

# Kuantum Biyolojisi

Mehmet ŞAHİN\*, Bera KILIÇ

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye

Takvim-i Vekayi

ISSN: 2148-0087

Basım Tarihi: 30 Aralık 2019 / 4 Cemâziyelevvel 1441

Gönderi Tarihi: 24.09.2019, Kabul Tarihi: 16.11.2019

Cilt: 7 No: 2 Sayfa: 40-50 (2019)

SLOI: <http://www.sloi.org/sloi-name-of-this-article>

\*Sorumlu Yazar; E-mail: mehmet.sahin@erdogan.edu.tr

İnceleme Makalesi

**ÖZET** Kuantum biyolojisi, kuantum teorisinin, klasik fiziğin doğru bir tanım veremediği, biyolojinin yönlerine uygulanmasıdır. Bu basit tanımlamaya rağmen, bu alanın bilimsel amaçları ve rolü hakkında tartışmalar devam etmektedir. Bu makale, kuantum biyolojisinin bugün nerede durduğuna dair bir perspektif sunar ve bu alanda daha fazla ilerleme için potansiyel yolları, var olan tartışmaları ve birazda bilim kurgu sayılabilecek ileri zamanları tahmin etmek, okuyucuya hayal dünyası ile bilimsel gerçekler arasında bir resim sunmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Kuantum Biyolojisi, Kuantum Fiziği, Fizik, Biyoloji.

# Quantum Biology

Mehmet ŞAHİN\*, Bera KILIÇ

Recep Tayyip Erdoğan University, Rize, Turkey

Takvim-i Vekayi

ISSN: 2148-0087

Published: 30 December 2019 / 4 Cemâziyelevvel 1441

Vol: 7 No: 2 Page: 40-50 (2019)

SLOI: <http://www.sloi.org/sloi-name-of-this-article>

\*Correspondence; E-mail: mehmet.sahin@erdogan.edu.tr

Review Article

**ABSTRACT** The Quantum biology is a new branch of science that is born to explain situations in which classical physics cannot accurately give an accurate description of the interactions of the cell with its interior and environment. Despite this simple definition, the debate about the scientific aims and role of this field continues. This paper provides a perspective on where quantum biology stands today and is intended to provide the reader with a picture between the world of imagination and scientific realities, anticipating potential ways of further progress in this field, existing debates, and some future science fiction.

**Keywords:** Quantum Biology, Quantum Physics, Physics, Biology.

## **1. GİRİŞ**

Kuantum mekaniği, atom altı parçacıkların, atomların, moleküllerin, molekül gruplarının ve muhtemelen ötesinin özelliklerini tanımlayan temel teoridir. Kuantum mekaniği nanometre ve alt nanometre ölçeklerinde çalışır ve evrendeki cansız maddi yapıları tanımladığı gibi fotosentez, solunum ve görme gibi temel yaşam süreçlerinin oluşumlarını da izah eder. Kuantum fiziği yüzyılımızın teorik fizikte en ilginç teorisi demek yanlış olmaz. Uygulama alanı oldukça geniş olup klasik fizikten oldukça farklıdır. Bunun temelinde parçacıkların (foton, elektron, proton vb.) hem dalga hemde parçacık özelliği göstermesidir. Kuantum fiziği parçacığın ona eşlik eden kuantum dalgası ile ilgilenir. Bu dalganın varlığı hakkında iki görüş vardır. Birinci görüş bunun gerçek bir fiziksel dalga olduğu diğeri ise bunun bir matematiksel dalga olduğu, yani bir ihtimal dalgası olduğudur. Şu anda ikinci görüş daha kabul edilir görünse de şahsi görüşümüz bu dalganın fiziksel bir dalga olduğudur. Kuantum fiziği doğada ortaya çıkan fiziksel niceliklerin örneğin enerjinin her değerinde değil de ancak belli bir enerji değerinin tam katları şeklinde olduğudur. Aslında bu makrosopik ölçekte de tanımlıdır. Örneğin bir ağaçtaki elma sayısı tam sayıdır. Yani çeyrek elma yoktur. Tüm elmaların sayısı tam sayıdır. Fakat tüm elmalar aynı değildir. Çocuklar bir, iki, üç doğar ama buçuklu doğmaz, bunun yanında bazen enderde olsa siyam ikizleri de olur. Biyolojide oluşan bu tür şeyler fizikte olmaz. Özel izafiyet teorisi kâinat da olan fiziksel nicelikleri ölçerken sabit olarak ışık hızını kullandığından her formül de  $c$  ışık hızı sabiti yer alır. Kuantum mekaniğinden bunun yerini Planck sabiti alır. Dolayısıyla siz enerji momentum vb. fiziksel nicelikleri ölçtüğünüzde veya teorik hesap yaptığımızda her formülde bu sabit olmalıdır. Kuantum fiziğinin ilginç fenomenleri vardır. Bunlara örnek verirsek spin, tünelleme, çift yarık deneyi ve dolanıklığı diyebiliriz. Spin kavramı her ne kadar önemli ve de ölçülebilir olsa da doğası hakkında henüz bir şey bilmiyoruz. Klasik manada parçacıkların kendi etraflarındaki dönmeden kaynaklanan bir açıl momentum gibi düşünülse de gerçek bu değil. Belki de bunun izahı için ekstra boyutlara ihtiyaç vardır. Çünkü fiziksel dünya o kadar hem karmaşık hem

düzenli ki sanki bu kâinatın oluşması için üç boyut yetersiz gibidir. Bir boyutlu bir evren tasarlanırsa tek boyutlu bir evrende ancak tek boyutta sıralanmış tek boyutlu parçacıklar dizisi elde edilebilir; bunlar arasında ancak itme çekme gibi bir ilişki kurulabilirse bundan öte olmaz. İki boyutlu bir evrende düzlemde hareket ettiğiniz için burada çok daha fazla yasa oluşturabilirsiniz. Hakeza 19. yüzyılda insanların kavradığı şekliyle bugün ki kâinatın olması için üç uzay boyutu olması lazımdır. Oysaki ilerleyen zaman şunu ilham ediyor ki bu kâinatı izah etmek için ekstradan uzay boyutları lazım. Kuantum fiziğindeki meşhur Schrödinger'in kedisi deneyi bize canlı nedir sorusu hakkında temel bir yeni düşünce veriyor. İnsanlar için bir canlı ya yaşıyordur ya da ölüdür. Oysaki bu deney bize bir ara form olabileceğini der. Deney yapılan kedinin bulunduğu kutu açılmadığı sürece kedi hem ölü hem de diri durumdadır. İlginçtir ki buna benzer bir yaklaşım Kuranda vardır. Şehitlerin hayatı buna benzer bir durumdur. Hakeza esir diye isimlendirilen temel madde, tüm uzayı dolduran ve ışık dalgasının ortamı olan maddeden yaratılmış canlı varlıklarda olabilir. Şayet yine varlığına inanılan cinler, melekler ve de onlar kadar inanılmasa da periler gibi varlıklarda canlı olduğu için bu canlılar da bir gün bilimin konusu olacaksa bu ancak kuantum mekaniğindeki ilerleme ile olacak gibi görünüyor. Ne kadar bir zaman sonra bunlar olur diye bir şey diyemeyiz. Fakat kesin olan şey biyolojinin alanı eninde sonunda genişleyecek. Kuantum fiziğinin özellikle atom, molekül ve daha düşük boyutlarda etkin olduğu söylenebilir. Bunun temeli bu boyutlarda parçacıklar veya sistemlere eşlik eden De Broglie dalga boyunun sistem boyutlarına göre kıyaslanabilir büyüklükte olmasıdır. Fakat büyük sistemlerde dalga boyu oldukça düşüktür. Bu itibarla biyolojik sistemlere baktığımızda, özellikle hücreler, hücre içi organeller, hücreler arası, yapıların büyüklükleri mikrometre ile nanometre arası mesafeler de olduğu görülür. Dolayısıyla kuantum fiziğinin ilginç fenomenleri bu yapılarda önemli rol oynaması kaçınılmazdır. Yani klasik biyoloji ne kadar ilerlese ilerlesin en sonunda nano boyutlarda olan temel olayların anlaşılması kuantum fiziği kullanılmadan imkansızdır. Kuantum fiziğinin kurucu babaları bile bu kuramda eksik bir yan

olduğunu derler. Kuramın, özellikle Schrödiger denkleminin çıkarılışına baktığımızda, bu denklemin çok sağlam matematiksel yapısının olduğunu görürüz. Eksik olan yan ise çeşitli kabuller yapıyor olsa da henüz deneysel bir desteğin olmamasıdır.

Kuantum biyolojisi genel olarak, fotosentez, enzim katalizi, kuş navigasyonu veya koku alma gibi biyolojik olayların yalnızca klasik fiziğin sınırları içerisinde işlenemeyebileceğini ve ancak kuantum fiziğinin tünelleme, girişim gibi olgularını kullanarak izah edilebileceğini belirten, güncel çalışmalardan vuku bulan yeni bir bilim dalı olarak kabul edilir. En belirgin araştırmalar son yirmi yılda çıkmasına rağmen, yirminci yüzyıl başlarında kuantum fiziğinin kurucularına kadar inilebilir. Bu öncü kuantum fizikçilerin o günlerdeki öngörülerini bugünkü kavrayışımızı ilerleterek sürdürmemizi sağladığı söylenebilir.

## 2. KUANTUM BİYOLOJİSİNİN KÖKLERİ

Kuantum biyolojisinin tarihsel gelişimi canlı hücrelerin içinde bulunan bazı spesifik mekanizmaların uzun ömürlü kuantum bağdaşımı, süperpozisyon, kuantum tüneli açma ve hatta kuantum dolanması daha önce çoğunlukla izole moleküler, atomik ve atom altı sistemler veya mutlak sıfıra yakın sıcaklıklar seviyesinde söz konusu olduğu düşünülen ve dolayısıyla da yaşamdan sorumlu mekanizmalarla ilişkili olduğu düşünülmemiş bu tür olaylardan faydalandığına dair giderek büyüyen bir kanıtsal süreçtir. Açık bir şekilde kuantumlanma mikroskobik ölçekteki tüm maddeler için geçerlidir ve uzun bir süredir standart moleküler biyolojiye ve biyokimyaya asimile edilmiştir. Günümüzde kuantum biyolojisi küçük olmasına rağmen sayısı giderek artan ve fizik ile kimya alanlarında ünlü olan fakat bugüne dek canlı hücrelerin komplike ortamında anlamlı bir rol oynamadığı düşünülen çok daha spesifik olaylara atıfta bulunur. Kuantum biyolojisinin ne anlama geldiğine ve bu alandaki son ilerlemelere dair güncel araştırmalar aşağıda özetlenmiştir. Kuantum mekaniğinin biyolojide oynaması muhtemel komplike rolün en meşhur örneklerinden biri fotosentezde

eksiton enerjisinin taşınımı sırasında gözlemlenen ve ortaya atılmış olan uzun ömürlü kuantum bağdaşımıdır. Bu konu halen tartışmalara neden olurken, kuantum mekaniği için daha yerleşik bir rol enzim katalizinde meydana gelen elektron ve proton tüneli açılımında bulunmuştur. Bütün bu örneklerin ötesinde, kuantum tüneli açılımının olfaksiyon ve mutasyon ile alakalı olduğu öne sürülürken, kuantum girişimi ise kuşların yön bulma sistemi ile ilişkilendirilir. Daha teorik bir şekilde kimileri de kuantum bağdaşımı ve konsiyans arasında bir bağ olduğunu ileri sürdüler ancak bu kanı nörobiyoloji camiasından çok az destek görmektedir. Kuantum biyolojisinin kökenleri çoğunlukla 1944'e ve Erwin Schrödinger'in ünlü "Yaşam Nedir?" kitabının yayınlanmasına dayanır. Fakat bundan da önce, diğer fizikçilerden birkaçı çoktan biyoloji yolunda bir gedik açmışlardı. Örneğin Alman fizikçi Pascual Jordan Schrödinger'in kitabından bir yıl önce "Fizik ve Organik Yaşamın Sırrı" başlığı altında bir kitap yayınladı ve içinde 'Sind die Gesetze der Atomphysik und Quantenphysik für die Lebensvorgänge von wesentlicher Bedeutung?' (Atomik ve kuantum fizik yasaları yaşam için çok mu önemlidir?) şeklinde bir ibare bulunmaktadır.

Aslına bakılırsa kuantum biyolojisi bizzat kuantum mekaniğinin gelişiminden kısa bir süre sonra ortaya çıkmıştır. 1927 yılında, yeni kuantum mekaniğinin matematiksel çerçevesi mevcuttu ve bunu Bohr, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Dirac, Born, Jordan, Fermi ve diğerlerinin çabalarına borçluydu. Atomik dünyayı ehliştirmelerindeki başarının verdiği heyecan ve gençliğin ukalalığı ile birlikte çoğu kuantum öncüsü yeni bilim dalları elde etme arayışına koyulmak amacıyla fizik laboratuvarlarından ve kara tahtalarının başından dev adımlarla ayrıldılar. Su yüzüne çıkmakta olan genetik dalını da içine alan mikrobiyoloji ile kromozom kalıtım teorisi hala keşfedilmemiş alanlardı ve sayısı giderek artan biyofizikçi ve biyokimyacılar bu konulara geçici bir ilgiden daha fazlasını duymaya başladılar. Bu nedenle modern atomik fiziğin yaşamın bloklarını inşa etmek konusunda da bir fikir verebileceğini sorgulamak birçok kişi için doğal bir durumdan başka bir şey değildir.

Deneysel fizik alanında bu süre zarfındaki ilerlemeler aynı zamanda ortaya yeni sorular çıkarıyordu. Tıpkı Robert Hooke'un 17.yüzyılın ortasında yeni ve çok küçük bir dünyanın kilidini açması gibi, iki dünya savaşı arasındaki onlarca sene içerisinde yer alan yeni teknikler ve ana deneyler çok daha küçük, moleküler biyolojinin temellerinin atılmasına yardımcı oluyordu. Bunlar H.J. Muller'in 1927 yılındaki X-ray mutagenезini keşfini, Theodor Svedberg'in 1920'li yılların ortalarında ünlü ultrasantrifüj tekniğini kullanarak protonların atom ağırlıklarını ölçümünü ve ardından da 1935 yılında W.M. Stanley'nin bir virüsü kristalleştirmesini içine alıyordu. Bunlarla birlikte diğer çığır açan ilerlemeler öyle bir iyimserlik hissine önayak oldu ki, kuantum mekanik araçlarıyla hayatın sırları sonunda su yüzüne çıkarılabilirdi.

Bununla birlikte pek çok kimse fizik ve kimya prensiplerinin biyolojiyi açıklayacak kadar yeterli olacağından pek de emin değildi. Bu eleştiri sahiplerinden biri Niels Bohr'un tâ kendisi idi ve bugün halen görebildiğimiz gibi; kuantum biyolojisinin temellerini atacak olan insanoglunu paradoksal olarak etkileyecek ve ona ilham verecek olan şey, Bohr'un kuantum mekaniğinin yaşamın sırlarının kilidinin açılmasındaki önemine ilişkin karamsarlığıydı. Kuantum devrimi fizikte yaşanırken, Mendelian kalıtımının yeniden keşfedilen prensiplerini Hugo de Vries ve Thomas Hunt Morgan tarafından tanımlanan mutasyonlarla bir araya getiren neo-Darwinist sentez yoluyla biyolojide büyük adımlar atıldı. Bununla birlikte, özellikle miras kalan malzemenin doğasını çevreleyen birçok gizem varlığını sürdürdü. 19. yüzyılın sonundaki mikroskobik çalışmalar, bu zamana kadar "gen" olarak adlandırılan görünür kromozom liflerini Mendel'in kalıtsal faktörleriyle ilişkilendirmişti. Biyokimyasal çalışmalar kromozomların proteinlerden ve nükleik asitlerden oluştuğunu kanıtlamıştı fakat genetik bilginin sıradan kimyasallara nasıl yazıldığı ve daha sonra da miras alındığı tam bir gizem olmaya devam etti. Dahası, organizmalara cansız maddede bulunmayan özel bir nitelik bahşeden birtakım hayati 'yaşam gücü' olduğunu öne süren vitalizm (dirimselcilik) fikri 19. yüzyıldaki gelişmelerin -Wöhler'in üre sentezi gibi- etkisiyle geri çekilmiş

olmasına rağmen, birçok bilim adamı ve filozof yaşamın bazı yönlerinin klasik bilim dışında ilkeler gerektirdiği inancına sarıldılar. Örneğin, 1907'de Fransız filozof Henri Bergson ilk kez kalıtımın ve evrimin canlılara özgü bir “elan vital” veya “yaşamsal bir dürtü” tarafından yönlendirildiğini savunduğu “Yaratıcı Evrim”i yayınladı. Birçok bilim adamı benzer şekilde, yaşam ve kalıtımın olağanüstü dinamiklerinin termodinamik, organik kimya ve fizik gibi klasik bilimler tarafından açıklanabileceğine ikna olmamışlardır.

### 3. ÇALIŞMALAR

Fotosentez ve görme olaylarının izahı son yüzyılda geliştirilen kuantum mekaniği sayesinde olmuştur. Bu teori enerji ve elektron transferini, kuantum mekaniğinde ayırık enerji seviyelerinden sürekli enerji seviyelerine geçişi tanımlayan Fermi'nin altın kuralı ile tanımlanır. Kısaca anlatırsak, elektronlar atomlarda, moleküllerde belli enerji seviyelerinde bulunur. En dışta elektronların olmadığı enerji seviyeleri bulunur. Bu enerji seviyelerinin arasındaki enerji farkı o kadar çok azdır ki bu bölge sürekli olarak kabul edilebilir. Fotonla uyarılan bir elektronun bu sürekli bölgeye geçiş hızının matematiksel ifadesi Fermi tarafından verilmiştir (Forster, 1946; Killoran vd., 2015).

Nihai durumların büyük ve yarı-sürekli bir dağılımına göre transfer oranının ortalamasının bir sonucu olarak, hesaplanan dinamikler artık koherans ve girişim fenomenleri göstermemektedir. Fotosentetik reaksiyon merkezlerinde ve hafif hasat komplekslerinde, 1990'larda yapılan birçok çalışmada salınım olayları gözlemlendi ve tipik olarak titreşimli ya da karışık elektronik-titreşimli dalgalı paketlerin oluşumuna bağlandı. Bir fotosentetik sistemde uyarma enerjisi aktarımı sırasında oldukça uzun ömürlü (660 fs ve daha uzun) elektronik kuantum tutarlılığının rapor edilmesi, canlı organizmaların temel yaşam süreçlerini açıklamak için kuantum mekaniğinin rolüne ilgi gösterdi (Engel vd., 2007).

Bununla birlikte, kuantum olaylarının- tutarlılık gibi- makroskobik yaşam sistemlerinde işlevsel bir rol oynayabileceği fikri yeni değildir. 1932'de,



kuantum fizikçisi Niels Bohr, atom yapısı üzerindeki çalışmaları nedeniyle Nobel Ödülü'nü kazanmasından 10 yıl sonra, Kopenhag'daki Uluslararası Işık Terapisi Kongresi'nde 'Işık ve Yaşam' adlı bir konferans verdi (Bohr, 1933). Bu durum, kuantum teorisinin yaşam sistemleri hakkında bilimsel bir anlayışa katkıda bulunup bulunmadığı sorusunu gündeme getirdi. Katılım, daha sonra moleküler biyoloji alanının kurulmasına yardım eden ve 1969'da genetik alanındaki keşiflerinden dolayı Nobel Ödülü kazanan genç bir fizikçi olan meraklı bir Max Delbrück'ti (McKaughan, 2005).

Tüm canlı sistemler moleküllerden oluşur ve temel olarak tüm moleküller kuantum mekaniği ile tanımlanır. Bununla birlikte, geleneksel olarak, kuantum mekaniğinin tarif ettiği sistemler ile biyolojide incelenen sistemler arasındaki geniş ölçek ayrımı ve aynı zamanda cansız ve canlı maddenin belirgin görünüşte farklı özellikleri, iki bilgi topluluğu arasında bir miktar ayrılık sağlamıştır. Son zamanlarda, ultrafast spektroskopisi (Jonas, 2003), tek moleküllü spektroskopisi (Moerner vd., 2015; Gruber vd., 2017; Kondo vd., 2017; Liebel vd., 2018; Malý vd., 2016), zamanla çözülmüş mikroskopi (Šrajer and Schmidt, 2017; Young vd., 2018; Borst and Visser, 2010) ve tek partikül görüntüleme gibi deneysel tekniklerdeki gelişmeler giderek artan bir şekilde biyolojik dinamikleri incelememize olanak sağlamıştır. Kuantum ve klasik fiziksel etkiler arasındaki hassas etkileşime dayanan yaşam sisteminin işlevi için gerekli olan çeşitli süreçleri ortaya koyan küçük uzunluk ve zaman ölçekleridir. Yapılan çalışmaların güzel bir özeti kaynak (URL-1, 2018)'de verilmiştir.

#### 4. SONUÇ

Kuantum biyolojisi üzerine ilk kitap, Pascual Jordan (Jordan, 1932Die) tarafından organik moleküllerin gizeminin fiziği üzerinedir. Ancak, 1932'deki yayınından bu yana, yaşamın doğası hakkında birçok gizem kalmaktadır. Kaba taneli klasik modellerin, canlı sistemlerde gerçekleşen çeşitli süreçlerin kesin bir resmini veremediği açıktır. Buradan şunu açıkça diyebiliriz ki kuantum fiziğini

canlı organizmalarda temel işlevsel işlemleri izah etmek için kullanmak kaçınılmazdır.

Enerji harmanlama veya çevresel algılama için aynı amaç için tasarlanan klasik cihazlardan daha iyi performans gösteren biyolojik olarak ilham almış kuantum teknolojilerinin mühendisliğidir. Makroskopik ölçekte kuantum etkileri, fizyolojik sıcaklıklarda ve son derece karmaşık sistemlerde daha iyi yapılması, biyolojik dünyadan ilham alarak bugünkü teknolojimizi ilerletmek için bize bir bilgi hazinesi kaynağı olduğu açıktır.

Bu doğrultuda, önceki çalışmalarda elektronik ve titreşimsel serbestlik dereceleri arasında tek bir enerji kantının tutarlı bir değişiminin, yalnızca termal mekanizmalarla mümkün olanın üstünde ışık toplama sisteminin gücünü artırabildiği kuantum tasarım prensibini açıkça gösteren bir prototip kuantum ısı motoru teklif edilmiştir. Termodinamik performans ölçütlerini kullanarak kuantum avantajı ölçülmüş ve prensibin gerçekçi biyolojik yapılar için uygulanabilirliği gösterilmiştir (Jordan, 1932Die). Kuantum biyolojisi, iyi ayrılan uzunluk ve zaman skalasındaki dinamik fenomenler arasında, nano-ölçekte moleküler düzeneklerde femtosaniye enerji aktarım işlemlerinden, genel organizma ölçeklerinde ekosistemlerde hayatta kalma ve üremeye kadar etkileşimlerle de ilgilidir.

Ülkemizde kuantum biyolojisi üzerine literatür yok denecek kadar azdır. Oysaki biyolojinin, tıbbın, Farmokoloji'nin en sonunda gideceği alanın yukardaki izahlardan sonra burası olduğunu görmek zor değildir. Ülkemizde bu alanda en az yüksek lisans, doktora yapmış yetişmiş bilim insanlarına ihtiyaç vardır. Bu amaç va plan doğrultusunda Biyoloji, Tıp, Diş hekimliği vb. alanlarda Fizik dersi sayısı artırılmalı fakat bu dersi veren hocaların özellikle zaman içinde kuantum biyolojisinde doktora yapmış kişilerden seçilmesi tavsiye edilmektedir. Yetişmiş insan kaynağına ulaşabilmek için öncelikle bu gereksinimin görülmesi şarttır. Bu yazının yazılmasının temel amacı da budur.

**Kaynaklar**

- Bohr N. (1933). Light and life. *Nature*, 131, 421-423. (doi:10.1038/)
- Borst J.W., Visser A.J.W.G. (2010). Fluorescence lifetime imaging microscopy in life sciences, *Meas. Sci. Technol.*, 21, 102002. (doi:10.1088/0957-0233/21/10/102002)
- Engel G. S., Calhoun T.R., Read E.L., Ahn T-K, Mančal T., Cheng, Y-C, Blankenship R.E., Fleming G.R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446, 782-786. (doi:10.1038/nature05678)
- Forster T. (1946). Energiewanderung und Fluoreszenz. *Naturwissenschaften*, 6, 166-175. (doi:10.1007/BF00585226)
- Gruber J.M, Malý P., Krüger T.P.J., van Grondelle R. (2017). From isolated light-harvesting complexes to the thylakoid membrane: a single-molecule perspective, *Nanophotonics*, 7, 81-92. (doi:10.1515/nanoph-2017-0014)
- Jonas D.M. (2003). Two-dimensional femtosecond spectroscopy. *Ann. Rev. Phys. Chem.*, 54, 425-463. (doi:10.1146/annurev.physchem.54.011002.103907)
- Jordan P. (1932Die). Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie, *Naturwissenschaften*, 20, 815-821. (doi:10.1007/BF01494844)
- Killoran N., Huelga S.F., and Plenio, M.B. (2015) Enhancing light-harvesting power with coherent vibrational interactions: a quantum heat engine picture, *Institut für Theoretische Physik, Albert-Einstein-Allee 11, Universität at Ulm, D-89069 Ulm, Germany* (Dated: October 22, 2015)
- Kondo T., Chen W.J., Schlau-Cohen G.S. (2017). Single-molecule fluorescence spectroscopy of photosynthetic systems. *Chem. Rev.*, 117, 860-898. (doi:10.1021/acs.chemrev.6b00195)
- Liel M., Toninelli C., van Hulst N.F. (2018). Room-temperature ultrafast nonlinear spectroscopy of a single molecule, *Nat. Photonics*, 12, 45-49. (doi:10.1038/s41566-017-0056-5)
- Malý P., Gruber J.M., Cogdel R.J., Mančal T., van Grondelle R. (2016). Ultrafast energy relaxation in single light-harvesting complexes, *Proc. Natl Acad. Sci.*, USA 113, 2934-2939. (doi:10.1073/pnas.1522265113)
- McKaughan D.J. (2005). The influence of Niels Bohr on Max Delbrück, *Isis*, 96, 507-529. (doi:10.1086/498591)
- Moerner W.E, Shechtman Y., Wang Q. (2015) Single-molecule spectroscopy and imaging over the decades. *Faraday Discuss*, 184, 9-36. (doi:10.1039/C5FD00149H)
- Šrajer V., Schmidt M. (2017). Watching proteins function with time-resolved x-ray crystallography, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 50, 373001. (doi:10.1088/1361-6463/aa7d32)
- URL-1 (2018). <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsif.2018.0640>
- Young Let al. (2018). Roadmap of ultrafast x-ray atomic and molecular physics, *J. Phys. B: At. Mole. Opt. Phys.*, 5, 032003. (doi:10.1088/1361-6455/aa9735) Crossref, ISI,