executar várias funções que variam de acordo com a característica específica de cada neurônio.

Essas quatro funções são:

- 1) abertura de canais iônicos específicos na membrana da célula pós-sináptica – promove uma abertura por tempo prolongado do canal, ao contrário dos canais iônicos ativados diretamente;
- 2) ativação do monofosfato de adenosina cíclico (AMPc) ou monofosfato de guanosina cíclico (GMPc) na célula neuronal – AMPc e GMPc responsáveis por ativar maquinaria metabólica altamente específica do neurônio;
- 3) ativação de uma ou mais enzimas intracelulares – estas enzimas podem induzir várias funções químicas específicas das células; (4) ativação da transcrição gênica – provoca a formação de novas proteínas dentro do neurônio.^[2]

Receptores inibitórios e excitatórios na membrana pós-sináptica

Um neurotransmissor pode produzir uma transmissão excitatória, que cria um impulso nervoso, ou uma transmissão inibitória, que impede os impulsos nervosos subsequentes. Estes neurotransmissores irão se ligar a receptores determinados na membrana pós-sináptica que quando ativados irão induzir essa excitação ou inibição.^[2]

Para a excitação do neurônio é necessário que o potencial interno da membrana pós-sináptica fique mais positivo em relação ao potencial de repouso, o que tem um caráter excitatório. Para tal, pode ocorrer a abertura dos canais de sódio, permitindo o fluxo de um grande número de cargas positivas para o interior do terminal pós-sináptico. Pode também ocorrer uma diminuição da difusão de íons cloreto carregados negativamente para dentro do terminal pós-sináptico ou redução da difusão de íons potássio carregados positivamente para fora do terminal pós-sináptico. Nos dois casos o potencial interno da membrana fica mais positivo. Além disso, mudanças no metabolismo interno do neurônio, no número de receptores ou em propriedades intrínsecas da membrana podem alterar a excitabilidade do neurônio.^[2]

Neuromoduladores

São substâncias químicas liberadas nas fendas sinópticas que geram efeitos mais lentos e mais a longo prazo do que os efeitos dos neurotransmissores. As ações dos [neuromoduladores](#) influenciam o efeito geral dos neurotransmissores, modulando-os. Alguns neurotransmissores, como a

noradrenalina, podem agir como neuromoduladores em casos específicos, devido às características de seus efeitos.^[8]

Referências

1. ↑ Marcus Lira Brandão (2008). *As bases biológicas do comportamento. Introdução à neurociência*. São Paulo: E.P.U. 244 páginas. [ISBN 8512406305](#)
2. ↑ [Ir para: a b c d e f g h i j k l m](#) A. C. Guyton, J. E. Hall (2006). *Tratado de fisiologia médica 11ª ed*. Rio de Janeiro: Elsevier. 1115 páginas. [ISBN 8535216413](#)
3. ↑ [Ir para: a b c d e f g](#) Dee Unglaub Silverthorne (2010). *Fisiologia humana. Uma abordagem integrativa 5ª ed*. Porto Alegre: Artmed. 992 páginas. [ISBN 9788536322841](#)
4. ↑ Margarida de Mello Aires (2008). *Fisiologia 3ª ed*. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan. 1252 páginas. [ISBN 9788527713689](#)
5. ↑ Gray EG (1959) Axo-somatic and axo-dendritic synapses of the cerebral cortex: an electron microscope study. *J. Anat. (Lond.)*, 93:420-433.
6. ↑ Klemann CJ1, Roubos EW (2011) The gray area between synapse structure and function-Gray's synapse types I and II revisited *Synapse*, 65(11):1222-30.
7. ↑ Gerard Jerry Tortora, Bryan Derrickson (2010). *Princípios de anatomia e fisiologia 12ª ed*. Porto Alegre: Artmed. 1256 páginas. [ISBN 8527716534](#)
8. ↑ Lent, Roberto. «4 - Chips Neurais». *Cem Bilhões de Neurônios 2a ed*. [S.l.: s.n.]



