

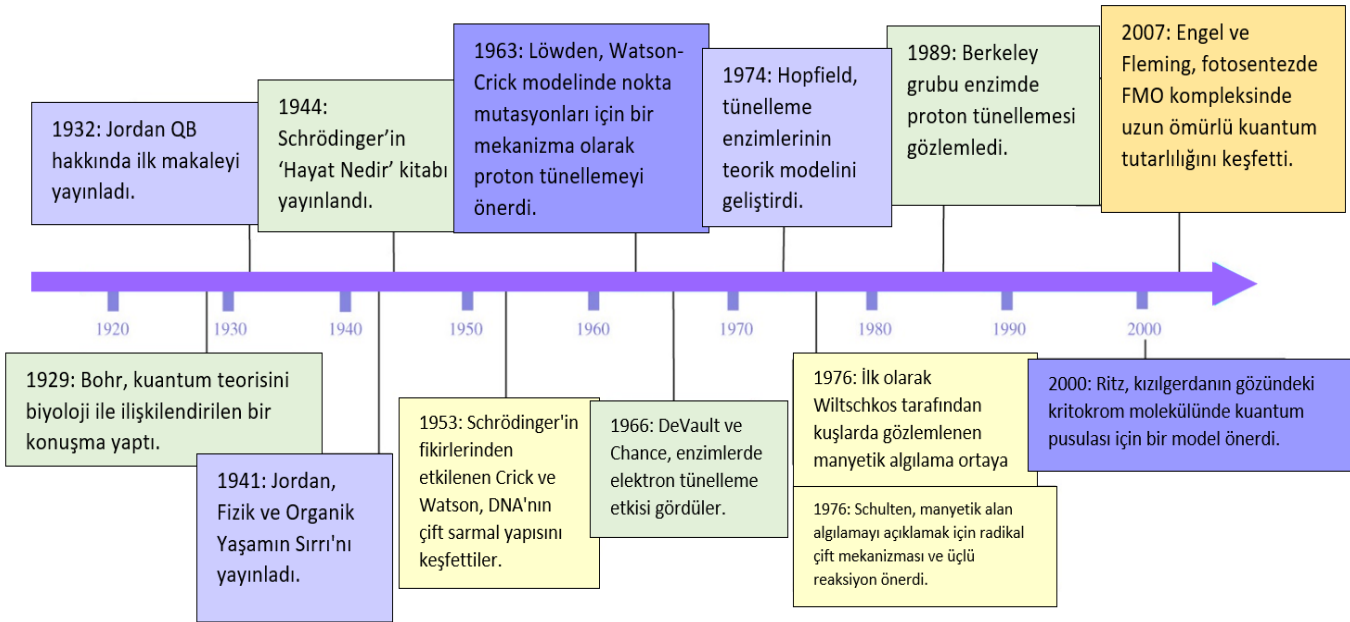
Biyolojik Sınırdaki Mekanik: Kuantum Biyolojisi

Elif Duymaz^Y, Fatma Duran^E.

Kuantum

Modern bilim prensiplerinde enerjinin veya maddenin mümkün olan en küçük yapısı, “*Latince adı miktar*” anlamına gelen **kuantum** kavramı ile adlandırılmaktadır¹. **Max Planck**’ın cisimlerin sıcaklık değişimleri sonrasında renklerinin de dönüşüme uğramasının sebebini merak etmesiyle başlayan serüven, bilim insanlarının farklı alanlardaki çalışmalarıyla yol almış ve geliştikçe teknolojinin yönelimini çeşitlendirmiştir². Kuantum, canlılık belirtisi kabul edilen tüm süreçlerde kimyasal değişimlerin, enerji dönüşümlerinin ve aktarımlarının atomdan daha küçük, parçacık düzeyinde sebep olduğu fonksiyonel

değişimleri açıklamada bilime katkı sunmaktadır³. Aynı zamanda, atom ve atom altı parçacık boyutlarında doğanın fiziksel davranışlarını tanımlama gayreti içinde olan bir çalışma alanıdır⁴. Klasik fizikteki kanunların, makro ölçekte limitleri çerçevesinde açıkladığı veya prensipleri gereği belirsiz olarak nitelendirdiği pek çok olayın hem **dalga** hem de **parçacık** özelliklerini kullanarak anlaşılmasında önemli rol oynamaktadır⁵. **Schödinger** denkleminin olası fiziksel çözümleri için sunulan doğrusal denklem sistemleri, dalga fonksiyonlarının oluşturduğu ve **Hilbert** adı verilen sonsuz boyutlu **vektör uzayda** üst üste gelmesi ilkesini temel almaktadır^{6,7,8}.



Şekil 1. 20-21. yüzyıllarda Kuantum Biyolojinin gelişmesinde yer alan önemli olayları gösteren zaman çizelgesidir⁹. QB: Kuantum Biyoloji, FMO: Fenna-Matthews-Olson

Şekil 1’de belirtildiği üzere uzun bir geçmişte olan kuantum, çeşitli evrimsel dokunuşlarla epey yol katetmiş ve bilime çeşitli açılardan yön vermiştir^{9,10}. Kuantum mekanik; fizik,

matematik, tıp, biyoloji ve kimya gibi pek çok farklı bilim dalının olgunlaşmasında ve sabit kurallı duvarların aşılmasında basamak oluşturmuştur¹¹. Bu derleme yazısında

kuantumun daha çok canlılık ve biyolojik tabanlı süreçlerin çözölen gizemlerindeki rollerinden bahsedilecektir.

Kuantum Biyolojisi

Niels Bohr, Uluslararası Işıık Terapisi Kongresi'nde yaptığı konuşmasında, kuantumun canlılardaki biyolojik süreçlerde bilimsel bir anlayış olup olmadığını sorgulaması sayesinde kuantum biyolojisinin temelleri atılmıştır¹². Kuantum biyolojisi, istatistiksel olarak termal denge durumlarında izole edilmiş biyolojik sistemlerin anlaşılması için kullanılan temel kimya ve termodinamik yasalar üzerine kurulu biyoloji kavramlarına göre daha açıklayıcı bilgiler elde edilmesini sağlamaktadır¹³. Tutarlı bir fiziksel tablo sunmak için zaman ve uzunluk ölçeklerinin üzerinde yapılan çalışmalar, kuantum **süperpozisyon, dolanıklık ve tünelleme** gibi kavramların oluşmasını mümkün kılmaktadır. Dolanıklık kavramı, kuantum mekaniğı başlığı altında incelenmekte ve klasik fizik kavramlarıyla açıklanamayan benzer iki parçacığın farklı yerlerdeyken aynı anda birbirlerini etkileyerek benzer davranışları göstermesi olarak tanımlanmaktadır¹⁴. Süperpozisyon ise iki yerde birden bulunan parçacığın konumunu belirtmek için kullanılan kuantum kavramıdır¹⁵. Dalga özelliğı olan bu parçacık süperpozisyon durumunda iken çekirdeğinin hem içinde hem de dışında olabilme özelliğine sahiptir. Bu ilginç durum parçacığın bulunduğu yerden ötekine geçme imkanı sağlamakta ve bu olay kuantum

mekaniğinde tünelleme olarak ifade edilmektedir¹⁶.

Kuantum Biyolojisi Model Sistemleri

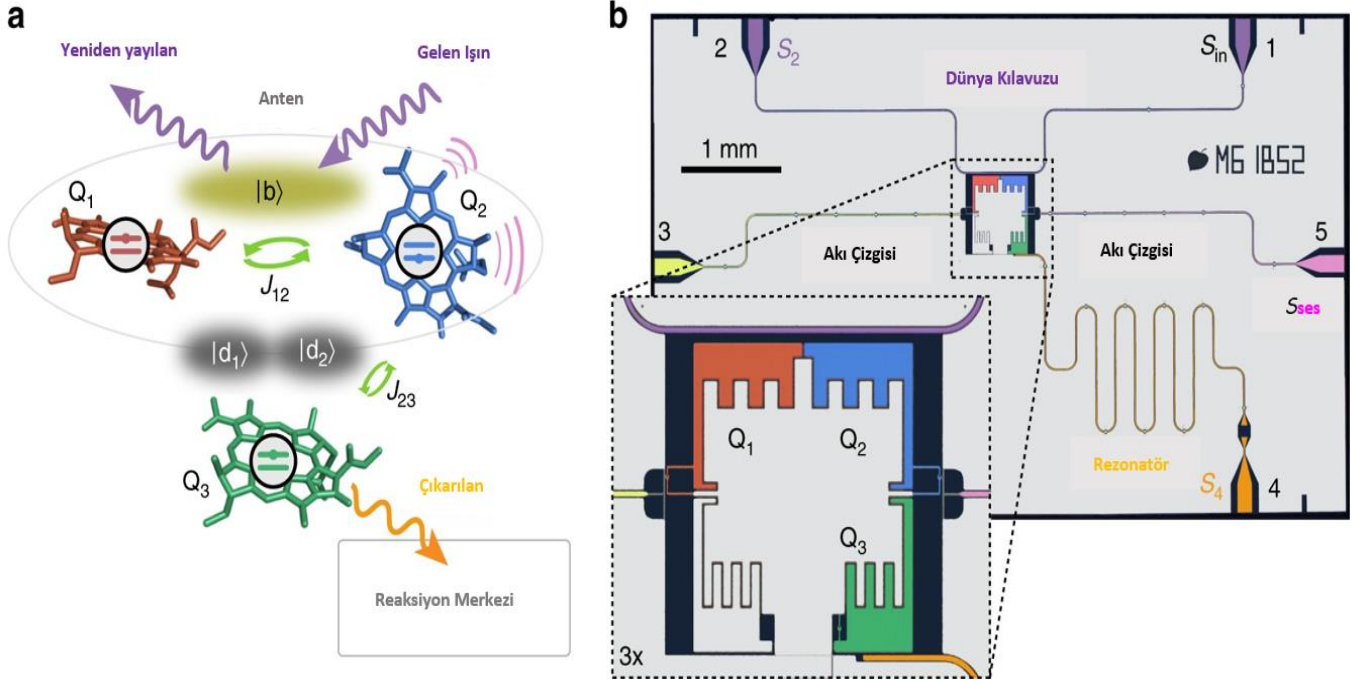
Klasik fizikte açıklanamayan pek çok olgu, biyoloji ve yaşam bilimlerine başvuru bu çağda kuantum biyolojisi için teşvik sağlamakta ve bilim insanları için büyük önem taşımaktadır. En bilinen dinamik sistemlerden biri taşıma süreçleridir¹⁷. Elektron, proton ve iyonların hareketlerini içermekte ve temelde enerji uyarım ve depolama transferi ilişkilerinin kontrolünde yeni bir araştırma alanı sunmaktadır¹⁸.

1. Fotosentez

Fotosentez olayı taşıma süreçleri içerisinde en çok bilinen mekanizmalardan biridir¹⁹. Güneş ışığını kaynak alan bu döngü, kaynak enerjisini çeşitli formlara dönüştürme ve canlılığın devamını sağlama görevini üstlenmektedir²⁰. Süreç, ışık enerjisinin soğurulması ile başlamaktadır. **Işıık hasadı** (light-harvesting) adı verilen bu adımda, klorofiller tarafından güneş enerjisi toplanmaktadır²¹. Klorofil molekülü, yapısındaki karbon (C) ve hidrojen (H) atomlarından oluşan bir iskelet ve bu iskeletin bağılı olduğı merkezinde bir magnezyum (Mg) atomu bulunan yapıya sahiptir. Bu şekildeyken Mg atomunun çevresinde bulunan azot (N) ve C atomları sebebiyle son katmanında bir elektron yer almaktadır²². Güneşten aldığı ışınlardaki fotonun enerjisi bu elektrona etki ettiğinde atomdan uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Atomdan uzaklaşan elektronun atomda yarattığı pozitif yüke sahip bir boşluk ve

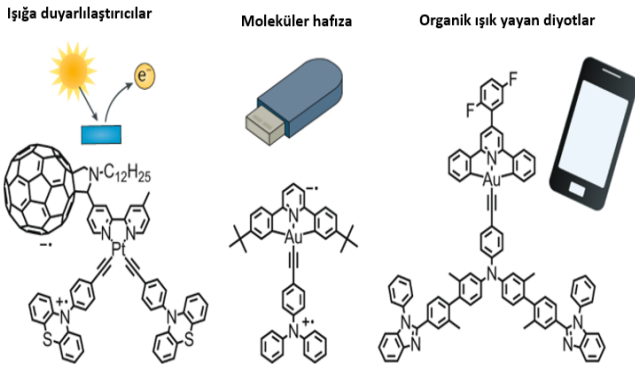
gerçekteki varlığı birlikte **eksiton** adı verilen yapıyı oluşturmaktadır²³. Nanosaniyeler seviyesindeki sonlu yaşam süreleri boyunca enerji depolayabilen eksitonlar, kararlı yapıya erişmek için fotonlar aracılığıyla reaksiyon merkezine ulaşma çabasıdır²⁴. Kuantum tam da bu noktada sürecin işleyişi hakkında

bilim insanlarının öngörülerini açıklığa kavuşturmaktadır. Merkeze ulaşma sürecinde kaybolmadan fotosentez aşamalarının verimli bir şekilde oluşmasını sağlayan eksitonların yollarını nasıl bulduğu kuantum süperpozisyon kavramı ile açıklanmaktadır²⁵.



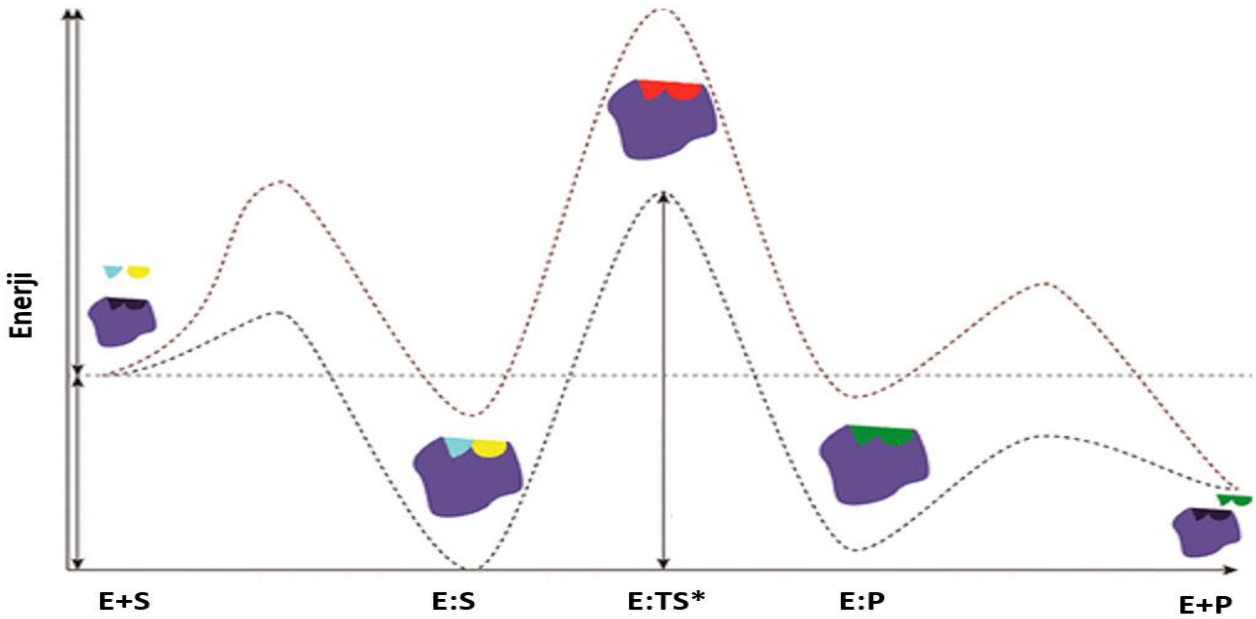
Klorofil moleküllerinin yaptığı bileşiklerde kuantum tutarlılığının gözlemlenmesinin ardından, fotosentetik bakteriler üzerinde yapılan bir deneyde uyarılmış elektronun aynı anda birden fazla gidebileceği yol haritası olduğu ve en hızlı rotayı kullandığı tespit edilmiştir. Temeli eksitonların çalışma prensibine dayanan **yapay fotosentez** çalışmaları ise kuantum biyolojisindeki son

gelişmeler içerisinde yer almaktadır. Katalizör kararsızlıkları, daha hızlı ışık emilimi, enerji transferi ve daha verimli hızlı ulaşılan reaksiyon merkezi tasarımı üzerinde çalışılmaktadır^{27,28}.



Şekil 3. Elektron transfer sistemlerinin kullanım alanları²⁹. Fotosentez sürecinde elektron süperpozisyon ve eşzamanlılık ilkesi ile muazzam bir depolama yapan mekanizmanın sıra dışı mantığı günümüzde farklı endüstri alanlarında fikir kaynağı olmuştur. Bataryaların hızlı depolama ve uzun kullanım ömrü prensibine dayanan yeni piller oluşturulmuştur.

2. Enzim Katalizi



Şekil 4. Reaksiyonda aktivasyon enerjisinin sebep olduğu enzim-substrat kompleksinin davranışdır³⁴. E: Enzim, S: Substrat, T: Sıcaklık, P: Ürün.

Dinamik sistemlerin yanı sıra, yaşam boyu tanık olunan çevresel ve çok boyutlu olaylardaki algılamalarımız da seçimlerimizde yön gösterici olmakta ve tabi ki bu doğal süreç sonucundaki seçimlerin de açıklanabilir yanları araştırılmaktadır³⁵. Çevredeki küçük değişimler organizmaların işleyişinde makroskopik

Kataliz süreçlerinde hücresel fonksiyonlar için vazgeçilmez olan enzimler, düşük biyokimyasal reaksiyonlarda katabolizmayı hızlandırmada görev almaktadır³⁰. Genel çalışma prensipleri proton ve elektronların bağlanmasına dayanmaktadır³¹. Olası farklı yapıları sayesinde bir proteinin yerel titreşim hareketlerinin olup olmasını tespit edebilmektedir³². Enzimler, kuantum tünelleme ile molekülün bir bölgesinden bir başka bölgesine elektron veya proton gibi atom altı parçacıklar aktarılabilmektedir; böylece protonlar enerji bariyerini aşmak zorunda kalmamaktadır³³.

değişimlere denk gelebilmektedir. Günümüzde bu değişimleri tespit edecek kadar hassas kuantum düzeyde **algılama** mekanizmaları, kuantum biyolojisi ile incelenmektedir³⁶.

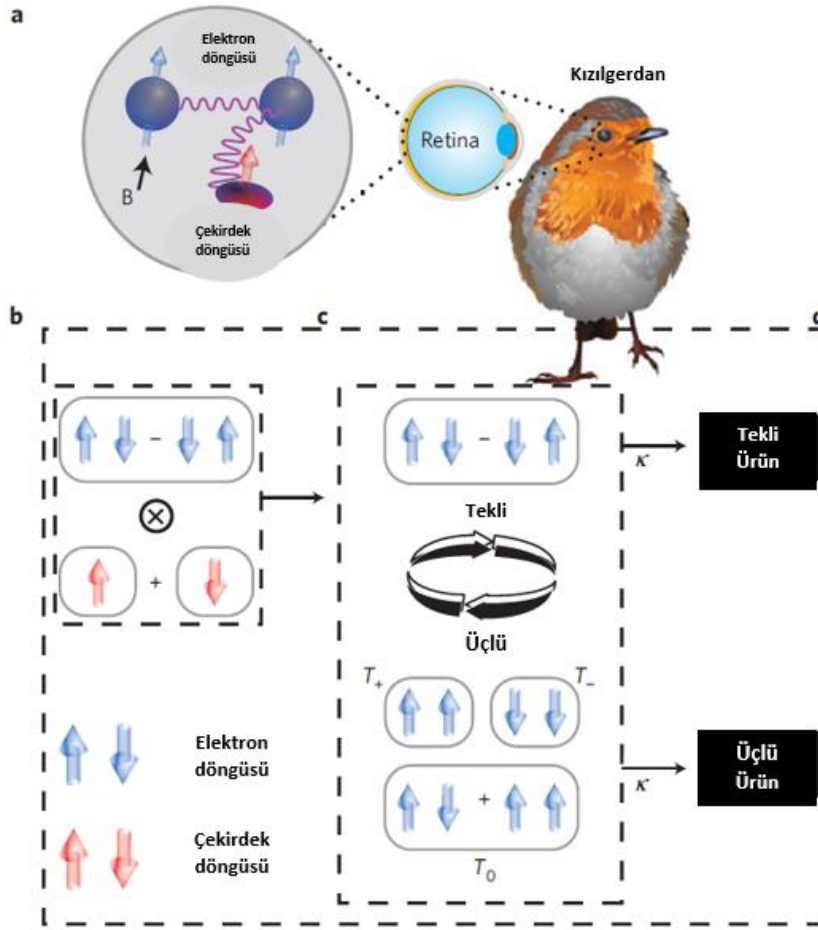
3. Görme (Vision)

Fotokimyasal işlemlere en iyi örneklerden biri de görmedir. Fermi'nin çalışmalarıyla edinilen bulgularla tanımlanan görme olayı, enerji ve elektronların transferi temeline dayanmaktadır^{37,38}. Işığa duyarlı bir sinir katmanından oluşan retina, ilk olarak korneadan ve sonrasında lensten kırılarak gelen fotonların enerjisini fotoreseptörler (**çubuklar** ve **koniler**) yardımıyla elektrokimyasal enerjiye dönüştürmekte ve görme sinirleri ile beyne iletmektedir³⁹. Planck sabiti ve ışık frekansının çarpımı kabul edilen bir kuantum sayısı, kullanılabilir minimum ışık enerjisi miktarına denk gelmektedir. Bir kuantum tarafından uyarılan çubuğun ancak bir veya daha fazla çubuğun eş zamanlı yardımıyla iki kutuplu bir hücreyi uyarabileceği gözlemlenmiştir⁴⁰. Işık hissini üretmek için uyarılmak durumunda kalan çubuklar üzerinde yapılan bir deneyde, uyarılma miktarlarının kesin olarak hesaplanamasa da retinanın duyarlılığına bağlı olmayıp uyarının enerjisindeki dalgalanmalara bağlı olduğu ispatlanmıştır⁴¹. Yakın tarihli çalışmalarda, güvenilir ve hassas kuantum cihazların

temellerini atabilecek kuantum noktalarının özelliklerinin de kullanılabileceği mekanizmalar önerilmektedir. Böylece medikal görüntüleme ve hücre biyolojisi çalışmalarına esneklik sağlamak hedeflenmektedir^{42,43}.

4. Dış Manyetik Alan

Maeda ve arkadaşları, yaklaşık 50 tür canlının (kuşlar, böcekler, bazı memeliler, vb) oryantasyonları ve yön bulmaları için dünyanın **manyetik alanını** kullandığını ve bu manyetik alanın radikal bir çiftin ömrünü etkilediğini yapay fotokimyasal reaksiyon çalışmalarında göstermiştir. Çalışmanın bulguları henüz tam olarak sistemleri anlaşılamayan türlerin detaylı olarak incelemesi için fizibilite çalışması niteliğindedir⁴⁴. Nitekim, Benjamin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da tek bir fotonun emilimi ile oluşan iki farklı elektronun kuantum dolanıklığı durumunda var olabileceği öne sürülmüştür. Böylece bir spinin (parçacığın açısal momentumu) oryantasyonunun diğer tarafa bağlı olarak tutarlılık gösterdiği ve radikallerin uzaklıklarla ilişkili olmadığı, ancak dolanıklığın sıcaklıkla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir⁴⁵.



Şekil 5. Avaian (kuş) kuantum pusulası gösterimidir. Manyetik alan algılama için radikal çift mekanizma üzerinde yapılan bir çalışmada göç davranışının temeli kuantum dolanıklılığı ile açıklanmaktadır⁴⁶. a. Retinada yer alan kriptokrom proteinlerinin kimyasal döngüsü gösterilmiştir. Üç adımdan oluşan bu mekanizmada; b. Radikal çifti oluşturan molekülün ışığın gelmesiyle elektron transferi olmaktadır. c. Tekli ve üçlü (T ile gösterilenler) elektron dönüş durumları dış ve dahili manyetik alanlar oluşturmaktadır. d. Biyolojik olarak sırasıyla tespit edilebilir kombinler gösterilmiştir.

Pusula işlevi gören yapıların manyetik alan algılama bulmacası, **zebra ispinozu** ve **kızılgerdan** kuş türleri üzerinde yapılan araştırmalarla göç merkezini muazzam bir kroki kullanarak bulan sürüler için haritalama olduğunu göstermiştir⁴⁷. Yakın tarihli bir çalışmada, kuşların retinasında yer alan ışığa duyarlı bir proteinin manyetik alan sezisine sahip olduğu ve bu sayede mekânsal hizalama hakkında yönlendirme yaptığı vurgulanmıştır. **Sirkadiyen ritimdeki** negatif geri bildirim döngüsünde yer aldığı bilinen **kriptokrom** proteinleri (**Cry1**, **Cry2** ve **Cry4**) kullanarak,

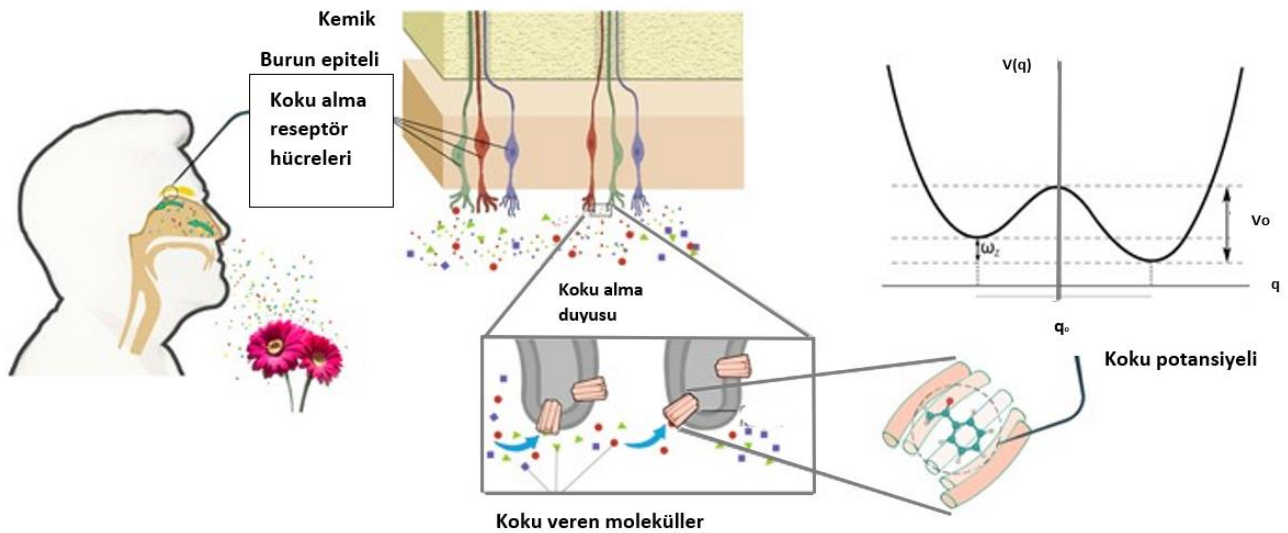
gen ekspresyonları araştırılmıştır⁴⁸. Göçmen kuşların retinasında bulunan ve biyolojik saat döngüsünü etkileyen, hormonal düzenlenme, vücut ısı ve sıvı basıncı ayarlamasında önemli rol alan Cry4 proteini, deney sürecinde diğer proteinlerin aksine sabit seviyelerde ifade edilmesi sebebiyle en olası aday olarak belirlenmiştir^{48,49}. Işıkla uyarıldığında bir molekülden diğerine elektron geçişine olanak sağlanmasında iki adet eşlenmemiş elektronun ortaya çıkmasına sebep olan Cry4, manyetik alanlarla etkileşimi ve bu sayede de kuşların

manyetik alanı algılayarak yön bulmasını sağlamaktadır⁵⁰.

5. Koku Alma (Olfaction)

Turin ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, doğal yaşantımızda canlı veya cansız varlıklarla kurduğumuz etkileşimlerde önemi büyük olan koku duyusunun, molekül ile reseptör arasında bir şekilsel ilişki aracılığıyla beyne iletilerek bir tepki mekanizması oluşturması prensibinin doğru olmadığını kanıtlanmıştır⁵¹. Basit bir molekül içerisindeki **H** atomları, **döteryum** (hidrojenin bir izotopu)

atomları ile değiştirildiğinde şekli korunan ancak farklı koku elde edilmesine sebep olan bir molekül elde edilmiştir. Çalışmanın bulguları, molekül şekline bağlı olduğu sanılan koku alma kuramının aksine molekülün kimyasal yapısı ve içerdiği bağların arasındaki titreşim hareketlerine bağlı olduğunu göstermiştir⁵¹. Ek olarak, yapılan çalışmalarda koku molekülünün reseptöre bağlanmasının ardından moleküldeki bir elektronun, reseptörün olduğu bölgeye kuantum tünelleme yolu ile geçip beyne sinyal ilettiği gösterilmiştir^{52,53}.



Şekil 6. Kokuların burun boşluğunda yer alan koku reseptör hücrelerinde absorbe edilmesi şemasıdır⁵⁴. Elastik olan ve olmayan elektronların farklı faktörler altında (sıcaklık, basınç gibi) hassasiyet eşikleri ve duyarlılıkları açısından kuantum tünelleme mekanizmasındaki davranışları incelenmiş ve izotopik koku moleküllerinin potansiyel koku grafiği şekilde gösterilmiştir.

6. DNA Mutasyonu

DNA replikasyonu sırasında karşılıklı gelmesi gereken tamamlayıcı baz çiftlerinin karışıklığa uğraması ve **nokta mutasyonu** olarak adlandırılan DNA hasarının nedeninin de kuantum tünelleme ile açıklanabileceği düşünülmektedir⁵. Replikasyon sırasında H^{+1} bağları, yeni çiftlerini oluşturmak için önce

parçalanmakta ve ayrılan parçalara kararlı protonlar geçiş sağlamaktadır⁵⁶. Bu geçiş esnasında hidrojen bağı oluşturacak proton, kuantum tünelleme ile kendi baz çiftinin dışında bir bölgeye denk gelebilmekte veya süperpozisyon durumunda olup iki yerde birden bulunabilmektedir⁵⁷.

Bakterilerin incelendiği bir çalışmada, hidrojen çekirdeği olan bir popülasyon kültürlenmiş ve mutasyon üreten hücrelerle ölçüm yapılmıştır. Deney sonucunda hidrojen çekirdeğindeki protonlar tünel yapıp mutasyon üretirken, döteryumun tünelden geçmesi zor olduğu için mutasyon üretmemiştir⁵⁸. Elde edilen bulgular, taşınan genetik bilgiler ve değişikliklerinde, yaşam koşullarına göre hayatta kalma ve doğal seçimde **kuantum tutarlılık** süreçlerinin önemli olduğunu vurgulamaktadır⁵⁹.

Diğer Çalışmalar

Fizyolojide gün geçtikçe kuşkusuz merakları ve dikkatleri üzerine çekmekte başarılı olan konu başlıklarından biri de beynin zihin ve bilinç arasındaki uyum mekanizmasıdır⁶⁰. Yapılan çalışmalarda bilinç ile algılayan ve karşılaştırmalı olarak öğrenme yapabilen memelilerde, bilincin uyarılara karşı kullandığı reseptörler araştırılmıştır⁶¹. Uyku-uyanıklık fonksiyonlarının meydana getirdiği kimyasal etkileşimler ve nörotransmitter örüntüleri kuantum etkileşimleriyle ortak çalışmalarda incelenmektedir^{62,63}. Sinir ağ araştırmaları, suni nöral yapılar geliştirme ve iyonik (fosfat ve kalsiyum) aktarımların öğrenme süreçlerinde, davranış yapılarında ve hafıza tekniklerindeki performanslarını makine öğrenmesi algoritmalarıyla incelenmektedir⁶⁴. Nöron ateşlemenin kuantum korelasyonları analiz edilmekte ve elektronların spin hareketleriyle bilinç okuma deneyleri yürütülmektedir^{65,66}. Bunlar dışında klasik

fiziğin cevaplayamadığı, mitokondriyal solunum, oksidatif stres, kalsifikasyon, sinyal iletimleri, D vitamini üretimi, ilaç direnci ve metabolizma işlevleri gibi pek çok biyolojik süreçte kuantum biyolojisine başvurulması gerektiği öngörülmektedir⁶⁷.

Sonuç

Kuantum biyolojisinin de hizmet ettiği kuantum mekanikleri, çeşitli algoritmaların (en yakın komşu sınıflandırma, K-means kümeleme, Markov modülleri, nöral ağlar ve derin öğrenme) simülasyon yapımında, süreç optimizasyonunda ve güvenlik sistemleri için şifrelemede, lojistik pazarlama endüstrilerinde tedarik işleyişi ve rekabetçi faktörlerin belirlenmesinde, finansal ürün portföyleri için kar/zarar tahmin çizelgeleri oluşturmada ve risk yönetimlerinde kullanılmaktadır⁶⁸⁻⁷². Hayatımızın sıradan parçaları haline gelmiş pek çok olayın perde arkasının aydınlanmasında kuantumun yol gösterici olduğu düşünülmektedir. Kuantum inanılması ve inşası oldukça zor bir yol olsa da doğadaki sistemler ve döngülerdeki gizemi çözmemiz için doğru bir anahtar olacaktır. Mevcut ve olası süreçler için tahmin ve açıklama gerektiren pek çok mantıksal kuramı oluşturabilecek potansiyeldedir ve bu potansiyeli desteklemek bilim perspektifini artıracak bir temel adımdır. Fiziksel süreçlerin analizlerini mümkün kılma ve tıp alanındaki teşhis-tedavi olanaklarını genişletme niteliğindedir.

“Kuantum teorisi karşısında hayrete düşmemiş bir kimse, onu anlamamış demektir.” Niels Bohr

Referanslar:

1. M. Gieseke, R. L. (2021). Plasmons: untangling the classical, experimental, and quantum mechanical definitions. *Materials Horizons*.
<https://doi.org/10.1039/D1MH01163D>
2. Scofield, D. F., & Collins, T. C. (2018). Implications of causality for quantum biology – I: topology change.
<https://doi.org/10.1080/00268976.2018.1438675>, 116(12), 1624–1634.
<https://doi.org/10.1080/00268976.2018.1438675>
3. Lee, J., Jeon, D.-J., & Yeo, J.-S. (2021). Quantum Plasmonics: Energy Transport Through Plasmonic Gap. *Advanced Materials*, 2006606.
<https://doi.org/10.1002/ADMA.202006606>
4. Fujisaki, H., Yagi, K., Kikuchi, H., Takami, T., & Stock, G. (2017). Vibrational energy transport in acetylbenezonitrile described by an ab initio-based quantum tier model. *Chemical Physics*, 482, 86–92.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMPHYS.2016.09.010>
5. Liang, X., Liu, W.-Y., Lin, P.-Z., Guo, G.-C., Zhang, Y.-S., & He, L. (2018). Solving frustrated quantum many-particle models with convolutional neural networks. *Physical Review B*, 98(10), 104426.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.104426>
6. Clark, T., Murray, J. S., & Politzer, P. (2018). A perspective on quantum mechanics and chemical concepts in describing noncovalent interactions. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(48), 30076–30082.
<https://doi.org/10.1039/C8CP06786D>
7. da Costa, B. G., & Borges, E. P. (2019). Nonlinear quantum mechanics in a q-deformed Hilbert space. *Physics Letters A*, 383(23), 2729–2738.
<https://doi.org/10.1016/J.PHYSLET A.2019.05.056>
8. Mostafazadeh, A. (2018). Energy observable for a quantum system with a dynamical Hilbert space and a global geometric extension of quantum theory. *Physical Review D*, 98(4), 046022.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.046022>
9. McFadden, J., & Al-Khalili, J. (2018). The origins of quantum biology. *Proceedings of the Royal Society A*, 474(2220).
<https://doi.org/10.1098/RSPA.2018.0674>
10. Torday, J. S. (2018). Quantum Mechanics predicts evolutionary biology. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 135, 11–15.
<https://doi.org/10.1016/J.PBIOMOL BIO.2018.01.003>
11. Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & Joolingen, W. R. van. (2018). Key topics for quantum mechanics at secondary schools: a Delphi study into expert opinions.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1550273>, 41(3), 349–366.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1550273>
12. Faye, J., & Jaksland, R. (2021). What Bohr wanted Carnap to learn from quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 88, 110–119.
<https://doi.org/10.1016/J.SHPSA.2021.05.010>
13. Kosloff, R. (2019). Quantum thermodynamics and open-systems modeling. *The Journal of Chemical Physics*, 150(20), 204105.
<https://doi.org/10.1063/1.5096173>
14. Chandiramouli, R. (2018). Antimonene nanosheet device for detection of explosive vapors – A first-principles inspection. *Chemical Physics Letters*, 708, 130–137.
<https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2018.08.016>
15. Szczepanik, D. W., Zak, E., & Mrozek, J. (2017). From quantum superposition to orbital communication. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1115, 80–87.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPTC.2017.05.041>
16. Schreiner, P. R. (2020). Quantum Mechanical Tunneling Is Essential to Understanding Chemical Reactivity. *Trends in Chemistry*, 2(11), 980–989.
<https://doi.org/10.1016/J.TRECHM.2020.08.006>
17. Wang, L., Allodi, M. A., & Engel, G. S. (2019). Quantum coherences reveal excited-state dynamics in biophysical systems. *Nature Reviews Chemistry* 2019 3:8, 3(8), 477–490.
<https://doi.org/10.1038/s41570-019-0109-z>
18. Alighanbari, S., Giri, G. S., Constantin, F. L., Korobov, V. I., & Schiller, S. (2020). Precise test of quantum electrodynamics and determination of fundamental constants with HD⁺ ions. *Nature* 2020 581:7807, 581(7807), 152–158.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2261-5>
19. Paunov, M., Koleva, L., Vassilev, A., Vangronsveld, J., & Goltsev, V. (2018). Effects of Different Metals on Photosynthesis: Cadmium and Zinc Affect Chlorophyll Fluorescence in Durum Wheat. *International Journal of Molecular Sciences* 2018, Vol. 19, Page 787, 19(3), 787.
<https://doi.org/10.3390/IJMS19030787>
20. Yanjuan Li, Wei Li, Haoran Zhang, Yingliang Liu, Li Ma, & Bingfu Lei. (2019). Amplified light harvesting for enhancing Italian lettuce photosynthesis using water soluble silicon quantum dots as artificial antennas. *Nanoscale*, 12(1), 155–166.
<https://doi.org/10.1039/C9NR08187A>
21. Arp, T. B., Kistner-Morris, J., Aji, V., Cogdell, R. J., Grondelle, R. van, & Gabor, N. M. (2020). Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light-harvesting spectra. *Science*, 368(6498), 1490–1495.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABA6630>
22. Peng, Y. Y., Liao, L. L., Liu, S., Nie, M. M., Li, J., Zhang, L. D., Ma, J. F., & Chen, Z. C. (2019). Magnesium Deficiency Triggers SGR-Mediated Chlorophyll Degradation for Magnesium Remobilization. *Plant Physiology*,

- 181(1), 262–275.
<https://doi.org/10.1104/PP.19.00610>
23. Kim, Y., Bertagna, F., D'Souza, E. M., Heyes, D. J., Johannissen, L. O., Nery, E. T., Pantelias, A., Jimenez, A. S.-P., Slocombe, L., Spencer, M. G., Al-Khalili, J., Engel, G. S., Hay, S., Hingley-Wilson, S. M., Jeevaratnam, K., Jones, A. R., Kattnig, D. R., Lewis, R., Sacchi, M., ... McFadden, J. (2021). Quantum Biology: An Update and Perspective. *Quantum Reports* 2021, Vol. 3, Pages 80-126, 3(1), 80–126.
<https://doi.org/10.3390/QUANTUM3010006>
24. Uddin, S. Z., Rabani, E., & Javey, A. (2020). Universal Inverse Scaling of Exciton–Exciton Annihilation Coefficient with Exciton Lifetime. *Nano Letters*, 21(1), 424–429.
<https://doi.org/10.1021/ACS.NANO.1ETT.0C03820>
25. Brookes, J. C. (2017). Quantum effects in biology: golden rule in enzymes, olfaction, photosynthesis and magnetodetection. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2201).
<https://doi.org/10.1098/RSPA.2016.0822>
26. Potočník, A., Bargerbos, A., Schröder, F. A. Y. N., Khan, S. A., Collodo, M. C., Gasparinetti, S., Salathé, Y., Creatore, C., Eichler, C., Türeci, H. E., Chin, A. W., & Wallraff, A. (2018). Studying light-harvesting models with superconducting circuits. *Nature Communications* 2018 9:1, 9(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03312-x>
27. Dogutan, D. K., & Nocera, D. G. (2019). Artificial Photosynthesis at Efficiencies Greatly Exceeding That of Natural Photosynthesis. *Accounts of Chemical Research*.
<https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.9B00380>
28. Zhang, J. Z., & Reisner, E. (2019). Advancing photosystem II photoelectrochemistry for semi-artificial photosynthesis. *Nature Reviews Chemistry* 2019 4:1, 4(1), 6–21.
<https://doi.org/10.1038/s41570-019-0149-4>
29. Yam, V. W.-W., Chan, A. K.-W., & Hong, E. Y.-H. (2020). Charge-transfer processes in metal complexes enable luminescence and memory functions. *Nature Reviews Chemistry* 2020 4:10, 4(10), 528–541.
<https://doi.org/10.1038/s41570-020-0199-7>
30. Nguyen, V., Wilson, C., Hoemberger, M., Stiller, J. B., Agafonov, R. V., Kutter, S., English, J., Theobald, D. L., & Kern, D. (2017). Evolutionary drivers of thermoadaptation in enzyme catalysis. *Science*, 355(6322), 289–294.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAH3717>
31. Le, J. M., & Bren, K. L. (2019). Engineered Enzymes and Bioinspired Catalysts for Energy Conversion. *ACS Energy Letters*, 4(9), 2168–2180.
<https://doi.org/10.1021/ACSENERGYLETT.9B01308>
32. Jones, H. B. L., Crean, R. M., Matthews, C., Troya, A. B., Danson, M. J., Bull, S. D., Arcus, V. L., Kamp, M. W. van der, & Pudney, C. R. (2018). Uncovering the Relationship between the Change in Heat Capacity for Enzyme Catalysis and Vibrational Frequency through Isotope Effect Studies. *ACS Catalysis*, 8(6), 5340–5349.
<https://doi.org/10.1021/ACSCATAL.8B01025>
33. Delgado, M., Görllich, S., Longbotham, J. E., Scrutton, N. S., Hay, S., Moliner, V., & Tuñón, I. (2017). Convergence of Theory and Experiment on the Role of Preorganization, Quantum Tunneling, and Enzyme Motions into Flavoenzyme-Catalyzed Hydride Transfer. *ACS Catalysis*, 7(5), 3190–3198.
<https://doi.org/10.1021/ACSCATAL.7B00201>
34. Sousa, S. F., Calixto, A. R., Ferreira, P., Ramos, M. J., Lim, C., & Fernandes, P. A. (2020). Activation Free Energy, Substrate Binding Free Energy, and Enzyme Efficiency Fall in a Very Narrow Range of Values for Most Enzymes. *ACS Catalysis*, 10(15), 8444–8453.
<https://doi.org/10.1021/ACSCATAL.0C01947>
35. Li, T., Tang, H., Zhu, J., & Zhang, J. H. (2019). The finer scale of consciousness: quantum theory. *Annals of Translational Medicine*, 7(20), 585–585.
<https://doi.org/10.21037/ATM.2019.09.09>
36. Ham, B. S. (2021). Macroscopic and deterministic quantum feature generation via phase basis quantization in a cascaded interferometric system. *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 1–7.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-98478-8>
37. Lopes, V., & Anda, E. V. (2019). Spin polarized current in a quantum dot connected to a spin-orbit interacting Fermi sea. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 128, 188–195.
<https://doi.org/10.1016/J.JPCS.2018.03.038>
38. Ullah, K., & Saif, F. (2018). Normal mode splitting in quantum degenerate Fermi gas in nanocavity. *The European Physical Journal D* 2018 72:11, 72(11), 1–8.
<https://doi.org/10.1140/EPJD/E2018-90079-9>
39. Vinberg, F., Palczewska, G., Zhang, J., Komar, K., Wojtkowski, M., Kefalov, V. J., & Palczewski, K. (2019). Sensitivity of Mammalian Cone Photoreceptors to Infrared Light. *Neuroscience*, 416, 100–108.
<https://doi.org/10.1016/J.NEUROSCIENCE.2019.07.047>
40. Huang, J., Wu, D., Cai, Y., Xu, Y., Li, C., Gao, Q., Zhao, L., Liu, G., Xu, Z., & Zhou, X. J. (2020). High precision determination of the Planck constant by modern photoemission spectroscopy. *Review of Scientific Instruments*, 91(4), 045116.
<https://doi.org/10.1063/1.5129140>
41. Alao, O. D., Joshua J V, & Somefun A A. (2019). Human Ability Improvement with Wireless Sensors in Human Computer Interaction. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 8, 331–339.
www.ijcat.com

42. Storm, J.-H., Hömmen, P., Drung, D., & Körber, R. (2017). An ultra-sensitive and wideband magnetometer based on a superconducting quantum interference device. *Applied Physics Letters*, 110(7), 072603. <https://doi.org/10.1063/1.4976823>
43. Ackerman, M. M., Tang, X., & Guyot-Sionnest, P. (2018). Fast and Sensitive Colloidal Quantum Dot Mid-Wave Infrared Photodetectors. *ACS Nano*, 12(7), 7264–7271. <https://doi.org/10.1021/ACS.NANO.8B03425>
44. Maeda, K., Henbest, K. B., Cintolesi, F., Kuprov, I., Rodgers, C. T., Liddell, P. A., Gust, D., Timmel, C. R., & Hore, P. J. (2008). Chemical compass model of avian magnetoreception. *Nature* 2008 453:7193, 453(7193), 387–390. <https://doi.org/10.1038/nature06834>
45. Gauger, E. M., Rieper, E., Morton, J. J. L., Benjamin, S. C., & Vedral, V. (2011). Sustained Quantum Coherence and Entanglement in the Avian Compass. *Physical Review Letters*, 106(4), 040503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.040503>
46. Lambert, N., Chen, Y.-N., Cheng, Y.-C., Li, C.-M., Chen, G.-Y., & Nori, F. (2012). Quantum biology. *Nature Physics* 2012 9:1, 9(1), 10–18. <https://doi.org/10.1038/nphys2474>
47. Hore, P. J., & Mouritsen, H. (2016). The Radical-Pair Mechanism of Magnetoreception. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-biophys-032116-094545>, 45, 299–344. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-032116-094545>
48. Pinzon-Rodriguez, A., Bensch, S., & Muheim, R. (2018). Expression patterns of cryptochrome genes in avian retina suggest involvement of Cry4 in light-dependent magnetoreception. *Journal of The Royal Society Interface*, 15(140). <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0058>
49. Günther, A., Einwich, A., Sjulstok, E., Feederle, R., Bolte, P., Koch, K.-W., Solov'yov, I. A., & Mouritsen, H. (2018). Double-Cone Localization and Seasonal Expression Pattern Suggest a Role in Magnetoreception for European Robin Cryptochrome 4. *Current Biology*, 28(2), 211–223.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.12.003>
50. Xu, J., Jarocha, L. E., Zollitsch, T., Konowalczyk, M., Henbest, K. B., Richert, S., Golesworthy, M. J., Schmidt, J., Déjean, V., Sowood, D. J. C., Bassetto, M., Luo, J., Walton, J. R., Fleming, J., Wei, Y., Pitcher, T. L., Moise, G., Herrmann, M., Yin, H., ... Hore, P. J. (2021). Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird. *Nature* 2021 594:7864, 594(7864), 535–540. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03618-9>
51. Horsfield, A. P., Haase, A., & Turin, L. (2017). Molecular recognition in olfaction. <https://doi.org/10.1080/23746149.2017.1378594>, 2(3), 937–977. <https://doi.org/10.1080/23746149.2017.1378594>
52. Liu, S., Fu, R., & Li, G. (2020). Exploring the mechanism of olfactory recognition in the initial stage by modeling the emission spectrum of electron transfer. *PLOS ONE*, 15(1), e0217665. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217665>
53. Na, M., Liu, M. T., Nguyen, M. Q., & Ryan, K. (2018). Single-Neuron Comparison of the Olfactory Receptor Response to Deuterated and Nondeuterated Odorants. *ACS Chemical Neuroscience*, 10(1), 552–562. <https://doi.org/10.1021/acscchemneuro.8b00416>
54. Tirandaz, A., Taher Ghahramani, F., & Salari, V. (2017). Validity Examination of the Dissipative Quantum Model of Olfaction. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04846-8>
55. L. Slocombe, S. Al-Khalili, J., & M. Sacchi. (2021). Quantum and classical effects in DNA point mutations: Watson–Crick tautomerism in AT and GC base pairs. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(7), 4141–4150. <https://doi.org/10.1039/D0CP05781A>
56. Shekaari, A., & Jafari, M. (2020). Modeling the action of environment on proton tunneling in the adenine–thymine base pair. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 150, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2019.07.002>
57. Srivastava, R. (2019). The Role of Proton Transfer on Mutations. *Frontiers in Chemistry*, 0, 536. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00536>
58. Ajibola, W., Karcagi, I., Somlyai, G., Somlyai, I., & Fehér, T. (2020). Deuterium-depletion has no significant impact on the mutation rate of Escherichia coli, invalidating the Double D-Bridge Hypothesis. *BioRxiv*, 2020.11.24.395657. <https://doi.org/10.1101/2020.11.24.395657>
59. Santiago-Alarcon, D., Tapia-McClung, H., Lerma-Hernández, S., & Venegas-Andraca, S. E. (2020). Quantum aspects of evolution: a contribution towards evolutionary explorations of genotype networks via quantum walks. *Journal of the Royal Society Interface*, 17(172). <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0567>
60. Görnitz, T. (2017). Quantum Theory and the Nature of Consciousness. *Foundations of Science* 2017 23:3, 23(3), 475–510. <https://doi.org/10.1007/s10699-017-9536-9>
61. Adams, B., & Petruccione, F. (2020). Quantum effects in the brain: A review. *AVS Quantum Science*, 2(2), 022901. <https://doi.org/10.1116/1.5135170>
62. Jedlicka, P. (2017). Revisiting the Quantum Brain Hypothesis: Toward Quantum (Neuro)biology? *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 0, 366. <https://doi.org/10.3389/fnmol.2017.00366>
63. Devi, N. R., Kumar, T. H. V., & Sundramoorthy, A. K. (2018). Electrochemically Exfoliated Carbon Quantum Dots Modified Electrodes for Detection of Dopamine

Neurotransmitter. Journal of The Electrochemical Society, 165(12), G3112.

<https://doi.org/10.1149/2.0191812JES>

64. Cova, T. F. G. G., & Pais, A. A. C. C. (2019). Deep Learning for Deep Chemistry: Optimizing the Prediction of Chemical Patterns. Frontiers in Chemistry, 0, 809. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2019.00809>

65. Schweidtmann, A. M., Rittig, J. G., König, A., Grohe, M., Mitsos, A., & Dahmen, M. (2020). Graph Neural Networks for Prediction of Fuel Ignition Quality. Energy & Fuels, 34(9), 11395–11407. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.0C01533>

66. Altaisky, M. V., & Kaputkina, N. E. (2021). Quantum Neural Networks and Quantum Intelligence. 165–185. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7253-1_6

67. Bullon, P. (2020). Quantum Physic, Quantum Biology, Quantum Medicine? SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/SSRN.3593591>

68. Ingber, L. (2018). Quantum Variables in Finance and Neuroscience II. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/SSRN.3237445>

69. An, D., Linden, N., Liu, J.-P., Montanaro, A., Shao, C., & Wang, J. (2021). Quantum-accelerated multilevel Monte Carlo methods for stochastic differential equations in mathematical finance. Quantum, 5, 481. <https://doi.org/10.22331/q-2021-06-24-481>

70. Guo, P., & Zhang, X. (2021). A Model and Algorithm of Logistics Distribution Path in B2C Electronic Commerce Environment Based on Genetic Algorithm. Advances in Intelligent Systems and Computing, 1343, 477–480. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69999-4_65

71. Njegovanović, A. (2018). Hilbert Space / Quantum Theory of

the Financial Decision and Role of the Prefrontal Cortex with a View to Emotions. International Journal of Social and Administrative Sciences, 3(1), 42–54.

<https://doi.org/10.18488/JOURNAL.136.2018.31.42.54>

72. Outeiral, C., Strahm, M., Shi, J., Morris, G. M., Benjamin, S. C., & Deane, C. M. (2021). The prospects of quantum computing in computational molecular biology. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science, 11(1), e1481. <https://doi.org/10.1002/WCMS.1481>

BIOINFORANGE