

فرآیندهای کوانتومی در علوم زیستی

سید نصیب‌الله دوستی مطلق^۱، امیر اشراقی^{۱*}

چکیده

زیست‌شناسی کوانتومی از رشته‌های نوظهور در حوزه مطالعات مکانیک کوانتومی است که طی دهه گذشته توجه زیادی را به خود معطوف کرده است. در گذشته فرض بر این بود که ویژگی‌های مکانیک کوانتومی نظیر هم‌دوسی، درهم‌تنیدگی و تونل‌زنی فقط در دمای نزدیک به صفر مطلق و سیستم‌های خالص اتفاق می‌افتند؛ بنابراین آنها در دمای محیط و سامانه‌های زیستی که محیط‌هایی گرم و مرطوب هستند، تخریب خواهند شد؛ از این رو، این ویژگی‌های در سامانه‌های زیستی نادیده گرفته می‌شدند.

آیا مکانیک کوانتومی نقشی در فرآیندهای زیستی دارد؟ اگرچه این سؤال به اندازه نظریه کوانتوم قدیمی است اما اندازه‌گیری‌های اخیر بر سیستم‌های زیستی در مقیاس‌های زمانی بسیار سریع، پاسخ احتمالی را روشن کرده است. شواهد اخیر نشان می‌دهد که بعضی از پدیده‌های زیستی ممکن است برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد مکانیک کوانتومی را به کار گیرند تا مزیت زیستی به دست آورند. تاکنون دانشمندان موفق شده‌اند که این خواص کوانتومی را در فرآیندهای فتوسنتز، گیرندگی مغناطیسی در پرندگان، حس بویایی و کاتالیز آنزیمی مشاهده کنند. زیست‌شناسی کوانتومی مطالعه چنین فرایندهایی است. در این بررسی ما آخرین نتایج مربوط به اثرات کوانتومی غیربدهی در پدیده‌های زیستی را ارائه می‌دهیم.

واژگان کلیدی: زیست‌شناسی کوانتومی، فتوسنتز، گیرندگی مغناطیسی در پرندگان، بویایی، کاتالیز آنزیم.

* عهده‌دار مکاتبات: پژوهشگر دکتری، نشانی الکترونیکی: amireshraghi106@gmail.com

^۱ دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، پژوهشکده آماد و فناوری دفاعی، تهران، ایران.

مقدمه

طولانی مدت مشاهده شده در انتقال انرژی اکسیتون^۱ در فتوستنتز است [۱۲،۱۱،۸]. علاوه بر این موضوع بحث برانگیز، نقش پررنگ تر مکانیک کوانتومی در تونل زنی الکترون ها و پروتون ها در کاتالیز آنزیمی یافت می شود. فراتر از این نمونه ها، درهم تنیدگی کوانتومی در نوابری^{۱۱} پرندگان نقش دارد [۱۳]، در حالی که پیشنهاد شده است تونل زنی کوانتومی نیز در حس بویایی^{۱۲} و جهش^{۱۳} DNA دخیل می باشد [۱۴]. پیشرفت های اخیر در روش های آزمایشگاهی مانند طیفسنجی فوق سریع، طیفسنجی تک مولکولی، میکروسکوپ تفکیک زمانی و تصویربرداری تک مولکولی محققان را قادر کرده که دینامیک زیستی را در بازه های زمانی و اندازه های بسیار کوچک مطالعه کنند [۱۵،۴].

در این مطالعه ما تصویری از نقش خواص کوانتومی در فتوستنتز، مهاجرت پرندگان، حس بویایی و عملکرد آنزیمی را ارائه داده و شواهد و استدلال های موجود در مورد وجود نقش عملکردی پدیده های کوانتومی در این سیستم ها را به شرح زیر ارائه می دهیم.

فتوستنتز

فتوستنتز تقریباً انرژی لازم برای حیات اغلب جانداران روی زمین را تأمین می کند. این انرژی، در شکل یک فوتون توسط آنتن های گیرنده نور به عنوان یک برانگیختگی الکترونی جذب می شود. سپس این برانگیختگی از هر آنتن به یک مرکز واکنش منتقل می شود. در نهایت جداسازی بار باعث ایجاد اشکال پایدارتری از انرژی شیمیایی می شود. ساختارهای زیستی دقیق و ترکیب های رنگدانه به کاررفته از آنتن به مرکز واکنش و پس از آن، بین ارگانیسم ها متفاوت هستند [۱۶،۱۲،۱۷]. این تنوع در ابزارهای جذب نور نشان دهنده لزوم سازگاری ارگانیسم های فتوستنتزی با شرایط زیستی و زیستگاه های طبیعی مختلف است. یکی از ساده ترین و متداول ترین مثال ها، ابزار جذب نور باکتری گوگردی سبز^{۱۴} است [۱۸]. این باکتری ها دارای یک آنتن کلروزومی بسیار بزرگ هستند که رشد در شرایط کم نور را

پیشرفت های مکانیک کوانتومی در دنیای فیزیک دگرگونی های عظیمی را به پا کرده است. یکی از این پیشرفت ها مربوط به زمینه ی در حال ظهور «زیست شناسی کوانتومی»^۱ است. زیست شناسی کوانتومی بسیار هیجان انگیز و بدون شک شاخه ای است که به سرعت در حال رشد است [۱-۴]. زیست شناسی کوانتومی شاخه ای جدید نیست؛ بحث در مورد این حوزه بعد از تکمیل شدن چارچوب نظری مکانیک کوانتومی در بین دانشمندان پیشگام در حوزه مطالعات کوانتومی آغاز شده بود. دانشمندان نظیر نیلز بور^۲، جردن پاسکال^۳، ماکس دلبروگ^۴ و اروین شرودینگر^۵ و... به ارتباط بین زیست شناسی و مکانیک کوانتومی پرداخته و مقالات متعددی را منتشر کرده اند. در بین پیشگامان کوانتومی می توان کتاب «حیات چیست»^۶ شرودینگر را تأثیرگذارترین تألیف در این حوزه دانست. بحث در مورد ارتباط بین زیست شناسی و مکانیک کوانتومی به دلایل مختلفی نظیر شروع جنگ جهانی دوم و نبود تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته به فراموشی سپرده شد. بنابراین، تفکر غالب نه تنها در بین زیست شناسان بلکه در بین فیزیکدانان و بیوشیمی دانان این بود که مکانیک کوانتومی نمی تواند هیچ نوع نقش ویژه ای در سیستم های زنده داشته باشد [۵-۷]. اکنون، شواهدی رو به رشدی وجود دارد که تعدادی مکانیسم خاص در موجودات زنده از ویژگی های مکانیک کوانتومی، مانند همدوسی^۷ طولانی مدت و بلند برد، تونل زنی^۸ و حتی درهم تنیدگی^۹ استفاده می کنند. در ابتدا این اثرات در سامانه های زیستی نادیده گرفته می شدند چون این خواص فقط مختص به دنیای زیر اتمی، اتم ها و مولکول ها، سیستم های خالص در دماهای نزدیک به صفر مطلق هستند؛ از این رو تصور نمی شد در سیستم های زنده که محیط هایی پیچیده، گرم، مرطوب و پر از نویز هستند، مشاهده شوند [۸-۱۰]. یکی از مشهورترین نمونه ها در مورد نقش غیر بدیهی مکانیک کوانتومی در زیست شناسی، همدوسی کوانتومی

¹ Quantum Biology

² Niels Bohr

³ Pascual Jordan

⁴ Max Delbrück

⁵ Erwin Schrödinger

⁶ What is life

⁷ Coherence

⁸ Tunneling

⁹ Entanglement

¹⁰ Exciton

¹¹ Navigation

¹² Smell

¹³ Mutation

¹⁴ Green-sulphur bacteria

اکسیتون بین سایت‌ها به‌عنوان یک انتقال ناهمدوس در نظر گرفته می‌شود، و همه همدوسی‌ها یا برهم‌نهی‌های بین سایت‌ها نادیده گرفته می‌شوند [۲۶،۱]. در ابتدا مفهوم مشاهده همدوسی کوانتومی در دمای اتاق در یک سیستم زیستی می‌تواند تعجب‌برانگیز باشد. با این حال، حتی یک مقایسه ساده در مورد مقیاس‌های انرژی مربوطه نشان می‌دهد که در واقع اثرات کوانتومی می‌توانند در این مورد مهم باشند [۲۷]. محاسبه یا سنجش دقیق انرژی‌ها و قدرت‌های کوپلینگ در کمپلکس فوتوسنتزی مانند FMO، مستلزم ترکیبی از طیف‌سنجی و روش‌های شیمی کوانتومی اولیه مبتنی بر مدل‌های اتمی می‌باشد. خوشبختانه FMO یکی از مدل‌هایی است که بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است و به‌طور کلی، سنجش و محاسبه قدرت‌های کوپلینگ و انرژی‌ها از نظر کمی، مطابقت دارند. در دیدگاه کلاسیک انرژی به‌طور تصادفی از یک مولکول به مولکول دیگر جهش پیدا می‌کند در حالی که مطابق دیدگاه کوانتومی، انرژی به‌طور هم‌زمان در چند جهت حرکت می‌کند. در دنیای مکانیک کلاسیک، گام‌های کلاسیکی در واقع حرکت تصادفی براونی^۵ هستند در حالی که گام‌های کوانتومی یک برهم‌نهی از موقعیت-هاست [۲۸،۲۹]. تفاوت بین تفسیر کلاسیکی و کوانتومی به‌وضوح در شکل ۱ قابل مشاهده است.

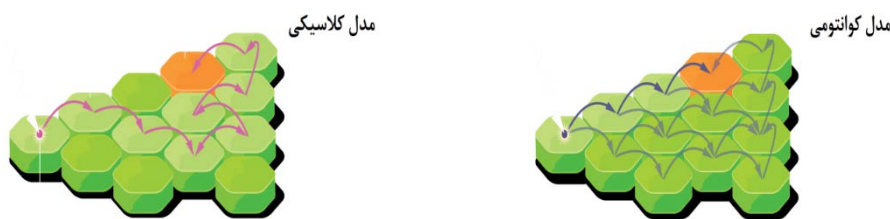
گیرندگی مغناطیسی^۶ در پرندگان و ناوربی آنان

گیرندگی مغناطیسی عبارت است از قابلیت برخی از گونه‌های مهاجر برای حرکت با استفاده از میدان مغناطیسی زمین. مکانیسم مبتنی بر تأثیر فرآیندهای شیمیایی با میدان مغناطیسی خارجی، رسوبات مواد معدنی مغناطیسی در موجود زنده، برای توضیح

امکان‌پذیر می‌سازد. انرژی جمع‌آوری شده توسط این کلروزوم‌ها از طریق یک ساختار تخصصی به نام کمپلکس FMO^۱ به مرکز واکنش منتقل می‌شود. نکته قابل توجه، راندمان مشاهده شده آن با سایر واحدهای فوتوسنتزی است. تقریباً هر فوتون (تقریباً ۱۰۰ درصد) جذب شده، با موفقیت به مرکز واکنش منتقل می‌شود، حتی اگر برانگیختگی‌های الکترونی ایجاد شده طول عمر بسیار کوتاهی (تقریباً ۱ نانوثانیه) داشته باشند [۱۹-۲۲]. در سال ۲۰۰۷، فلمینگ^۲ و همکارانش، شواهد مربوط به انتقال همدوس انرژی در کمپلکس FMO را ارائه کردند [۱۱]. نتایج این تحقیق به قدری شگفت‌آور بود که منجر به انجام تحقیقات نظری و تجربی زیادی توسط محققان علاقه‌مند به این زمینه شد. نتایج این مطالعه در مجله نیچر^۳ به چاپ رسید.

ویژگی‌های کوانتومی

شواهد مستقیم مربوط به وجود همدوسی کوانتومی در مقیاس-های طولی و زمانی قابل توجه در کمپلکس FMO توسط فلمینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است. آنها مشاهدات طیفی در دمای پایین (۷۷ کلوین) برای دینامیک همدوسی کوانتومی مربوط به یک برانگیختگی الکترونی در رنگدانه‌های متعدد موجود در کمپلکس FMO را ارائه کردند. از آن زمان مجموعه عظیمی از آزمایش‌های بیشتر نشان می‌دهند که همدوسی حتی در دمای اتاق تا ۳۰۰ فمتوثانیه قابل مشاهده است [۲۳-۲۵]. مدل‌های نظری گوناگونی برای توضیح چرایی و چگونگی استفاده از همدوسی کوانتومی توسط طبیعت در هدایت این برانگیختگی الکترونی از طریق کمپلکس FMO ارائه شده است. نزدیک‌ترین مدل کلاسیک که می‌تواند با این اثرات کوانتومی مقایسه شود، مدل فورستر^۴ است که در آن انتقال



شکل ۱: طبق مدل کلاسیک یا «ناهمدوس» این فرآیند، مسیر برانگیختگی به مرکز واکنش کم‌وبیش تصادفی است. در نتیجه، چنین مسیری می‌تواند منجر به هدر رفتن انرژی شود. در مقابل، اگر فرآیند انتقال انرژی «همدوس» باشد به گونه‌ای که اکسیتون مانند یک موج حرکت کند، می‌تواند همه مسیرهای ممکن را به طور هم‌زمان کاوش کند و فقط کارآمدترین مسیر را طی کند. [30]

¹ Fenna-Matthews-Olsen

² Fleming

³ Nature

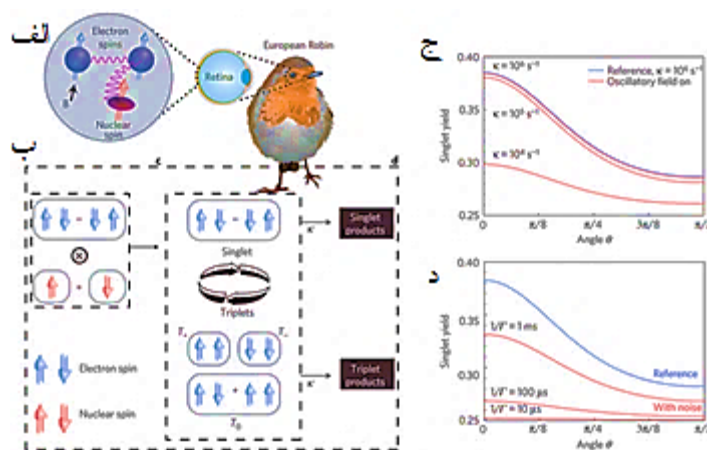
⁴ Förster

⁵ Brownian motion

⁶ Magnetoreception

داد [۳۷]. مدل جفت-رادیکال استاندارد می‌تواند به شرح زیر خلاصه شود (شکل ۲)، هر چند جزئیات و مراحل دقیق می‌توانند بسیار پیچیده باشند [۳۸،۳۹]: یک جفت رادیکال (معمولاً) یک جفت مولکول متصل است که هر یک دارای یک الکترون جفت نشده می‌باشد. این جفت‌ها با فرآیند فوتوشیمیایی در حالات همبسته اسپینی ایجاد می‌شوند؛ به عبارتی، به صورت تک یا سه‌تایی هستند. وضعیت این اسپین‌ها تحت تأثیر ترکیبی میدان مغناطیسی ضعیف زمین و برهم‌کنش‌های هایپر فین^۴ هسته‌ای با هسته میزبان تکامل می‌یابد. در نهایت، سرعت نوترکیبی بار^۵ به اسپین بارهای جدا شده وابسته است و محصولات واکنش این جفت رادیکال‌ها را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهد (یا: در نهایت، سرعت نوسان بین این حالات مستقیماً بر روی محصولات واکنش جفت-رادیکال تأثیر می‌گذارد). محصولات متفاوت واکنش جفت-رادیکال از نظر زیستی قابل تشخیص هستند. بنابراین، اگر وزن نسبی حالت‌های تک و سه‌تایی به زاویه میدان خارجی حساس باشند، محصولات واکنش نیز منجر به یک قطب‌نمای مغناطیسی خواهند شد. تا سال ۲۰۱۶، مدل‌های ارائه شده قادر نبودند تا دقت بالای چشم پرنده را برای تشخیص میدان مغناطیسی توضیح دهند. در

این قابلیت در برخی از ارگانیسم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، با توجه آزمایش‌های رفتاری انجام شده بر روی ارگانیسم‌های دیگر، مکانیسم مبتنی بر مواد مغناطیس رد می‌شود. به عنوان مثال، سینه‌سرخ‌های اروپایی دارای یک حس مغناطیسی هستند که به عنوان قطب‌نما عمل می‌کند و مستقل از قطبیت است، در حالی که اکثر مدل‌های قطب‌نما مبتنی بر مغناطیس بر پایه حساسیت به قطبیت عمل می‌کنند [۳۱-۳۳]. مجموعه آزمایش‌های رفتاری نشان‌دهنده ویژگی‌های جذاب‌تر این حس مغناطیسی غیرقطبی هستند. در نهایت، نشان داده شد که حس ناوبری توسط پالس‌های مغناطیسی و میدان‌های مغناطیسی نوسان‌کننده خارجی ضعیف تغییر می‌کند [۳۴]. در پاسخ به آزمایش‌های اولیه که نشان‌دهنده ویژگی‌های گیرندگی مغناطیسی وابسته به نور هستند، شولتن^۱ و همکاران، مکانیسم جفت رادیکال را به عنوان یک قطب‌نمای شیمیایی-زیستی قابل قبول پیشنهاد کردند [۳۵]. در سال ۱۹۸۰، الریچ^۲ و همکارانش نشان دادند که میدان‌های مغناطیسی قوی (۱۰۰-۱۰ گوس) می‌تواند بر عملکرد واکنش جفت رادیکال تأثیر بگذارند [۳۶]. در سال ۲۰۰۰، ریتز^۳ در یک مقاله تحت عنوان «مدلی برای گیرندگی مغناطیسی مبتنی بر گیرنده نور در پرندگان» کار شولتن را گسترش داده و مدل صحیحی از مکانیسم جفت-رادیکال را ارائه

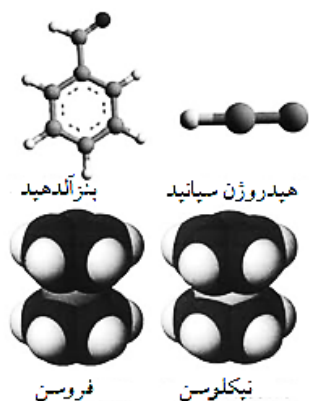


شکل ۱: قطب‌نمای کوانتومی پرندگان. الف. طرح کلی مکانیسم جفت رادیکال برای گیرندگی مغناطیسی که به طور بالقوه می‌تواند توسط سینه‌سرخ‌های اروپایی و سایر گونه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این مکانیسم سه مرحله اصلی وجود دارند. اول، انتقال الکترون القاشده با نور از مولکول تشکیل‌دهنده جفت-رادیکال به یک مولکول پذیرنده که یک جفت رادیکال را ایجاد می‌کند (ب و ج). دوم، حالت‌های اسپین-الکترون تک و سه‌تایی به دلیل کوپلینگ‌های میدان‌های مغناطیسی خارجی (زیمان^۱) و داخلی (هایپر فین) به یکدیگر تبدیل می‌شوند (د). سوم، جفت رادیکال‌های تک و سه‌تایی به ترتیب به محصولات تک و سه‌تایی تبدیل می‌شوند. نتایج بالا نشان می‌دهند که حالت اسپین الکترون باید زمان همدوسی بسیار طولانی داشته باشد [۱۸].

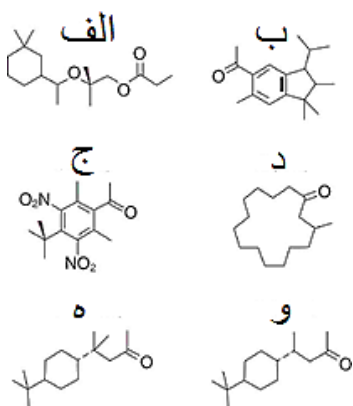
¹ Schulten
² Ulrich
³ Ritz

⁴ Hyperfine
⁵ Charge recombination

ترکیبات مانند فروسن^۶ و نیکلوسن^۷ دارای ساختار مشابه اما بوهای متفاوتی هستند. نیکلوسن دارای بوی سیکلوکلن^۸ است، درحالی که فروسن دارای بوی کافور است. علاوه بر این، هیدروژن سیانید و بنزالدهید دارای ساختار متفاوت اما بوی یکسان هستند (بادام تلخ). شکل ۴ مدل فضاپرکن^۹ بوها را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ساختار بنزالدهید و هیدروژن سیانید و مدل فضاپرکن فروسن و نیکلوسن [۴۴].



شکل ۴: بوهای الف تا د ساختار متفاوت اما بوی یکسانی دارند، درحالی که بوهای (ه) و (و) دارای ساختار یکسان اما بوی متفاوتی هستند [۴۵].

مثال‌های دیگر در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. ترکیب‌های الف تا د دارای ساختار متفاوت اما بوی یکسان هستند (مشک)، درحالی که (ه) و (و) دارای شکل مشابه ولی با بوی متمایزی

مطالعه‌ای که توسط هیسکوک^۱ و همکارانش انجام شد، آنها مدلی از مکانیسم جفت-رادیکال را که قادر به توضیح اینکه چگونه چشم پرنده قادر به تشخیص زاویه کمتر از پنج درجه است، ارائه کردند [۴۰]. آنها با استفاده از شبیه‌سازی‌های رایانه-ای، نشان دادند که هم‌دوسی طولانی مدت اسپینی کوانتومی، می‌تواند منجر به این دقت بالا در پرنده شود. آنها در این مطالعه نشان دادند که گیرندگی مغناطیسی جفت-رادیکال بیشتر از آنچه تا حالا شناخته شده است، کوانتومی است.

حس بویایی

حس بویایی یکی از ویژگی‌های مهم موجودات زنده است. مکانیسمی که بو به وسیله آن شناسایی می‌شود، به طور کامل ناشناخته است. پیش‌ازاین، نظریه‌ی شکل^۲ یا قفل و کلید^۳ به عنوان توضیحی برای مکانیسم درک بو ارائه شده است. بر اساس این نظریه، شکل ماده معطر باید متناسب با گیرنده‌ی بویایی باشد (مانند تناسب قفل و کلید). محدودیت‌های این مکانیسم سبب ارائه یک نظریه جدید به نام نظریه ارتعاش^۴ بویایی شده است. در نظریه‌ی ارتعاشی، بینی به عنوان یک طیف‌سنج در نظر گرفته می‌شود که ارتعاش مولکول معطر را شناسایی می‌کند. با این حال، این موضوع در حال حاضر بحث‌برانگیز است و به طور جدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه ما به بررسی نظریه‌های ارائه شده برای فرآیندهای دخیل در بویایی می‌پردازیم.

مدل قفل و کلید

در سال ۱۹۶۳، آمور^۵ [۴۱] اظهار داشت که پاسخ به بو بر اساس مکانیسم «قفل و کلید» کار می‌کند. مدل قفل و کلید نشان می‌دهد که شکل مولکول‌های گیرنده و مولکول معطر مکمل یکدیگر هستند؛ این ایده از مکانیسم مولکولی رفتار آنزیم‌ها الهام گرفته شده بود [۱۴]. با وجود این توضیح قدرتمند در مورد اتصال ساختاری مولکول بو، نشان داده شده است که مولکول‌هایی با ساختار متفاوت دارای بوی یکسان هستند و ترکیباتی با ساختارهای مشابه، بوی متفاوتی دارند [۴۲، ۴۳، ۱۰]. برخی از

¹ Hamish G. Hiscock

² Shape

³ Lock and key

⁴ Vibrational

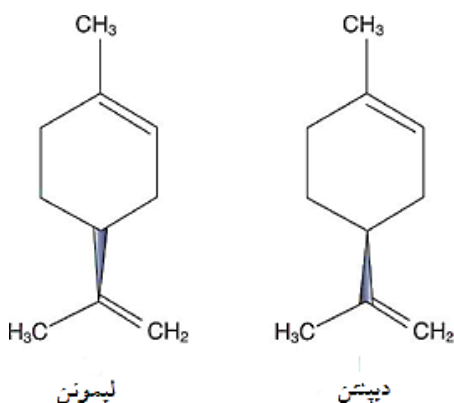
⁵ Amore

⁶ Ferrocene

⁷ Nickelocene

⁸ Cycloalkene

⁹ Space-filling model



شکل ۵: لیمونن و دیپنتن بوی متفاوتی دارند، درحالی که طبق مشاهدات دارای طیف یکسانی هستند [۴۵].

معطر باعث ایجاد بو می‌شوند [۴۷-۵۰]. گفته می‌شود که بخش اتصال گیرنده بویایی مانند دستگاه کارت‌خوان عمل می‌کند. به‌طور کلی، این بدان معنی است که مولکول بو ابتدا به شکل گیرنده مکمل خود متصل می‌شود، سپس تونل‌زنی الکترون ناشی از ارتعاش را انجام می‌دهد. گیرنده سمت راست، مولکول سمت راست را شناسایی می‌کند و بوی آن را تشخیص می‌دهد که متفاوت از مولکول سمت چپ شناسایی شده توسط گیرنده سمت چپ می‌باشد. نکته‌ای که هنوز واضح نیست، این است که شکل گیرنده بویایی چگونه است، چگونه دو مولکول گیرنده و دهنده مستقر شده و اتصال مولکول‌های سمت راست و سمت چپ به یک گیرنده یا گیرنده‌ای متفاوت صورت می‌گیرد.

عملکرد آنزیم‌ها

آنزیم‌ها برای عملکرد سلولی به دلیل کاتالیز کردن فرآیندهای بیوشیمیایی با سرعت بسیار پایین، ضروری هستند. شناخت اینکه چگونه آنزیم‌ها سرعت فرآیندها را افزایش می‌دهند هنوز جز مسائل باز است و نیازمند به تحقیق در این زمینه می‌باشد. نظریه حالت گذار^۶ (TST) به‌عنوان پایه‌ای برای توضیح عملکرد آنزیم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. پارادایم برای فرآیندهای آنزیمی مفهوم «قفل و کلید»^۷ است. این مفهوم از این واقعیت که

هستند. مشخص شده است که ترکیب (ه) بدون بو است، درحالی که ترکیب (و) بوی ادرار می‌دهد. این باعث ایجاد مشکل در نظریه «قفل و کلید» شده است.

نظریه ارتعاش بویایی

در سال ۱۹۳۸، مالکوم دیسون^۱ اظهار داشت که بینی، به‌جای شکل یک مولکول بو، فرکانس ارتعاشی آن را شناسایی می‌کند. دیسون اظهار داشت که مواد شیمیایی دارای بوی یکسان معمولاً گروه‌های شیمیایی یکسانی دارند (به‌عنوان مثال، C=O، این گروه‌های شیمیایی تا حد زیادی ویژگی‌های مولکول‌ها را تعیین می‌کنند). علاوه بر این، چند گروه شیمیایی دیگر مانند گروه تیول^۲ (SH) وجود دارند که بوی یک مولکول را صرف‌نظر از شکل آن تعیین می‌کنند (بویی شبیه به تخم‌مرغ فاسد). او فرکانس‌های ارتعاشی ترکیباتی را اندازه‌گیری کرد و مشخص شد که از اصل پراکندگی نور رامان^۳ تبعیت می‌کردند [۴۶]. او متوجه شد که بین برخی از فرکانس‌ها در طیف رامان با یک بوی خاص، ارتباطی قوی وجود دارد. همه‌ی ترکیباتی که دارای یک پیوند سولفور-هیدروژن انتهایی هستند دارای یک فرکانس رامان در همان محدوده می‌باشند.

استفاده از نظریه‌ی رامان برای توضیح بویایی دشوار بود. این نظریه زمانی بی‌فایده بود که مشاهده شد مولکول‌های کایرال (ترکیبات با ساختار شیمیایی یکسان و طیف رامان مشابه) می‌توانند به‌آسانی توسط بینی تشخیص داده شوند. یک مثال کلی لیمونن^۴ است که به‌عنوان مولکول راست‌دست و دیپنتن^۵ به‌عنوان مولکول چپ‌دست در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵). هر دوی آن‌ها دارای پیوند مولکولی یکسان و طیف رامان مشابه درحالی که بوی متفاوتی دارند.

مدل رمز کارت مغناطیسی^۶

رمز کارت مغناطیسی ترکیبی از نظریه «قفل و کلید» و نظریه ارتعاشی است. این مدل ابتدا توسط استونهام^۷ ارائه شد. او استدلال کرد که شکل گیرنده بویایی و ارتعاشات پیوند مولکول

¹ Malcolm Dyson

² Thiol

³ Raman

⁴ Limonene

⁵ Dipentene

⁶ Swipe-card model

⁷ Stoneham

⁸ Transition-State Theory

⁹ lock and key

نیاز به انرژی فعال‌سازی هست؛ اما باکمال تعجب، در دماهای پایین‌تر (۱۰۰-۴ کلوین) وابستگی اکسیداسیون به دما از بین می‌رود و واکنش هنوز بدون انرژی «لازم» برای غلبه بر سد پتانسیل TST رخ می‌دهد. این بدان معنی است که بدون نیاز به انرژی اولیه برای غلبه بر سد پتانسیل، ممکن است الکترون‌ها از طریق تونل‌زنی مکانیک کوانتومی از سد پتانسیل عبور کنند. این یافته در ابتدا ناتوانی TST را در محدوده‌ی کلاسیک آن برای توضیح عدم‌وابستگی به دما در دمای پایین و سرعت بالای انتقال الکترون را برجسته می‌کند. درحالی‌که افزایش دما باعث افزایش سرعت واکنش می‌شود، تئوری کلاسیکی هنوز نمی‌تواند بالاترین سرعت را گزارش دهد. تونل‌زنی کوانتومی یکی از راه‌های عبور از موانع است. آنها نشان دادند که انتقال الکترون تنها در محدوده فیزیک کوانتومی قابل توضیح دادن است [۲۵،۵۱].

کاربردهای نوظهور

بعد از مشخص شدن وجود اثرات کوانتومی در پدیده‌های زیستی نظیر فتوسنتز، جهت‌یابی پرندگان و سیستم بویایی، محققین بر آن شدند که بتوانند این فرآیندها را با حفظ ویژگی‌های کوانتومی تقلید کنند. به‌عبارت‌دیگر تلاش می‌کنند تا بتوانند مواد کوانتومی زیست‌تقلید ایجاد کنند. تقلید از فرآیند فتوسنتز با حفظ ویژگی‌های کوانتومی برای ارتقای سلول‌های خورشیدی، ساخت قطب‌نماهای زیست-شیمیایی که نسبت به قطب‌نمای رایج ساده‌تر و ارزان‌تر هستند. همچنین با الگوبرداری از مکانیسم کوانتومی دخیل در سیستم بویایی انسان بتوانند آشکارسازهایی برای تشخیص بوها (یا مواد شیمیایی) ارائه کنند. دانشمندان بر این باورند که این حوزه سبب موفقیت در دستگاه‌های عملی‌تر، مستحکم‌تر و بسیار کارآمد برای انرژی‌های سبز، پروتکل‌های ارتباطی و ناوبری، سنجش‌های زیستی و تصویربرداری تبدیل می‌شوند و همه این‌ها براساس منابع پایدار و سازگار با محیط‌زیست است. مطالعات این حوزه غالباً بر بخش نظری متمرکز است اما تحقیقات آزمایشگاهی برای تولید، ساخت و پیاده‌سازی نمونه‌های زیست‌تقلید تنها در تعداد محدودی از

آنزیم-پیش‌ماده^۱ به سایت فعال درون ساختار آنزیم متصل می‌شود و اتصالات درون‌مولکولی خاصی با اسیدآمینه‌های باقی‌مانده بر روی آن ایجاد می‌کند. این باقی‌مانده‌ها زمانی به‌عنوان هسته و یا کاتالیزورهای اسید-باز در واکنش عمل می‌کنند که پیش‌ماده دقیقاً (مثل یک کلید) به آنزیم (مثل قفل) متصل شود. در طول تبدیل واکنش‌دهنده‌ها به فرآورده، فرآیند به‌دست‌آوردن این ترتیب خاص بین آنزیم و پیش‌ماده، ممکن است به دلیل هدایت اوربیتالی^۲، پیش‌ماده را به سمت حالت انتقال سوق دهد. این تناسب^۳ سبب می‌شود که حالت انتقال به سمت محصول سوق پیدا کند و انرژی فعال‌سازی کاهش یابد. این مکانیسم ابتدا توسط پائولینگ^۴ با عبارت «تئوری حالت گذار پیشرفته» بیان شد. علت استفاده از واژه پیشرفته این بود که اتصال بین آنزیم و پیش‌ماده ترجیحی است و به‌راحتی قابل‌جایگزینی و تقلید نیست. بااین‌حال، یک معما گیج‌کننده وجود داشت: افزایش سرعتی که به دلیل این انتقال اتفاق می‌افتد با هیچ‌کدام از تعبیرهای کلاسیک و یا هر نظریه حالت گذار کاملاً کلاسیک قابل توضیح نبود (به‌عنوان‌مثال، تفاوت سرعت تجربی برای واکنش‌دهنده‌ها در محلول در مقایسه با محیط آنزیمی^۵ است). این سرعت‌های بالای واکنش نه‌تنها به‌طور تجربی مشاهده می‌شوند بلکه فرآیندهای آنزیمی وابستگی عجیبی به دما دارند. حال چگونه این نتایج عجیب و سرعت‌های بالا رخ می‌دهند؟ برای اولین بار، آزمایش‌هایی که توسط دوال و چانس^۶ انجام شد، نقش تونل‌زنی کوانتومی در فرآیندهای آنزیمی مشخص شد. در کروماتیوم وینسوم^۶، باکتری فتوسنتز کننده، اکسیداسیون نوری سیتوکروم^۷ که سبب انتقال الکترون از سیتوکروم به باکتریوکروموفیل می‌شود. به‌غیراز حالتی که دو مولکول بسیار به هم نزدیک باشند (تماس و اندروالسی)، انتقال الکترون از سیتوکروم به باکتریوکروموفیل به‌وسیله یک سد پتانسیل تقسیم می‌شود که از منظر فیزیک کلاسیک ممنوع است. آزمایش‌ها نشان‌داد، همان‌طور که انتظار می‌رود، اکسیداسیون در دماهای بالا وابسته به دما است. سرعت اکسیداسیون در دماهای بالاتر سریع‌تر است و نشان می‌دهد برای عبور از سد پتانسیل

^۱ enzyme-substrate: پیش‌ماده یا سوبسترا ماده‌ای است که آنزیم بر آن اثر می‌کند و تحت تاثیر آنزیم‌ها، سوبسترا تغییر می‌کند و به یک یا تعدادی محصول تبدیل می‌شود. هر یک از مولکول‌های زیستی و آلی، حتی در بعضی موارد یون‌ها، می‌توانند سوبسترا باشند

^۲ Orbital steering

^۳ Fit

^۴ Pauling

^۵ DeVault & Chance

^۶ Chromatium vinosum

^۷ Cytochrome

Grondelle R, Ishizaki A, Jonas DM, Lundeen JS, McCusker JK, Mukamel S, Ogilvie JP, Olaya-Castro A, Ratner MA, Spano FC, Whaley KB, Zhu X (2017) Using coherence to enhance function in chemical and biophysical systems. *Nature* 543 (7647):647-656. doi:10.1038/nature21425

[۴]. نصیری، فرید. شریعت پناهی، پیمان. رهنمای، محمد. موسوی موحدی، علی اکبر (۱۳۹۸)، زیست شناسی کوانتومی، نشریه نشاء علم، ۷۲-۶۳، (۲)۹

[5]. Marais A, Adams B, Ringsmuth AK, Ferretti M, Gruber JM, Hendrikx R, Schuld M, Smith SL, Sinayskiy I, Krüger TPJ, Petruccione F, van Grondelle R (2018) The future of quantum biology. *Journal of The Royal Society Interface* 15 (148):20180640. doi:10.1098/rsif.2018.0640

[6]. McFadden J, Al-Khalilij.al-khalili J (2018) The origins of quantum biology. 474 (2220). doi:10.1098/rspa.2018.0674

[۷]. سربلوکی م (۱۳۸۰) حیات چیست؟ دیدگاه‌های برجسته‌ترین دانشمندان معاصر. کتاب ماد

[8]. Lee H, Cheng Y-C, Fleming GR (2007) Coherence Dynamics in Photosynthesis: Protein Protection of Excitonic Coherence. *Science* 316 (5830):1462. doi:10.1126/science.1142188

[9]. Wolynes PG (2009) Some quantum weirdness in physiology. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (41):17247. doi:10.1073/pnas.0909421106

[10]. Brookes JC, Horsfield AP, Stoneham AM (2009) Odour character differences for enantiomers correlate with molecular flexibility. *Journal of The Royal Society Interface* 6 (30):75-86. doi:10.1098/rsif.2008.0165

[11]. Engel GS, Calhoun TR, Read EL, Ahn T-K, Mančal T, Cheng Y-C, Blankenship RE, Fleming GR (2007) Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature* 446 (7137):782-786. doi:10.1038/nature05678

[12]. Collini E, Wong CY, Wilk KE, Curmi PMG, Brumer P, Scholes GD (2010) Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature. *Nature* 463 (7281):644-647. doi:10.1038/nature08811

[13]. Kerpel C, Richert S, Storey JG, Pillai S, Liddell PA, Gust D, Mackenzie SR, Hore PJ, Timmel CR (2019) Chemical compass behaviour at microtesla magnetic fields strengthens the radical pair hypothesis of avian magnetoreception. *Nature Communications* 10 (1):3707. doi:10.1038/s41467-019-11655-2

[14]. Turin L (1996) A Spectroscopic Mechanism for Primary Olfactory Reception. *Chemical Senses* 21 (6):773-791. doi:10.1093/chemse/21.6.773

[15]. Arndt M, Juffmann T, Vedral V (2009) Quantum physics meets biology. *HFSP Journal* 3 (6):386-400. doi:10.2976/1.3244985

بهترین مراکز تحقیقاتی در حال انجام است. هر چند تاکنون هیچ‌کدام از این کاربردها عملی نشده است ولی تلاش‌های زیادی در حال انجام است. [۵۴،۵۵-۱۸،۵۲]. به عنوان مثال، همین اخیراً گروه تحقیقاتی اوله اینگانوس^۱ به‌طور کاملاً تصادفی همدوسی کوانتومی را در یک سلول خورشیدی آلی مشاهده کردند [۵۶]. در سال ۲۰۱۸، ایده استفاده از مکانیسم ارتعاشی مولکول‌ها در سیستم بویایی به عنوان پایه‌ای برای طراحی و توسعه‌ی سنسورهای مواد معطر ارائه شد. در این مطالعه ایده ساخت یک بینی الکترونیکی بر مبنای مکانیسم ارتعاشی دخیل در حس بویایی انسان ارائه شد [۵۷].

نتیجه‌گیری

زیست‌شناسی کوانتومی یک شاخه نوظهور از مطالعات کوانتومی است که هنوز در ابتدای راه قرار دارد و در بخش‌های مختلفی بر مبنای حدس و گمان است. پیشرفت در تکنیک‌های مشاهده به ما این امکان را می‌دهد که دینامیک زیستی را در مقیاس‌های به‌طور فزاینده کوچک بررسی کنیم. درک عمیق‌تر از پدیده‌های زیستی می‌تواند تأثیر شگرفی بر مصرف انرژی جوامع، توسعه فناوری‌های نوآورانه، زیست‌تقلید، پایدارتر و ارزان‌تر داشته باشد که بسیار فراتر از فناوری‌های امروزی ما است. مسائل بسیار زیادی مانده است تا کشف و توضیح داده شوند اما زیبایی هر یک از موارد گفته‌شده در این مطالعه این است که نگرش جدیدی در حوزه مطالعات کوانتومی و زیست‌شناسی مطرح شده است. با توجه به تحقیقات انجام‌شده در این حوزه، بسیار زود است که بخواهیم در مورد وجود این شاخه از علم با توجه به تردیدهایی که وجود دارد، با قطعیت سخن به میان آورد؛ اما آنچه مشخص است، شواهد اخیر وجود اثرات کوانتومی را در فرآیندهای زیستی را به‌خوبی نشان داده‌اند.

منابع و مؤاخذ

- [1]. Mohseni M, Omar Y, Engel GS, Plenio MB (2013) *Quantum effects in biology*. Cambridge University Press; 1 edition,
- [2]. Hore P, Rooman M (2011) *Discussions on Session 5B: Quantum effects in biology: enzyme activity, bird navigation*. *Procedia Chemistry* 3 (1):316-321. doi:https://doi.org/10.1016/j.proche.2011.08.039
- [3]. Scholes GD, Fleming GR, Chen LX, Aspuru-Guzik A, Buchleitner A, Coker DF, Engel GS, van

¹ Olle Inganäs

- [29]. Reberntrost P, Mohseni M, Kassal I, Lloyd S, Aspuru-Guzik A (2009) Environment-assisted quantum transport. *New Journal of Physics* 11 (3):033003. doi:10.1088/1367-2630/11/3/033003
- [30]. Offord C (2019) Quantum Biology May Help Solve Some of Life's Greatest Mysteries. *The Scientist*.
- [31]. Roswitha W, Wolfgang W (2014) Sensing Magnetic Directions in Birds: Radical Pair Processes Involving Cryptochrome. *Biosensors* 4 (3)
- [32]. Wiltschko W (2003) Magnetic Orientation in Birds and Other Animals. In: Kramer B (ed) *Advances in Solid State Physics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 815-832. doi:10.1007/978-3-540-44838-9_58
- [33]. Rodgers CT, Hore PJ (2009) Chemical magnetoreception in birds: The radical pair mechanism. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (2):353. doi:10.1073/pnas.0711968106
- [34]. Wiltschko R, Stapput K, Thalau P, Wiltschko W (2010) Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *Journal of The Royal Society Interface* 7 (suppl_2):S163-S177. doi:10.1098/rsif.2009.0367.focus
- [35]. Schulten K, Swenberg CE, Weller A (1978) A Biomagnetic Sensory Mechanism Based on Magnetic Field Modulated Coherent Electron Spin Motion. *Z Phys Chem (N F)* 111 (1):1-5. doi:10.1524/zpch.1978.111.1.001
- [36]. Steiner UE, Ulrich T (1989) Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena. *Chemical Reviews* 89 (1):51-147. doi:10.1021/cr00091a003
- [37]. Ritz T, Adem S, Schulten K (2000) A Model for Photoreceptor-Based Magnetoreception in Birds. *Biophys J* 78 (2):707-718. doi:https://doi.org/10.1016/S0006-3495(00)76629-X
- [38]. Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, Nießner C, Ritz T, Wiltschko W (2015) Magnetoreception in birds: the effect of radio-frequency fields. *Journal of The Royal Society Interface* 12 (103):20141103. doi:10.1098/rsif.2014.1103
- [39]. Shaw J, Boyd A, House M, Woodward R, Mathes F, Cowin G, Saunders M, Baer B (2015) Magnetic particle-mediated magnetoreception. *Journal of The Royal Society Interface* 12 (110):20150499. doi:10.1098/rsif.2015.0499
- [40]. Hiscock HG, Worster S, Kattnig DR, Steers C, Jin Y, Manolopoulos DE, Mouritsen H, Hore PJ (2016) The quantum needle of the avian magnetic compass. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113 (17):4634-4639. doi:10.1073/pnas.1600341113
- [41]. Amoore JE (1963) Stereochemical Theory of Olfaction. *Nature* 199 (4896):912-913. doi:10.1038/199912b0
- [42]. Bentley R (2006) The Nose as a Stereochemist. *Enantiomers and Odor*. *Chemical Reviews* 106 (9):4099-4112. doi:10.1021/cr050049t
- [16]. Romero E, Augulis R, Novoderezhkin VI, Ferretti M, Thieme J, Zigmantas D, van Grondelle R (2014) Quantum coherence in photosynthesis for efficient solar-energy conversion. *Nature Physics* 10 (9):676-682. doi:10.1038/nphys3017
- [17]. Rathbone HW, Davis JA, Michie KA, Goodchild SC, Robertson NO, Curmi PMG (2018) Coherent phenomena in photosynthetic light harvesting: part one—theory and spectroscopy. *Biophysical Reviews* 10 (5):1427-1441. doi:10.1007/s12551-018-0451-2
- [18]. Lambert N, Chen Y-N, Cheng Y-C, Li C-M, Chen G-Y, Nori F (2013) Quantum biology. *Nature Physics* 9 (1):10-18. doi:10.1038/nphys2474
- [19]. Cogdell RJ, Gall A, Kohler J (2006) The architecture and function of the light-harvesting apparatus of purple bacteria: from single molecules to membranes. *Quarterly Reviews of Biophysics* 39 (2):227-334
- [20]. Sarovar M, Ishizaki A, Fleming GR, Whaley KB (2010) Quantum entanglement in photosynthetic light-harvesting complexes. *Nature Physics* 6 (6):462-467. doi:10.1038/nphys1652
- [21]. Policht VR, Niedringhaus A, Ogilvie JP (2018) Characterization of Vibrational Coherence in Monomeric Bacteriochlorophyll a by Two-Dimensional Electronic Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 9 (22):6631-6637. doi:10.1021/acs.jpcllett.8b02691
- [22]. Rammler T, Wackenhut F, Oven-Krockhaus Sz, Rapp J, Forchhammer K, Harter K, Meixner AJ (2019) Quantum coherence in the photosynthesis apparatus of living cyanobacteria. *bioRxiv*:2019.2012.2013.875344. doi:10.1101/2019.12.13.875344
- [23]. Phelan BT, Schultz JD, Zhang J, Huang G-J, Young Ryan M, Wasielewski MR (2019) Quantum coherence in ultrafast photo-driven charge separation. *Faraday Discussions* 216 (0):319-338. doi:10.1039/C8FD00218E
- [24]. Wang L, Allodi MA, Engel GS (2019) Quantum coherences reveal excited-state dynamics in biophysical systems. *Nature Reviews Chemistry* 3 (8):477-490. doi:10.1038/s41570-019-0109-z
- [25]. Brookes JC (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):20160822. doi:10.1098/rspa.2016.0822
- [26]. Scholes GD, Fleming GR, Olaya-Castro A, van Grondelle R (2011) Lessons from nature about solar light harvesting. *Nature Chemistry* 3 (10):763-774. doi:10.1038/nchem.1145
- [27]. Lambert N, Chen Y-N, Cheng Y-C, Li C-M, Chen G-Y, Nori F (2012) Functional quantum biology in photosynthesis and magnetoreception. *arxiv*
- [28]. Mohseni M, Reberntrost P, Lloyd S, Aspuru-Guzik A (2008) Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer. *The Journal of Chemical Physics* 129 (17):174106. doi:10.1063/1.3002335

- Transfer in Potential-Induced Dioxygen Reduction. *Physical Review Letters* 121 (23):236001. doi:10.1103/PhysRevLett.121.236001
- [52]. Lidar DA (2019) Lecture Notes on the Theory of Open Quantum Systems. arXiv:190200967:131
- [53]. García-Pérez G, Rossi MAC, Maniscalco S (2020) IBM Q Experience as a versatile experimental testbed for simulating open quantum systems. *npj Quantum Information* 6 (1):1. doi:10.1038/s41534-019-0235-y
- [54]. Lukzen NN, Ivanov KL, Sadovsky VM, Sagdeev RZ (2020) Magnetic field effect on recombination of radicals diffusing on a two-dimensional plane. *The Journal of Chemical Physics* 152 (3):034103. doi:10.1063/1.5131583
- [55]. Jones GA, Bradshaw DS (2019) Resonance Energy Transfer: From Fundamental Theory to Recent Applications. *Frontiers in Physics* 7 (100). doi:10.3389/fphy.2019.00100
- [56]. Bian Q, Ma F, Chen S, Wei Q, Su X, Buyanova IA, Chen WM, Ponseca CS, Linares M, Karki KJ, Yartsev A, Inganäs O (2020) Vibronic coherence contributes to photocurrent generation in organic semiconductor heterojunction diodes. *Nature Communications* 11 (1):617. doi:10.1038/s41467-020-14476-w
- [57]. Kesarwani S, Mahajan A, Ganguly S IETS in MIS Contacts: Towards a Quantum Biomimetic Electronic Nose. In: 2018 IEEE SENSORS, 28-31 Oct. 2018 2018. pp 1-4. doi:10.1109/ICSENS.2018.8589860
- [43]. Gane S, Georganakis D, Maniati K, Vamvakias M, Ragoussis N, Skoulakis EMC, Turin L (2013) Molecular vibration-sensing component in human olfaction. *PLoS One* 8 (1):e55780. doi:10.1371/journal.pone.0055780
- [44]. Brookes JC (2011) Olfaction: the physics of how smell works? *Contemporary Physics* 52 (5):385-402. doi:10.1080/00107514.2011.597565
- [45]. Al-Khalili J, McFadden J (2014) *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*. Bantam Press, London, UK
- [46]. Asogwa C (2019) Quantum Biology: Can we explain olfaction using quantum phenomenon?
- [47]. Brookes JC, Hartoutsiou F, Horsfield AP, Stoneham AM (2007) Could humans recognize odor by phonon-assisted tunneling. *Physical Review Letters* 98. doi:10.1103/PhysRevLett.98.038101
- [48]. Brookes CJ, Horsfield PA, Stoneham MA (2012) The Swipe Card Model of Odorant Recognition. *Sensors* 12 (11). doi:10.3390/s121115709
- [49]. Liza N, Blair EP (2019) An explicit electron-vibron model for olfactory inelastic electron transfer spectroscopy. *Journal of Applied Physics* 125 (14):144701. doi:10.1063/1.5086053
- [50]. Som PM, Naidich TP (2018) The Olfactory System: Part II: How Olfaction Is Processed in the Olfactory Epithelium and Olfactory Bulb. *Neurographics* 8 (2):136-153. doi:10.3174/ng.1700003
- [51]. Sakaushi K, Lyalin A, Taketsugu T, Uosaki K (2018) Quantum-to-Classical Transition of Proton