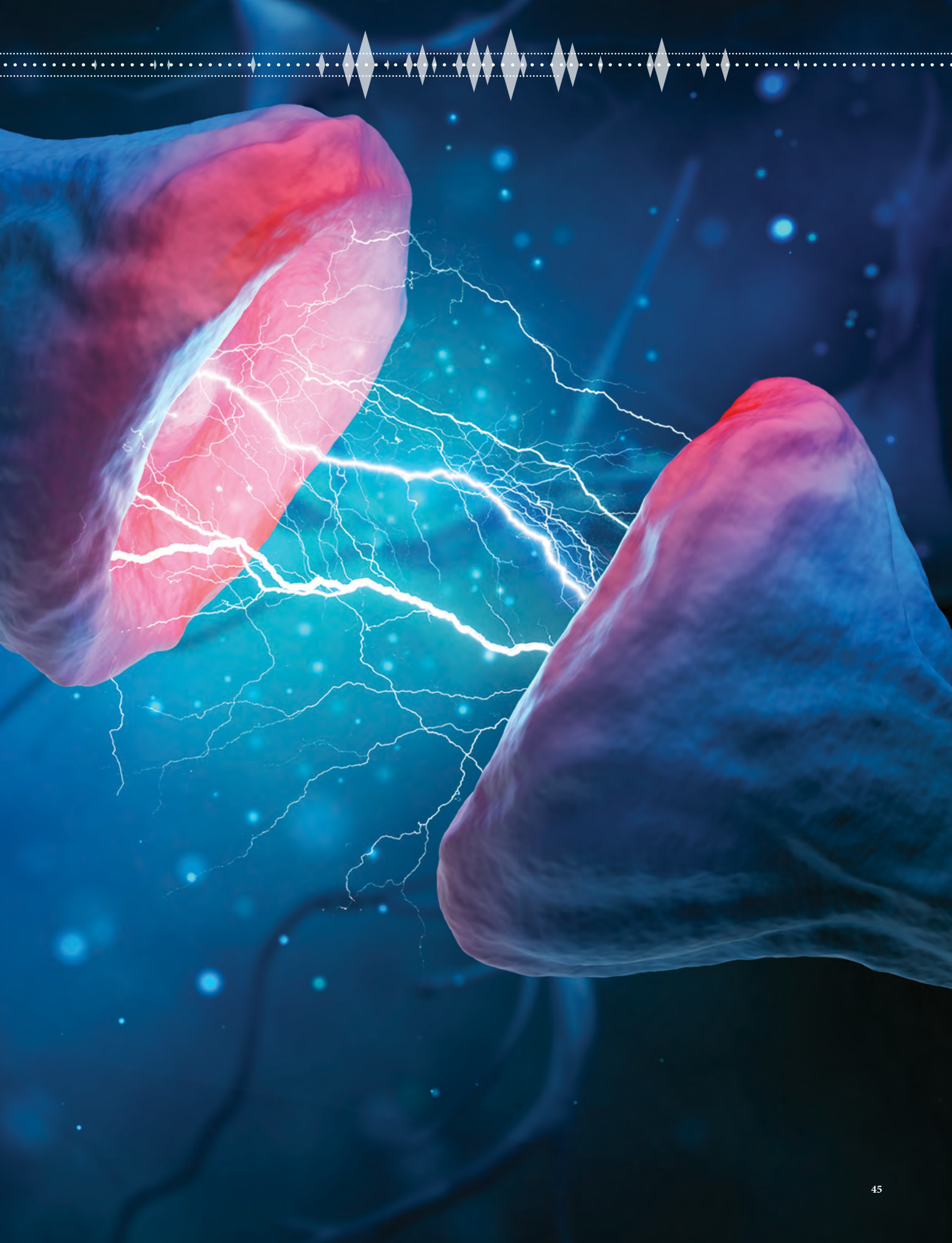


Kuantum Mekaniği ve Beyin

Dr. Mahir E. Ocak [*TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*

Kuantum mekaniği sadece atom ölçeğinde değil her ölçekte geçerli bir kuramdır. Ancak süperpozisyon, dolanıklık ve tünelleme gibi kuantum mekaniksel olgulara günlük hayatımızda şahit olmayız. Kuantum mekaniğine özđü bu ve benzeri olgular ancak düşük sıcaklıklarda ve laboratuvar ortamında çevresinden yalıtılmış sistemlerde gözlemlenir. Çünkü sıcak ve yoğun ortamlarda çevreyle yaşanan etkileşimler süperpozisyon ve dolanıklık gibi durumların kısa süre içinde yok olmasına, sistemin özelliklerinin ve davranışlarının klasik kuramlarla da açıklanabilecek hâle gelmesine neden olur. Biyolojik sistemler de sıcak ve yoğundur. Dolayısıyla çeşitli biyolojik süreçleri açıklamak için kuantum mekaniğine ihtiyaç duyulması beklenen bir durum değildir. Ancak bilimsel çalışmalar aksini işaret ediyor. Günümüzde beyin ve genel olarak sinir sisteminin işleyişinde kuantum mekaniğinin rolü üzerine yoğun araştırmalar yapılıyor.



Klasik Beyin

İnsan bedenindeki organların en karmaşıklarının başında hiç kuşkusuz beyin gelir. Sinirbilim üzerine yıllardır yapılan çalışmalar sonucunda büyük bir bilgi birikimi oluşmuşsa da beyin yapısı ve işleyişi hakkında hâlâ bilinmeyenler var. Beynin nasıl çalıştığını tam olarak çözmek zor. Beyindeki fizyolojik süreçlerin nasıl olup da bilinci ortaya çıkardığını anlamaksa çok daha zor.

Nöron olarak adlandırılan sinir hücreleri genellikle ince ve uzundur. Yuvarlak biçimli gövdeleri üzerinde dentrit olarak adlandırılan çıkıntılar vardır. Bu çıkıntıların akson olarak adlandırılan bir tanesi ise özellikle çok uzundur. Dış kısımları miyelin kılıf olarak adlandırılan koruyucu bir katmanla kaplı olan aksonlar, elektrik sinyallerini aktarır ve beyin farklı bölgeleri arasında bağlantı kurar.

İnsan beyininde 80 milyardan fazla nöron ve bu nöronları destekleyen glial hücreler bulunur. Beyin maddesi beyaz ve gri madde olarak ikiye ayrılır. Beyaz madde hücre gövdelerinden, gri madde ise miyelinli aksonlardan meydana gelir.

Beyin, farklı bölgeleri arasında karmaşık etkileşimler olan bir sinir ağıdır. Bu bakımdan belirli görevlerin beyin belirli bölgeleri tarafından yerine getirildiğini

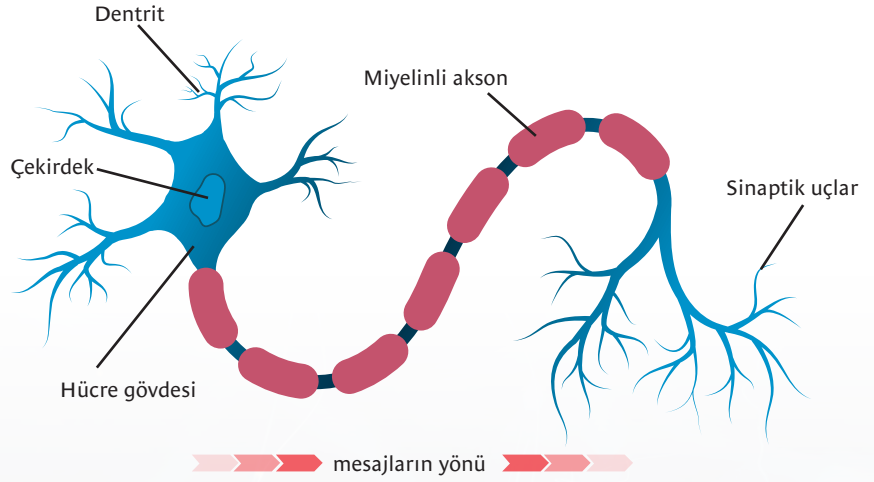
ifade etmek beyin işleyişini aşırı derecede basitleştirmeye çalışmak olur. Yine de sınıflandırma amacıyla, beyin farklı görevleri üstlendiği söylenen çok sayıda bölgeye ve alt bölgeye bölünür.

Vücudun farklı bölgelerinden toplanan bilgilerin beyne iletilmesi nöronlarda bir elektrik sinyalinin oluşması (ateşlenme) ve oluşan sinyalin nöronlar arasında aktarılması yoluyla olur. Bir nöronun ateşlenmesi için hücre zarının durağan hâldeki elektriksel



potansiyelinin aksiyon potansiyeli olarak adlandırılan bir eşik değerin üzerine çıkması gerekir. Elektriksel potansiyelin artması ya da azalması ise hücre zarına dağılmış hâlde bulunan elektrik yüklü iyonların hareketlerinin sonucudur. Sinyallerin bir nörondan diğerine aktarılmasıysa özetle şu şekilde gerçekleşir: Nöron boyunca yol alan elektrik sinyali, aksonun ucuna geldiğinde hücre zarındaki iyon kanallarının açılmasına sebep olur. Böylece sinir hücreleri arasındaki bölgeye (sinaptik boşluğa) nörotransmitter denilen mesajcı kimyasal maddeler salınır. Nörotransmitterler sinaptik boşlukta yol alarak bir sonraki sinir hücresine ulaşır ve çeşitli reseptörlere bağlanarak iyon kanallarının açılmasına neden olur. Açılan kanallardan hücreye giren iyonlar hücre zarının elektriksel potansiyelini artırır. Eğer algılanan sinyal yeteri kadar güçlüyse (hücre zarının potansiyeli aksiyon potansiyelini aşarsa) nöron ateşlenir ve oluşan sinyal nöron boyunca yol almaya başlar.

Fizyolojik süreçlerin bilinci nasıl ortaya çıkardığı hakkında ise bugün çok az şey biliniyor. Bu konu üzerine çalışmalar yapan araştırmacılar genellikle bilinci kaybetme ve yeniden kazanma sırasında (örneğin anestezi maddeler verilen insanlarda) meydana gelen sinirsel değişiklikleri tespit etmeye çalışıyorlar.



Mikro Dünyada Kuantum Mekanikliği

Beynin işleyişinde kuantum mekaniğinin rolünü tartışmaya başlamadan önce kuantum mekaniğinin temel ilkelerini yazının devamının daha kolay anlaşılmasına yetecek düzeyde özetlemeye çalışalım.

Kuantum mekaniğinde bir sistemin durumu dalga fonksiyonu olarak adlandırılan ve genellikle ψ sembolü ile gösterilen bir fonksiyon tarafından temsil edilir. Dalga fonksiyonu sistem üzerinde yapılacak ölçümlerin hangi olasılıklarla hangi sonuçları vereceği hakkında bilgi taşır. Örneğin bir parçacığın belirli bir özelliği hakkında ölçüm yapmak istediğimizi ve muhtemel iki sonuç olduğunu düşünelim. Bu iki sonuç $|\alpha\rangle$ ve $|\beta\rangle$ olsun. Ölçümden önce eğer $\psi=|\alpha\rangle$ ise parçacığın doğal olarak $|\alpha\rangle$ durumunda olduğu, eğer $\psi=|\beta\rangle$ ise parçacığın doğal olarak $|\beta\rangle$ durumunda olduğu bulunacaktır. Ancak ölçümden önce parçacığın bu iki durumun herhangi bir süperpozisyonunda (lineer kombinasyonunda) olması

da mümkündür: a ve b , $|a|^2+|b|^2=1$ koşulunu sağlayan herhangi iki karmaşık sayı olmak kaydıyla, dalga fonksiyonu ölçümden önce $\psi=a|\alpha\rangle+b|\beta\rangle$ olarak ifade edilen sonsuz farklı lineer kombinasyondan herhangi biri de olabilir. Kuantum mekaniği bu durumda ölçüm sonucunda sistemin $|a|^2$ olasılıkla $|\alpha\rangle$ durumunda, $|b|^2$ olasılıkla $|\beta\rangle$ durumunda bulunacağını söyler. Örneğin $a=0,6$, $b=0,8$ olduğu durumu ele alalım. Bu durumda ölçüm $0,36$ olasılıkla $|\alpha\rangle$ sonucunu, $0,64$ olasılıkla $|\beta\rangle$ sonucunu verecektir. Başka bir deyişle, 100 özdeş sistem üzerinde aynı ölçüm yapılırsa 36'sının $|\alpha\rangle$, 64'ünün $|\beta\rangle$ durumunda olduğu bulunacaktır. Ölçüm sonucunda dalga fonksiyonu bulunduğu duruma "çöker". Ölçümden önce $\psi=a|\alpha\rangle+b|\beta\rangle$ olan dalga fonksiyonu ölçümden sonra, eğer sonuç $|\alpha\rangle$ ise $|\alpha\rangle$ durumuna, sonuç $|\beta\rangle$ ise $|\beta\rangle$ durumuna eşittir.

Konuyu bir de klasik dünyada örneği olmayan kuantum mekaniğin spin üzerinden örneklendirelim. Spin terimi

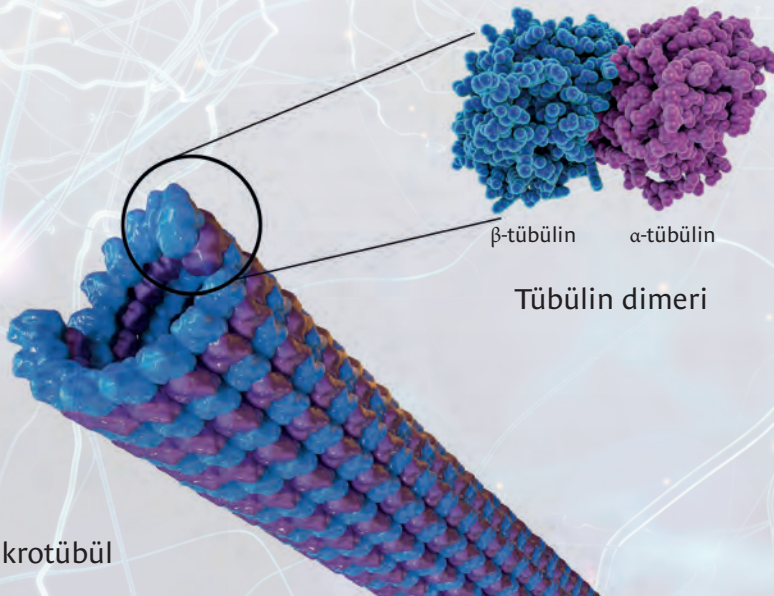
klasik fizikte herhangi bir nesnenin kendi kütle merkezi etrafındaki açısal momentumunu ifade etmek için kullanılır. Elektronların ve diğer temel parçacıklarınsa bir spine sahip olmaları beklenmez. Çünkü noktasal (boyutsuz) kabul edilirler, dolayısıyla kendi kütle merkezleri etrafındaki açısal momentumları sıfır olmalıdır. Ancak bilimsel çalışmalar temel parçacıkların içkin bir açısal momentuma sahip olduğunu gösteriyor ve bu açısal momentum da spin olarak adlandırılıyor. Bir temel parçacığın belirli bir yöndeki spini ölçüldüğünde sonuç olarak spinin ya +1/2 (yönünün ölçüm yönüyle aynı) ya da -1/2 (yönünün ölçüm yönünün tersi) olduğu bulunur. Eğer bu iki muhtemel ölçüm sonucunu $|\uparrow\rangle$ ve $|\downarrow\rangle$ olarak gösterirsek, belirli bir anda parçacığın spinine karşılık gelen

dalga fonksiyonu, bu iki durumun $\psi = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$ olarak ifade edilen herhangi bir lineer kombinasyonu da olabilir. Ölçüm yapıldığında spinin $|a|^2$ olasılıkla $|\uparrow\rangle$, $|b|^2$ olasılıkla $|\downarrow\rangle$ olduğu bulunur. Ölçümden sonra elektronun spini ölçüm sonucuna uygun biçimde $|\uparrow\rangle$ ya da $|\downarrow\rangle$ durumlarından birine çöker.

Birden fazla parçacık söz konusu olduğunda bazen “dolanık” durumlarla karşılaşılır. Dolanıklığın ne olduğunu iki elektronun spini üzerinden ele alalım. Her bir elektronun spin ölçümü için iki muhtemel sonuç vardır: $|\uparrow\rangle$ ve $|\downarrow\rangle$. Dolayısıyla iki elektronun spinleri ölçüldüğünde bulunabilecek muhtemel dört sonuç vardır: $|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle$, $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$, $|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$ ve $|\downarrow\rangle|\downarrow\rangle$. Ölçümden önce ya da sonra, dalga fonksiyonu bu dört durumun herhangi bir süperpozisyonunda da olabilir.

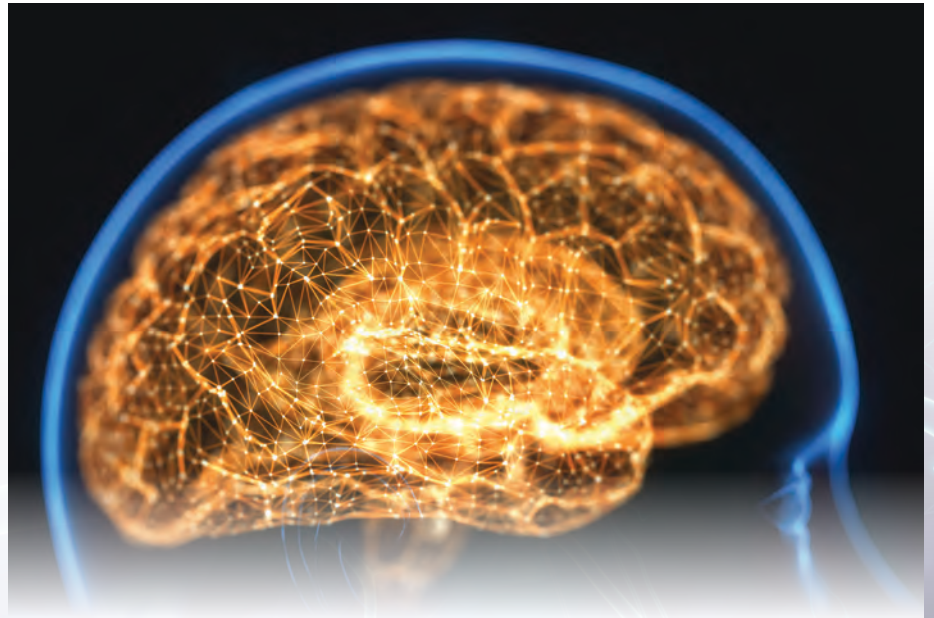
Dalga fonksiyonunun eşit olabileceği sonsuz farklı süperpozisyon durumundan bazıları şunlardır: $1/\sqrt{2}(|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle)$, $1/\sqrt{2}(|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle)$, $1/\sqrt{17}(-2*|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + 3*|\downarrow\rangle|\downarrow\rangle + 2*|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)$, $(0,6*|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle + 0,8*|\downarrow\rangle|\downarrow\rangle)$. Bunlardan bazıları dolanık olarak adlandırılır. Çünkü iki parçacığın spin durumları birbirinden bağımsız değildir. Örneğin $1/\sqrt{2}(|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle)$ durumunda iki elektronun spin durumları birbirine dolanıktır. Ne birinci elektron $|\downarrow\rangle$, ikinci elektron $|\uparrow\rangle$ durumunda ne de birinci elektron $|\uparrow\rangle$, ikinci elektron $|\downarrow\rangle$ durumundadır. Spinleri dolanık hâlde bulunan iki elektrondan birinin spini ölçüldüğünde diğerinin spini de anlık olarak belirlenir. Örneğin spinleri $1/\sqrt{2}(|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle - |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle)$ durumunda olduğu bilinen iki elektrondan birinin spinini ölçtüğümüzü düşünelim. Sonuç 0,5 olasılıkla $|\uparrow\rangle$, 0,5 olasılıkla $|\downarrow\rangle$ çıkar. Ancak iki elektronun spinleri birbirine dolanık olduğu için, birinci elektronun spinini $|\downarrow\rangle$ olarak ölçersek ikinci elektronun spininin de artık $|\uparrow\rangle$ olduğunu; birinci elektronun spinini $|\uparrow\rangle$ olarak ölçersek ikinci elektronun spininin de artık $|\downarrow\rangle$ olduğunu biliriz. Birbirine dolanık hâldeki iki parçacıktan biri üzerinde yapılan ölçüm, diğerini de anlık olarak etkiler.

Klasik dünyada karşılığı olmayan bir fiziksel süreç de tünellemedir. Konuyu bir benzetmeyle açıklamaya



çalışalım. Bir topu yokuş yukarı yuvarlayarak bir tepeyi aşırtmaya çalıştığımızı düşünelim. Topa bir ilk hız verirsiniz. Ancak top yokuş yukarı gittikçe yerçekimi etkisiyle yavaşlar. Bu yüzden topun tepeyi aşabilmesi için başlangıçta sahip olduğu hareket enerjisi, başlangıç noktası ile tepe noktası arasındaki potansiyel enerji farkından büyük olmalıdır. İki nokta arasındaki potansiyel enerji farkı topun tepeyi aşmasını engelleyen bir bariyer gibidir. Bu bariyeri aşmak ancak yeteri kadar hareket enerjisine sahip olmakla mümkündür. Aynı soruyu kuantum fiziği ile ele aldığımızda şaşırtıcı bir sonuçla karşılaşırız. Kuantum mekaniği topun potansiyel enerji bariyerini aşmasına yetecek kadar enerjisi olmadığı durumlarda da “tepeyi aşma olasılığının sıfır olmadığını” söyler. Başka bir deyişle her zaman değilse de belirli olasılıklar dâhilinde topun tepeyi aşması mümkündür. Böyle bir durumda top tepeyi tırmanmak yerine bir tünelin içinden geçip karşıya geçiyor gibidir. Deneylerle ve gözlemlerle de doğrulanan bu olgu kuantum tünelleme olarak adlandırılır.

Bu kısmı tamamlamadan önce yazının devamında sıklıkla kullanılacak iki terimin ne anlama geldiğini de not edelim. Süperpozisyon durumlarını meydana getiren farklı durumların fazları arasında belirli bir nicel ilişki olması durumunda, dalga

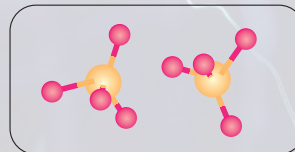
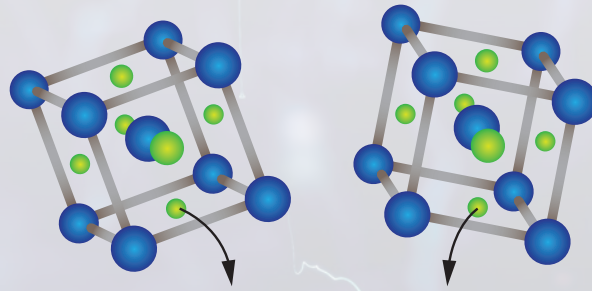


fonskiyonunun *coherent* olduğu söylenir. *Decoherence* ise sistemin çevreyle etkileşerek bu özelliğini kaybetmesidir. Bir sistemin kuantum *coherence*'a sahip olması (dalga fonskiyonunun *coherent* olması) klasik fizikle açıklanamayacak özelliklere sahip olduğu anlamına gelir. *Decoherence* ise çevreyle yaşanan etkileşimler sonucunda sistemin kuantum mekaniksel özelliklerini kaybetmesi, klasikleşmesidir.

Sinirsel Süreçler ve Kuantum Mekaniği

Canlıları meydana getiren atomlar ve moleküller kuantum mekaniği ilkelerine uygun davrandığı için tüm biyolojik sistemlerin de kuantum mekaniği ilkelerine uygun davrandığı söylenebilir. Ancak tıpkı atomlardan ve moleküllerden oluşan gezegenlerin uzaydaki hareketlerini

Posner Molekülleri



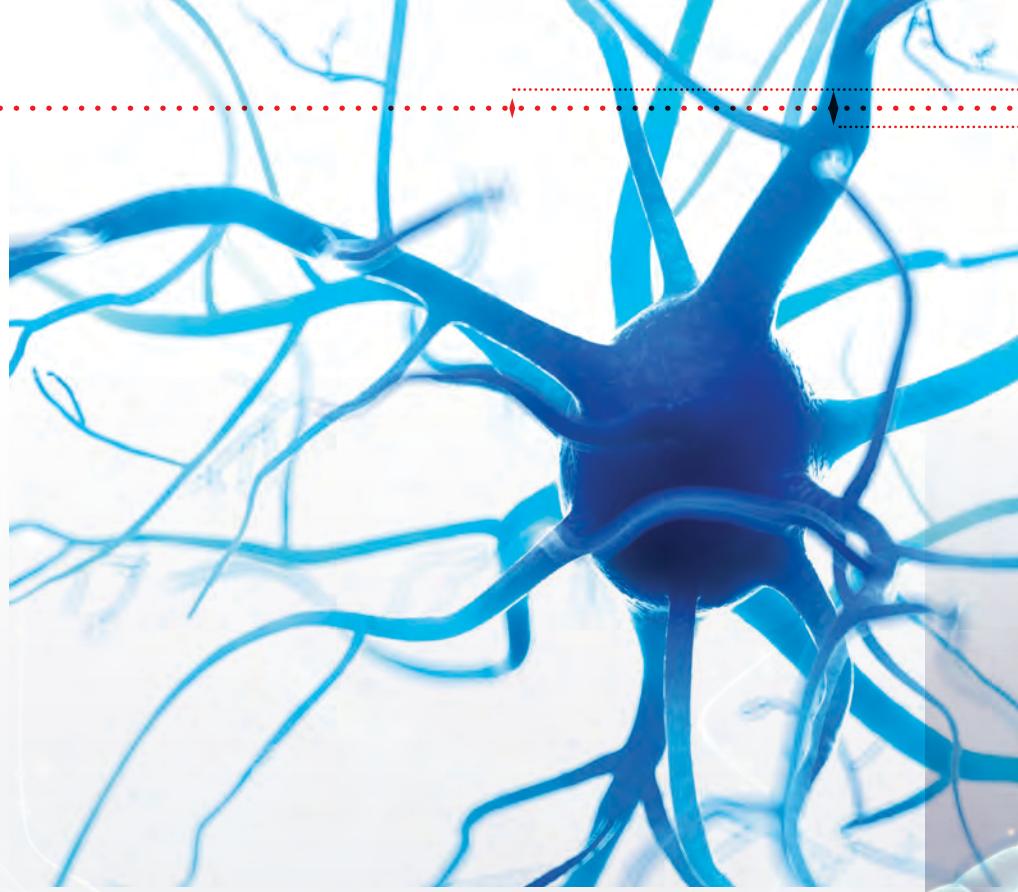
Dolanık fosfatlar

açıklamak için klasik fiziğin “yeterli” olmasına benzer biçimde, beynin ve genel olarak sinir sisteminin işleyişini açıklamak için de klasik fizik yeterli midir? Yoksa atom ölçeğinde meydana gelen fizyolojik süreçlerde günlük hayatta aşına olmadığımız sıra dışı kuantum mekaniksel olguların da rolü var mıdır?

Bilinç

Nobel ödüllü fizikçi Roger Penrose, 1989’da yayımladığı The Emperor’s New Mind (Kralın Yeni Usu) başlıklı popüler bilim kitabında, bilinci açıklamak için klasik fizik yasalarının yeterli olamayacağını, kuantum fiziğinin bilincin ortaya çıkmasında kilit rol oynadığını ileri sürmüştü. Başlangıçta Penrose’un bu düşüncesi biyolojik temelden yoksundu. Ancak ilerleyen yıllarda anestezi uzmanı Stuart Hameroff ile birlikte bilinçte kuantum mekaniğinin rolü üzerine bir kuram geliştirdiler. Kısaca “Orch OR” olarak adlandırılan bu kuram, bilincin mikrotübüllerdeki kuantum hesaplamalarının sonucu olduğunu öne sürer.

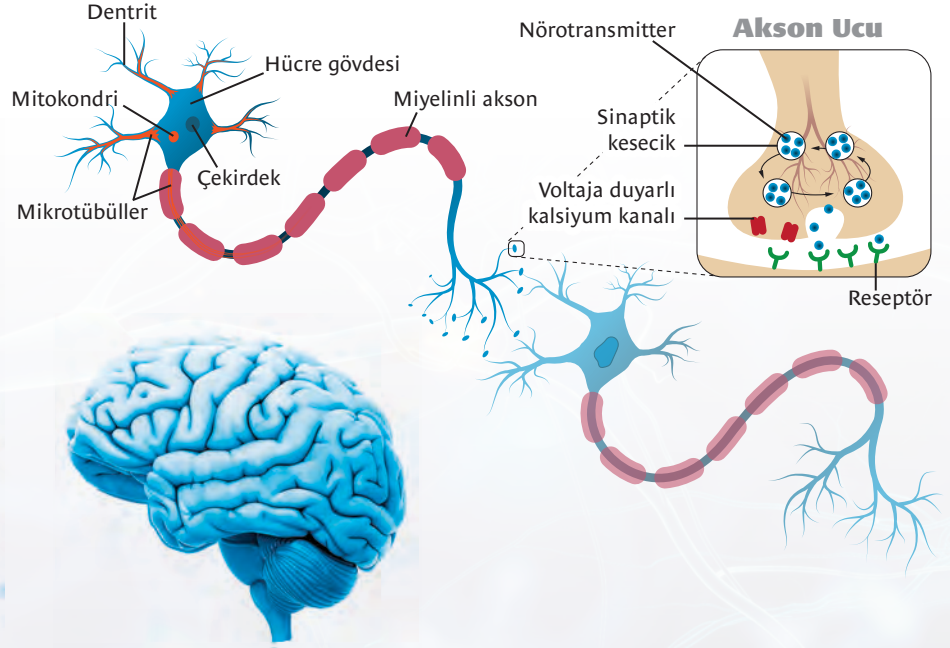
Tübülün proteinlerinin polimerleşmesiyle oluşan mikrotübüller, ökaryotik ve bazı prokaryotik hücrelerin iskeletinin bir kısmını oluşturarak hücrenin şeklinin ve ana yapısının oluşmasına katkıda bulunur ve hücre bölünmesinde rol alırlar. Ayrıca kimyasal enerjiyi



hareket enerjisine dönüştüren motor proteinler, hücre içinde hareket ederken mikrotübüllerin oluşturduğu rayların üzerinde hareket eder.

Mikrotübüller sadece sinir hücrelerinde değil tüm ökaryotik hücrelerde bulunur. Ancak Orch OR kuramı özellikle sinir hücrelerinin gövdelerinde ve dentritlerinde bulunan mikrotübüllere odaklanır. Bu durumun nedeni, sinir hücresi dışındaki hücrelerde ve sinir hücrelerinin aksonlarında bulunan mikrotübüllerin görece düzenli bir yapıya sahip olması ve bu durumun bilgi işlemeye uygun olmamasıdır. Sinir hücrelerinin gövdelerindeki ve dentritlerindeki mikrotübüllerse Penrose ile Hameroff’un “öğrenmeye uygun yenilemeli ağ” dedikleri daha düzensiz bir yapı oluşturur.

Orch OR kuramının tam olarak ne anlama geldiğine bir göz atalım. Orch OR’un temelinde Roger Penrose tarafından öne sürülmüş bir kuantum kütle çekimi kuramı ve mikrotübüllerde gerçekleşen kuantum hesaplamalar vardır. Roger Penrose’un kuantum kütle çekimi kuramı sadece kuantum mekaniği ve kütle çekimini bir araya getirmekle kalmaz, bugün tartışmalara konu olan “ölçümlerin dalga fonksiyonunun çökmesine neden olması” sorununa da bir çözüm sunar. Penrose’un kuantum kütle çekimi kuramında dalga fonksiyonunun çökmesi, kütle çekimi etkisiyle nesnel bir biçimde gerçekleşir. Bu sürece kısaca OR (nesnel indirgenme anlamına gelen İngilizcedeki “objective reduction” ifadesinden türetilmiş bir kısaltma) denir.



Klasik bilgisayarlarda bilgi "0" ve "1" değerini alabilen bitlerde kodlanır. Kuantum bilgisayarındaki kubitler (kuantum bitler) ise bu iki değer her hangi bir süperpozisyonunda da olabilir. Orch OR kuramına göre, mikrotübüllerdeki kuantum hesaplamalar tübülün dimerlerinin

farklı süperpozisyonlarının oluşturduğu kubitlerde yapılır ve bu hesaplamalar OR ile sonlanarak klasik sonuçlar verir. Kuramın Orch OR (Orchestrated OR) olarak adlandırılmasının nedeniyse OR ile sonlanan kuantum hesaplamalarının biyolojik sistemler tarafından organize edilmesidir.

Orch OR'un yaygın olarak kabul gören bir kuram olduğu söylenemez. Aksine pek çok yönden eleştiriliyor. Diğer yandan, Penrose ve Hameroff da tüm eleştirileri cevaplamaya, kuramı gün geçtikçe güncellemeye ve geliştirmeye devam ediyorlar.

Anestezi

Bilincin nasıl ortaya çıktığını anlamamanın bir yolu bilincin kaybolması sırasında yaşanan değişimleri incelemektir. Örneğin ameliyata girmeden önce narkoz verilen bir hastanın bilincini kaybetmesine hangi fizyolojik süreçler neden olur?

Anestezik maddelerin kuantum mekaniksel süreçlerle etki gösterdiğine dair çeşitli hipotezler var. Bunlardan



biri Penrose ve Hameroff'un Orch OR kuramının temelinde yer alan mikrotübüllerdeki kuantum mekaniksel süreçlere, diğeri ise anestezi verilmiş meyve sineklerindeki spin değişikliklerine odaklanıyor. Her iki kuram da temelde 1980'lerde ortaya atılmış bir görüşe, anestetik maddelerin elektronik etkinliklerde değişikliklere sebep olabileceği ihtimaline, atıfta bulunuyor. Bu iki kuramdan da kısaca bahsedelim.

Cıvık mantarlar tek hücreli canlılardır. Ancak buna rağmen etraftaki yiyecekleri algulamak, yiyeceklere doğru yönelmek ve nerede bulduklarını hatırlamak gibi bilişsel yeteneklere sahiptirler. Dr. Travis Craddock ve arkadaşları da bu gözlemden yola çıkarak anestetik maddelerin etkilerini sinir ağı üzerinde ya da sinapslarda aramanın yanlış olduğunu ileri sürdüler. Cıvık mantarların bilişsel yetenekleri bu tek hücreli canlıların ana iskeletini oluşturan mikrotübüllerle ilişkili olduğu için, anestetik maddelerin sebep olduğu değişikliklerin izleri de mikrotübüllerde aranmalıdır. Araştırmacılar mikrotübüllerde fotosentezdekine benzer kuantum mekaniksel süreçler gerçekleştiğini, anestetik maddelerin de bu süreçleri bozarak bilinç kaybına yol açtığını iddia ettiler.

Geçmişte fotosentez sırasındaki enerji aktarımının klasik olduğu, ışıktan alınan enerjinin bir

noktadan diğerine sıçraya sıçraya tepkime merkezine aktarıldığı düşünülürdü. Ancak son yirmi yılda yapılan deneysel çalışmalar fotosentezdeki enerji aktarımının dalga benzeri özellikler gösterdiğini ve kuantum mekaniksel bir süreç olduğunu gösterdi. Craddock ve arkadaşları da mikrotübüllerde fotosentezdekine benzer biçimde *coherent* enerji aktarımı olduğunu öne sürüyorlar. Bu hipoteze göre, anestetik maddeler mikrotübüllerdeki proteinlere bağlanarak elektronlar tarafından taşınan enerjinin aktarılmasına engel oluyor ve böylece bilinç kaybına yol açıyor.

Anestetik özelliklere sahip olduğu bilinen maddeler kimyasal olarak birbirlerine pek benzemezler. Örneğin tek atomlu bir soygaz olan ksenon da $C_{12}H_{32}O_3$ molekül formülüne sahip karmaşık yapıdaki alfaxalone da anestetiktir. Bu durum bilincin kaybolmasına yol açan maddelerin kimyasal değil fiziksel yollarla etkili olduğunu düşündürüyor.

Yapısı diğerlerine kıyasla çok daha basit olduğu için üzerine en çok araştırma yapılan anestetik maddelerin başında ksenon geliyor. Bu çalışmaların en dikkat çekicilerinden birine Dr. Na Li ve arkadaşları imza attı. Ksenonun dokuz kararlı izotopu vardır. Bu izotoplarının yedisinin nükleer spini 0, birisinin $\frac{1}{2}$, diğerinin de $\frac{3}{2}$ 'dir. Araştırmacılar farklı ksenon izotoplarının anestetik etkinliğini incelediklerinde nükleer spini sıfırdan farklı olan izotopların daha etkisiz olduğunu tespit etmişler. Diğer yandan, spini buçuklu olan parçacıkların kuantum dolanıklığa daha uygun olduğu bilinir. Araştırmacılar da bu bilgiye dayanarak anestetik maddelerin etki mekanizmalarında kuantum dolanıklığın rol aldığını öne sürüyorlar.

Kuantum spinle ilgili bir başka çalışma da Dr. Luca Turin ve arkadaşları tarafından yapıldı. Araştırmacılar narkoz verilmiş meyve sinekleri üzerinde yaptıkları



çalışmalarda anestetik maddelerin elektron spinlerinde değişikliğe sebep olduğu sonucuna varmışlar. Ancak tespit edilen değişikliklerin doğrudan anestezi sũreciyle mi, yoksa bu sũrecin yan etkileriyle mi ilgili olduğu tam olarak bilinmiyor. Elde edilen sonuçlar, anestetik maddelerin etki mekanizmalarında muhtemelen kuantum mekaniksel sũreęlerin de yer aldığı biğiminde yorumlanıyor.

Nörokimyasalların alışması

Nörotransmitterler nöral sinyallerin bir nörondan diğerine aktarılmasına aracılık eden maddelerdir. Bir nöron tarafından sinaps boşluğuna bırakılan nörotransmitterler başka bir nöronu uyararak iyon kanallarının ağılmasını sağlarlar.

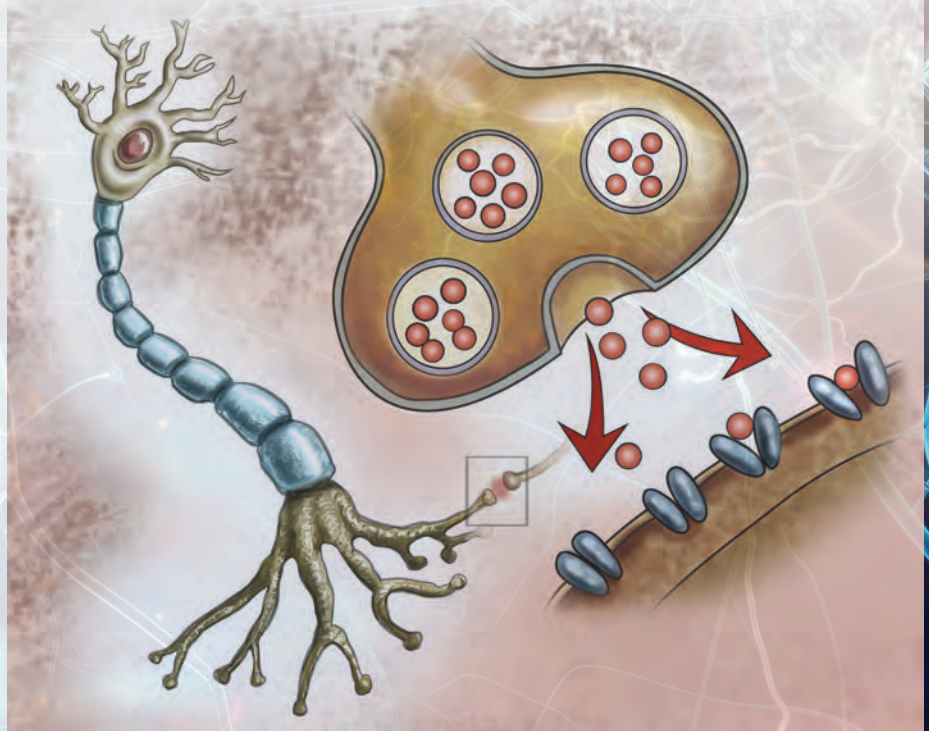
Nörotransmitterlerin alışma biğimini açıklamak için kullanılan yaygın bir örnek anahtar-kilit benzetmesidir: İyon kanallarının kapısında özel kilitler vardır. Bu kilitlerin ağılıp bir aksiyon potansiyelinin oluşması için doğru anahtara ihtiyaç vardır. İyon kanalları ancak doğru molekũler şekle sahip nörotransmitterler tarafından ağılabilir. Anahtar-kilit benzetmesi sadece nöral sinyallerin nasıl aktarıldığını açıklamak için değil, enzimlerin çalışma biğimini, koku algısının oluşumunu ve proteinlerin DNA'ya bağlanmasını açıklamak için de

yaygın olarak kullanılır. Her ne kadar başarılı bir açıklama olduğu dũřünũlse de son zamanlarda önce koku algısını tetikleyen nörokimyasalların daha sonra da nörotransmitterlerin çalışma biğimini açıklamak için anahtar işlevi gören molekũlerlerden daha fazlasına ihtiyaç olduğu iddia edildi.

Koku sinirlerini uyaran nörokimyasalların ve sinyallerin nöronlar arasında aktarılmasını sağlayan nörotransmitterlerin çalışma biğimini ağıklayan alternatif bir kuram, bu sũreęlerde titreşim destekli tũnellemelerin rol aldığını ne sũrũyor. Titreşim destekli tũnellemede, bir elektronun bir potansiyel enerji engelini

tũnelleyerek aşması için gerekli enerji, bir molekũlũn titreşim modlarından sağlanır.

Bir molekũlũn titreşim frekansları, iğerisindeki atomların kũtlelerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla aynı kimyasal formũle sahip ancak farklı izotopların bir araya gelmesiyle oluşan molekũllerin titreşim frekansları arasında az da olsa farklar vardır. Bu yũzden titreşim-destekli tũnelleme hipotezini test etmenin bir yolu sinir hũcrelerinin farklı izotoplardan oluşan nörokimyasallara nasıl tepki verdiğini incelemektir. Her ne kadar bu yolla hipotezi test etmek için yapılan kuramsal çalışmalar olumlu sonuç verse de bugũne kadar hipotezin doğru olduğuna işaret eden herhangi bir deneysel veriye ulaşılabilmış değil.



Elektrik sinyalleri sinapslarda bir nörondan diğerine aktarılır.

Nöral Sinyaller ve Biyofotonlar

Geçtiğimiz yıllarda sinir hücreleri arasındaki sinyal aktarımının nörotransmitterlerin yanı sıra biyofotonlarla da yapıldığına dair iddialar ortaya atıldı. Biyofotonlar, biyolojik sistemler -özellikle de mitokondri- tarafından üretilen, ışık tayfının yakın morötesi ile yakın kızılötesi arasındaki bölgesine ait fotonlardır. Beyinde de biyofotonların üretildiği bilinir. Işığın doğası kuantum mekaniği ile açıklandığı için ışığın olduğu yerde kuantum mekaniksel süreçlerin de rol alması beklenir.

Biyofotonların bitkilerde ve bakterilerde hücreler arası haberleşmede rol aldığına işaret eden veriler var. Sinir hücrelerinin biyofotonları iletebildiği de Dr. Yan Sun ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel çalışmalarla doğrulandı. Araştırmacılar ayrıca anestezi maddeleriyle biyofoton iletiminin engellenebileceğini de gösterdiler.

Sinir hücrelerinin biyofotonları nasıl ilettiğine dair bir çalışma Dr. Sourabh Kumar ve arkadaşları tarafından yapıldı. Araştırmacılar ilk olarak nöronlarda foton kaynakları ve foton algılayıcıları olduğuna dikkat çekiyor, daha sonra da kuramsal hesaplar yaparak miyelin kaplı aksonların bir dalga kılavuzu gibi fotonları yönlendirmeye uygun yapıda olduğunu gösteriyorlar. Dr.



Kumar ve arkadaşları ileri sürdükleri düşünceleri test etmek için çeşitli deneyler de öneriyorlar. Ancak henüz bu konuda elde edilmiş bir sonuç yok.

Dr. Philip Kurian ve arkadaşları mitokondride üretilen biyofotonların mikrotübüller tarafından soğurularak enerjinin *coherent* kuantum durumları aracılığıyla aktarıldığını ileri sürdüler. Deneysel veriler de fotonlara maruz kalan mikrotübüllerde yapısal değişiklikler olduğunu gösteriyor.

Biyofotonlara dair en ilginç çalışmalardan biri Dr. Zhuo Wang ve arkadaşları tarafından yapıldı. Araştırmacılar çeşitli canlıların beyinlerinde üretilen biyofotonları inceledi ve canlıların beyinlerindeki fotonların şu sıra ile giderek kırmızıya kaydığını (dalga boyunun uzadığını) tespit ettiler: kurbağa, fare, tavuk, domuz, maymun ve insan. Araştırmacılar bu sıralamanın

canlıların zekâ seviyesi sırasıyla hemen hemen aynı olduğunu söylüyor ve biyofotonların kırmızıya kaymasıyla zekâ arasında bir ilişki olduğunu öne sürüyorlar. Ancak hem zekânın net bir ölçüsünün olmaması hem de biyofotonların kırmızıya kaymasının zekâyı nasıl artırdığına dair bir açıklama sunulamaması yüzünden ileri sürülen hipotez şüpheyle karşılanıyor.

Kuşların Manyetik Alan Algısı

Bazı kuş türlerinin göç ederken Dünya'nın manyetik alanından yararlandığı bilinir. Bir hipoteze göre kuşların beyinlerindeki manyetik pusula radikal çift mekanizmasıyla çalışır. Radikal çift terimi, spinleri iki farklı durumda bir süperpozisyonunda olan elektron çiftlerini ifade etmek için kullanılıyor.

Kuşların beyinlerindeki kuantum pusulasının özetle şöyle çalıştığı düşünülüyor: ilk olarak, kuşların gözlerindeki ışığa duyarlı sinir hücrelerinde bulunan ve kriptokrom adıyla sınıflandırılan çeşitli moleküller, çevreden gelen bir mavi ışık fotonunu soğuruyorlar ve böylece bir radikal çift oluşuyor. Süperpozisyonu meydana getiren farklı spin durumlarının hangi oranda karıştığı (lineer kombinasyondaki katsayılar) ise ortamdaki manyetik alana bağlı olarak değişiyor. Farklı süperpozisyon durumları tarafından tetiklenen farklı sinyaller de kuşların beyni tarafından yön belirlemek için kullanılıyor.

Sadece kuşların değil başka canlıların da Dünya'nın manyetik alanını algıladığına dair bulgular var. Hatta yakın zamanlarda yayımlanan bir çalışmaya göre insanlar da manyetik alanı algılayabiliyor. Dr. Kwon-Seok Chae ve arkadaşları uzun süre aç bırakılan insanların Dünya'nın manyetik alanını algılayarak

hatırladıkları bir besin kaynağına doğru yöneldiklerini tespit etmişler. Araştırmacılar makalelerinde bu yönelmenin ancak ortamda mavi ışık bulunduğunda gerçekleştiğini yazıyorlar.

Reaktif oksijen türevleri yaşlanma, depresyon ve çeşitli hastalıklarla ilişkilidir. Bu yüzden antioksidanların sağlık için yararlı olduğu söylenir. Bilimsel çalışmalar, manyetik alanların radikal çift mekanizması aracılığıyla reaktif oksijen türevlerinin artmasına sebep olabildiğini gösteriyor. İnsan hücrelerinde gerçekleşen çeşitli süreçlerde de radikal çift mekanizmasının rol alması muhtemel. Örneğin Dünya'nın manyetosferinde Güneş'in etkisiyle geçici değişimlerin yaşandığı jeomanyetik fırtınalar sırasında intihar oranlarının arttığına dair bulgular var. Jeomanyetik fırtınalar radikal çift mekanizması aracılığıyla insanların fizyolojisini ve psikolojisini etkiliyor olabilir.

Nöral Dolanıklık

Kuantum mekaniğinin biyolojide herhangi bir rolü olmayacağına dair argümanların başında *decoherence* gelir. Biyolojik sistemler yoğun ve sıcaktır. Dolayısıyla çevreyle yaşanan etkileşimlerin sebep olduğu *decoherence* nedeniyle kuantum mekaniksel süreçlerin biyolojik sistemlerde rol alması zordur.

Fotosentezdeki *coherent* enerji aktarımı picosaniye (10^{-12} saniye), radikal çift mekanizması ise mikrosaniye (10^{-6} saniye) zaman ölçeğinde gerçekleşir. Bir nöronun ateşlenmesi ise milisaniyeler sürer. Dolayısıyla kuantum mekaniğinin sinir hücrelerinin işleyişinde bir rolü olması için çok uzun *decoherence* sürelerine ihtiyaç vardır. Yakın zamanlarda ortaya atılan bir hipoteze göre, bu kadar hatta çok daha uzun süre sinirsel dolanıklığı korumak mümkün olabilir. Posner molekülleri diye adlandırılan moleküllerin

Dolanıklığın temsili bir gösterimi





yirmi güne kadar kuantum dolanıklığı koruyabileceği ve sinir hücrelerinin işleyişinde rol alabileceği öne sürülüyor.

Söz konusu olan dolanıklık olduğunda, dolanık nükleer spin durumları için *decoherence* süresi daha uzundur. Ayrıca nükleer spini $\frac{1}{2}$ olan atom çekirdekleri, daha büyük nükleer spine sahip atom çekirdeklerine kıyasla daha uzun süre kuantum dolanıklığı koruyabilirler. Biyolojik sistemlerde önemli görevler üstlenen atomlar ve iyonlar arasında $\frac{1}{2}$ nükleer spine sahip iki atom vardır: fosfor ve hidrojen. Posner moleküllerinin içinde de fosfor atomları bulunuyor.

Posner molekülleri küp biçimli moleküllerdir. Bu küplerin her bir köşesinde ve merkezinde birer (toplam dokuz) tane kalsiyum atomu ve küplerin her bir yüzünde de birer (toplam altı)

tane fosfat (PO_4^{2-}) iyonu bulunur. Matthew Fisher'ın tahminlerine göre Posner moleküllerindeki fosfor atomlarının nükleer spinleri, etraflarındaki nükleer spini sıfır olan oksijen ve kalsiyum atomlarının sağladığı koruyucu kalkan sayesinde, 21 güne kadar dolanık hâlde kalabilir.

Fisher, Posner moleküllerinin nöronlarda nasıl bir işlev üstlenebileceğine dair bir mekanizma da öne sürüyor: Hücrelerin enerji kaynağı, kısaca ATP diye adlandırılan adenzin trifosfat molekülleridir. Bir ATP molekülü hidrolizle adenzin monofosfata (AMP) dönüştüğünde ortaya çıkan iki fosfat molekülündeki fosfor atomlarının nükleer spinleri dolanık hâlde olur. Bu fosfat molekülleri kalsiyum iyonlarıyla bir araya gelerek Posner moleküllerini oluşturur. Dolanık hâldeki Posner

molekülleri daha sonra farklı nöronların içine girer ve kimyasal tepkimeler yoluyla kalsiyum iyonlarını serbest bırakırlar. Ortaya çıkan kalsiyum iyonları da sahip oldukları elektrik yükü nedeniyle nöronların ateşlenmesinde kilit rol oynarlar. Bu mekanizmada dolanık Posner molekülleri yer aldığı için ortaya çıkan nöron ateşlemelerinin de dolanık olduğu söylenebilir.

Fisher ortaya attığı düşüncelerin sınanması için çeşitli deneyler öneriyor. Bu deneylerin en önemlilerinden biri hiç kuşkusuz canlı organizmalarda Posner moleküllerinin olup olmadığının tespit edilmesi. Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde Posner moleküllerine benzer kalsiyum fosfat kümelerinin vücut sıvısı benzeri sıvılarda kararlı olduğuna dair gözlemler olsa da canlı organizmalarda da Posner moleküllerinin oluştuğuna dair bir veri henüz elde edilemedi.

Bununla birlikte, kuantum bilgisayarları geliştirmeye çalışan araştırmacıların aşmaya çalıştığı sorunların en başında *decoherence* geliyor. Bu yüzden, yirmi günden daha uzun bir süre kuantum dolanıklığı koruyabilecek moleküllerin olabileceği iddiası, deneylerle doğrulanmamış olsa bile, şimdiden kuantum bilgisayarları üzerine çalışan araştırmacıların dikkatini çekmeye başladı.

Sonuç

Sinir sisteminin işleyişini açıklamak için bugün elektrikten manyetizmaya, mekanikten termodinamiğe kadar çeşitli fizik dallarından yararlanılıyor. Bu listeye yakın gelecekte kuantum fiziği de eklenebilir.

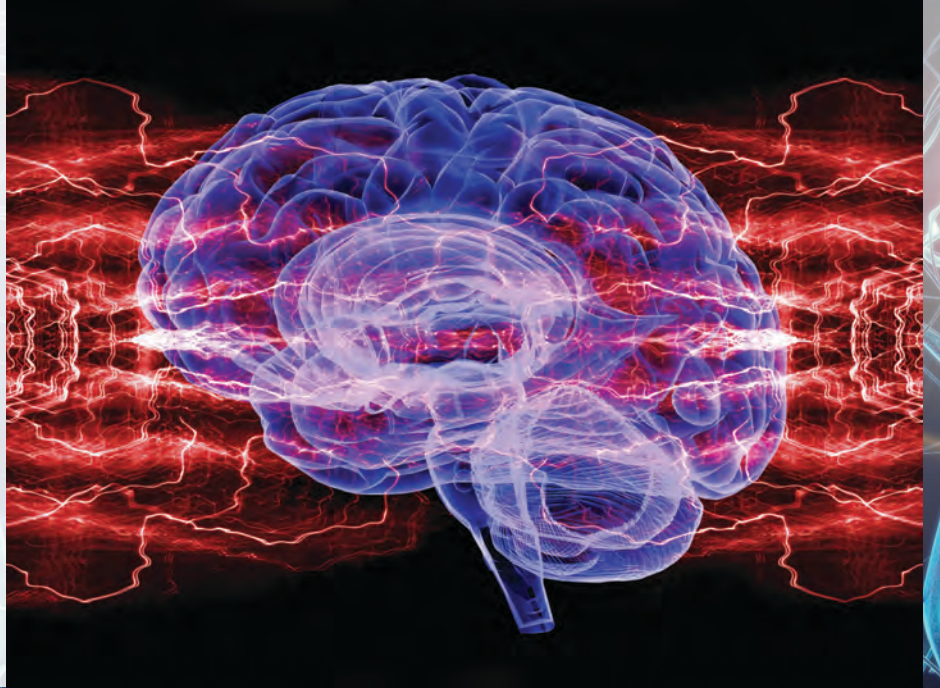
Bugüne kadar beynin ve genel olarak sinir sisteminin işleyişinde kuantum fiziğinin rolü üzerine pek çok çalışma yapılmış olsa da bu çalışmaların büyük çoğunluğunun sadece kuramsal aşamada kaldığı söylenebilir. Ancak araştırmacılar ileri sürdükleri hipotezleri test etmek için deneyler de öneriyorlar. Dolayısıyla giderek gelişen deneysel teknikler sayesinde, tıpkı fotosentezde olduğu gibi, bu hipotezlerin yakın gelecekte test edilmesi ve doğrulanması ya da yanlışlanması mümkün olabilir.

Beynin işleyişinde kuantum fiziğinin rolü olup olmadığını anlamının sadece entelektüel bir çaba olduğu söylenemez. Bu konuda yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlardan çok çeşitli alanlarda yararlanılabilir. Örneğin bugün sinirlerdeki ve duyulardaki reseptörleri hedef alan pek çok

ilaç var. Nörotransmitterlerin reseptörlere nasıl bağlandığının daha iyi anlaşılmasıyla daha etkin ilaçlar bulunabilir. Hatta kimyasal yöntemler olarak sınıflandırılmayacak yeni tedaviler de geliştirilebilir. Örneğin bugün depresyon tedavisi için kullanılan, beynin çeşitli bölgelerinin elektrik akımı ya da manyetik alanlarla uyarıldığı yöntemler var. Beynin işleyişinde kuantum fiziğinin rolünün daha iyi anlaşılmasıyla bu yöntemler iyileştirilebilir.

Işığın insanlar üzerinde fizyolojik etkileri olduğunu gösteren çeşitli çalışmalar

var. Örneğin, yarıiletken nanoparçacıklardan yayılan ışıkla Parkinson ve Alzheimer hastalığıyla ilişkili protein topaklarının çözülebileceği bulundu; kırmızı ışık tedavisiyle mitokondrideki hasarlardan kaynaklanan görme kaybının azaltılabileceği anlaşıldı; kırmızı ya da kızılötesi lazer ışığıyla çeşitli beyin sorunlarının tedavi edilebileceği, hatta dikkat, hafıza ve öğrenmenin geliştirilebileceği gösterildi. Sinir sistemindeki rolünün daha iyi kavranmasıyla, ışıktan tedavi amacıyla ne ölçüde yararlanılabileceği daha iyi anlaşılabilir. ■



Kaynaklar

- Adams, Bentley ve Petruccione, Francesco, "Quantum effects in the brains: A review", *AVS Quantum Science*, Cilt 2, Makale No: 022901, 2020.
- Adams, Bentley ve Petruccione, Francesco, "Do quantum effects play a role in consciousness", *Physics World*, <https://physicsworld.com/a/do-quantum-effects-play-a-role-in-consciousness/>, 2021.