

# زیست‌شناسی کوانتومی

جوانجو مک‌فادن، جیم الخیلی و ...

گردآوری و ترجمه

دکتر ایرج نبی‌پور



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# زیست‌شناسی کوانتومی

جوانجو مک‌فادن

جیم الخلیلی

گردآوری و ترجمه

دکتر ایرج نبی‌پور



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
مرکز تحقیقات زیست‌فناوری خارج فارس



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی تهران  
پژوهشگاه علوم غدد و متابولیسم



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر



بنیاد ملی تحقیقات  
بنیاد تحقیقات استان بوشهر



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی  
معاونت آموزشی  
کلان منطقه پنج

## به نام خداوند اندیشه و خرد

سرشناسه	: مکفادن، جانجو McFadden, Johnjoe
عنوان و نام پدیدآور	: زیست‌شناسی کوانتومی/جانجو مکفادن، جیم الخلیلی؛ گردآوری و ترجمه ایرج نبی‌پور؛ ویراستار دارا جوکار.
مشخصات نشر	: بوشهر: دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	: ۲۹۹ص: (مصور) رنگی).
شابک	: ۹۷۸-۶۲۲-۹۴۴۸۶-۰-۱
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: Life on the edge: the coming of age of quantum biology, 2014.
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: زیست‌شیمی کوانتومی Quantum biochemistry
	: زیست‌شناسی Biology
	: چرخه زندگی Life cycles (Biology)
شناسه افزوده	: خلیلی، جیم، ۱۹۶۲ - م.
شناسه افزوده	: Al-Khalili, Jim
شناسه افزوده	: ۱۹۴۲ Jim, Al-Khalili
شناسه افزوده	: نبی‌پور، ایرج، ۱۳۴۲ - مترجم
شناسه افزوده	: دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی استان بوشهر
رده بندی کنگره	: QP۵۱۷
رده بندی دیویی	: ۵۷۲/۳۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۸۷۵۵۳۸۳
اطلاعات رکورد کتابشناسی	: فیبا

## زیست‌شناسی کوانتومی

جانجو مکفادن، جیم الخلیلی

گردآوری و ترجمه: دکتر ایرج نبی‌پور

ویراستار و صفحه‌آرا: دارا جوکار

ناشر: انتشارات دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر

چاپ اول: زمستان ۱۴۰۰

چاپ: احمدی

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
مرکز تحقیقات زیست فناوری سلج فارس



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
پژوهشگاه علوم عدد و منابوبیوسم



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر



بنیاد ملی نخبگان  
بنیاد نخبگان استان بوشهر



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی  
معاونت آموزش  
کلان منطقه پنج

بوشهر، خیابان معلم، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر

تقدیم به دبیر عزیز زیست‌شناسی ام

جناب آقای ابراهیم سهرابی

که پایه‌های دانش زیست‌شناسی را به ما آموخت



## فهرست مطالب

سختن نخست .....	۱
فصل اول: جستاری بر زیست‌شناسی کوانتومی .....	۷
منشأ زیست‌شناسی کوانتومی .....	۱۲
زیست‌شناسی کوانتومی پس از کشف DNA .....	۱۶
زیست‌شناسی کوانتومی در سده بیست‌ویکم .....	۲۰
کاربردهای بالقوه .....	۲۳
مرکز تربیت دکترای زیست‌شناسی کوانتومی لورهیوم (QB-DTC) .....	۲۵
فصل دوم: مبانی مکانیک کوانتومی .....	۲۷
انقلاب کوانتوم .....	۴۳
معادله موجی شرودینگر .....	۴۹
معمای اصلی مکانیک کوانتومی .....	۵۳
اندازه‌گیری کوانتومی .....	۵۵
تونل‌زنی کوانتومی .....	۵۹
فصل سوم: آزیبها .....	۶۳
نقدی بر برهان تئوری «حالت گذار» .....	۷۰

انتقال الکترون .....	۷۴
تونل‌زنی کوانتومی الکترون در آنزیم‌شناسی .....	۷۹
تونل‌زنی H- در سامانه‌های زیست‌شناسی .....	۸۴
آنزیم‌ها و زیست‌شناسی کوانتومی .....	۹۱
<b>فصل چهارم: فتوسنتز .....</b>	<b>۹۵</b>
سفر به مرکز فتوسنتز .....	۹۹
تپش کوانتومی .....	۱۰۵
محاسبه‌گری طبیعی؟ .....	۱۱۳
بیان‌های ابراز شده مخلوط .....	۱۱۶
کوانتومی شدن .....	۱۱۸
حلقه کامل .....	۱۲۰
<b>فصل پنجم: حس‌گیرندگی مغناطیسی .....</b>	<b>۱۲۳</b>
قطب‌نمای پرنده‌ای .....	۱۲۹
اسپین کوانتومی و کنش شیح‌وار .....	۱۳۵
مدل «جفت رادیکال» .....	۱۴۶
جفت رادیکال‌های حاصله از کریپتوکروم .....	۱۴۸
نقش کریپتوکروم .....	۱۵۱
دیدگاه کوانتومی به حس‌گیرایی مغناطیسی .....	۱۵۴
چشم‌انداز .....	۱۶۲
<b>فصل ششم: بویایی .....</b>	<b>۱۶۵</b>
تئوری‌های بویایی .....	۱۷۵
الف/ مدل «قفل و کلید» .....	۱۷۵
ب/ تئوری ارتعاشی .....	۱۷۷



ج/ تئوری «شکل ضعیف» یا مدل اُدوتپ.....	۱۸۰
د/ تئوری طیف‌سنجی تونل‌زنی الکترون غیرکشسان تورین.....	۱۸۲
<b>فصل هفتم: ژن‌های کوانتومی.....</b>	<b>۱۹۳</b>
کدگذاری با پروتون‌ها.....	۱۹۹
آذرخش‌های کوانتومی در جهش DNA.....	۲۰۹
فراگرد کلی و نتیجه‌گیری.....	۲۱۵
<b>فصل هشتم: هوشیاری کوانتومی.....</b>	<b>۲۲۱</b>
سه تئوری مطرح ارتباط فیزیک کوانتومی با هوشیاری.....	۲۴۱
۱/ گرانش کوانتومی و هوشیاری کوانتومی.....	۲۴۱
۲/ تئوری ماتيو فيشر.....	۲۴۹
۳/ همدوسی کوانتومی در کانال‌های یونی عصبی.....	۲۵۴
<b>فصل نهم: منشأ حیات.....</b>	<b>۲۶۱</b>
جهان RNA.....	۲۶۹
آیا مکانیک کوانتومی می‌تواند کمک کند؟.....	۲۷۵
نخستین خود همانندساز شبیه چه چیزی بود؟.....	۲۸۱
<b>منابع گردآوری شده برای ترجمه.....</b>	<b>۲۸۵</b>



بسم الله الرحمن الرحيم  
آفریننده بنیادی ترین ذرات هستی

تا پیش از سده بیستم، زیست‌شناسی و فیزیک به ندرت با یکدیگر تلاقی می‌یافتند. به سامانه‌های زیستی این گونه نگریسته می‌شد که این سامانه‌ها اغلب آنچنان پیچیده بوده که شیوه‌های ریاضیاتی نمی‌توانند به آن‌ها چنگ زنند. چگونه می‌توان معادلات دیفرانسیل یا اصول فیزیکی را بر سامانه‌های پیچیده، بازتابش نمود؟ کار قهرمانانه شروودینگر در کتاب جاودانه‌اش به نام «حیات چیست؟» گامی سترگ در این راه بود و شروودینگر توانست چندین سیمای عملکردی ملکول DNA را که در آن زمان هنوز ناشناخته بود پیش‌بینی کند. چنین بود که آذرخش‌های مکانیک کوانتومی نیز بر جهان زیست‌شناسی فرود آمدند.

آرام‌آرام در طی سده بیستم به این آگاهی دست یافتیم که ارگانسیم‌های زنده نیز از نیرنگ‌های مکانیک کوانتومی برای برتری جستن خود در رقابت زیستی بهره می‌برند. این ارگانسیم‌ها چنین نیرنگ‌هایی را برای میلیون‌ها سال از تنازع بقاء خود به پرورش درآورده‌اند که رازگشایی از آن‌ها هم‌اکنون نیز برای فیزیکدانان ذرات بنیادی بسیار دشوار است.

شگفت‌آور آن که چگونه موجودات زنده می‌توانند از گستره مکانیک کوانتومی که در مقیاس نانومتری قابل مشاهده هستند در شرایط گرم، مرطوب و آشوبناک زیست‌شناسی استفاده کنند؟

در این نوشتار به پاره‌ای از هم‌آغوشی اصول فیزیک کوانتومی با زیست‌شناسی اشاره خواهیم کرد که برجستگی‌های آن را می‌توان در پدیده فتوسنتز، حس جهت‌یابی پرندگان، سازوکار پیچیده بویایی، جهش‌زایی در DNA، هوشیاری و سازوکارهای نورولوژیک و همچنین راز منشأ حیات یافت نمود. در سایه تلاش‌های دانشمندان برای به زیر سلطه در آوردن مکانیسم‌های پیچیده زیستی با اصول فیزیک کوانتومی، رشته علمی «زیست‌شناسی کوانتومی» گسترش یافته است. از پیشگامان مطرح کنونی این دانش، جوانجو مک‌فادن و جیم الخیلی می‌باشند که بر روی فرضیه‌های بحرانی زیست‌شناسی کوانتومی در دانشگاه سوری انگلستان در قالب تربیت دکترای زیست‌شناسی کوانتومی کار می‌کنند و یک گروه میان‌رشته‌ای شامل فیزیکدانان نظری، شیمیدانان محاسباتی، زیست‌شناسان ملکولی، متخصصین ژنتیکی و گستره‌های دیگر دانشگاهی را گرد هم آورده‌اند تا بر روی شگفتی‌های حیات و رمزهای ناگشوده آن بر پایه فیزیک کوانتومی کار کنند.

زیست‌شناسی کوانتومی، رشته‌ای بسیار جوان است و به تازگی دوران نوزایی آن آغاز گردیده است. فهم بسیاری از رویدادهای مکانیک کوانتومی در عرصه زیست‌شناسی بسیار دشوار است ولی جوانجو مک‌فادن و جیم

الخلیلی در کتاب پرمغز زیست‌شناسی کوانتومی خود (در لبهٔ حیات) تلاش کرده‌اند به زبان ساده این دانش را معرفی کنند. چکیده و فرازهایی بحرانی از کتاب «در لبهٔ حیات» آن دو، پایه‌های اصلی ساختار نوشتار کنونی را شکل داده‌اند اما از آنجا که چاپ کتاب به سال ۲۰۱۴ باز می‌گردد و از آن زمان تئوری‌های نوینی مطرح گردیده و یا فرضیه‌های زیست‌شناسی کوانتومی پیشین ویرایش یافته‌اند، تلاش گردیده است تا از جدیدترین مقالات مطرح در این عرصه برای روزآمد کردن متن کتاب مک‌فادن و الخلیلی استفاده شود که فهرست آن‌ها در پایان این ترجمه آورده شده است.

گفته شده است که اگر در جستجوی علمی باشید که درک آن دشوار باشد باید آن را در فیزیک کوانتومی بجوید زیرا این در قلمروی کوانتوم است که پدیده‌ها و رویدادهای غیرممکن رخ می‌دهند. در این گستره است که با اصولی بر می‌خوریم که بسیار گیج کننده بوده و در چهارچوب عقل نظری کلاسیک نمی‌گنجند. از این رو، خوانش این نوشتار ممکن است با دشواری‌های ویژه‌ای توأمان یابد که برای گریز از آن شاید لازم باشد خوانندهٔ صبور، با شکیبایی، متن را دوباره خوانی و یا چندباره خوانی کند. تلاش شده است در بخش مبانی فیزیک کوانتومی به پاره‌ای از پدیده‌ها و رویدادهای مکانیک کوانتومی مانند تونل‌زنی کوانتومی، همدوسی و ناهمدوسی، برهم‌نهی کوانتومی و برهم‌تنیدگی کوانتومی پردازیم. در نخست تصمیم بر آن بود که در ادامهٔ این ترجمه مباحثی نیز در خصوص پیوند یافتگی زیست‌شناسی سینتتیک با زیست‌شناسی کوانتومی،

کاربردهای پزشکی زیست‌شناسی کوانتومی، همبستگی میان زیست‌شناسی کوانتومی با مسئله پیچیدگی و تحلیل سامانه‌های پیچیده و همچنین گفتاری پیرامون راهبردهایی برای پیاده‌سازی زیست‌شناسی کوانتومی در کشور و توجه به مسئله منابع انسانی و آموزش، سرمایه‌گذاری و زیرساخت‌های پژوهشی زیست‌شناسی کوانتومی ارائه شود، اما آن را به فرصتی دیگر در نوشتاری مجزا، خواهیم گذاشت.

بی‌شک، در رشد پرهیجان دانش زیست‌شناسی کوانتومی، فرصت‌ها و پتانسیل‌های بالقوه‌ای نهفته‌اند که می‌توان از آن‌ها برای اهداف فناورانه مانند فناوری حسگرها، سلامت، فناوری‌های محیط زیست و اطلاعاتی استفاده کرد، زیرا آموزه‌های مکانیک کوانتومی که در قلمروی ارگانسیم‌ها آشکار شده‌اند هم اکنون در ساخت ادوات ذخیره‌سازی انرژی یا سلول‌های خورشیدی ارگانیک بهینه و یا در عرصهٔ رایانش کوانتومی و ساخت رایانه‌های کوانتومی، کاربرد یافته‌اند.

امید است در معاونت محترم علمی و فناوری ریاست جمهوری که به علوم نوین با دیدی مثبت و با تلاشی وصف‌ناپذیر اهتمام ورزیده شده است، به زیست‌شناسی کوانتومی نیز به عنوان ابزاری راهبردی برای آیندهٔ علم در کشور نگریسته شود.

اما پیش از این لازم است ادبیات علمی زیست‌شناسی کوانتومی گسترش یابد. بسیار جای سرافرازی است که سرکار خانم دکتر مریم فرخ‌نیا، عضو هیئت علمی پژوهشکدهٔ علوم زیست پزشکی خلیج فارس برای

نخستین بار در کشور، کارگاه زیست‌شناسی کوانتومی را در قالب یک سلسله دروس پایه در این زمینه در فضای مجازی با حضور دانشجویان و اساتید علاقه‌مند به این حوزه در پاییز ۱۴۰۰ در دانشگاه علوم پزشکی بوشهر برگزار کردند. ایشان همچنین با علاقه‌مندی به خوانش این ترجمه همت گماشتند که در اینجا سزاوار است از آن خواهر دانشمند سپاسگزاری نمایم.

از جناب آقای مهندس دارا جوکار که در بازآفرینی تصاویر، ویرایش و صفحه‌آرایی این کتاب تمام تلاش خود را به کار بستند نیز کمال امتنان را دارم. از جناب آقای حسین آذری و سرکار خانم فاطمه مرزوقی که در حروفچینی این نوشتار بسیار شکیبا بودند و نیز از سرکار خانم دکتر زهرا صفایی در انتشارات دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، صمیمانه قدردانی می‌نمایم.

امید است این نوشتار ناچیز بتواند «اثرات کوانتومی» خود را در سامانه پیچیده جامعه رو به رشد ایران فرود آورده و شاهد شکوفایی پایه‌های اصیل این علم در کشور باشیم تا بتوانیم از ثمرات فناوری آن در عرصه‌های گوناگون بهره‌مند شویم.

### دکتر ایرج نبی‌پور

گروه آینده‌نگاری، نظریه‌پردازی و رصد کلان سلامت

عضو پیوسته فرهنگستان علوم پزشکی جمهوری اسلامی ایران





فصل اول

# جستاری بر زیست‌شناسی کوانتومی



یک نفر می‌تواند به خوبی به چیزهای زنده بپردازد  
و ببیند که چقدر هنوز فیزیک ابتدایی است. (آلبرت اینشتین)

زیست‌شناسی، به صورت سنتی، در دامنهٔ کلاسیک قلمداد می‌شده است و این در حالی بوده است که فیزیک و شیمی به شکل ژرفی در مکانیک کوانتومی خود را سنگربندی نموده‌اند. سامانه‌های زیستی، به صورت بنیادی، مکانیک کوانتومی می‌باشند زیرا پویایی ملکول‌ها و اتم‌ها و دستگاه شیمیایی زیراتمی آن‌ها مانند هر چیز دیگری زیرفرمان قانون فیزیک کوانتوم می‌باشند. آیا این مقیاس اتمی در زیست‌شناسی اهمیت دارد؟ آیا حیات به مکانیک کوانتوم نیاز دارد؟ به زبان دیگر، مکانیک کوانتوم می‌تواند نقش بنیادی‌ای داشته باشد و اثری فیزیولوژیک در زیست‌شناسی خلق کند؟ از همه مهمتر، آیا ملکول‌های زیستی یا سامانه‌های زیست‌ملکولی‌ای هستند که اثرات مکانیک کوانتومی غیر ناچیزی را از خودشان نشان داده‌اند تا بدین سان برتری‌های زیست‌شناسی که نمی‌توان در چهارچوب‌های فیزیک کلاسیک آن‌ها را درک نمود، به دست آورده باشند؟ بسیاری از پیشگامان مکانیک کوانتومی بر این اندیشه‌اند که پاسخ این پرسش‌ها به صورت تصدیق‌آمیزی مثبت است. از نام‌آوران این گستره، اروین شرودینگر است که در کتاب پر نفوذش «حیات

چیست؟» به این پرسش پرداخته است.

تا همین اخیراً، اکثر رهیافت‌ها برای کاوش در اثرات کوانتومی در زیست‌شناسی، مانند رهیافت شرودینگر، کاملاً نظری بوده‌اند. این عمدتاً به این دلیل بوده است که رهیافت‌های تجربی‌ای که بتوانند اثرات ظریف و شکننده کوانتوم در سامانه‌های زیستی را در پس زمینۀ برهم‌کنش‌های ملکولی تصادفی، مورد شناسایی قرار دهند، هنوز توسعه نیافته بودند. با این وجود، در این هنگامه، مفید خواهد بود تعریف شود که معنای «اثرات کوانتوم» در زیست‌شناسی کوانتومی چیست؟ همان‌گونه که اشاره شد، مانند بنیادی‌ترین سطح ذرات، اتم‌ها و ملکول‌ها، حیات و زیست‌شناسی نیز مانند هر چیز دیگری در جهان، با قوانین کوانتومی، فرمان رانده می‌شوند. برای مثال، ساختار اربیتال‌های الکترونی و پیوندهای شیمیایی که گاهی از آن‌ها به عنوان نمونه‌های «ناچیز مکانیک کوانتومی» نام برده می‌شوند، برای زیست‌شناسی ساختاری و همچنین فیزیک و شیمی نقش مرکزی دارند. اما هنوز زیست‌شناسی ساختاری معمولاً به عنوان شاخه‌ای از زیست‌شناسی کوانتومی لحاظ نمی‌شود.

آنچه که به عنوان زیست‌شناسی کوانتومی معنا می‌یابد، درگیر بودن پدیده‌هایی هستند که به شکل طبیعی در حوزه کوانتومی اتم‌ها و ملکول‌ها قرار می‌گیرند مانند همدوسی<sup>۱</sup>، تونل‌زنی<sup>۲</sup>، درهم‌تنیدگی<sup>۳</sup> یا اسپین<sup>۴</sup>؛ زیرا

<sup>1</sup> Coherence

<sup>2</sup> Tunnelling

<sup>3</sup> Entanglement

<sup>4</sup> Spin

اثرات آن‌ها در سطح ماکروسکوپی به صورت طبیعی به دلیل پدیده ناهمدوسی باطل می‌گردند و بدین سان تصور می‌شده است که در محیط گرم، مرطوب و بی‌نظم درون سلول‌های زنده، رخداد آن‌ها بسیار غیرمحمتمل بوده است. از این مهمتر، برای این که این پدیده‌ها «غیرناچیز»<sup>۱</sup> باشند این اثرات می‌بایست یک فرایند زیستی که توسط تکامل احتمالاً بهینه می‌شود را توضیح دهند یا موجب پیش‌ران آن شوند. چنین است که یک اثر کوانتومی برای این که غیرناچیز باشد، زیست‌شناسی می‌بایست برای نمایش آن تکامل یافته باشد. این در حالی است که برعکس، یک اثر ناچیز، از مواد ساخته شده از اتم‌ها، ملکول‌ها و الکترون‌ها و غیره برمی‌خیزد و همه آن‌ها با مکانیک کوانتومی توصیف می‌شوند.

با در نظر گرفتن وجود این محدودیت‌ها در زیست‌شناسی کوانتومی در هنگامه دهه‌های نخستین پیدایی آن، جای شگفتی نیست که اکتشافات چشمگیر در این گستره می‌بایست منتظر توسعه یافتن مجموعه‌ای از تکنیک‌های مشاهده‌ای، ابزارها و رهیافت‌ها می‌مانند تا اندازه‌گیری پویایی زیست‌شناسی ملکولی پیچیده را با دقتی که تا پیش از این سابقه نداشته است، امکان‌پذیر گردد. هر چند که پاره‌ای از این رهیافت‌ها با نقادی نیرومندی روبه‌رو شده‌اند اما شواهدی که نشان می‌دهند اثرات مکانیک کوانتومی غیرناچیز نقش بنیادی در زیست‌شناسی بازی می‌کنند، رو به انباشت می‌باشند. بر پایه‌های چنین چشم‌اندازی،

---

<sup>1</sup> Non-trivial

امروزه زیست‌شناسی کوانتومی در جستجوی سازوکارها و پدیده‌هایی هستند که بر اثرات کوانتومی غیرناچیز در درون سلول‌های زنده متکی می‌باشند، تعریف می‌گردد. این «اثرات کوانتومی ناچیز» خود به معنای پدیده‌هایی همچون تونل‌زنی کوانتومی، همدوسی، طول حیات طولانی، برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی کوانتومی می‌باشند. این پدیده‌ها، اثرات شگفت‌انگیزی هستند که ما هم اکنون می‌بینیم که در درون ارگانیسم‌های زنده رخ می‌دهند. این همان زیست‌شناسی کوانتومی است.

### منشأ زیست‌شناسی کوانتومی

ما گرایش داریم تا پیرامون زیست‌شناسی کوانتومی چنین تفکر کنیم که یک گسترهٔ کاملاً نوین از علوم میان‌رشته‌ای است و در واقع نیز چنین است. اما در واقع زیست‌شناسی کوانتومی منشأهای کهن‌تری دارد و به اوایل دههٔ ۱۹۳۰ باز می‌گردد. ما حتی می‌توانیم آن را تا پیش از این زمان یعنی به خطابهٔ ویژه‌ای که نیلز بوهر<sup>۱</sup> در همایشی در سال ۱۹۲۹ ایراد کرد، آن را باز گردانیم. بوهر همانند بسیاری از پیشگامان کوانتوم بر این باور بود که ممکن است مکانیک کوانتومی کلید بسیاری از بخش‌های علم باشد. از آنجا که مکانیک کوانتومی بسیاری از مسائل فیزیک و شیمی را حل نموده بود، آن‌ها مغرورانه بر این فرض بودند که از آن می‌توان برای چیرگی بر رازهای خود «حیات» نیز استفاده کرد. بوهر خودش یکی از

<sup>۱</sup> Niels Bohr

همین پیشگامان اولیه کوانتوم بود که این نظر را ارائه نمود که مکانیک کوانتومی ممکن است بتواند چنین نقشی را داشته باشد. او الهام‌بخش فیزیکدانان دیگر بود؛ به ویژه کسانی مانند ماکس دلبروک<sup>۱</sup> که سپس تغییر گستره داد و به یک بیوفیزیکدان تبدیل گردید و بر روی زیست‌شناسی ملکولی کار کرد و نیز پاسکوال جردن<sup>۲</sup>. او به همراه ماکس بورن<sup>۳</sup> و ورنر هایزنبرگ<sup>۴</sup> در کوتینگن، یکی از مؤلفین مقالات کلاسیک مکانیک کوانتومی (مکانیک ماتریکس) بود. جردن هر چند به نسبت بورن و هایزنبرگ کمتر شناخته شده است ولی مسلماً یکی از نامداران پیشگام کوانتوم در دهه ۱۹۲۰ است و از زاویه‌ای دیگر، بنیان‌گذار گستره زیست‌شناسی کوانتومی قلمداد می‌گردد. او در جستجوی قوانینی از جهان کوانتوم مانند عدم تعیین<sup>۵</sup> و متممیت<sup>۶</sup> بود، ایده‌هایی که با مطالعه تحت نظر بوهر، توسعه داده بود و تلاش می‌کرد دریابد آیا این‌ها در «حیات»، به کار برده شده‌اند و آیا در «حیات»، نقش بحرانی‌ای بازی می‌کنند؟

در واقع، پاسکال جردن، احتمالاً اولین مقاله زیست‌شناسی کوانتومی را در سال ۱۹۳۲ به چاپ رساند و پاره‌ای از ایده‌های خود را در آن پیرامون این که چگونه مکانیک کوانتومی و عمل مشاهده و غیره موجب پدیده‌های حیات می‌گردند، ارائه داد که از زوایایی هنوز نیز سحرآمیز به نظر می‌آیند.

---

<sup>1</sup> Max Delbruck

<sup>2</sup> Pascual Jordan

<sup>3</sup> Max Born

<sup>4</sup> Werner Heisenberg

<sup>5</sup> Indeterminism

<sup>6</sup> Complementarity

مسئله این مسئله به دلیل وجود دیدگاه‌های سیاسی جردن بود که چندان این دیدگاه‌ها خوشایند نبودند. او یک نازی بود و نه از آن افرادی که فقط سر خود را در آلمان ۱۹۳۰ به زیر انداخته باشند. نه، او یک فاشیست تمام عیار بود و چنین بود که پس از جنگ با به ویرانی کشیده شدن شهرتش، زیست‌شناسی کوانتومی نیز از زاویه‌ای به دلیل آن که سایهٔ مدافعانهٔ پاسکوال جردن بر سرش بود، دچار خدشه گردید. با این وجود، هنوز کسانی دیگر بودند که بر این باور قرار داشتند مکانیک کوانتومی می‌تواند نقشی در توصیف «حیات» داشته باشد. بدین گونه، در اوایل ۱۹۳۰، کلوب زیست‌شناسی نظری کمبریج، شکل گرفت و حاوی تعدادی از بزرگ‌ترین متفکران آن زمان کمبریج بود؛ حتی افرادی همچون جی‌بی‌اس هالدین<sup>۱</sup> که یک زیست‌شناس تکاملی بزرگی بود و بسیاری از فلاسفه، ریاضیدانان و همچنین فیزیکدانان و زیست‌شناسان در آن قرار داشتند. در اصل، این کلوب، منادی دیدگاهی بود که ما آن را ارگانسیسم<sup>۲</sup> می‌نامیم.

ارگانسیسم، در میانهٔ دو مکتب فکری افراطی قرار داشت. در هنگامی که آن‌ها حیات را توصیف می‌کردند، هر آن چه که باور داشتند، غلط بود. در یک سو، مکانیستیک‌ها<sup>۳</sup> بودند که دیدگاهی فروکاستی<sup>۴</sup> به حیات داشتند آن‌ها به سامانه‌های زیستی که در سطح بسیار بالایی منظم بوده و آنتروپی را پایین نگه می‌دارند، همانند موتورهای بخار می‌نگریستند.

<sup>1</sup> J.B.S. Haldane

<sup>2</sup> Organicism

<sup>3</sup> Mechanical

<sup>4</sup> Reductionist



آن‌ها می‌گفتند، به ما انرژی بدهید، ما این انرژی مفید با آنتروپی پایین را برای نگهداری نظم در درون سامانه‌های زیستی استفاده می‌کنیم. این دیدگاه مکانیستیک‌ها بود. در آن سوی دیگر، ویتالیست‌ها<sup>۱</sup> قرار داشتند که واقعاً در قرن بیستم از درجه اعتبار ساقط شدند زیرا بر این باور بودند که آذرخی جادویی‌ای وجود دارد که حیات را با آن چه که آن را ویژه نموده و موجب تمایز موجود زنده از ماده غیرزنده می‌شود، اهداء نموده است.

اما طرفداران ارگانسیسم چنین گفتند: نه، "چیز بیشتری برای حیات وجود دارد تا این که آن را همچون گونه‌ای از ماشین‌ها قلمداد نمود، شما نمی‌توانید حیات را با آن چه که ما هم اکنون می‌دانیم (برای مثال، ساخت بر پایه قوانین نیوتونی)، درک کنید." ولی از سوی دیگر، آن‌ها بحث نمودند که نکته ویژه درباره حیات آن است که احتمالاً می‌بایست قوانین فیزیک و شیمی‌ای باشند که هنوز کشف نشده و یا به شکل خاصی به خوبی درک نشده‌اند و این قوانین برای توصیف «زیست‌شناسی» مورد نیاز هستند. شاید بتوان این قوانین را که دانشمندان در جستجوی آن هستند را در چیزی مانند قلمروی زیست‌شناسی کوانتومی، جستجو نمود.

مسئلاً، افزون بر گروهی که در دهه ۱۹۳۰ در کمبریج بودند، کسانی دیگر نیز حضور داشتند؛ برای مثال، قطعاً در میان پیشگامان کوانتوم، می‌بایست از اروین شرودینگر<sup>۲</sup> نیز یاد نمود زیرا کتابی بسیار مشهور تحت

---

<sup>۱</sup> Vitalism

<sup>۲</sup> Erwin Schrodinger

عنوان «حیات چیست؟» را در سال ۱۹۴۴ به چاپ رساند که در آن او این را پیشنهاد داد که شاید وجود نظم در سامانه‌های زیستی مانند وجود ماده بی‌جان در درجه حرارت بسیار پایین باشد. ما می‌دانیم هنگامی که به صفر مطلق نزدیک می‌شویم، اثرات کوانتومی مانند ابرسانایی<sup>۱</sup> و ابرشارگی<sup>۲</sup> مشارکت می‌کنند یعنی هنگامی که آشفتگی تصادفی ترمودینامیکی اتم‌ها و ملکول‌ها را می‌توان چنان آرام نمود تا اثرات کوانتومی، اجازه پابرجایی بیابند. ما این را در ماده بی‌جان در درجه حرارت پایین می‌بینیم. شرویدینگر این را بیان نمود که ماده زنده با آنروپی پایین و حالات نظم یافته بسیار بالایی که دارد شاید همانند ماده بی‌جان در درجه حرارت پایین باشد؛ بنابراین، موجود زنده با اثرات کوانتومی و پدیده‌های کوانتومی، موضوعیت می‌یابد. از این رو، مصالح ساخت بنیادی حیات تا حدی به قوانین فیزیک و به ویژه فیزیک کوانتومی نیاز دارند تا قابل درک باشند.

### زیست‌شناسی کوانتومی پس از کشف DNA

چیزی که ما می‌بایست به یاد داشته باشیم این است که مکانیک کوانتومی و سپس توسعه یافتگی تئوری میدان کوانتومی و غیره در موازات با حوزه‌های نوین زیست‌شناسی، ژنتیک و زیست‌شناسی ملکولی رشد یافتند. ژنتیک‌دانان زیست‌شناسان ملکولی در دهه‌های ۱۹۳۰، ۱۹۴۰ و در واقع در دهه ۱۹۵۰، یعنی هنگامی که ساختار مارپیچ دوگانه DNA

<sup>1</sup> Superconductivity

<sup>2</sup> Super fluidity

کشف گردید، واقعاً چنین احساس می‌کردند که نیاز به مکانیک کوانتومی ندارند و بدون آن موفق بودند. آن‌ها در حال یادگیری فراوان پیرامون ساختار ملکولی موجود در درون سامانه‌های زیستی بودند؛ هیچ نیازی به آوردن اعجاب مکانیک کوانتومی نداشتند و مقدار زیادی زیست‌شناسی کوانتومی به سوی فراموشی سپرده شد. به ویژه پس از کشف مارپیچ دوگانه DNA، متخصصین طیف‌سنجی و زیست‌شناسان ملکولی چنان بیشتر پیرامون مصالح ساخت سلول در حال یادگیری بودند که جایی برای برهم‌نهی کوانتومی، «مسئله اندازه‌گیری» در مکانیک کوانتومی و اصل عدم قطعیت نداشتند و آن‌ها را به فیزیکدانان واگذار نمودند.

در همین زمان، دست فیزیکدانان پر بود. آن‌ها همچنین در مکانیک کوانتومی تا تئوری میدان کوانتومی، فیزیک ذره‌ای و هسته‌ای پیشرفت کرده و پیرامون مصالح ساخت ماده به خوبی آموخته بودند. در منظر نظری، آن‌ها به این که چگونه می‌توان ایده‌های متفاوت و نیروهای طبیعی گوناگون را یکتا نموده و به آن‌ها وحدت بخشید نیز پرداختند. تئوری میدان کوانتومی خودش به الکترودینامیک کوانتومی و کرومودینامیک کوانتومی در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ تکامل یافت. فیزیکدانان، هر روز به صورت فزاینده‌ای به ساخت شتاب دهنده‌های بزرگ‌تر و بزرگ‌تر برای نگرستن به اجزای کوچک‌تر و کوچک‌تر ماده روی گرداندند. فیزیکدانان نمی‌خواستند که به جهان پیچیده زیست‌شناسی بنگرند و زیست‌شناسان نیز زمینه کافی برای مکانیک کوانتومی نداشتند تا پاره‌ای از ریاضیات

دشوار را برای فرایندهای زیستی به کار ببرند. چنین بود که برای چندین دهه، احتمالاً تا دههٔ ۱۹۹۰، کار اندکی در گسترهٔ زیست‌شناسی کوانتومی انجام شد.

به زیست‌شناسی کوانتومی به عنوان بازیگر بیرونی مملو از مباحث ضدونقیض و تا حدی گیج کننده در علم نگریسته می‌شد؛ به ویژه وقتی که شما به پاره‌ای از ایده‌هایی که در طی اواخر دههٔ ۱۹۶۰ و اواخر دههٔ ۱۹۷۰ رشد یافتند فکر می‌کنید یعنی زمانی که افراد از مکانیک کوانتومی برای توصیف همهٔ اقسام پدیده‌های عجیب و غریب مانند تله‌پاتی یا ایده‌های شبه علمی<sup>۱</sup> استفاده می‌کردند. مکانیک کوانتومی این بازوی مملو از رمز را توسعه داد. یکی از نمونه‌های مشهور، کار راجر پنروز<sup>۲</sup> و استوارت همروف<sup>۳</sup> بود. آن‌ها مکانیسمی را پیشنهاد دادند که ماهیت «هوشیاری»<sup>۴</sup> را توصیف می‌کرد. بر اساس این ایده، پروتئین‌هایی در سلول‌های عصبی مغز وجود دارند که در یک برهم‌نهی کوانتومی دو حالت هستند و هنگامی که به میزان کافی از آن‌ها، درهم‌تنیدگی می‌یابند، این هنگامی است که کلید هوشیاری روشن می‌شود. در نخست، هیجانی کوتاه پیرامون این ایده وجود داشت و با وجودی که هنوز در مورد این ایده مقالاتی به چاپ می‌رسد و از تئوری‌های مطرح در زمینه عملکرد مغز است و ما در بخش «هوشیاری کوانتومی» به آن می‌پردازیم اما گروهی دیگر از دانشمندان

<sup>1</sup> Pseudo-Science

<sup>2</sup> Roger Penrose

<sup>3</sup> Stuart Hameroff

<sup>4</sup> Consciousness

این گونه بیان کردند: "خیر، لحظه‌ای درنگ کنید، این که فقط مکانیک کوانتومی رمزآلود است و ما آن را درک نمی‌کنیم و هوشیاری نیز رمزآلود می‌بوده و ما آن را درک نمی‌کنیم به معنای آن نیست که این دو با یکدیگر پیوستگی داشته باشند." این دلیل دیگری بود که افراد در مورد پرداختن به پاره‌های ایده‌ها در گستره زیست‌شناسی کوانتومی خشنود نبودند. اما این موضوع تغییر کرد. در دهه ۱۹۹۰، ناگهان تکنیک‌های تجربی با استفاده از لیزرهای پالسی فوق سریع و طیف‌سنجی دوبعدی توسعه یافتند و امکان پمپاژ ملکول زیستی، برانگیخته کردن آن‌ها و دیدن این که چگونه فرو می‌پاشند، فراهم آمد و ناگهان پاره‌ای از این تجربیات، آغازی شدند برای نشان دادن این که اثرات کوانتومی‌ای وجود دارند که ادامه یافته، همدوسی طولانی‌مدت و اثرات تداخلی طول کشیده داشته که نمی‌توان به شیوه‌ای دیگر آن‌ها را توضیح داد و همه این موضوع‌ها در قالب مکانیک کوانتومی (چنانچه در فصل دوم به آن‌ها خواهیم پرداخت) مورد بحث قرار می‌گیرند و امروزه می‌دانیم که همه این رویدادها در بعضی از مکانیسم‌های خاص سلول‌های زنده رخ می‌دهند مانند شیوه‌ای که آنزیم‌ها ذرات را از یک ملکول به دیگری انتقال می‌دهند و خواهیم دید که چگونه الکترون‌ها و حتی پروتون‌ها که ۲۰۰۰ بار از لحاظ جرم بیشتر از الکترون‌ها هستند می‌توانند از یک مکان به مکان دیگر در سامانه‌های زیستی تونل‌زنی کنند.

### زیست‌شناسی کوانتومی در سده بیست‌ویکم

از دیدگاه تاریخی، یکی از رویدادهای برجسته در تاریخ زیست‌شناسی کوانتومی، همکاری جیم الخلیلی<sup>۱</sup> با جوانجو مک‌فادن<sup>۲</sup> می‌باشد. زمینه کاری الخلیلی فیزیک هسته‌ای نظری بود ولی مک‌فادن که همکار دانشگاهی الخلیلی می‌باشد به عنوان یک زیست‌شناس ملکولی در دانشگاه سوری<sup>۳</sup> کار می‌کرد. او در سال ۱۹۹۷ به بخش فیزیک آمد و سمیناری درباره ایده‌اش ارائه داد. او پذیرفت که این ایده احتمالاً گیج‌کننده بوده است یعنی این که گونه‌ای از جهش به نام جهش سازگارمند<sup>۴</sup> است که در آن برای مثال باکتری *E. coli* (که مک‌فادن بر روی آن پژوهش می‌کرد) بدون هیچ کمکی از محیط بیرون، می‌توانست برگزیند که در چه مسیری جهش یابد. این باکتری بر روی سطح ژنی در ظرف آزمایشگاهی قرار داده شد که به عنوان غذا فقط حاوی لاکتوز بود و این سویه باکتری *E. coli* استفاده شده در این آزمایش یک خطا در ژن‌هایش داشت که نمی‌توانست از لاکتوز استفاده کند و قطعاً می‌بایست می‌مرد. اما با شیوه جهش سازگارمند آن باکتری‌ای که توانست این خطا را با جهش ترمیم کند دارای این مزیت شد تا در این محیط بقاء یافته و رشد نماید. به زبان دیگر چنین به نظر آمد که باکتری مسیر جهش خود را برگزید؛ این یک معما در زیست‌شناسی ملکولی می‌باشد.

<sup>1</sup> Jim Al Khalili

<sup>2</sup> Johnjoe McFadden

<sup>3</sup> University of Surrey

<sup>4</sup> Adaptive mutations

ایده‌ای که مک‌فادن داشت این بود که به طریقی مقداری ملکول زیستی‌ای در درون باکتری *E. coli* وجود دارد که می‌تواند در یک برهم‌نهی دو حالت باشد یا جهش ژنتیکی مذکور توانست در یک برهم‌نهی<sup>۱</sup> دو حالته قرار گیرد و باکتری آن را تا زمانی که توانست در خود نگه داشت؛ یعنی زمانی که با محیطش مورد «مسئله اندازه‌گیری» قرار گرفت و دچار ناهمدوسی<sup>۲</sup> گردید. این ایده‌ای تکان دهنده بود که در واقع اکثر افراد حاضر در بخش فیزیک در دانشگاه سوری که به آن گوش می‌دادند آن را مردود دانستند که بخشی از آن به این دلیل بود که گیج کننده بود و بخشی دیگر به خاطر این بود مک‌فادن یک زیست‌شناس بود که تلاش می‌کرد به فیزیکدانان درباره مکانیک کوانتومی بگوید. اما ارائه این سمینار موجب ایجاد طرح دوستی میان الخلیلی و مک‌فادن گردید که تا کنون این دوستی بیش از دو دهه ادامه داشته است و در طی این همکاری علمی، ایده‌های مکانیک کوانتومی در زیست‌شناسی به خوبی مورد کاوش قرار گرفته‌اند و در واقع دانش زیست‌شناسی کوانتومی به جامعه علمی به زبانی شیوا و روان معرفی شده است.

مثال‌های دیگر از تلاش‌های انجام گرفته در کاوش‌های زیست‌شناسی کوانتومی را می‌توان در لابه‌لای مقالات ژورنال‌های برجسته علمی مانند نیچر و ساینس یافت نمود که گویای آن هستند که چیزی مکانیک کوانتومی در درون سلول‌های زنده می‌گذرد چه در پدیده

---

<sup>1</sup> Superposition

<sup>2</sup> Decoherence

فتوستنتز، چه در واکنش‌های کاتالیزوری آنزیم‌ها، چه در جهش‌های DNA و حتی در فرایند بویایی که در تئوری‌های بویایی انعکاس یافته‌اند، یا در حس‌گیری مغناطیسی<sup>۱</sup> که به واسطه آن بعضی از جانوران می‌توانند میدان مغناطیسی زمین را حس کنند یعنی قطب‌نمای شیمیایی که به آن‌ها این اجازه را می‌دهد که جهت‌یابی را بر پایه اثرات کوانتومی (درهم‌تنیدگی کوانتومی) انجام دهند. گرچه این ایده‌ها آکنده از مباحث ضدونقیض بوده و نظری می‌باشند ولی به شکل برجسته‌ای هیجان‌انگیز هستند.

هنگامی یک مسئله در مکانیک کوانتومی حل می‌شود فقط معادله شرودینگر نیست که حل می‌شود زیرا سامانه کوانتومی مورد ملاحظه، توسط یک محیط، احاطه شده است که نقش مهمی دارد و به این دلیل است که چرا افراد درباره زیست‌شناسی کوانتومی، دیر باور و شکاک هستند. آن‌ها می‌گویند، چگونه این اثرات کوانتومی کوتاه‌مدت، ناپایا و ظریف می‌توانند نقش عملکردی در همه ابعاد زیست‌شناسی داشته باشند با در نظر گرفتن این که سامانه‌های زیستی در محیط‌هایی هستند که پیچیده، گرم و آشفته می‌باشند. به طور یقین، ناهمدوسی در ظرف فمتوثانیه‌ها<sup>۲</sup> سر می‌رسد و برای این که آن‌ها نقش چشمگیری در زیست‌شناسی بازی کنند، مجبور هستند برای پیکو یا نانوثانیه و حتی درازتر به طول انجامند. به نظر می‌آید سرنخ‌هایی است که به واسطه آن‌ها حیات به گونه‌ای تکامل یافته است تا بتواند توانایی برقراری این اثرات

<sup>1</sup> Magnetoreception

<sup>2</sup> Femtoseconds



کوانتومی را برای دوره‌های زمانی طولانی‌تر «از دید زیست‌شناسی» نگه ندارد. آشفتگی موجود در محیط موجب پدید آمدن «مسئله اندازه‌گیری» در سامانه می‌شود و آن را ناهمدوس می‌کند. امروزه به نظر می‌آید که سامانه کوانتومی به شکل فزاینده‌ای با محیط اطرافش که آکنده از آشفتگی است، درهم‌تنیدگی می‌یابد و بیش از این که اثرات کوانتومی توسط این محیط نابود شوند چنین می‌آید که با آن رزونانس می‌یابد و به نظر می‌آید که آن‌ها را ابقاء می‌کند. از این رو، چنین تصور می‌رود که اشکال مختلفی از آشفتگی وجود دارند که می‌بایست ما آن را لحاظ داریم. بنابراین، از دیدگاه نظری، یک گستره فوق‌العاده هیجان‌انگیزی وجود دارد که پرسش‌های ما را گسترش می‌دهند مانند این که «مسئله اندازه‌گیری» چیست؟ پرسش‌هایی پیرامون بنیادهای مکانیک کوانتومی.

### کاربردهای بالقوه

مطالعه و پژوهش در مورد این پدیده‌ها در زیست‌شناسی کوانتومی مسلماً بیشتر از یک کنجکاوی عقلانی می‌باشد. در انگلستان بر روی گستره‌های سترگی سرمایه‌گذاری‌های پژوهشی انجام شده است. یکی از آن‌ها فناوری‌های کوانتومی است، یعنی ایده استفاده از مکانیک کوانتومی «غیرناچیز» جهت توسعه ابزارهای نوین و تکنیک‌های جدید و غیره مانند حسگرهای نوین. مقدار فراوانی پول در فناوری‌های کوانتومی هزینه می‌شود و این در حالی است که به زیست‌شناسی پرداخته نمی‌شود. در

سوی دیگر، زیست‌شناسی سینتتیک<sup>۱</sup> است که در حال توسعه دادن به ماشین‌هایی است که بر دستگاه حیات<sup>۲</sup> متکی می‌باشند. زیست‌شناسی کوانتومی به طریقی در پل قرار دارد؛ در میانه زیست‌شناسی سینتتیک و فناوری‌های کوانتومی.

اگر پاره‌ای از این سازوکارهایی که ما در سامانه‌های زیستی هم اکنون می‌بینیم مانند همدوسی طولانی‌مدت در پدیده فتوسنتز و تونل‌زنی کوانتومی در DNA آشکار شود که واقعیت داشته‌اند و جادویی نمی‌باشند، حیات تقریباً چهار میلیارد سال زمان داشته است تا ترفندهای خودش را تکمیل کند. چنانچه استفاده از قوانین جهان کوانتومی به «حیات» مزیتی را بر قوانین کلاسیک می‌دهد پس «حیات» از آن‌ها استفاده کرده است. بدین سان، ما نیز می‌توانیم بیاموزیم. اگر که «حیات» پاره‌ای از این ترفندها را به کار بسته است آیا ما نمی‌توانیم از «حیات» بیاموزیم و ایده‌های خودمان را توسعه دهیم؟ شاید این آموزه‌ها، راه را برای ساخت و پردازش رایانه‌های کوانتومی و حسگرهای جادویی گشایش نمایند. اگر گیاهان آموخته‌اند که چگونه از ترفندهای مکانیک کوانتومی برای بالاترین بهره‌وری‌های انرژی در پدیده فتوسنتز استفاده کنند ما نیز می‌توانیم از آن‌ها نسخه‌برداری نموده و در توسعه‌های فناوری‌های خود، بهره‌مند شویم.

<sup>1</sup> Synthetic biology

<sup>2</sup> Machinery of life

**مرکز تربیت دکترای زیست‌شناسی کوانتومی لورهیوم (QB-DTC)<sup>۱</sup>**

در دانشگاه سوری، الخلیلی و مک‌فادن، به صورت بسیار جدی، کار بر روی زیست‌شناسی کوانتومی را پیگیری کرده‌اند و با سرمایه‌گذاری تراست لورهیوم که نهادی خیریه است، مرکز تربیت دکترای زیست‌شناسی کوانتومی راه‌اندازی کرده‌اند که در مقطع Ph.D. دانشجوی می‌گیرد. در این مرکز، یک گروه میان‌رشته‌ای شامل فیزیکدانان نظری، شیمی‌دانان محاسباتی، زیست‌شناسان ملکولی، متخصصین ژنتیکی و گستره‌های دیگر دانشگاهی گرد هم آمده‌اند تا بر روی شگفتی‌های حیات و رمزهای ناگشوده آن کار کنند.

---

<sup>1</sup> Leverhulme Quantum Biology Doctoral Training Center (QB-DTC)



فصل دوم

# مبانی مکانیک کوانتومی



اگر امروزه از دانشمندان در یک نظرسنجی پرسش شود که موفقیت‌آمیزترین، گسترده‌ترین و مهم‌ترین تئوری در کل علم، کدام تئوری است پاسخ آن به این بستگی دارد که از دانشمند گستره علوم فیزیکی یا دانشمند حوزه علوم زیستی پرسیده شود. اکثر زیست‌شناسان، تئوری تکامل داروین و انتخاب طبیعی را به عنوان تأثیرگذارترین ایده موجود در نظر می‌گیرند اما گزینه مورد نظر یک فیزیکدان، تئوری «مکانیک کوانتومی» است که به ما یک تصویر کامل چشمگیر از واحدهای ساختاری کل گیتی ارائه می‌دهد. در واقع، بدون توان توصیفی آن، عمده درک کنونی ما از این که جهان چگونه کار می‌کند، ناپدید می‌گردد.

تقریباً ممکن است بسیاری افراد از «مکانیک کوانتومی» شنیده باشند. این ایده که مکانیک کوانتومی گستره‌ای دشوار و گیج‌کننده از دانش است که فقط اندکی از افراد بسیار باهوش آن را درک می‌کنند، بسیار در فرهنگ عامه ریشه دوانده است. اما، واقعیت آن است که مکانیک کوانتومی بخشی از همه زندگی ما از اوایل قرن بیستم بوده است. این علم به صورت یک تئوری ریاضی در میانه دهه ۱۹۲۰ برای بررسی جهان بسیار کوچک توسعه یافت که ناظر به رفتار اتم‌هایی است که هر چیزی که ما در اطراف خود می‌بینیم را می‌سازند و شامل ویژگی‌های حتی ذرات ریزتری است که اتم‌ها را می‌سازند؛ برای مثال، در توصیف قوانینی که

الکترون‌ها از آن‌ها تبعیت می‌کنند و این که چگونه آن‌ها خودشان را درون اتم‌ها مرتب می‌سازند، مکانیک کوانتومی همهٔ شیمی مواد و حتی الکترونیک را مورد حمایت قرار می‌دهد.

با وجود عجیب‌وغریب بودن آن، قوانین ریاضی‌اش در قلب اکثر پیشرفت‌های فناوریانهٔ نیم قرن گذشته نهفته است. بدون توصیف مکانیک کوانتومی از این که چگونه الکترون‌ها درون مواد حرکت می‌کنند، ما نمی‌توانستیم رفتار نیمه هادی‌هایی که بنیان الکترونیک مدرن هستند را درک کنیم و بدون درک نیمه هادی‌ها، ما ترانزیستور سلیکونی و بعداً ریزتراشه و رایانه‌های مدرن را توسعه نداده بودیم و این فهرست نیز رو به گسترش است.

بدون توسعه‌های فراهم آمده از مکانیک کوانتومی، لیزری موجود نبود و همچنین CD، DVD، Blue-ray Players؛ بدون مکانیک کوانتومی ما تلفن‌های هوشمند، نوبوری ماهواره‌ای یا اسکنرهای MRI نداشتیم. در واقع، اینگونه برآورد شده است که بیش از یک سوم تولید ناخالص کشورهای توسعه یافته وابسته به کاربردهایی است که بدون درک ما از جهان مکانیک کوانتوم، به سادگی می‌توانست وجود نداشته باشد.

این تازه آغاز راه است. می‌توانیم به آیندهٔ کوانتوم بنگریم؛ در گذر احتمالی طول زندگی خودمان، الکتریسیته تقریباً نامحدود، از طریق گداخت هسته‌ای رانش یافته با لیزر، ممکن است به زودی در دسترس قرار گیرد، هنگامی که ماشین‌های ملکولی صناعی، گستره‌ای از وظایف



متنوع را در حوزه‌های مهندسی، بیوشیمی و پزشکی به انجام خواهند رساند؛ هنگامی که رایانه‌های کوانتومی، هوش مصنوعی را فراهم خواهند ساخت و هنگامی که از فناوری تخیلی انتقال راه دور جهت انتقال اطلاعات، به شکل روزمره استفاده خواهد شد. انقلاب کوانتومی قرن بیستمی در قرن بیست‌ویکم به اوج می‌رسد و به شیوه‌های غیرقابل تصویری زندگی‌مان را متحول خواهد نمود.

اما دقیقاً مکانیک کوانتومی چیست؟ ما در جاهای گوناگونی از این نوشتار به این پرسش خواهیم پرداخت اما به عنوان یک چاشنی، ما آن را با تعدادی مثال از واقعیت پنهان کوانتوم که در زندگی‌مان تنیده شده است، آغاز می‌کنیم. نخستین مثال ما نمای شگفت‌آور جهان کوانتومی را به تصویر می‌کشد؛ به زبان دیگر، نمای تعریفی آن یعنی دوگانه «موج - ذره»<sup>۱</sup>. ما با این واقعیت آشنایی داریم که ما و همه چیزهای اطرافمان از مقادیری انبوه از ذرات کوچک و مجزا همچون اتم‌ها، الکترون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها تشکیل شده‌ایم. شما همچنین ممکن است آگاه باشید که انرژی مانند نور یا صدا، به صورت امواج می‌آید تا ذرات. امواج منتشر می‌شوند تا این که به صورت ذره باشند و همچنین آن‌ها در فضا جریان می‌یابند با سستی‌ها و فرورفتگی‌هایی همچون موج‌های دریا.

مکانیک کوانتومی هنگامی زایش یافت که در اولین سال‌های قرن بیستم کشف گردید که ذرات زیر اتمی می‌توانند همانند امواج رفتار کنند،

---

<sup>1</sup> Wave-particle duality

امواج نور می‌توانند مانند ذرات عمل نمایند. گرچه دوگانگی «موج - ذره» چیزی نیست که شما نیاز دارید هر روز آن را در نظر بگیرید، این دوگانگی، اساس تعداد فراوانی از ماشین‌های بسیار مهم همچون میکروسکوپ الکترونی می‌باشد. میکروسکوپ الکترونی از کشف این که الکترون‌ها ویژگی‌های موج همبسته مانند دارند الهام گرفته است. ماکس نول<sup>۱</sup> و ارنست روسکا<sup>۲</sup> پی بردند از آنجا که طول موج همبسته با الکترون‌ها، بسیار کوتاه‌تر از طول موج نور مرئی است، یک میکروسکوپ بر پایه تصویربرداری الکترونی می‌بایست بتواند جزئیات بسیار ظریف‌تری از میکروسکوپ نوری ارائه دهد. زیرا هر شیء یا جزء کوچکی که ابعاد کوچک‌تر از موجی که بر آن می‌افتد داشته باشد بر آن موج اثر یا تأثیری نخواهد گذاشت. بر این پایه، این دو دانشمند آلمانی اولین میکروسکوپ الکترونی را ساختند و از آن برای گرفتن تصاویر ویروس‌ها استفاده کردند که برای آن ارنست روسکا، جایزه دیرهنگام نوبل را در سال ۱۹۸۶ دریافت کرد (دو سال بعد او فوت نمود).

مثال دوم ما بنیادی‌تر است. چرا خورشید می‌درخشد؟ بسیاری از مردم احتمالاً آگاهی دارند که خورشید ضرورتاً یک راکتور گداخت هسته‌ای است که گاز هیدروژن را می‌سوزاند تا گرما و نور خورشیدی را رها سازد که موجب بقاء حیات در کره زمین می‌شود؛ ولی اندکی از مردم می‌دانند که اگر به خاطر ویژگی چشمگیر کوانتوم که به ذرات اجازه

---

<sup>1</sup> Max Knoll

<sup>2</sup> Ernst Ruska

می‌دهد «از دیوارها گذر کنند» نبود، خورشید اصلاً نمی‌درخشید. خورشید و در واقع همه ستاره‌ها در گیتی می‌توانند مقادیر عظیمی از انرژی ساطع کنند زیرا هسته‌های اتم هیدروژن که هر کدام از یک ذره واحد مثبت به نام پروتون تشکیل شده‌اند می‌توانند ترکیب و گداخته شوند و در نتیجه انرژی را به شکل تابش الکترومغناطیس که ما آن را نور خورشید می‌نامیم، رها سازند. دو هسته هیدروژن می‌توانند بسیار نزدیک شوند تا گداخته گردند؛ اما هر چقدر نزدیک‌تر شوند، نیروی دافع قوی‌تری میان آن‌ها به وجود می‌آید زیرا هر کدام بار الکترونی مثبتی حمل می‌کنند و بارهای همانند، یکدیگر را دفع می‌کنند. در واقع، برای این که آن‌ها به اندازه کافی نزدیک شوند تا گداخته شوند، ذرات می‌بایست قادر به گذر از معادل زیر اتمی (دیوار آجری) باشند؛ یعنی یک مانع انرژی آشکارا غیرقابل نفوذ و رسوخ. فیزیک کلاسیک که بر پایه قوانین حرکت نیوتون، مکانیک و جاذبه ساخته شده است و به خوبی جهان هر روزه توپ‌ها، فنرها و ماشین‌های بخار (و حتی سیارات) را توصیف می‌کند، پیش‌بینی می‌کرد که نباید اینچنین رخ دهد؛ ذرات می‌بایست بتوانند از دیوارها گذر کنند و بنابراین خورشید نمی‌باید بدرخشد. اما ذرات که از قوانین مکانیک کوانتومی تبعیت می‌کنند، مانند هسته‌های اتمی، نیرنگی پاک در آستین خود دارند. آن‌ها به آسانی می‌توانند از چنین موانعی از طریق فرایندی به نام «تونل‌زنی کوانتومی»<sup>۱</sup> گذر کنند. این ضرورتاً ویژگی دوگانگی موج-ذره‌ای‌شان است

---

<sup>۱</sup> Quantum tunnelling

که آن‌ها را قادر می‌سازد این کار را انجام دهند. یک هسته هیدروژن در درون خورشید انجام این کار را با دقتی شگفت‌آور، مدیریت می‌کند یعنی این ذره می‌تواند خود را به بیرون انتشار دهد و از مانع انرژی‌ای مانند یک فوتون «نشت»<sup>۱</sup> یابد تا به اندازه کافی به جفت خودش در بخش دیگر دیواره نزدیک شود تا گداخته گردد.

مثال سوم نیز ارتباط دارد ولی نمای گوناگون و حتی خارق‌العاده‌ای از جهان کوانتوم را به تصویر می‌کشد: پدیده‌ای به نام «برهم‌نهی»<sup>۲</sup> که به موجب آن ذرات می‌توانند دو یا یکصد، یا میلیون چیز را به یک باره انجام دهند. این ویژگی مسئول این واقعیت است که گیتی ما بی‌نهایت پیچیده و جالب است. چندان از مه‌بانگ<sup>۳</sup> (که جهان ما از طریق آن هستی یافت) نگذاشته بود که فضا لبریز از فقط یک گونه اتم شد: ساده‌ترین اتم در ساختار یعنی اتم هیدروژن که از یک پروتون مثبت و یک الکترون منفی ساخته شده است. این بیشتر یک مکان ملال‌انگیز بود که هیچ ستاره‌ای یا سیاره‌ای و مطلقاً هیچ موجود زنده‌ای نبود این در حالی است که عناصر قالب‌های ساختاری هر چیزی که در اطراف ما است شامل حتی خودمان، از بیش از فقط اتم هیدروژن ساخته شده‌اند که شامل عناصر سنگین‌تر مانند کربن، اکسیژن و آهن می‌شوند. خوشبختانه، این عناصر سنگین‌تر در درون ستاره‌های لبریز از اکسیژن ساخته شدند و جزء ترکیبی آغازین

---

<sup>1</sup> Leak

<sup>2</sup> Superposition

<sup>3</sup> Big Bang

آن‌ها یک ایزوتوپ سنگین هیدروژن به نام دوتریوم<sup>۱</sup> بوده که حیاتش مرهون یک جادوی کوانتومی بوده است.

اولین گام در این دستورالعمل آن است که ما هم اکنون توصیف کرده‌ایم، یعنی هنگامی که دو هسته هیدروژن، یعنی پروتون‌ها، به اندازه کافی از طریق «تونل‌زنی کوانتومی» نزدیک می‌شوند تا مقداری از انرژی‌ای را رها سازند که به نور خورشید تبدیل می‌شود تا سیاره ما را گرم سازد. آن گاه، دو پروتون مجبور هستند که به یکدیگر اتصال یابند و این سراسر نیست زیرا نیروهای میان آن‌ها یک چسب کافی و قوی را فراهم نمی‌سازند. همه هسته‌های اتمی از دو گونه ذره تشکیل می‌شوند: پروتون‌ها و زوج‌های از لحاظ الکتریکی خنثی یعنی نوترون‌ها. اگر یک هسته مقدار فراوانی از یک گونه ذره یا گونه‌ای دیگر داشته باشد، آن گاه قوانین مکانیک کوانتومی معین می‌کنند که تراز می‌بایست جبران گردد و آن ذرات زیادی به شکل دیگری تبدیل خواهند شد: پروتون‌ها به نوترون‌ها تبدیل خواهند شد یا نوترون‌ها به پروتون‌ها، از طریق فرایندی موسوم به «واپاشی بتا<sup>۲</sup>». این دقیقاً همان چیزی است که هنگامی دو پروتون به نزدیکی یکدیگر می‌آیند رخ می‌دهد: یک ترکیب از دو پروتون نمی‌تواند وجود داشته باشد و یکی از آن‌ها با «واپاشی - بتا» به نوترون تبدیل خواهد شد. پروتون باقیمانده و نوترون جدیداً تغییر یافته می‌توانند

<sup>1</sup> Deuterium

<sup>2</sup> Beta-decay

با یکدیگر اتصال یافته و دوترون<sup>۱</sup> (هسته یک اتم دوتریوم<sup>۲</sup>) را شکل بدهند که پس از آن واکنش‌های هسته‌ای، ساخت هسته‌های پیچیده‌تر عناصر سنگین‌تر از هیدروژن را امکان‌پذیر می‌نماید، مانند هلیوم (با دو پروتون و یک یا دو نوترون) تا کربن، نیتروژن، اکسیژن و غیره.

نکته کلیدی این است که دوترون هستی‌اش به توانایی آن به موجود بودن در دو حالت به صورت همزمان از طریق برهم‌نهی کوانتومی وابسته است. این به خاطر آن است که پروتون و نوترون می‌توانند به دو شیوه گوناگون با یکدیگر الصاق بیابند که به واسطه این که چگونه آن‌ها چرخش<sup>۳</sup> می‌یابند تمیز داده می‌شوند. ما بعداً با مفهوم «اسپین کوانتومی»<sup>۴</sup> آگاهی می‌یابیم که چگونه واقعاً واقع از چرخش یک شیء بزرگ مانند توپ تنیس متفاوت است؛ ولی برای اکنون ما با بینش کلاسیک یک ذره در حال چرخش ادامه می‌دهیم و هر دوی پروتون و نوترون را که با یکدیگر در درون دوترون با ترکیبی از رقص آهسته و همدمانه والس و رقص سوینگ سریع، به شکلی دقت‌آمیزی در حال رقصند، به ترسیم می‌کشیم. در اواخر دهه ۱۹۳۰ کشف گردید که در دوترون این دو ذره با یکدیگر در یک یا جهت دیگری از این دو حالت، نمی‌رقصند بلکه در هر دو حالت در یک زمان، می‌رقصند یعنی آن‌ها در یک منظره مه‌آلود همزمان والس و رقص سوینگ هستند و این است که آن‌ها را قادر می‌سازد با یکدیگر

<sup>1</sup> Deuteron

<sup>2</sup> Deuterium

<sup>3</sup> Spin

<sup>4</sup> Quantum spin

اتصال داشته باشند.

پاسخ روشن به این بیان این است: “ما چگونه می‌دانیم؟” مسلماً، هسته‌های اتم آن چنان کوچک هستند که دیده نمی‌شوند، بدین گونه آیا این منطقی‌تر نیست فرض شود که یک چیزی در درک ما از نیروهای هسته‌ای در حال گم شدن است؟ پاسخ خیر است، زیرا در بسیاری از آزمایشگاه‌ها، بارها و بارها تایید شده است که چنانچه پروتون و نوترون معادلی از رقص والس کوانتومی یا رقص سوینگ کوانتومی انجام می‌دادند، آن گاه چسب میانشان آن قدر قوی نبود که آن‌ها را به یکدیگر اتصال دهد؛ این فقط هنگامی رخ می‌دهد که این دو حالت بر بالای یکدیگر برهم‌نهی شوند یعنی دو واقعیت در یک زمان وجود داشته باشند و در آن هنگام است که نیروی اتصال دهنده به اندازه کافی قوی می‌شود. تصور وجود برهم‌نهی دو واقعیت تا حد کمی شبیه مخلوط کردن دو رنگ مانند آبی و زرد و ساخت رنگ سبز است. گرچه شما می‌دانید رنگ سبز ساخته شده از دو رنگ جزء ترکیبی است، اما رنگ سبز نه یکی از آن‌ها و نه رنگ دیگری است و نسبت‌های مختلف آبی و زرد، سایه‌های گوناگونی از سبز خواهند ساخت. به همین صورت، دوترون هنگامی بند می‌شود که این پروتون و نوترون عمدتاً با رقص والس قفل شده باشند که مقدار ناچیزی نیز از رقص سوینگ به آن‌ها افشانده شده باشد.

اگر ذرات نمی‌توانستند همزمان به رقص والس و سوینگ بپردازند، جهان ما به صورت سوپ گاز هیدروژن بود و نه چیزی بیشتر، هیچ ستاره‌ای

نمی‌درخشید و هیچ کدام از عناصر شکل نمی‌گرفتند و دیگر شما نبودید تا این واژگان را بخوانید. ما وجود داریم زیرا این توانایی پروتون‌ها و نوترون‌ها است که با شیوه‌ای کوانتومی و برخلاف عقل رفتار می‌کنند.

مثال آخر ما به جهان فناوری برمی‌گردد. ماهیت جهان کوانتوم را نه تنها با نگرستن به اشیاء ریز مانند ویروس‌ها می‌توان یافت بلکه با نگاه به اندرون بدن‌های خودمان نیز می‌توانیم دریافت کنیم. MRI یک تکنیک اسکن پزشکی است که با جزئیات شگفت‌آوری تصاویر بافت نرم را تولید می‌کند. اکثر توصیفات غیرفنی از عملکرد MRI، از این واقعیت اجتناب می‌کنند که این تکنیک به شیوهٔ مرموزی وابسته است که دنیای کوانتوم با آن کار می‌کند.

MRI از آهنرباهای قدرتمند بزرگ جهت هم‌راستایی محورهای هسته‌های در حال چرخش اتم‌های هیدروژن بدن بیمار، استفاده می‌کند. این اتم‌ها سپس با ضربانی از امواج رادیویی کوبیده می‌شوند و به هسته‌های هم‌راستا نیرو فرود آورده می‌شود تا در همان حالت عجیب کوانتومی چرخیدن در هر دو جهت به صورت هم‌زمان قرار گیرند. این از تجربهٔ روزانهٔ ما بسیار دور است تا بتوان از آن چه انجام می‌شود به تصویر کشید. آن چه که مهم است این است هنگامی که هسته‌های اتمی به حالت اولیهٔ خود به استراحت برمی‌گردند (حالتی که در پیش از این که پالس انرژی دریافت کنند و در یک برهم‌نهی کوانتومی تکانده شوند) آن‌ها این انرژی را آزاد می‌سازند و توسط ابزارهای الکترونیکی اسکنر MRI



برداشت می‌شود و برای تولید تصاویر زیبای ارگان‌های داخلی شما با به تصویر کشیدن جزئیات، استفاده می‌گردد.

ما در فصولی دیگر از این نوشتار، به صورت ژرف به شگفت‌انگیزترین نمای مکانیک کوانتومی می‌نگریم که «درهم‌تنیدگی کوانتومی»<sup>۱</sup> می‌نامند. درهم‌تنیدگی کوانتومی به ذراتی که روزگاری با یکدیگر بودند این اجازه را می‌دهد که در لحظه، با وجود این که در فواصل ستیجی از هم جدا شده قرار دارند، نیز به صورت تقریباً جادویی‌ای در ارتباط با یکدیگر بمانند. برای مثال، ذراتی که روزگاری نزدیک هم بودند و بعدها آن قدر از یکدیگر مجزا شدند که در مکان‌های مخالف یکدیگر در جهان قرار گرفتند، می‌توانند حداقل در اصل هنوز نیز با یکدیگر در ارتباط باشند. در واقع، با برانگیختن یک ذره، ذرهٔ جفتش که در نقطه‌ای دور قرار دارد را «بی‌درنگ» به پریدن برمی‌انگیزد. پیشگامان کوانتومی نشان دادند که درهم‌تنیدگی به طور طبیعی از معادلاتشان تبعیت می‌کنند، ولی دلالت‌های آن به اندازه‌ای خارق‌العاده بودند که حتی آلبرت انیشتین که به ما سیاه‌چاله و پیچیدگی فضا-زمان را عرضه داشت، از پذیرش درهم‌تنیدگی امتناع ورزید و به تمسخر از آن به عنوان «کنش شبح‌وار در یک مسافت» یاد نمود. در واقع، این «کنش یا عمل شبح‌وار در یک مسافت» است که اغلب «سالکان کوانتوم» را که ادعاهای گزافی برای درهم‌تنیدگی کوانتومی دارند، شیفته می‌سازد؛ برای مثال، این که درهم‌تنیدگی کوانتومی، پدیده‌های فراطبیعی

---

<sup>۱</sup> Quantum entanglement

(مانند تله‌پاتی) را شرح می‌دهد. انیشتین به دیده‌تردید به درهم‌تنیدگی می‌نگریست زیرا به نظر می‌آمد که تئوری نسبیتش را زیر پا می‌گذاشت؛ چون که بر اساس تئوری نسبیت، هیچ اثر یا سیگنالی هرگز نمی‌تواند در فضا، سریع‌تر از سرعت نور حرکت کند.

از این رو، بر اساس نظر انیشتین، ذرات دور از هم نمی‌توانستند پیوندهای شبیح‌وار آبی داشته باشند. در این مورد، انیشتین اشتباه می‌کرد: ما هم اکنون به صورت تجربی می‌دانیم که ذرات کوانتوم واقعاً می‌توانند به صورت آبی، پیوندهایی در گستره‌ای طولانی داشته باشند. فقط از جهت شگفتی شما، درهم‌تنیدگی کوانتومی نمی‌تواند به تله‌پاتی درجه‌ای از اعتبار دهد. این ایده که ویژگی خارق‌العاده درهم‌تنیدگی می‌تواند در واکنش‌های معمولی شیمیایی دخالت داشته باشد، در اوایل دهه ۱۹۷۰، عجیب و غریب در نظر گرفته شد. در آن زمان، بسیاری از دانشمندان هم‌عقیده با انیشتین، این که آیا ذرات درهم‌تنیده واقعاً وجود داشته باشند، در شک و تردید بودند زیرا هیچ کس هنوز آن‌ها را شناسایی نکرده بود. اما در طی دهه‌ها و پس از آن هنگام، بسیاری از تجربیات آزمایشگاهی نوآورانه، حقیقت این پیوندهای شبیح‌وار را مورد تأیید قرار داده‌اند؛ معروف‌ترین این آزمایشات در اوایل ۱۹۸۲ توسط یک گروه از فیزیکدانان فرانسوی تحت هدایت آلین اسپکت<sup>۱</sup> در دانشگاه پاریس - سوت<sup>۲</sup> انجام گردید.

گروه اسپکت، جفت‌هایی فوتونی (ذرات نور) تولید کردند که حالات

<sup>۱</sup> Alain Aspect

<sup>۲</sup> Paris-South

قطبش<sup>۱</sup> درهم‌تنیده شده داشتند. شاید برای اکثر ما «پدیده قطبش» از طریق پوشیدن عینک‌های پولاریزه آشنا باشد. هر فوتون نور یک نوع راستایی<sup>۲</sup> دارد که زاویه قطبش آن است و پدیده قطبش مقداری شبیه ویژگی اسپین (چرخش) می‌باشد که در مورد آن صحبت کردیم. فوتون‌های نور خورشید با همه زوایای ممکن قطبش می‌آیند ولی عینک‌های پولاریزه، آن‌ها را فیلتر می‌کنند و فقط به آن فوتون‌هایی که یک زاویه قطبش خاصی دارند اجازه عبور می‌دهند. گروه اسپکت، جفت‌های فوتونی با مسیرهای قطبشی تولید کرد که نه تنها متفاوت (بگذارید بگوییم که یکی به سوی بالا و دیگری به سوی پایین جهت یافته بودند) بلکه درهم‌تنیده بودند و مانند زوج‌های رقص کننده پیشین، هیچ کدام یک از زوج درهم‌تنیده، واقعاً به یک سو یا سوی دیگر، جهت نیافته بودند: آن‌ها هر دو به هر دو سو به صورت هم زمان، جهت داشتند (البته تا زمانی که مورد اندازه‌گیری قرار نگرفته بودند).

مفهوم اندازه‌گیری یکی از مرموزترین و مسلماً بحث برانگیزترین منظرهای مکانیک کوانتوم است و این به پرسشی که ما مطمئن هستیم هم اکنون به ذهن شما خطور کرده است مرتبط است: چرا ما همه اشیا را که می‌بینیم، همه آن چیزهای مرموز و شگفت‌انگیزی که ذرات کوانتومی می‌توانند انجام دهند را انجام نمی‌دهند؟ پاسخ این است که در سطح پایین جهان میکروسکوپی کوانتوم، ذرات می‌توانند به این شیوه‌های

---

<sup>1</sup> Polarization

<sup>2</sup> Directionality

عجیب و غریب رفتار کنند مانند انجام دادن دو چیز در یک لحظه، داشتن توانایی عبور از دیوارها یا دارا بودن پیوندهای شبح‌وار؛ فقط هنگامی که هیچ کس به آن‌ها نمی‌نگرد. در هنگامی که آن‌ها مورد مشاهده قرار گرفته یا به شیوه‌ای مورد اندازه‌گیری قرار گیرند، ویژگی مرموز بودن خودشان را از دست می‌دهند و همانند اشیاء کلاسیکی که ما در اطراف خودمان می‌بینیم، رفتار می‌کنند. اما این خود مسلماً پرسشی دیگر را بر می‌انگیزد: چه چیز خاصی پیرامون اندازه‌گیری است که اجازه می‌دهد رفتار کوانتومی به رفتار کلاسیک تبدیل شود؟ پاسخ به این پرسش در مورد داستان ما اساسی است زیرا «اندازه‌گیری» در مرز میان جهان‌های کوانتوم و کلاسیک (لبهٔ کوانتوم) جای می‌گیرد یعنی همان جایی که رازهای حیات و زیست‌شناسی نیز مسکن گزیده‌اند.

در واقع هنگامی که یک حالت قطبش ذره‌ای توسط ابزارهای علمی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد آن گاه به یک باره به آن فشار آورده می‌شود تا توانمندی‌های کوانتومی‌اش را فراموش کند (مانند نشانه‌گیری همزمان در بسیاری از جهات) و ویژگی معمول کلاسیک یعنی جهت‌گیری فقط در یک سو را به خود می‌گیرد. چنین است هنگامی که اسپکت حالت قطبش یکی از هر جفت فوتون‌های در هم تنیده را با مشاهدهٔ این که آیا می‌تواند از یک عدسی پولاریزه گذر کند، مورد اندازه‌گیری قرار داد، به یک باره آن فوتون، پیوند شبح‌وار با جفتش را از دست داد و یک جهت قطبش واحد را اخذ کرد. همین ماجرا بر سر جفتش که مهم نبود که در

چه مسافتی قرار داشت، به یک باره رخ داد. حداقل این مورد، آن چه می‌باشد که معادلات مکانیک کوانتومی پیش‌بینی می‌کردند و مسلماً این مورد، آن چیزی بود که انیشتین را مضطرب نمود.

آسپکت و گروهش، آزمایش معروف جفت‌های فوتونی که چندین متر در آزمایشگاهش، از یکدیگر جدا بودند را انجام داد، این مسافت به اندازه‌ای کافی بود که حتی یک اثر که با سرعت نور عبور می‌کرد نیز وجود نداشت (می‌دانیم که تئوری نسبیت به ما می‌گوید که چیزی نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور حرکت کند) تا بتواند میان آن دو گذر کرده و زوایای قطبش آن‌ها را هماهنگ سازد. اما اندازه‌گیری‌های ذرات جفت شده به یکدیگر همبسته بودند: هنگامی که قطبش یک فوتون سوی بالا را نشانه می‌رفت، فوتون دیگر سوی پایین را نشانه گرفته بود. از سال ۱۹۸۲، این آزمایش حتی برای ذراتی که صدها مایل از یکدیگر به دور بودند نیز تکرار شده است و هنوز آن‌ها پیوند درهم‌تنیدهٔ شب‌خوار خود را که انیشتین نتوانست آن را بپذیرد، دارا هستند.

## انقلاب کوانتوم

انفجار دانش علمی در طی سده‌های روشنگری هجدهم و نوزدهم، مکانیک نیوتونی، الکترومغناطیس و ترمودینامیک را تولید کرد و نشان داد که این سه حوزهٔ فیزیک به شکل موفقیت‌آمیزی حرکت و رفتار اشیاء و پدیده‌های روزمرهٔ ماکروسکوپیک جهان ما از گلوله‌های توپ تا ساعت‌ها،

از طوفان‌ها تا قطارهای بخار، از پاندول‌ها تا سیارات را توصیف می‌کنند. اما در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، هنگامی که فیزیکدانان توجه خود را به اجزاء میکروسکوپییک ماده (اتم و ملکول‌ها) نشان دادند آن‌ها کشف کردند که قوانین آشنا، دیگر کاربردی ندارند. فیزیک به یک انقلاب نیاز داشت.

اولین مرزشکنی عمده، خود مفهوم «کوانتوم» بود که توسط فیزیکدان آلمانی، ماکس پلانک<sup>۱</sup> ابداع شد. او نتایج خود را در یک سمینار به جامعه آلمانی فیزیک در ۱۴ دسامبر ۱۹۰۰ ارائه داد که این تاریخ به عنوان روز تولد تئوری کوانتوم در نظر گرفته می‌شود. درک معمول در آن زمان این بود که تابش حرارتی مانند دیگر اشکال انرژی به صورت یک موج از فضا گذر می‌کند. مسئله این بود که تئوری موج نمی‌توانست شیوه‌ای که بعضی از اشیاء داغ، انرژی از خود تابش می‌دهند را توضیح دهد. از این رو، پلانک این ایده بنیان برافکن را پیشنهاد داد که ماده موجود در دیواره‌های این اجسام داغ در بعضی از فرکانس‌های مجزا ارتعاش نموده که پیامد این بوده است که انرژی گرمایی فقط در توده‌های مجزای کوچکی به نام «کوانتا» تابش یافته که تقسیم‌ناپذیر بودند. این تئوری ساده او به شکل چشمگیری موفقیت‌آمیز جلوه می‌کرد ولی یک رجعت افراطی از تئوری کلاسیک تابش بود که انرژی در آن به صورت «ممتد» نگریسته می‌شد.

<sup>1</sup> Max Planck

<sup>2</sup> Quanta

تئوری او این پیشنهاد را می‌داد که انرژی به جای این که از ماده مانند آبی که به شکل ممتد از یک شیر آب می‌ریزد جریان بیابد به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های مجزای نامرئی می‌آید؛ مانند آن که از یک شیر آب به آهستگی آب چکه کند. پلانک هرگز از این ایده که انرژی ناصاف و موج‌دار باشد احساس راحتی نمی‌کرد ولی پنج سال بعد از این که او تئوری کوانتومی‌اش را پیشنهاد نمود، آلبرت انیشتین این ایده را گسترش داد و پیشنهاد کرد که همهٔ تابش الکترومغناطیس شامل نور، به جای این که ممتد باشد، «کوانتیزه<sup>۱</sup>» است و به شکل بسته‌های مجزا یا «ذرات» می‌آید که ما هم اکنون آن‌ها را فوتون‌ها می‌نامیم. او بیان نمود که این شیوه از تفکر پیرامون نور می‌تواند معمای قدیمی اثر فتوالکتریک را به عنوان پدیده‌ای که نور می‌تواند الکترون‌ها را از ماده کوبش کند، شرح دهد. این کار و نه تئوری‌های نسبیت مشهورترش بود که برای انیشتین جایزهٔ نوبل در سال ۱۹۲۱ را به ارمغان آورد.

به مقدار فراوانی شواهد موجود بودند تا بیان کنند که نور رفتار موجی از خود نشان می‌دهد. پس چگونه نور می‌تواند هم موج باشد و هم ذره؟ به نظر نمی‌آمد که در آن زمان (حداقل در چهارچوب دانش کلاسیک) این موضوع قابل درک بوده باشد. گام سترگ بعدی توسط فیزیکدان دانمارکی، نیلز بوهر<sup>۲</sup> برداشته شد که در منچستر در سال ۱۹۱۲ جهت

---

<sup>1</sup> Quantized

<sup>2</sup> Niels Bohr

کار کردن با ارنست رادرفورد<sup>۱</sup> حضور یافت.

رادرفورد مدل معروف سیاره‌ای اتمی خودش را که شامل یک هسته متراکم کوچک در مرکز بود و با الکترون‌های ریزتر در گردش احاطه شده بود، ارائه داده بود ولی هیچ کس درک نمی‌کرد که چگونه اتم‌ها پایدار می‌مانند. بر پایه تئوری الکترومغناطیس استاندارد، الکترون‌های با بار منفی می‌توانستند به صورت دائم انرژی نوری، مادامی که آن‌ها در دور هسته مثبت می‌چرخیدند، ساطع کنند. با انجام چنین کاری، آن‌ها انرژی خود را از دست داده و به سرعت (در ظرف یک هزار میلیاردم ثانیه) به سوی درون هسته چرخیده و موجب می‌شد که اتم فروپاشی پیدا کند. اما الکترون‌ها این کار را نمی‌کنند. پس آن‌ها چه ترفندی دارند؟

برای توصیف پایداری اتم‌ها، بوهر پیشنهاد داد که الکترون‌ها آزاد نیستند که هر اربیت<sup>۲</sup> را در دور هسته اشغال کنند بلکه برعکس فقط بعضی از اربیت‌های ثابت (کوانتیزه) را اشغال می‌کنند. یک الکترون فقط می‌تواند به مدار بعدی در سطح پایین‌تر با تابش یک توده یا کوانتوم از انرژی الکترومغناطیسی (یک فوتون)، دقیقاً هم‌ارز تفاوت انرژی‌های میان دو مدار درگیر، سقوط کند. به همین منوال، فقط می‌تواند به مدار بالاتر با جذب یک فوتون با انرژی مناسب پرش کند. در میانه دهه ۱۹۲۰، بوهر که به کپنهاک برگشته بود، یکی از چند فیزیکدان اروپایی‌ای بود که با بی‌قراری بر روی یک تئوری کامل‌تر و منسجم‌تر جهت توصیف آن چه که

<sup>1</sup> Ernest Rutherford

<sup>2</sup> Orbit



در جهان زیر اتمی می‌گذرد، کار می‌کرد. یکی از با استعدادترین‌های این گروه یک جوان نابغه آلمانی به نام ورنر هایزنبرگ<sup>۱</sup> بود. او در دوران نقاهت از بیماری تب یونجه در تابستان ۱۹۲۵، توسعه عمده‌ای در فرمول‌بندی ریاضیات جدیدی که برای توصیف جهان اتم‌ها نیاز بود، به سرانجام رساند. اما این یک نوع عجیبی از ریاضیات بود و آن چه پیرامون اتم‌ها به ما می‌گفت حتی عجیب‌تر بود. برای مثال، هایزنبرگ نه تنها برهان آورد که ما نمی‌توانیم به دقت بگوییم که یک الکترون اتمی (اگر آن را اندازه‌گیری نکنیم) کجاست بلکه خود الکترون نیز یک مکان مطلق ندارد زیرا به شیوه‌ای ناشناخته و مبهم، انتشار می‌یابد.

هایزنبرگ به ناچار نتیجه‌گیری کرد که جهان اتمی یک مکان شبح‌وار و خیالی است که فقط هنگامی وجود واقعی آن تبلور می‌یابد که ما یک دستگاه اندازه‌گیری را برای برهم‌کنش با آن، چیدمان کنیم. این همان فرایند «اندازه‌گیری کوانتومی» است که ما به شکل چکیده در اول این فصل به آن اشاره کردیم. هایزنبرگ نشان داد که این فرایند فقط نماهایی که به شکل خاصی برای اندازه‌گیری طراحی شده‌اند را آشکار می‌سازد. مانند هر ابزار واحد در داشبورد یک خودرو که فقط اطلاعاتی در مورد یک منظر از عملکرد آن خودرو مانند سرعت، مسافت طی شده یا درجه حرارت موتور را ارائه می‌دهد. بدین سان، می‌توانیم یک آزمایش را برای تعیین دقیق مکان یک الکترون در زمان داده شده معین سازیم؛

---

<sup>۱</sup> Werner Heisenberg

ما همچنین می‌توانیم آزمایش متفاوتی برای اندازه‌گیری سرعت همان الکترون چیدمان کنیم. اما هایزنبرگ نشان داد که از لحاظ ریاضی امکان ندارد یک آزمایش واحد را چیدمان کرد که در آن واحد بشود به شکل دقیقی که ما انتظار داریم هم دریابیم که یک الکترون در کجا است و با چه سرعتی هم زمان در حال حرکت می‌باشد.

در سال ۱۹۲۷، این مفهوم به شکل اصل مشهور عدم قطعیت هایزنبرگ<sup>۱</sup> شهرت یافت که از آن زمان چندین هزار بار در آزمایشگاه‌های سراسر دنیا مورد تأیید قرار گرفته است. این اصل مهمترین ایده در کل علم است و یکی از بنیادهای مکانیک کوانتوم محسوب می‌گردد.

در ژانویه ۱۹۲۶، فیزیکدان اتریشی به نام اروین شرودینگر<sup>۲</sup> در یک مقاله، تصویری متفاوت از اتم را ترسیم کرد. در آن یک معادله ریاضی پیشنهاد داد که هم اکنون به عنوان معادله شرودینگر شناخته می‌شود و نه تنها مسیری که یک ذره حرکت می‌کند بلکه مسیری که یک موج تکامل می‌یابد را توصیف می‌نماید. این معادله بیشتر این را پیشنهاد می‌کند که یک الکترون از این که یک ذره مبهم در اتم با یک مکان نامعلوم باشد که در دور تا دور هسته در چرخش است، در عوض الکترون یک موج می‌باشد که در سراسر اتم انتشار می‌یابد. بر خلاف هایزنبرگ که بر این باور بود که امکان ندارد از کل یک الکترون هنگامی که ما آن را اندازه‌گیری نکرده باشیم، تصویری داشته باشیم، شرودینگر ترجیح داد که

<sup>1</sup> Heisenberg uncertainty principle

<sup>2</sup> Erwin Schrodinger

در مورد آن به شکل یک موج واقعی فیزیکی هنگامی که ما به آن نمی‌نگریم فکر کند که به یک ذره مجزا هر هنگام که به آن می‌نگریم، دچار «واپاشی» می‌شود. نسخهٔ تئوری اتمی‌اش به عنوان مکانیک موج<sup>۱</sup> شناخته شد و معادلهٔ معروفش این که این امواج تکامل یافته و در طی زمان رفتار می‌کنند را توصیف می‌کند. امروزه ما هر دوی توصیف‌های هایزنبرگ و شرودینگر را به عنوان شیوه‌های متفاوت ترجمان ریاضی مکانیک کوانتومی قلمداد می‌کنیم و هر دو را در جایگاه خودشان، درست می‌انگاریم.

### معادلهٔ موجی شرودینگر

هنگامی که ما می‌خواهیم حرکت اشیاء روزمره را توصیف کنیم چه این که گلولهٔ توپ یا قطارهای بخاری یا سیارات باشند، هر کدام متشکل از تریلیون‌ها ذره هستند و ما مسئله را با استفاده از معادلات ریاضی که تاریخ آن به کارهای ایزاک نیوتون باز می‌گردد، حل می‌کنیم. اما اگر سیستمی که ما توصیف می‌کنیم در جهان کوانتومی قرار گرفته باشد، آن گاه ما به جای آن، از معادلهٔ شرودینگر استفاده می‌کنیم. در اینجا است که تفاوت شگرف میان دو رهیافت پدیدار می‌شود زیرا در جهان نیوتونی ما، حل یک معادلهٔ حرکتی یک عدد یا مجموعه‌ای از اعداد است که مکان دقیق یک شیء را در لحظه‌ای از زمان تعریف می‌کند. در جهان کوانتومی، حل معادلهٔ شرودینگر یک کمیت ریاضی موسوم به «معادلهٔ موج<sup>۲</sup>» است

<sup>1</sup> Wave Mechanics

<sup>2</sup> Wave function

که به ما مکان دقیق (برای مثال یک الکترون در لحظه‌ای خاص از زمان) را نمی‌گوید بلکه به جای آن یک مجموعه کامل از اعداد فراهم می‌نماید که «احتمال<sup>۱</sup>» این که الکترون در مکان‌های متفاوت در فضا «چنانچه ما در جستجوی آن در آنجا باشیم» را توصیف می‌کند.

مسلماً، اولین واکنش به این موضوع را شما این گونه بیان می‌کنید که پس این چندان خوب نیست، زیرا گفتنِ به ما که الکترون در کجا ممکن است باشد چندان اطلاعات مفیدی را حاصل نمی‌دهد. شما می‌خواهید دقیقاً بدانید که ذره در کجا است. اما برعکس یک شیء کلاسیک که همیشه یک مکان مطلق را در فضا اشغال می‌کند، یک الکترون می‌تواند در مکان‌های چندگانه در یک زمان باشد، تا در لحظه‌ای که مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. موج کوانتومی در سرتاسر همه فضا انتشار می‌یابد که این به معنای آن است که در توصیف یک الکترون در بهترین حالت می‌توانیم مجموعه‌ای از اعداد را ارائه کنیم که احتمال یافت آن را در یک مکان واحد نمی‌دهند ولی می‌توانند در هر نقطه‌ای از فضا به صورت همزمان بیان کنند. این مهم است که درک شود که این احتمالات کوانتومی نشانگر کمبودی در دانش ما نیست که بتوان با به دست آوردن اطلاعات بیشتر آن را جبران کرد بلکه بیشتر، آن‌ها، نمایی بنیادی از جهان طبیعی که در مقیاس میکروسکوپی هستند را بیان می‌دارند.

---

<sup>1</sup> Likelihood

تصور کنید که به یک دزد جواهرات عفو مشروط داده‌اند و از زندان آزاد شده است. به جای تصحیح شیوه زندگی‌اش او بلافاصله به عادت پیشین روی می‌آورد و به شکستن قفل خانه‌ها در سراسر شهر اقدام می‌کند. با مطالعه یک نقشه، پلیس‌ها جای پنهان شدنش از لحظه‌ای که آزاد شده است را دنبال می‌کنند. در حالی که آن‌ها نمی‌توانند به شکل نقطه‌ای، مکان دقیقش را در هر لحظه از زمان تعیین کنند، آن‌ها می‌توانند احتمالاتی را برای دزدی‌های مرتکب شده‌ او در مناطق گوناگون تعیین نمایند. برای شروع، آن‌ها خانه‌های نزدیک زندان را بالاترین خطر محسوب می‌دارند ولی با گذشت زمان، منطقه مورد تهدید، بزرگ‌تر می‌شود و با دانستن نوع وسایلی که او در گذشته دزدی آن‌ها را هدف قرار داده بود، پلیس می‌تواند با مقداری اطمینان بگوید که مناطق ثروتمندتر دارای جواهرات با ارزش، در بالاترین خطر به نسبت مناطق فقیرتر هستند. این موج جرم یک نفره که در سطح شهر در حال انتشار است می‌توان به عنوان یک موج احتمالاتی مدنظر قرار داد. این موج نه قابل لمس و نه واقعی است ولی فقط به صورت مجموعه‌ای از اعداد انتزاعی است که می‌توان به بخش‌های متنوع از شهر منسوب داشت. در شیوه‌ای مشابه، یک تابع موج از نقطه‌ای که یک الکترون در آخرین بار دیده شده است، انتشار می‌یابد. محاسبه تابع این موج در مکان‌ها و زمان‌های گوناگون به ما این اجازه را می‌دهد که احتمالاتی که ممکن است در دفعه بعد خود را نشان دهد تعیین کند.

اکنون، اگر پلیس در حین اخطار بتواند دزد را در حین ارتکاب جرم

در حالی که از پنجره با کیسه‌ای که بروی شانه‌اش قرار دارد دستگیرد کند چه اتفاقی می‌افتد؟ بلافاصله، توزیع پخش احتمالاتی مکان‌های پنهان شدن دزد به یک مکان و مطلقاً نه هر جای دیگر، به شکل مطلق، فرو پاشیده می‌شود. به همین منوال، چنانچه الکترون در مکان قطعی مورد شناسایی قرار گیرد آن گاه معادله موجی‌اش به یک باره تغییر می‌یابد. به زبان دیگر، در لحظه مورد شناسایی قرار گرفتنش، احتمال صفری از پیدا کردن آن در جایی دیگر وجود دارد.

اما باید به این نکته اشاره شود که در جایی، این مشابهت میان الکترون و دزد، در هم می‌شکند زیرا هر چند که پیش از این که پلیس‌ها او را بگیرند، آن‌ها می‌توانند احتمالاتی پیرامون مکان‌های پنهان شدن او تعیین کنند، آن‌ها می‌دانند به دلیل فقر اطلاعاتی که دارند نمی‌توانند مکان واقعی دزد را داشته باشند. همچنین دزد واقعاً خود را در سراسر شهر انتشار نمی‌دهد و این در حالی است که پلیس باید او را بالقوه در هر مکانی در نظر گیرد، در واقع مسلماً او در هر زمان داده شده فقط در یک نقطه است. اما بر خلاف دزد، هنگامی که ما الکترون را ردیابی نمی‌کنیم ما نمی‌توانیم به هیچ وجه مکان مطلق را در زمان خاصی مفروض داریم و در هر لحظه، در هر جایی می‌تواند باشد. فقط از طریق نگریستن (انجام یک اندازه‌گیری) ما می‌توانیم بر الکترون فشار آوریم تا خود را به یک ذره مستقر<sup>۱</sup>، بدل کند.

در سال ۱۹۲۷، در پناه تلاش‌های هایزنبرگ، شرودینگر و دیگران،

---

<sup>1</sup> Localized particle

پی‌ریزی‌های ریاضیاتی مکانیک کوانتوم به صورت ضروری کامل شدند. امروزه، آن‌ها بنیانی که فیزیک و شیمی بر آن ساخته می‌شوند را تشکیل می‌دهند و برای ما یک تصویر جامع از واحدهای ساختاری تمام جهان فراهم می‌سازند. در واقع، بدون توان توصیفی مکانیک کوانتومی در توصیف نمودن این که چگونه هر چیزی با یکدیگر مناسبت می‌یابد، به سادگی، به واقعیت پیوستن بسیاری از جهان فناورانه مدرن ما، امکان‌ناپذیر بود.

### معمای اصلی مکانیک کوانتومی

آزمایش دو شکاف<sup>۱</sup>، ساده‌ترین نمایش کامل آن چیزی است که در مادون جهان کوانتومی روی می‌دهد و به ما نشان می‌دهد که در این جهان «همه چیز متفاوت است». در این آزمایش، مفهوم «برهم‌نهی کوانتومی<sup>۲</sup>» نهفته است. بر پایه این آزمایش که ریشه در قلب مکانیک کوانتومی دارد، بر ما آشکار می‌شود که ذرات می‌توانند مانند امواج در فضا انتشار یابند و گاهی امواج می‌توانند همچون ذرات مکان یافته منفردی عمل کنند؛ بدین سان ما با مفهوم «دوگانگی موج - ذره<sup>۳</sup>» روبه‌رو می‌شویم. در واقع، تفسیر کوانتومی آزمایش دو شکاف<sup>۴</sup> آن است که در هر لحظه زمانی، هر اتم

<sup>1</sup> Two-slit experiment

<sup>2</sup> Quantum superposition

<sup>3</sup> Wave-particle duality



<sup>۴</sup> پیرامون آزمایش دو شکاف از طریق رمزیننه مقابل، ویدیویی در سایت آپارات مشاهده فرمایید:

لینک ویدئو: <https://www.aparat.com/v/fgiEM>

می‌بایست به صورت مجموعه‌ای از اعداد که مکان احتمالی آن را در فضا توصیف می‌کنند، توصیف گردد. این همان است که در بالا ما آن را با «معادله موج<sup>۱</sup>» معرفی نمودیم. در آنجا ما آن را با ایده مشابه ردیابی موج ارتکاب به جرم، توصیف کردیم که در سطح شهر انتشار می‌یابد و با احتمالات وقوع سرقت در مناطق مختلف ارزیابی می‌گردد. به شیوه‌ای مشابه، تابع موج، یک اتم را که از دو شکاف عبور می‌کند، به صورت احتمال یافت آن در هر جایی از دستگاه در هر زمان داده شده، توصیف می‌نماید.

در واقع، آزمایش شکاف دو درز به ما نشان می‌دهد که تمام هستی‌های کوانتومی چه ذرات بنیادین و یا اتم‌ها و ملکول‌ها که از این ذرات تشکیل شده‌اند، رفتار موجی هم‌دوس<sup>۲</sup> از خود نشان می‌دهند و بدین‌گونه آن‌ها با خودشان می‌توانند تداخل<sup>۳</sup> کنند. در این حالت کوانتومی، آن‌ها می‌توانند تمام رفتارهای خارق‌العاده کوانتومی را به نمایش بگذارند مانند این که می‌توانند به طور هم‌زمان در دو مکان متفاوت باشند، در دو جهت در یک زمان چرخش داشته باشند و از موانع نفوذناپذیر از طریق تونل‌زنی عبور کنند یا دارای ارتباطات درهم‌تنیده<sup>۴</sup> شبح وار با جفت خود در مکانی دور<sup>۴</sup> داشته باشند. ولی پس چرا ما یا شما که از ذرات کوانتومی تشکیل شده‌ایم، نمی‌توانیم در نهایت به طور هم‌زمان در دو مکان متفاوت باشیم؛ قطعاً گاهی اوقات در یک روز شلوغ وجود این

---

<sup>1</sup> Wave-function

<sup>2</sup> Coherent

<sup>3</sup> Interefere

<sup>4</sup> Distant partner



وضعیت می‌تواند بی‌نهایت مفید باشد. پاسخ در یک سطح بسیار ساده است: هر چقدر پیکر بزرگتر و حجیم‌تر باشد، ماهیت موج مانند آن کوچک‌تر خواهد بود و گاهی اوقات اندازه و تودهٔ یک انسان یا در واقع هر چیزی که به اندازه‌ای بزرگ باشد که با چشمان غیرمسلح دیده شود، چنان طول موج کوانتومی ریز و ناچیزی خواهد داشت که اثر قابل اندازه‌گیری‌ای را دارا نخواهد بود. اما در ژرفا، شما می‌توانید این گونه فکر کنید که چنانچه هر اتم در بدن شما با تمام اتم‌های دیگر که شما را محاصره کرده‌اند مشاهده یا اندازه‌گیری شود، هر ویژگی ظریف کوانتومی که ممکن است داشته باشد به سرعت نابود می‌شود. واقعاً «اندازه‌گیری» چه معنایی را در خود نهفته دارد؟

### اندازه‌گیری کوانتومی<sup>۱</sup>

مکانیک کوانتوم با همهٔ موفقیتش، پیرامون معادلاتی که به توصیف این می‌پردازند که چگونه یک الکترون در اطراف یک اتم می‌چرخد، به ما هنگامی که اندازه‌گیری خاصی از آن الکترون انجام می‌دهیم، چیزی نمی‌گوید. به این دلیل، پدران بنیان‌گذار مکانیک کوانتومی با مجموعه‌ای از قوانین تک‌کاره<sup>۲</sup> آمدند که همچون پیوستی به فرمول‌بندی ریاضیاتی آن شد. آن‌ها به «انگاره‌های کوانتوم» معروف هستند و مجموعه دستورالعمل‌هایی را برای ما فراهم می‌سازند تا در مورد این که چگونه پیش‌بینی‌های ریاضی معادلات را

<sup>1</sup> Quantum measurement

<sup>2</sup> Ad hoc rules

به خصوصیات محسوس و لمس‌پذیری که می‌توانیم مشاهده کنیم (مانند موقعیت و انرژی یک اتم در هر لحظه داده شده) ترجمان کنیم.

در طی دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، فیزیکدان‌ها به این درک نائل آمدند که چه اتفاقی در لحظه اندازه‌گیری یک سیستم کوانتومی (مانند یک اتم واحد در آزمایش دو شکاف) با یک وسیله اندازه‌گیری ماکروسکوپی می‌افتد؟ در حالی که چنین سیستمی با تابع موجی‌اش در یک برهم‌نهی کوانتومی است که به معنای بودن در دو مکان در یک لحظه واحد می‌باشد. این آشکار می‌گردد که مورد شناسایی قرار دادن اتم موجب می‌شود که تابع موجی آن اتم با همه تریلیون اتم‌های وسیله اندازه‌گیری در برهم‌کنش قرار گیرد. این برهم‌کنش موجب می‌شود که همدوسی ظریف کوانتومی، با شتاب بسیاری نشت یافته و در اغتشاش نامتجانس<sup>۱</sup> اطرافش از دست برود و این فرایندی است که به آن «ناهمدوسی»<sup>۲</sup> (از دست دادن همدوسی کوانتومی) می‌گویند.

اما پدیده ناهمدوسی نیازی به وسیله اندازه‌گیری ندارد تا خود را نشان دهد. این پدیده در همه زمان‌ها، در درون هر جسم کلاسیک واحدی انجام می‌پذیرد؛ زیرا اجزاء کوانتومی‌اش (اتم‌ها و ملکول‌ها) ارتعاش‌های حرارتی را متحمل می‌شوند و با همه اتم‌ها و ملکول‌های اطراف، مورد کوبش قرار می‌گیرد و بدین سان، همدوسی موج مانند آن‌ها از دست می‌رود. از این طریق ما می‌توانیم در مورد «ناهمدوسی» فکر کنیم؛ به این

<sup>۱</sup> Incoherent

<sup>۲</sup> Decoherence

واسطه که تمام موادی که در اطراف (محیط) یک اتم است انگار که به شکل دائم و پیوسته آن اتم را مورد «اندازه‌گیری» قرار می‌دهند و آن را وادار می‌نمایند که مانند یک ذره کلاسیک رفتار کند. در واقع، ناهمدوسی یکی از کارآمدترین و سریع‌ترین فرایندها در کل جهان فیزیکی است و به خاطر این کارآمدی چشمگیرش است که «ناهمدوسی» تا مدت‌های طولانی از مورد کشف قرار گرفتن، گریزان بود. این فقط هم اکنون است که فیزیکدانان در حال یاد گرفتن این هستند که چگونه آن را مورد مطالعه و کنترل قرار دهند.

در یک مدل همانند، هنگامی که ما سنگریزه‌ها را به سوی آب برکه‌ای ساکت پرتاب می‌کنیم، به صورت ساده می‌بینیم که با امواج همپوشان خود با یکدیگر تداخل می‌کنند. اما بگذارید تا همان سنگریزه را به پایه آبشار نیاگارا پرتاب کنیم. ماهیت پیچیده و آشوبناک آب بلافاصله هر الگوی تداخلی تولیدی با سنگریزه‌ها را از بین می‌برد. این آب متلاطم، معادل کلاسیک حرکت ملکولی تصادفی در اطراف یک سیستم کوانتومی است که به یک باره موجب ایجاد ناهمدوسی می‌شود. اکثر محیط‌ها در سطح ملکولی به متلاطمی آب در پایه آبشار نیاگارا هستند. ذرات موجود در مواد به شکل دائم و پیوسته توسط محیط اطرافشان (اتم‌ها، ملکول‌ها یا فوتون‌های نوری دیگر) مورد ضربه و تنه زدن قرار می‌گیرند.

در اینجا پسندیده است که پاره‌ای از ترمینولوژی مورد استفاده در مکانیک کوانتومی را واضح نماییم. ما در مورد بودن اتم‌ها در دو مکان در

یک زمان، رفتاری مشابه انتشار موجی و وجود یک «برهم‌نهی» دو یا بیشتر از حالت‌های گوناگون در یک زمان، صحبت کردیم. برای جامع‌تر کردن گفتار خود در یک سیمای ساده ما می‌توانیم همهٔ این مفاهیم را در مفهوم «همدوسی»<sup>۱</sup> قرار دهیم. بدین سان، هنگامی که ما به اثرات «همدوسی» اشاره می‌کنیم منظور آن است که چیزی به شیوهٔ مکانیک کوانتومی رفتار می‌کند و از خود رفتاری شبیه به موج نشان داده یا بیش از یک چیز در یک زمان انجام می‌دهد. بر اساس همین تعریف، «ناهمدوسی»، فرایندی فیزیکی است که در آن اثر همدوسی از دست می‌رود و کوانتوم به «کلاسیک» تبدیل می‌شود.

به شکل طبیعی از همدوسی کوانتومی انتظار می‌رود که حیات بسیار کوتاهی داشته باشد مگر آن که سیستم کوانتومی را بتوان از محیطش جداسازی نمود (برای مثال ذرات تنه زندهٔ کمتری باشند) تا بتوان همدوسی ظریف کوانتومی را نگهداشت. در واقع، برای نشان دادن الگوهای تداخلی با اتم‌های واحد، دانشمندان همهٔ هوای موجود در دستگاه را به بیرون پمپ کرده و دمای تجهیزات را تا نزدیکی نقطهٔ صفر مطلق سرد می‌سازند. فقط با این گام‌های بی‌نهایت است که آن‌ها می‌توانند اتم‌هایشان را در یک حالت کاملاً همدوسی کوانتومی، به اندازه‌ای کافی از لحاظ زمانی، نگه دارند تا از خود الگوهای تداخلی نشان دهند. به همین دلیل است که در دمای صفر مطلق، تمام اشیاء، موضوع قوانین کوانتومی هستند

---

<sup>1</sup> Coherence

تا ترمودینامیکی. بر همین اساس، شرودینگر بیان می‌کند که حیات یک پدیده در سطح کوانتومی است که موجودات را قادر می‌سازد در هوا پرواز کنند، بر روی دوپا یا چهارپا راه بروند، در اقیانوس‌ها شنا کنند، در خاک رشد کنند و یا در واقع همچون شما، به مطالعه این کتاب بپردازند.

### تونل‌زنی کوانتومی

تونل‌زنی کوانتومی<sup>۱</sup> فرایند ویژه‌ای است که به ذرات اجازه عبور از موانع نفوذناپذیر را می‌دهد مانند صوت که به آسانی از دیوارها عبور می‌کند. این پدیده در سال ۱۹۲۶ توسط فیزیکدان آلمانی، فردریش هاند<sup>۲</sup> کشف شد و به زودی به صورت موفقیت‌آمیزی برای توضیح مفهوم واپاشی رادیواکتیو توسط ژرژ گاموف، رونالد گارنی و ادوارد کوندون استفاده شد که همگی آن‌ها پس از آن ریاضیات مکانیک کوانتومی را به کار بردند. تونل‌زنی کوانتومی نمای اصلی فیزیک هسته‌ای شد ولی بعداً پی برده شد که این پدیده برای حیات روی زمین ضروری است زیرا به جفت‌های هسته‌های هیدروژن دارای بار مثبت در درون خورشید اجازه گداختن با یکدیگر در اولین گام تبدیل هیدروژن به هلیوم را می‌دهد و از این طریق انرژی شگرف خورشید آزاد می‌شود. اما تا همین اواخر فکر نمی‌شد که در فرایندهای زیستی نیز دخیل باشد.

حس مشترک ما بر این دلالت دارد که عبور ذرات از یک مانع به

<sup>۱</sup> Quantum tunneling

<sup>۲</sup> Friedrich Hund

سوی دیگر آن، امکان ناپذیر است. منظور ما از «مانع» در اینجا یک منطقه فضایی غیرقابل عبور است (بدون انرژی کافی)؛ همانند میدان‌های نیروی مورد استفاده در داستان‌های علمی تخیلی. این منطقه می‌تواند شامل یک ماده عایق شده باریک دوسوی هادی‌های الکتریکی یا حتی فضای خالی مانند شکاف میان دو آنزیم در زنجیره تنفسی باشد. این نیز می‌تواند نوعی از تپه انرژی باشد که می‌تواند سرنوشت واکنش‌های شیمیایی را محدود سازد. برای مثال، در نظر بگیرید که یک توپ از پایین یک تپه کوچک به بالای آن تپه شوت می‌شود. برای این که این توپ به بالا رود و از سوی دیگر تپه به پایین آید می‌بایست به آن یک ضربه محکم زده شود. همچنان که به بالای شیب می‌خزد، به آرامی شتاب آن کاسته می‌شود و بدون یک انرژی کافی (یک ضربه محکم)، به سادگی متوقف شده و دوباره از مسیر آمده، به عقب می‌غلتد. بر اساس مکانیک کلاسیک نیوتونی تنها راهی که یک توپ می‌تواند از این مانع عبور کند آن است که دارای انرژی کافی باشد تا به بالای تپه انرژی بالا برده شود. چنانچه در نظر بگیریم که این توپ یک الکترون است و تپه یک مانع انرژی پسران، آن گاه فقط یک احتمال کوچک وجود دارد و آن این است که الکترون بتواند از مانع به صورت یک موج عبور کند و این یک شیوه عبوری کارآمدتر جایگزین می‌باشد. این سبک تونل‌زنی کوانتومی است.

یک نمای مهم مکانیک کوانتومی این است که هر چقدر ذره سبک‌تر باشد، تونل‌زنی آن ساده‌تر است. این فرایند یک نمای فراگستر در جهان

زیراتمی است که اکنون پی برده شده است که تونل‌زنی الکترون‌ها شایع‌ترین است زیرا آن‌ها ذرات ابتدایی بسیار سبکی هستند. تونل‌زنی کوانتومی در مورد واپاشی رادیواکتیو توضیح می‌دهد که چگونه انجام می‌پذیرد: یعنی هنگامی که بعضی از هسته‌های اتمی مانند اورانیوم گاهی یک ذره را به بیرون پرتاب می‌کنند. این اولین کاربرد موفقیت‌آمیز مکانیک کوانتومی در مسائل فیزیک هسته‌ای بود. در شیمی، تونل‌زنی کوانتومی، هم اکنون در مورد الکترون‌ها، پروتون‌ها (هسته‌های هیدورژن) و حتی اتم‌های سنگین‌تر به خوبی مورد درک قرار گرفته‌اند. یک سیمای اصلی تونل‌زنی کوانتومی این است که مانند دیگر پدیده‌های کوانتومی، به ماهیت انتشار موج مانند ذرات ماده، بستگی دارد. اما برای یک بدن که از ذرات بسیار فراوانی ساخته شده است، برای تونل‌زنی می‌بایست منظر موجی همه اجزاء خودش را در مسیر تونل‌زنی، حفظ کند؛ به گونه‌ای که فرازاها و نشیب‌های موج‌ها هم‌زمانی یابند که ما می‌گوییم سیستم در حالت هم‌دوسی<sup>۱</sup> قرار دارد و یا به شکل ساده در حالت «کوک» است.

ناهم‌دوسی فرایندی است که در آن همه امواج کوانتومی به سرعت از گام با دیگری بیرون می‌آیند و هر رفتار هم‌دوس و متجانس کلی را می‌شویند و بدین طریق توان بدن را برای تونل‌زنی کوانتومی نابود می‌سازند. برای این که یک ذره بتواند تونل‌زنی کوانتومی کند می‌بایست ماهیت موجی خود را حفظ کند تا بتواند از مانع تراوش کند. اما آن‌ها از

---

<sup>1</sup> Coherent

تریلیون‌ها اتم ساخته شده‌اند که نمی‌توانند در یک حالت موج مانند متجانسِ هماهنگ شده، رفتار نمایند. با استانداردهای کوانتومی، سلول‌های زنده نیز اشیاء بزرگی هستند؛ در نتیجه در نگاه نخست چنین به نظر می‌آید که محتمل نیست که تونل‌زنی کوانتومی را بتوان در درون سلول‌های زنده گرم و مرطوب که اتم‌ها و ملکول‌های آن‌ها اکثراً به حالت ناهمدوس در حرکت هستند، یافت نمود. اما در بخش‌های دیگر این نوشتار ما در خواهیم یافت (برای مثال در درون یک آنزیم)، شرایط متفاوت است؛ ذرات آن در یک رقص هماهنگ تا یک غوغای آشوبناک، درگیر هستند.



فصل سوم

آنزیم‌ها



میکروب‌ها، گیاهان و جانوران برای انجام تقریباً همهٔ فعالیت‌های زیستی خود به آنزیم‌ها وابسته هستند. آنزیم‌ها، در ساخت ملکول‌های زیستی مانند پروتئین‌ها، DNA، چربی‌ها و کاربوهدرات‌ها مشارکت نموده و مجموعه‌ای کاملاً متفاوت از آن‌ها ملکول‌های زیستی را خرد کرده و بازچرخش می‌نمایند. از این رو، آنزیم‌ها مسئول هضم، تنفس، فتوسنتز و متابولیسم هستند؛ یعنی هر آن چه که ما را می‌سازند و موجب می‌شوند که ما زنده بمانیم. چنین است که آن‌ها را «موتور حیات»<sup>۱</sup> نامیده‌اند.

خود آنزیم‌ها، ملکول‌های زیستی بزرگی هستند که معمولاً پروتئینی می‌باشند و به واکنش‌های شیمیایی سرعت می‌بخشند. ملکول‌هایی که واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کنند و پس از آن تغییر نمی‌یابند کاتالیست<sup>۲</sup> می‌نامند؛ موادی که آنزیم‌ها بر آن‌ها واکنش می‌کنند به عنوان سوبسترا<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. آنزیم‌ها ویژگی چشم‌گیری را برای ملکول‌های سوبسترای خود دارند و می‌توانند به «کمال کاتالیتیکی»<sup>۴</sup> نایل آیند. یک رهیافت رایج برای مدل‌سازی کنش کاتالیزوری، به تصویر کشیدن یک دیوارهٔ انرژی<sup>۵</sup> است که می‌باید بر آن غالب آمد تا بتوان از واکنش‌دهنده‌ها<sup>۶</sup>

<sup>1</sup> Engine of life

<sup>2</sup> Catalyst

<sup>3</sup> Substrate

<sup>4</sup> Catalytic perfection

<sup>5</sup> Energy barrier

<sup>6</sup> Reactants

به محصولات<sup>۱</sup> امتداد داد.

هر چقدر این دیواره انرژی بلندتر باشد، سرعت واکنش آهسته‌تر است. آنزیم‌ها (همانند دیگر کاتالیست‌ها)، میزان انرژی مورد نیاز برای عبور از این دیواره را کاهش داده و بدین طریق، میزان سرعت واکنش را افزایش می‌دهند. ساختار واکنش دهنده در فراز دیواره انرژی از لحاظ انرژی ناپایدار است و به عنوان حالت گذار<sup>۲</sup> شناخته می‌شود. انرژی مورد نیاز برای عبور از دیواره، انرژی فعال‌سازی قلمداد می‌گردد؛ چیرگی به دیواره با برانگیختگی حرارتی سوپسترا انجام می‌شود. این یک شیوه کلاسیک عبور از دیواره است که به نام تئوری حالت گذار<sup>۳</sup> (TST) نامیده شده است و به عنوان نمایی از واکنش‌های بر پایه فعالیت کاتالیزوری آنزیم‌ها در طی پنجاه سال پیش محسوب می‌شده است. اما پیشرفت‌های اخیر نشانگر آن است که این تصویر کلاسیک مندرج در کتب جامع، از پایه دچار کاستی (حداقل در بعضی از شرایط) است که در این نوشتار به آن خواهیم پرداخت.

اما پیش از آن، نیم‌نگاهی خواهیم انداخت به آن که چگونه کاتالیزورها کار خود را انجام می‌دهند. به زبان دیگر چگونه در واکنش‌های شیمیایی آنزیم‌ها می‌توانند بر دیواره انرژی غلبه نموده و سیمای آن را به گونه‌ای تغییر دهند تا سوپستراها بتوانند محصولات را سریع‌تر از نبود کاتالیزوری به سرانجام برسانند.

<sup>1</sup> Products

<sup>2</sup> Transition state

<sup>3</sup> Transition state theory

ما می‌توانیم چگونگی عملکرد آنزیم‌ها را در سطح ملکولی نشان دهیم که در شکستن ملکول کولاژن در فقدان آنزیم کولاژناز چگونه واکنش به آهستگی انجام می‌شود. کولاژن یک رشته از اسیدهای آمینه است که هر کدام توسط یک پیوند پپتیدی (خطوط تیره در تصویر ۱) میان کربن و اتم نیتروژن به یکدیگر اتصال یافته‌اند. پیوند پپتیدی یکی از چندین نوع پیوندی است که اتم‌ها را در درون ملکول‌ها به یکدیگر نگه می‌دارد. این پیوند ضرورتاً از یک جفت الکترون است که میان اتم‌های نیتروژن و کربن به اشتراک گذاشته شده‌اند. این الکترون‌های با بار منفی به اشتراک گذاشته شده توسط هستهٔ اتم‌های با بار مثبت، اتم‌ها را در هر دو سوی پیوند به خود جذب می‌کنند و بدین سان به عنوان یک چسب الکترونیکی عمل نموده تا اتم‌ها با یکدیگر در پیوندی پپتیدی به یکدیگر نگه داشته شوند. پیوندهای پپتیدی بسیار پایدار هستند زیرا با وارد کردن نیرو برای جداسازی الکترون‌های به اشتراک گذاشته شده، به «انرژی فعال‌سازی»<sup>۱</sup> بالایی، نیاز می‌باشد.

به زبان دیگر، پیوند برای شکسته شدن نیاز دارد تا از دیوارهٔ انرژی گذر کند. در عمل، پیوند معمولاً به خودی خود شکسته نمی‌شود و به یاری ملکول‌های آب در فرایندی به نام هیدرولیز نیاز دارد. برای انجام این عمل، یک ملکول آب ابتدا باید به اندازهٔ کافی به نزدیکی پیوند پپتیدی بیاید تا یکی از الکترون‌هایش را به پیوند کربنی اهدا کند و یک پیوند ضعیف بین آب و

---

<sup>۱</sup> Activation energy



تصور کنید که ملکول آب نه به خاطر از دست دادن یک الکترون مثبت شده است بلکه به لحاظ دارا بودن یک هسته هیدروژن عریان (یک پروتون) است که دارای علامت + در تصویر شده است. این پروتون با بار مثبت دیگر در درون مکان ملکول آب به سختی نگه داشته نمی‌شود و به زبان مکانیک کوانتومی دچار بی‌مکانی<sup>۱</sup> می‌گردد. گرچه در اکثر زمانش هنوز در پیوست با ملکول آبش است (ساختار سمت چپ در شکل ۱ب)، پاره‌ای از زمان می‌توان آن را دورتر در نزدیکی اتم نیتروژن (ساختار سمت راست در شکل ۱ب)، در سوی دیگر پیوند پیتیدی یافت. در این مکان، الکترون پرسه‌زن می‌تواند یکی از الکترون‌های پیوند پیتیدی را از مکانش یدک کشیده و بدین طریق پیوند را بشکند. اما معمولاً این اتفاق رخ نمی‌دهد. علت آن است که در «حالات گذار» مانند آن چه که در تصویر ۱ب دیده می‌شود بسیار حیات کوتاهی دارند؛ آن‌ها به اندازه‌ای ناپایدار هستند که با کوچک‌ترین اشاره از جای خود جابه‌جا می‌شوند.

برای مثال، الکترون با بار منفی که ملکول آب آن را اهدا نموده بود به سادگی قابل بازگشت است؛ به گونه‌ای که واکنش دهنده‌های اولیه بازساخت می‌شوند (خطوط تیره در تصویر)؛ این محتمل‌ترین سناریو است تا واکنش رو به جلو که در آن پیوند شکسته می‌شود. از این رو، پیوندهای پیتیدی معمولاً شکسته نمی‌شوند. در واقع، در محلول‌های خنثی که نه اسیدی و نه قلیایی هستند، زمان لازم برای شکستن نیمی از پیوندهای

---

<sup>1</sup> Delocalize

پیتیدی یک پروتئین که به عنوان نیمه عمر واکنش نامیده می‌شود، بیش از پانصد سال است. مسلماً تمام این‌ها، آن چیزی است که بدون آنزیم‌ها رخ می‌دهند: هنوز مانده است که به توصیف این بپردازیم که چگونه آنزیم‌ها در فرایند هیدرولیز کمک می‌کنند. بر طبق تئوری حالت گذار (TST)، کاتالیزورها، فرایندهای شیمیایی مانند شکستن پیوند پیتیدی را با ایجاد شرایط پایدارتر در «حالت گذار» سرعت می‌بخشند و بدین سان، شانس تشکیل فرآورده‌های نهایی را افزایش می‌دهند.

شیوه‌های گوناگون برای رخ دادن آن وجود دارد. برای مثال، اتم فلزی مثبت در نزدیکی پیوند می‌تواند اتم اکسیژن با بار منفی را در حالت گذار خنثی نموده و آن را پایدار نماید (بدین گونه دیگر در تکاپو نخواهد بود تا الکترون اهدایی ملکول آب را برگرداند). با پایدار نمودن «حالات گذار»، کاتالیزورها نقش کمک کننده‌ای را در عبور از دیواره انرژی فراهم می‌سازند.

### نقدی بر برهان تئوری «حالت گذار»

آیا چنین حرکت ملکولی رقص‌وار، لزوماً شامل مکانیک کوانتومی می‌شود؟ توانایی آنزیم کولاژناز جهت سرعت بخشی شکستن پیوندهای پیتیدی شامل چندین مکانیسم کاتالیتیکی است که شیمیدانان به صورت رایج برای سرعت بخشیدن به واکنش‌های شیمیایی (بدون نیاز به نگرش در مکانیک کوانتومی) به کار می‌برند. برای مثال، اتم «فلز روی» در جایگاه فعال آنزیم، به نظر می‌آید نقش مشابه‌ای را با فلز پلاتینیوم داغ که پرگرین



فلیپس<sup>۱</sup> در قرن نوزدهم جهت سرعت بخشی به ساخت اسید سولفوریک به کار برد داشته باشد. این کاتالیست‌های غیرآلی بر جنبش‌های ملکولی تصادفی اتکا دارند تا حرکت‌های رقص‌وار و بدین سان، گروه‌های کاتالیتیک شیمیایی خودشان را به نزدیکی سوبستراهایشان آورده و واکنش‌های شیمیایی را تسریع می‌کنند. آیا کنش کاتالیزوری آنزیمی فقط مجموعه‌ای از مکانیسم‌های سراسر است کاتالیتیک کلاسیک است که در جایگاه‌های فعال بسته‌بندی شده و بدین سان جرقه‌های حیات را مشتعل می‌سازند؟

تا این اواخر، تقریباً همه دانشمندان آنزیم‌شناس می‌گفتند بله؛ تئوری حالت گذار (TST) با توصیفش از فرایندهای گوناگون که به امتداد حیاتِ حالتِ گذار میانی کمک می‌کنند، به عنوان بهترین توضیح از عملکرد آنزیم‌ها بود. اما پس از این که همه عوامل مشارکت کننده شناخته شده به حساب آمدند، شک‌هایی پدیدار شدند. برای مثال، مکانیسم‌های احتمالی گوناگونی که می‌توانند واکنش شکافتگی پپتیدی را سرعت بخشند هر کدام به خوبی شناخته شده‌اند و به تنهایی تا حدود صدمبار در فزونی این میزان دخالت دارند. اما چنانچه همه این عوامل در یکدیگر ضرب شوند، بالاترین دستیابی، حدود فزونی در میزان واکنش تا حد یک میلیون بار است. این در برابر میزان فزونی‌ای که آنزیم‌ها خلق می‌کنند عدد ناچیزی است و به نظر می‌آید که یک شکاف بزرگ چشمگیری میان تئوری و عمل وجود داشته باشد. به زبان دیگر باید در جستجوی عوامل دیگر بود.

---

<sup>1</sup> Peregrine Phillips

معمای دیگر آن است که چگونه فعالیت آنزیمی با ایجاد گونه‌های گوناگون تغییر در ساختار خود این آنزیم‌ها، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. برای مثال، مانند همه آنزیم‌ها، کلاژناز ضرورتاً از شاسی پروتئینی بر روی یک رشته استوار است که فک‌ها و دندان‌های آنزیم را در جایگاه فعال آن مورد حمایت قرار می‌دهد. چنین انتظار می‌رود که تغییر اسیدهای آمینه که فک‌ها و دندان‌ها را می‌سازند یک تأثیر بزرگی بر کارآمدی آنزیم داشته باشد و واقعاً هم دارد. آن چه شگفت‌آور است کشف این واقعیت است که تغییر دادن اسیدهای آمینه در درون آنزیم که بسیار دورتر از جایگاه فعال آنزیم هستند می‌تواند اثرات چشمگیری بر کارآمدی آن داشته باشد. چرا چنین تغییراتی به ظاهر بی‌آزار بر ساختار آنزیم می‌توانند این گونه تفاوت چشمگیری را برانگیزند، بر اساس تئوری حالت گذار در هاله‌ای از راز می‌ماند ولی چنانچه مکانیک کوانتومی در آن وارد شود، ماجرا تغییر می‌کند.

مسئله دیگر آن است که تئوری حالت گذار تاکنون نتوانسته است آنزیم‌های صناعی که به خوبی نمونه‌های واقعی کار می‌کنند را ارائه دهد. بر اساس گفته مشهور ریچارد فاینمن<sup>۱</sup>، "آن چه من نتوانم خلق کنم، نمی‌توانم درک کنم"، به آنزیم‌ها نیز قابل انطباق است زیرا با وجودی که بسیاری از مکانیسم‌های آنزیم‌ها شناخته شده‌اند، هیچ کس تاکنون نتوانسته است طراحی یک آنزیم را از خرد تا کلان مدیریت کند تا بتواند چیزی را خلق کند که در فزونی بخشی به میزان واکنش‌ها همانند

<sup>1</sup> Richard Feynman

آنزیم‌های طبیعی عمل کند. پس اگر چنین است، بر اساس شاخص فاینمن، ما هنوز به خوبی از این که آنزیم‌ها چگونه کار می‌کنند، درک کاملی نداریم.

بگذارید این پرسش را داشته باشیم: آنزیم‌ها چه می‌کنند؟ پاسخ کاملاً آشکار آن است که آنزیم‌ها، اتم‌ها، پروتون‌ها و الکترون‌ها را در درون و میان ملکول‌ها، دستکاری می‌کنند. تا کنون به ذرات اتمی به صورت لامپ‌های کوچک بار الکتریکی که از یک مکان به مکان دیگر در ملکول‌ها همانند گلوله و میله فشرده شده یا کشیده می‌شوند، نگریسته‌ایم ولی در سیمای دیگر، الکترون‌ها، پروتون‌ها و حتی کل اتم‌ها از وجود چنین شباهت‌هایی به گلوله‌ها به دور می‌باشند زیرا آن‌ها تابع قوانین مکانیک کوانتومی هستند که شامل قوانین رمزآلودی مانند هم‌دوسی<sup>۱</sup> می‌باشند ولی به شکل طبیعی در مقیاس ماکروسکوپیک تحت فرایند ناهم‌دوسی فیلتر می‌گردند. با همه این‌ها، گلوله‌های بیلیارد، مدل‌های خوبی برای ذرات بنیادی نیستند. از این رو، برای درک کنش واقعی که به اندرون جایگاه‌های فعال آنزیم‌ها می‌روند ما می‌بایست پیش‌فرض‌های کلاسیک خود را در عقب رها ساخته و وارد جهان رمزآلود کوانتومی شویم جایی که اشیاء دو یا چند صد چیز را به یک باره انجام داده و می‌توانند ارتباطات اسرارآمیزی داشته و آشکارا از دیواره‌های غیرقابل عبور، گذر کنند. این‌ها کنش‌های شاهکاری هستند که هیچ گلوله بیلیاردی تاکنون انجام نداده است.

---

<sup>1</sup> Coherence

## انتقال الکترون

یکی از فعالیت‌های کلیدی آنزیم‌ها حرکت دادن الکترون‌ها در درون ملکول‌های سوبسترا است؛ برای مثال مانند هنگامی که کلاژناز، الکترون‌ها را در درون ملکول پپتیدی می‌فشارد و می‌کشد. اما همچنان که الکترون‌ها را در درون ملکول‌ها فشار می‌دهد، آن را می‌توان از یک ملکول به ملکول دیگر انتقال داد. یک گونهٔ بسیار رایج واکنش انتقال الکترون در شیمی، واکنشی است که هنگام فرایند اکسیداسیون صورت می‌پذیرد. جوهرهٔ اکسیداسیون، حرکت الکترون‌ها از یک دهنده به یک ملکول گیرنده است. در مورد سوزاندن توده‌ای از زغال، الکترون‌های پرانرژی از اتم‌های کربن حرکت می‌کنند تا پیوندهایی با سطح انرژی پایین‌تر در اتم‌های اکسیژن ایجاد کنند؛ که نتیجهٔ آن ایجاد دی‌اکسید کربن است. انرژی مازاد آزاد شده به صورت گرمای آتش زغال می‌باشد. اما سوختن زغال و موتورهای احتراق درونی، کاملاً خام بوده و شیوه‌هایی ناکارآمد برای استفاده از انرژی الکترون می‌باشند. طبیعت بسیار پیش از این، از شیوه‌های بسیار کارآمدتر به دام انداختن این انرژی از طریق فرایندی به نام «تنفس» استفاده کرده است که در طی این فرایند با رهاسازی اکسیژن در درون سلول‌ها و فرستادن دی‌اکسید کربن در طی واکنش‌های بسیار پیچیده در اندامک‌های درون سلولی به نام میتوکندری، تنفس انجام می‌دهد که پس از فتوسنتز در جایگاه مقام دوم واکنش‌های پیچیدهٔ درون سلولی قرار می‌گیرد. به شکل ساده، کربوهیدرات‌هایی که ما به عنوان موادغذایی مصرف

می‌کنیم در دستگاه گوارش ما به قندهایی مانند گلوکز شکسته شده و از طریق جریان خون به سلول‌های گرسنه انرژی، رسانده می‌شوند. اکسیژن مورد نیاز برای سوزاندن این سوخت قندی از طریق خون از شش‌ها به همان سلول‌ها رهائش می‌یابد. همانند سوختن زغال، الکترون‌ها در اربیتال‌های بیرونی اتم‌های کربن در درون یک ملکول به ملکولی به نام NADH انتقال می‌یابند. اما به جایی آن که بلافاصله به اتم‌های اکسیژن پیوند بیابند، الکترون‌ها از یک آنزیم به دیگری در طی زنجیره تنفسی<sup>۱</sup> آنزیم‌های درون سلولی گذر می‌کنند؛ بیشتر شبیه به دست به دست کردن چوب از یک دونده به دیگری در یک مسابقه دو امدادی. در هر گام انتقال، الکترون به حالت پایین‌تر انرژی افت می‌یابد و اختلاف در انرژی برای توان رساندن آنزیم‌هایی به کار برده می‌شود که پروتون‌ها را از میتوکندری به بیرون پمپاژ می‌کنند.

گرادین پروتونی حاصله از بیرون به داخل میتوکندری، آن گاه برای رانش چرخش آنزیمی دیگر به نام ATPase به کار می‌آید که ملکول زیستی دیگری به نام ATP را می‌سازد. ملکول ATP در همه سلول‌های زنده بسیار مهم است زیرا به عنوان یک باتری انرژی عمل می‌کند که می‌تواند به سادگی در سلول انتقال یافته و به فعالیت‌های بسیاری که به انرژی نیاز دارند، توان‌رسانی کند. عملکرد آنزیم‌های پمپ‌کننده پروتون رانش یافته با الکترون مقداری همانند پمپ‌های هیدروالکترونیک است که انرژی اضافی را

---

<sup>1</sup> Respiratory chain

با پمپ کردن آب به بالای یک تپه، ذخیره می‌سازد. انرژی ذخیره شده آن گاه با جاری شدن آب از تپه جهت چرخاندن موتور توربینی که برق تولید می‌کند، آزاد می‌شود. در شکلی همانند، آنزیم‌های تنفسی، پروتون‌ها را از میتوکندری به بیرون پرتاب می‌کنند. هنگامی که پروتون‌ها دوباره به داخل جریان می‌یابند، آن‌ها چرخش آنزیم ATPase که مشابه توربین است را فراهم می‌سازند. این چرخش‌ها، مجموعه‌ای دیگر از جنبش‌های ملکولی رقص‌وار را به پیش می‌رانند که یک گروه شیمیایی فسفات را بر روی ملکولی در درون این آنزیم پیچ می‌کند تا ATP ساخته شود.

با گسترش همانندی این فرایند به دام‌اندازی انرژی به یک شکل مسابقه دو امدادی، می‌توان چوب امدادی را با یک بطری آب (نمایانگر انرژی الکترونی) جایگزین کرد که هر دونه (آنزیم) یک جرعه از آب را می‌گیرد و بطری را آن گاه دست به دست می‌کند تا پیش از آن که در نهایت مابقی آب به درون یک سطل به نام اکسیژن ریخته شود. این به دام انداختن انرژی الکترونی در تکه‌های کوچک، کل فرایند را کارآمدتر از ریختن ساده آن (مستقیم به اکسیژن) می‌کند و مقدار ناچیزی از آن به عنوان گرمای اتلافی از دست می‌رود. در واقع، رویدادهای کلیدی در فرایند تنفس شامل انتقال منظم الکترون‌ها از طریق یک مسیر همانند دو امدادی از آنزیم‌های تنفسی در درون سلول‌های ما است. هر رویداد انتقال الکترون بین یک آنزیم و آنزیم بعدی در این مسیر امدادی، در شکافی از چندین ده‌ها آنگستروم (در فاصله بسیاری از اتم‌ها) صورت می‌گیرد که بسیار دورتر از آن

چه که با رقص معمول الکترونی تصور آن احتمال می‌رفت، انجام می‌پذیرد. معمای تنفس آن است که چگونه این آنزیم‌ها می‌توانند الکترون‌ها را چنان سریع و کارآمد از میان چنین شکاف‌های ملکولی بزرگی عبور دهند؟ در هر صورت، امروز می‌دانیم که واکنش انتقال الکترون اهمیت اساسی در زیست‌شناسی، شیمی و تقریباً هر منظری از حیات دارد. از زمان کار نظری پیشگامی این گستره توسط مارکوس<sup>۱</sup>، بیش از ۶۰ سال گذشته است و از آن زمان تلاش‌ها برای درک فرایند انتقال الکترون در واکنش‌های زیست‌شناسی به شکل ثابت ادامه داشته است. همان گونه که اشاره شد، انتقال الکترون در آنزیم‌ها بر واکنش‌های پایه بیوشیمیایی در زنجیره انتقال الکترونی در دو فرایند از مهم‌ترین فرایندهای متابولیسم یعنی فتوسنتز و تنفس، حاکم است؛ هر چند که پیشنهاد شده است که انتقال الکترون نقش‌های اساسی در بسیاری دیگر از فرایندهای زیست‌شناسی در سامانه‌های زیستی مانند گیرایش مغناطیسی پرندگان، بویایی و بینایی ایفا می‌نماید.

در هر صورت، با وجود گستردگی‌ای که انتقال الکترون در پدیده‌های زیستی دارد، معماهای آن پابرجا بوده و فرایندهای صورت گرفته در زنجیره تنفسی برای انتقال الکترون با کمک آنزیم‌های تنفسی، در هاله‌ای از راز پابرجا مانده‌اند و بی‌شک تئوری حالت گذار برای ترسیم رویدادهای آن ناموفق بوده است. برای مثال، در سال ۱۹۶۶ یکی از مرزشکنی‌های

---

<sup>1</sup> Marcus

واقعی در زیست‌شناسی کوانتومی از آزمایشات انجام گرفته در دانشگاه پنسیلوانیا توسط دو شیمیدان آمریکایی (دون دی‌والت<sup>۱</sup> و بریتون چانس<sup>۲</sup>) بیرون آمد که نشان دادند بر خلاف همه انتظارات، میزان رقص الکترونی در آنزیم‌های تنفسی در درجه حرارت پایین، افت نمی‌یابد.

این دو دانشمند، آزمایشی را طرح‌ریزی کردند که در آن یک لیزر یاقوتی، یک نور قرمز روشن را در زمانی کوتاه برای فقط ۳۰ نانوثانیه (۳۰ میلیارد ثانیه) به سلول‌های باکتریایی انباشته از آنزیم‌های تنفسی، رها می‌ساخت. آن‌ها دریافتند که با کاهش درجه حرارت، میزان انتقال الکترون کاسته می‌شود تا کاهش حرارت حدود ۱۰۰ کلوین (یا ۱۷۳- درجه سانتی‌گراد) که در آن درجه حرارت، واکنش انتقال الکترون حدود هزار بار آهسته‌تر از درجه حرارت اتاق انجام می‌شود. اگر که فرایند انتقال الکترون به صورت اولیه توسط میزان انرژی گرمایی موجود رانش می‌یافت، این گونه که توصیف شد انتظار آن می‌رفت که رخ دهد. اما چیزی خلاف آن در زمانی که این دو شیمیدان درجه حرارت را در زیر ۱۰۰ کلوین قرار دادند، رخ داد. به جای افت به مقادیر پایین‌تر، میزان انتقال الکترون به نظر می‌آمد که به یک سطح صاف رسیده باشد و با وجود کاهش بیشتر در درجه حرارت تا حد ۳۵ درجه بالای صفر مطلق (۲۳۷- درجه سانتی‌گراد)، ثابت ماند. این نشانگر آن بود که مکانیسم انتقال الکترون نمی‌تواند تنها به دلیل رقص الکترونی کلاسیک توصیف شده باشد. پاسخ

<sup>1</sup> Don DeVault

<sup>2</sup> Britton Chance



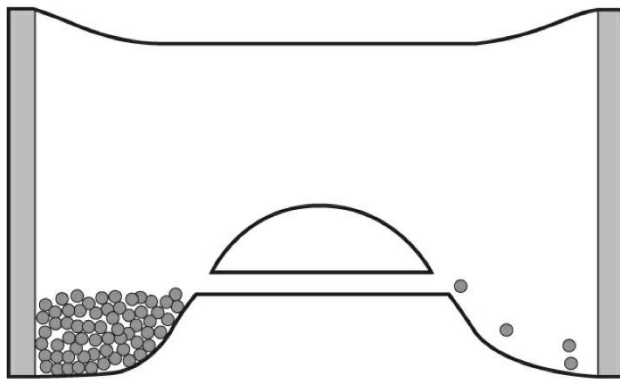
به نظر می‌آید در جهان کوانتوم باشد به ویژه در فرآیند رمزآلود تونل‌زنی کوانتومی که در فصل دوم به آن اشاره شد.

### تونل‌زنی کوانتومی الکترون در آنزیم‌شناسی

تئوری حالت گذار (TST) فقط ویژگی‌های ذره مانند ماده را در نظر می‌گیرد. این در حالی است که ماده (به ویژه آن‌هایی با جرم کوچک‌تر) را می‌توان با داشتن ویژگی‌های موج مانند در نظر گرفت؛ این ویژگی به عنوان دوگانه موج - ذره‌ای ماده، شناخته می‌شود. برای واکنش‌های کاتالیزوری شده آنزیمی، سیمای جایگزین به TST، با در نظر گرفتن دوگانگی موج - ذره‌ای ماده پدیدار شده است. یکی از سیمای‌های مهم ویژگی‌های موج مانند ماده این است که می‌تواند از مناطقی گذر کند؛ این در حالی است که اگر چنانچه یک ذره بود این مناطق دسترس ناپذیر بودند. ویژگی‌های موج مانند به معنای آن است که ماده می‌تواند از مناطقی که احتمال صفر برای یافت ماده در آنجا است گذر کند. از این رو، در مسیر واکنش دهنده‌ها تا فرآورده‌ها موجود در واکنش‌های کاتالیزوری شده آنزیمی، ممکن است که به گذر از دیواره نیازی نباشد (مانند آن چه که در TST با رفتار ذره‌ای صورت می‌گیرد) بلکه می‌تواند با ویژگی موج مانند خود از آن گذر کند.

این گذر از دیواره (تونل‌زنی کوانتومی؛ شکل ۲) مانند آن است که از یک دره به دره مجاور از طریق یک تونل گذر شود به جای آن که از کوه

میان آن دو، عبور نمود. همان گونه که همانندی نشان می‌دهد، این شیوه می‌تواند به صورت چشمگیری انرژی مورد نیاز از واکنش دهنده‌ها را تا فرآورده‌ها، پایین آورد. بدین سان، تونل‌زنی کوانتومی، نقش مهمی در واکنش‌های کاتالیزوری شدهٔ آنزیمی، به ویژه برای انتقال هسته‌های کوچک همانند هیدورژن دارد. تونل‌زنی کوانتومی، مکانیسم پابرجایی برای انتقال وابسته به آنزیم تا حد کوچکی ذره‌ای مانند الکترون است. پروتئین‌ها، عایق الکتریکی هستند اما با این وجود، الکترون‌ها می‌توانند در مسافت‌هایی تا حد  $3 \times 10^{-9}$  متر را از میان آن‌ها عبور کنند. این پارادوکس آشکار گذر الکترون از طریق عایق الکتریکی را می‌توان با ویژگی‌های موج مانند الکترون درک نمود. از این رو، الکترون می‌تواند با تونل‌زنی کوانتومی از طریق مناطقی که به دلیل ماهیت ذره‌ای آن منع گردیده، گذر نماید.



شکل ۲: تونل‌زنی کوانتومی از طریق منظر انرژی

انتقال الکترون‌ها در پروتئین‌ها توسط تونل‌زنی مکانیک کوانتومی امروزه به خوبی جا افتاده است. انتقال الکترون در درون پروتئین‌ها در میان دو مرکز (شناخته شده به عنوان مراکز اکسایش<sup>۱</sup>، زیرا یکی دیگری را احیاء می‌کند و با این عمل خودش اکسیده می‌شود)، رخ می‌دهد؛ «دهنده الکترون» (که بدین طریق اکسیده می‌شود) یک الکترون را برای «گیرنده الکترون» (که بدین طریق احیاء می‌شود) تأمین می‌کند. این را می‌توان با استفاده از مکانیک کوانتومی مدل‌سازی نمود. اگر تابع موج حالت واکنش کننده به صورت  $\Psi(R)$  و تابع موج حالت فرآورده  $\Psi(P)$  باشد، آن‌گاه انتقال الکترون میان دو مرکز اکسایش  $A$  و  $B$  به صورت یک گذار در حالت از  $\Psi(R)=(a^*, b)$  به  $\Psi(P)=(a, b^*)$  است. در اینجا  $a$  و  $b$  توابعی هستند که جنبش‌های هسته‌ای و الکترونی مراکز اکسایش مربوط به خودشان را توصیف می‌کنند. الکترون‌های هدایی که با ستاره مشخص شده است از  $a$  به  $b$  در طی واکنش انتقال می‌یابد. این موجب تغییری در انتشار بار الکتریکی می‌شود (زیرا مکان بارهای الکترونی تغییر می‌کند). به نوبه خود، این موقعیت گروه‌های قطبی اطراف مراکز اکسایش را تغییر می‌دهد. بدین سان، انتقال الکترون، موجب تغییر حالات هسته‌ای (مانند موقعیت‌های اتمی) و همچنین حالات الکترونی پروتئین می‌شود. به خوبی جا افتاده است که انتقال الکترون در پروتئین‌ها با واپیچش<sup>۲</sup> در هندسه هسته‌ای (پروتئین) حالت واکنش

---

<sup>1</sup> Redox

<sup>2</sup> Distortion

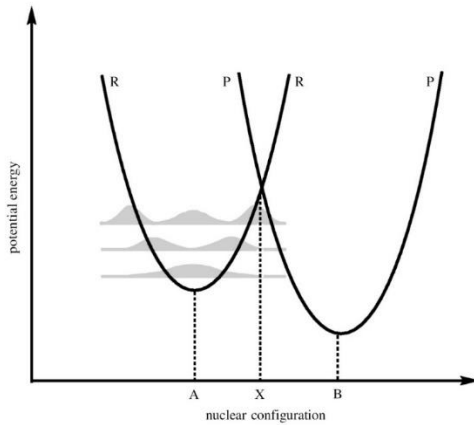
کننده، به پیش‌رانده می‌شود.

این وضعیت با تنفس طبیعی فعال شده با گرمای ملکول پروتئینی، تسهیل می‌گردد. فعال شدن گرمایی حالت واکنش کننده موجب همپوشانی با منحنی انرژی پتانسیل حالت فرآورده می‌شود؛ نقطه همپوشانی هندسه هسته‌ای<sup>۱</sup> است که با تونل‌زنی الکترونی انطباق دارد. در این نقطه برخورد، یک دیواره انرژی است که از میان آن الکترون می‌بایست تونل‌زنی کرده تا در سوی فرآورده برسد (شکل ۳). تئوری واکنش‌های انتقال الکترونی وابسته به پروتئین نمایانگر نقش مهم دینامیک پروتئین در پیش‌رانی فرآیند تونل‌زنی است. اهمیت نوسانات دینامیکی در پروتئین را می‌توان با نگرش در واکنش‌هایی که نیروی رانشی ترمودینامیکی غیر صفر برای واکنش انتقال الکترون دارند، مورد ارزیابی قرار داد. از آنجا که تونل‌زنی فقط میان حالات تقریباً انرژی مساوی قابل ملاحظه است، تونل‌زنی در چنین نمونه‌هایی غیرمحتمل است.

اما، نوسانات دینامیکی در پروتئین بر این مسئله چیرگی می‌یابد. این نوسانات انرژی میان واکنش کننده و فرآورده را در نقطه برخورد منحنی‌های  $P$  و  $R$  (نماهای آن یکسان است) متعادل می‌سازد و بدین طریق، انتقال را با تونل‌زنی کوانتومی قادر می‌نماید. واژه «تونل‌زنی یاری شده با ارتعاش<sup>۲</sup>» مناسب واکنش‌های انتقال الکترونی پروتئین است.

<sup>1</sup> Nuclear geometry

<sup>2</sup> Vibrationally assisted tunnelling



شکل ۳: دیاگرام مختصات واکنش برای یک واکنش شیمیایی ساده: ماده واکنش دهنده A به محصول B تبدیل می‌شود. منحنی R نمایانگر سطح پتانسیل برای این ماده است و منحنی P سطح انرژی پتانسیل محصول را نشان می‌دهد. فعال‌سازی گرمایی منجر به فرآیند بر فراز مانع در حالت گذار X می‌شود. حالات ارتعاشی برای ماده واکنش دهنده A نشان داده شده است. همچنان که درجه حرارت افزایش می‌یابد، حالات ارتعاشی انرژی بالاتر، اشغال می‌گردند و به نفوذ فزونی یافته منحنی P در زیر حالت گذار کلاسیک منجر می‌شود.

هم اکنون تعداد اندکی از دانشمندان هستند که در مورد انتقال الکترونی در مسیر زنجیره تنفسی از طریق تونل‌زنی کوانتومی، تردید داشته باشند. انتقال به واسطه تونل‌زنی الکترون‌ها حتی در حرارت‌های پایینی که دی‌والت و چانس یافتند نیز انجام می‌شود. در مورد ذرات بزرگتر مانند پروتون‌ها یا حتی اتم‌های کامل چه رخ می‌دهد؟ آیا این ذرات نیز در سامانه‌های زیست‌شناسی می‌توانند تونل‌زنی کنند؟ در دیدگاه نخست،

پاسخ منفی به نظر می‌آید. حتی یک پروتون واحد، دو هزار بار سنگین‌تر از یک الکترون است و تونل‌زنی کوانتومی بی‌نهایت حساس است که چقدر ذرهٔ تونل‌زننده بزرگ باشد زیرا ذرات کوچک به راحتی تونل‌زنی می‌کنند و این در حالی است که ذرات سنگین‌تر برای تونل‌زنی مقاوم هستند مگر آن که فاصله‌ای که می‌بایست پوشش داده شود، بسیار کوتاه باشد.

اما آزمایشات چشمگیر اخیر، نشانگر آن هستند که حتی این ذرات نسبتاً بزرگ نیز می‌توانند در واکنش‌های آنزیمی، تونل‌زنی کوانتومی انجام دهند.

### تونل‌زنی $^1\text{H}$ در سامانه‌های زیست‌شناسی

همسان انتقال الکترون، یکی از فعالیت‌های کلیدی در آنزیم‌هایی مانند کلاژناز، حرکت پروتون‌ها است که برای مثال کلاژناز برای سرعت بخشیدن به شکستن زنجیرهٔ کلاژن انجام می‌دهد. این گونه واکنش یکی از دستکاری‌های بسیار رایج در ذره است که توسط آنزیم‌ها صورت می‌پذیرد. حدود یک‌سوم از همهٔ واکنش‌های آنزیمی شامل حرکت دادن یک اتم هیدروژن از یک مکان به مکان دیگر است. باید توجه داشت که اتم هیدروژن می‌تواند چندین چیز را معنا دهد: می‌تواند یک اتم خنثی هیدروژن ( $\text{H}$ ) شامل یک الکترون چرخشی در اطراف هسته (یک پروتون) باشد؛ می‌تواند یک یون هیدروژن باردار مثبت ( $\text{H}^+$ ) باشد که یک هسته

<sup>1</sup> H-tunnelling

لخت می‌باشد (یک پروتون بدون الکترون)؛ یا حتی یک یون هیدرید<sup>۱</sup> باردار منفی باشد که شامل یک اتم هیدروژن با یک الکترون اضافی است ( $H^-$ ). اکثر واکنش‌های شیمیایی در درجه حرارت‌هایی که زندگی در آن‌ها جاری است، صورت می‌گیرد و تصور می‌رود که پروتون‌ها عمدتاً با رقص گرمایی غیرکوانتونی از یک ملکول به ملکول دیگر حرکت می‌کنند. اما تونل‌زنی پروتون در پاره‌ای از واکنش‌های شیمیایی صورت می‌گیرد که نسبتاً به درجه حرارت بی‌تفاوت هستند مانند آن چه که دی‌والت و چانس برای تونل‌زنی الکترونی نشان دادند.

حیات در درجه حرارت‌های بالا (از لحاظ استانداردهای جهان کوانتومی)، عمل می‌کند. بدین سان، در عمده تاریخ بیوشیمی، دانشمندان، انتقال آنزیمی پروتون را کاملاً به واسطه مکانیسم غیرکوانتومی می‌پنداشتند که بر دیواره انرژی چیرگی می‌یابد. اما این دیدگاه در سال ۱۹۸۹ تغییر کرد یعنی هنگامی که جوذیت کلینمن<sup>۲</sup> و همکارانش در برکلی، نخستین شاهد را برای تونل‌زنی پروتون در واکنش‌های آنزیمی فراهم نمودند. کلینمن که یک بیوشیمیست است مدت‌ها در اهمیت تونل‌زنی کوانتومی در سازوکار ملکولی حیات، بحث کرده است. در واقع، او تا به آنجا رفته است که مدعی آن بوده که تونل‌زنی پروتون یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین مکانیسم‌ها در کل زیست‌شناسی است. کارهای مرزשکن این خانم دانشمند از مطالعه آنزیمی خاص در

<sup>1</sup> Hydride

<sup>2</sup> Judith Klinman

مخمر به نام دهیدروژناز الکل حاصل آمد که کار آن انتقال یک پروتون از ملکول الکل به ملکول کوچک دیگر به نام  $\text{NAD}^+$  است تا  $\text{NADH}$  بسازد که انتقال دهنده اصلی الکترون سلول می‌باشد. تیم او موفق شدند حضور فرایند تونل‌زنی پروتونی را با استفاده از یک تکنیک هوشمندانه به نام «اثر کینتیک ایزوتوپی»<sup>۱</sup>، مورد تأیید قرار دهد.

اتم‌های یک عنصر خاص که اعداد متفاوت نوترونی دارند، ایزوتوپ نامیده می‌شوند. ایزوتوپ طبیعی هیدروژن، سبک‌ترین است و شامل فقط یک پروتون و الکترون واحد است. این فراوان‌ترین شکل هیدروژن می‌باشد. دو گونه نادرتر شامل ایزوتوپ‌های سنگین‌تر هیدروژن مانند دوتریوم<sup>۲</sup> ( $\text{D}$ ) است که یک نوترون افزون بر پروتون در هسته‌اش دارد و نیز تریتیوم<sup>۳</sup> ( $\text{T}$ ) که حاوی دو نوترون است. از آنجا که ویژگی‌های شیمیایی عناصر عمدتاً توسط تعداد الکترون‌های اتم‌هایشان تعیین می‌شود، ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر واحد (با تعداد متفاوت نوترون‌ها در هسته‌هایشان) شیمی مشابه ولی نه یکسان دارند. اثر کینتیک ایزوتوپ شامل اندازه‌گیری این مطلب است که یک واکنش شیمیایی چقدر به تغییرات اتم‌ها از ایزوتوپ‌های سبک به سنگین، حساس است و به صورت نسبت میزان‌های واکنش مشاهده شده با ایزوتوپ‌های سنگین و سبک تعریف می‌شود.

برای مثال، چنانچه ملکول آب  $\text{H}_2\text{O}$  در یک واکنش دخالت داشته باشد

<sup>1</sup> kinetic isotope effect

<sup>2</sup> Deuterium

<sup>3</sup> Tritium



آن گاه اتم‌های هیدروژن در ملکول‌های آب را می‌توان با نمونه‌های سنگین‌تر آن مانند دوتریوم و تریتیوم جایگزین کرد تا  $D_2O$  یا  $T_2O$  ساخته شود. واکنش ممکن است به تغییر وزن اتم‌ها حساسیت داشته یا نداشته باشد که بستگی به مسیری دارد که واکنش دهنده برای تبدیل شدن به فرآورده می‌بایست طی کند. چندین مکانیسم مسئول برای اثرات کینتیک ایزوتوپی وجود دارد و یکی از آن‌ها تونل‌زنی کوانتومی است که بی‌نهایت حساس به جرم ذره است که در تلاش برای تونل‌زنی می‌باشد. افزایش جرم، رفتار ذره را کمتر موج مانند کرده و از این رو شانس کمتری برای گذر از دیواره انرژی دارد. بنابراین، دو برابر کردن جرم اتم، برای مثال تغییر از هیدروژن طبیعی به دوتریوم، احتمال تونل‌زنی کوانتومی‌اش را سرنگون می‌سازد.

بنابراین، یافت یک اثر کینتیک ایزوتوپی شاهدهی است که مکانیسم واکنش (مسیری میان واکنش دهنده‌ها و فرآورده‌ها) شامل تونل‌زنی کوانتومی می‌باشد. اما این جامع نیست زیرا در این اثر مقداری شیمی کلاسیک (پیش‌ران شده توسط غیرکوانتوم) نیز مشارکت داشته است. چنانچه تونل‌زنی کوانتومی دخالت داشته باشد آن گاه واکنش یک پاسخ ویژه به حرارت می‌دهد. می‌بایست میزان واکنش در درجه حرارت‌های پایین در خط صاف قرار گیرد؛ همان گونه که در آزمایشات دی‌والت و چانس برای تونل‌زنی الکترونی نشان داده شد. این دقیقاً همان چیزی است که خانم کلاینمن و گروهش برای آنزیم دهیدروژناز الکل یافتند و نتایج آزمایش شاهد قوی‌ای فراهم کردند که تونل‌زنی کوانتومی در این مکانیسم واکنش،

دخالته دارد. در واقع، در کاتالیز کردن اکسیداسیون بنزیل الکل به سوی بنزالدئید، آنزیم دهیدروژناز الکل یک اتم هیدروژن را از یک موقعیت به موقعیت دیگر جابه‌جا می‌کند. به شکل غیرقابل منتظره، هنگامی که کلایمن و همکارانش اتم‌های خاص هیدروژن را در ماده با ایزوتوپ‌های سنگین‌تر دوتریوم و تریتیوم جایگزین کردند، واکنش به شکل شگفت‌آوری به شدت کاهش یافت.

گرچه توضیحات کلاسیک کاتالیزی آنزیم، به اثرات متعادل ایزوتوپی، اشاره داشته‌اند اما آن‌ها نمی‌توانند کاهش شگرف در آزمایش مورد مشاهده کلایمن را توصیف کنند؛ به همین خاطر، خانم کلایمن نوشت: *“آن چه که ما دیدیم انحرافات از تئوری موجود بود.”* گروه او مشاهدات خود را ادامه دادند و در سال ۱۹۸۹ بر پایه‌ی ایده‌ی مطرح در میان پژوهشگران آنزیم نوشتند که کاتالیز شامل یک نیرنگ کوانتومی به نام تونل‌زنی است. همان گونه که الخلیلی توضیح می‌دهد، چنانچه یک توپ را الکترون یا ذره‌ای دیگر تصور کنیم و تپه را یک دیواره‌ی انرژی که مانع از رخداد واکنش است، در جهان کلاسیک می‌بایست چنان ضربه‌ی محکمی به توپ زد تا بر فراز تپه قرار گرفته و از سوی دیگر آن پایین آید ولی در جهان کوانتومی نیازی به این کار نیست و توپ می‌تواند در نیمه‌ی راه ناپدید شده و در سوی دیگر پدیدار گردد.

گروه کلایمن این پدیده را در آزمایش خود و دیگر آزمایشات، در طی کاتالیز اکسیداسیون بنزیل الکل و بسیاری دیگر از واکنش‌ها منظور

داشتند که انتقال هیدروژن با کمک تونل‌زنی صورت می‌گیرد. این دیدگاه توضیح می‌دهد چرا دوتریوم و تریتیوم سرعت واکنش را می‌گیرند؛ زیرا همان گونه که اشاره شد، ذرات سنگین‌تر برای تونل‌زنی مناسب نبوده و تونل‌زنی را برای ذرات دیگری در همان ملکول دشوار می‌سازند. نتایج مشاهده شده گروه کلایمن توسط دانشمندان دیگر با چندین گونه دیگر آنزیمی، تکرار گردیده و شواهد قوی‌ای را برای اثرات کوانتومی در سامانه‌های زیست‌شناسی با بررسی اثر کینتیک ایزوتوپی، فراهم نموده‌اند. گروه کلایمن در ادامه کارهای خود به شواهد اساسی‌ای دست یافتند که تونل‌زنی پروتونی به شکل شایع در بسیاری از واکنش‌های آنزیمی در درجه حرارت‌هایی که حیات عمل می‌کند، رخ می‌دهد. اما با وجودی که به صورت عمومی پذیرفته شده است که تونل‌زنی در واکنش‌های آنزیمی در شرایط زیست‌شناسی رخ می‌دهد، پژوهشگران در مورد این که چقدر این پدیده در سامانه‌های زیست‌شناسی اهمیت دارد و این که آیا این پدیده موضوع «انتخاب طبیعی» است به دو گروه تقسیم می‌شوند.

ریچارد فینک<sup>۱</sup> در دانشگاه دولتی کُلرادو برای مثال نشان داد که بعضی از واکنش‌های، اثرات ایزوتوپی را به همان درجه نشان می‌دهند که آنزیم باشد یا نباشد و این نشانگر آن است که نامحتمل است که آنزیم‌ها برای فزونی اثرات تونل‌زنی در واکنش‌هایی که کاتالیزوری می‌کنند، سازگاری یافته باشند. هنوز آشکار نیست که چقدر تونل‌زنی، واکنش‌ها را

---

<sup>1</sup> Richard Finke

سرعت می‌بخشد، بعضی از پژوهشگران بر این بحث دارند که این اثر چیزی بیش از یک فزونی کوچک در فرایندهایی که مکانیک کلاسیک بر آن‌ها حاکم هستند، ایجاد نمی‌کند. اما کلایمن می‌گوید که او فکر می‌کند که تونل‌زنی در آنزیم‌ها بسیار بنیادی‌تر است. دیدگاه او این است که آنزیم‌ها، ساختارهای جایگاه فعال فشرده و بسیار فرادقیقی خلق می‌کنند که تونل‌زنی را ارتقاء می‌دهند. برای مثال، در هنگام کاتالیز کردن، آنزیم‌ها تغییر پیکربندی<sup>۱</sup> می‌دهند؛ به طریقی که دهنده هیدروژن و جایگاه‌های پذیرنده را به اندازه کافی نزدیک می‌آورند (در حدود ۰/۲۷ نانومتر از یکدیگر) تا تونل‌زنی را تسهیل کنند.

گروه کلایمن ایده تونل‌زنی کوانتومی را با جهش‌زایی جایگاه‌های فعال آنزیم‌ها دنبال کردند و مشاهده نمودند که چگونه میزان واکنش و اثرات کوانتومی در محیط زنده دچار تغییر می‌شود. برای مثال، این گروه تحقیقاتی، نسخه‌ای از لیپواکسیژناز سویا خلق کردند که سوبستراهای خودش را به شیوه‌ای جابه‌جا می‌کند که برای تونل‌زنی هیدروژن مساعد نمی‌باشد. در مقایسه با گونه وحشی، توان کاتالیتیک آنزیم جهش یافته چهار برابر کمتر بوده و به جایگزین کردن هیدروژن با دوتریوم، بسیار حساس‌تر است. پژوهشگران هنوز نقش تونل‌زنی در کاتالیز را کمی‌سازی می‌نمایند و کلایمن به اهمیت استفاده از شیوه‌های چندگانه شامل جهش‌زایی و مدل‌سازی رایانه برای درک کامل این که چگونه پروتئین‌ها

<sup>1</sup> Conformation

واکنش‌ها را سرعت می‌بخشند، پافشاری می‌نماید. تکامل تجربی آنزیم‌هایی که در آن پژوهشگران به صورت تکرار شونده پروتئین‌ها را برای افزایش توان کاتالیتیک آن‌ها گزینش می‌کنند می‌تواند بینش‌هایی را در مورد مشارکت تونل‌زنی کوانتومی ارائه دهد. این که چگونه آنزیم‌ها، همدوسی کوانتومی<sup>۱</sup> را برای ارتقاء تونل‌زنی برقرار می‌سازند هنوز یک موضوع بسیار مورد بحث است. در هر صورت، می‌دانیم که آنزیم‌ها، ساختارهای استاتیکی نیستند و به شکل مداوم در طی واکنش‌های خود، ارتعاش<sup>۲</sup> می‌کنند. برای مثال، فک‌های آنزیم کلاژناز هر زمان که آن‌ها یک پیوند کلاژنی را می‌شکنند، باز و بسته می‌شود. چنین تصور می‌شد که این حرکات یا به دنبال به مکانیسم واکنش بودند و یا این که در به دام‌اندازی سوبستراها و آوردن همهٔ اتم‌های فعال در راستای درست، دخالت داشته‌اند. اما، پژوهشگران زیست‌شناسی کوانتومی هم اکنون بر این ادعا هستند که این ارتعاش‌ها که به نام «جنبش‌های پیش‌ران<sup>۳</sup>» نامیده می‌شوند، عملکرد اولیه‌شان آن است که اتم ملکول‌ها را به اندازهٔ کافی به نزدیکی هم آورند تا ذرات آن‌ها (الکترون و پروتون‌ها) به تونل‌زنی کوانتومی بپردازند.

### آنزیم‌ها و زیست‌شناسی کوانتومی

آنزیم‌ها، هر ملکول زیستی در درون هر سلول زنده که زندگی می‌کند

<sup>۱</sup> Quantum coherence

<sup>۲</sup> Vibrating

<sup>۳</sup> Driving motions

و یا زندگی کرده است را ساخته و نابود کرده‌اند. آنزیم‌ها از هر چیز دیگری به قوای حیاتی نزدیک‌تر هستند. بدین گونه است که کشف این که پاره‌ای و احتمالاً همه آنزیم‌ها با ارتقاء غیرمادی‌سازی<sup>۱</sup> ذرات از یک نقطه در فضا و مادی نمودن بلافاصله آن‌ها در جایی دیگر کار می‌کنند، برای ما، بینش نوینی پیرامون راز حیات می‌گشایند؛ در حالی که هنوز موارد حل نشده بسیاری در پیوست با آنزیم‌ها نیاز است که بهتر درک شود؛ مانند نقش جنبش‌های پروتئینی که به آن‌ها اشاره شد که این شک را بر جای نمی‌گذارد. تونل‌زنی کوانتومی، نقش مهمی در راهی که آن‌ها کار می‌کنند، ایفا می‌نماید.

مخالفان با نقش تونل‌زنی کوانتومی در آنزیم‌شناسی اغلب بر این تاکید دارند که آیا آنزیم‌ها به گونه‌ای تکامل یافته‌اند یا خیر تا از مزیت پدیده کوانتومی مانند تونل‌زنی بهره گیرند؟ منتقدین بر این بحث دارند که پدیداری پدیده کوانتوم در فرایندهای زیست‌شناسی با در نظر گرفتن ابعاد اتمی اکثر واکنش‌های بیوشیمیایی، اجتناب‌ناپذیر است. البته تا حدی آن‌ها درست می‌گویند. تونل‌زنی کوانتومی شگفت‌آور نیست و از زمان تولد جهان رخ می‌داده است. مسلماً این نیرنگی نیست که به طریقی توسط حیات «اختراع» شده باشد. با این وجود، ما هنوز بحث داریم که پدیداری آن در فعالیت آنزیمی، با در نظر گرفتن وجود شرایط مرطوب، گرم و شلوغ درون سلول‌های زنده، فراتر از حالت اجتناب‌ناپذیر بودن است.

<sup>1</sup> Dematerialization

به یاد داشته باشیم که سلول‌های زنده مکان‌های خارق‌العاده شلوغی هستند که مملو از ملکول‌های پیچیده در حالت‌های پرآشوب و متلاطمی می‌باشند که حرکت‌های تصادفی دارند. همان گونه که در پیش از این اشاره شد، این گونه جنبش تصادفی است که همدوسی کوانتومی ظریف را در هم گسیخته و پراکنده کرده و جهان امروزی ما را «طبیعی» می‌نماید. انتظار نمی‌رود که همدوسی کوانتومی در درون این آشوب ملکولی بقا بیابد و بدین گونه کشف اثرات کوانتومی مانند تونل‌زنی که در دریای آشوب ملکولی سلول زنده پابرجا می‌ماند، بسیار شگفت‌انگیز به نظر می‌آید و این بیانگر آن است که حیات تمهیدات ویژه‌ای را برای بهره‌برداری از مزیت‌های فراهم آمده از جهان کوانتومی برای چرخش کار سلولی برگرفته است. اما چه تمهیداتی؟ چگونه حیات، دشمن رفتار کوانتومی، یعنی ناهمدوسی<sup>۱</sup> را به گوشه‌ای می‌راند؟ این یکی از بزرگ‌ترین اسرار زیست‌شناسی کوانتومی است که به آهستگی در حال آشکار شدن می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Decoherence





فصل چہارم

فتوسنتز



ویژگی‌های شگفت‌آور فیزیک کوانتوم چیزهایی هستند که شما انتظار دارید آن‌ها را در تحت شرایط خارق‌العاده‌ای در آزمایشگاه یافت کنید نه در یک چمن‌زار. با این وجود، در سالیان اخیر، یک ایده نوظهوری موسوم به زیست‌شناسی کوانتومی این را عرضه نموده است که مکانیسم‌های ملکولی حیات، پاره‌ای از این رفتارهای برخلاف عقل را از خود نمایان می‌سازند. در طی ده سال گذشته، پژوهشگران، شواهدی گزارش کرده‌اند که فرایند فتوسنتز که به واسطه آن گیاهان سبز و بعضی از باکتری‌ها نور خورشید را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند با بهره‌وری از برداشت نور با استفاده از پدیده «همدوسی یا هم‌نوسانی کوانتومی»<sup>۱</sup> انجام می‌دهند. این شامل برهم‌نهی‌های حالات کوانتوم الکترونیکی است که به نظر می‌آید می‌تواند مسیرهای انتقال دهنده انرژی بسیاری را در یک لحظه، جستجو نماید. چنانچه این گونه باشد، آن‌گاه مکانیک کوانتومی در فرایند بنیادی انرژی که همه حیات روی کره خاکی را به پیش می‌راند، یک فرایند یاری کننده می‌باشد.

این یک ادعای چشمگیر است ولی آیا واقعیت دارد؟ این پرسش در طی دهه گذشته به گرمی مورد بحث واقع شده است. گفتمان اولیه «همدوسی کوانتومی» در فتوسنتز همانند رایانه‌های کوانتومی است یعنی جایی که محاسبات سریع‌تر و با بهره‌وری بیشتر انجام می‌شوند؛ هر چند

---

<sup>1</sup> Quantum coherence

که جایگاه همدوسی کوانتومی در پدیده فتوسنتز به مقدار فراوانی هم اکنون به زیر پرسش رفته است و پاره‌ای از پژوهشگران بر این پافشاری دارند که اصلاً چنین همدوسی‌ای (هم‌نوسانی) نقش مفیدی در فتوسنتز ندارد. از سوی دیگر، گرگ انگل<sup>۱</sup> از دانشگاه شیکاگو که در کار اولیه پیشنهادی، نقش همدوسی کوانتومی به عنوان یک اصل طراحی نوین طبیعت درگیر بوده است، چنین بیان می‌کند: "این نظر عمومی که زبان و ریاضیات اطلاعات کوانتومی شامل همدوسی را می‌توان برای درک پویایی فتوسنتز در آزمایشات طیف‌سنجی مافوق سریع<sup>۲</sup> به کار برد، به نظر می‌رسد که از لحاظ پذیرش، در حال رشد باشد." اما سباستین وستن‌هوف<sup>۳</sup>، فیزیکدان زیستی از دانشگاه گوتنبرگ سوئد چنین بیان می‌کند که دانشمندان بیشتری در این گستره، کار اولیه را به عنوان یک سوءتعبیر محسوب می‌دارند و آشکارا عنوان می‌دارد که "چنین چیزی به عنوان همدوسی کوانتومی در فتوسنتز طبیعی، وجود ندارد."

در هر صورت، هنوز بحث میان این دو جبهه وجود دارد و ما در اینجا از این لحاظ که پدیده فتوسنتز در درک رخداد پدیده‌های کوانتومی در جهان زیست‌شناسی نقش الگوماندی را ایفا می‌کند به توصیف ساختار و عملکرد آن پرداخته و سپس به بررسی شواهد ارائه شده از سوی مخالفین نیز اهتمام می‌نماییم.

---

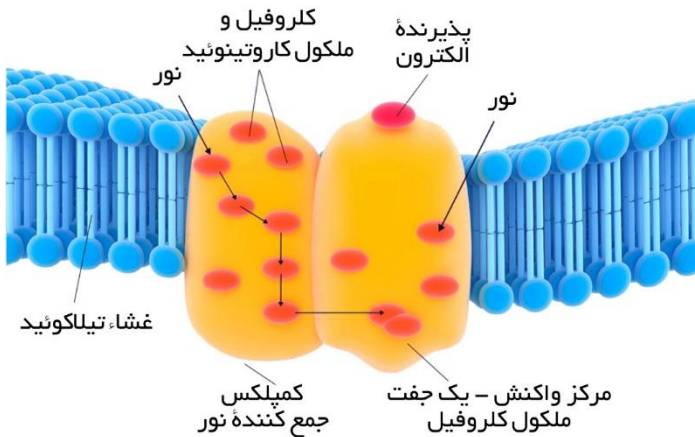
<sup>1</sup> Greg Engel

<sup>2</sup> Ultrafast Spectroscopy

<sup>3</sup> Sebastian Westenhoff

## سفر به مرکز فتوسنتز

فتوسنتز در گیاهان در درون اندامک‌هایی از سلول به نام کلروپلاست انجام می‌شود که همانند بالون‌های شیری رنگی بوده و مانند خود سلول با غشاء شفاف‌ی احاطه گردیده‌اند که از آن طریق اجسام سکه مانند سبز رنگی که به صورت کومه‌ای قرار دارند، قابل رؤیت می‌باشند. این اجسام، تیلاکوئیدها<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند و با انبوهی از ملکول‌های رنگدانه کلروفیل که موجب رنگ سبز گیاهان می‌شوند، انباشته شده‌اند (شکل ۴).



شکل ۴: کمپلکس جمع کننده نور در غشاء تیلاکوئیدی در کلروپلاست گیاهان یافت می‌شود. این مکان کلروفیل و ملکول‌های رنگدانه کاروتینوئید است که در فتوسنتز نقش ایفا می‌نمایند. آن‌ها فوتون‌های آمده را جذب کرده و انرژی برانگیختگی را به «مرکز واکنش» انتقال می‌دهند که در اینجا شامل یک جفت از ملکول‌های کلروفیل است. انرژی از طریق یک پذیرنده الکترون به بیرون انتقال می‌یابد و در واکنش‌های بعدی در جایی دیگر در غشاء استفاده می‌شود.

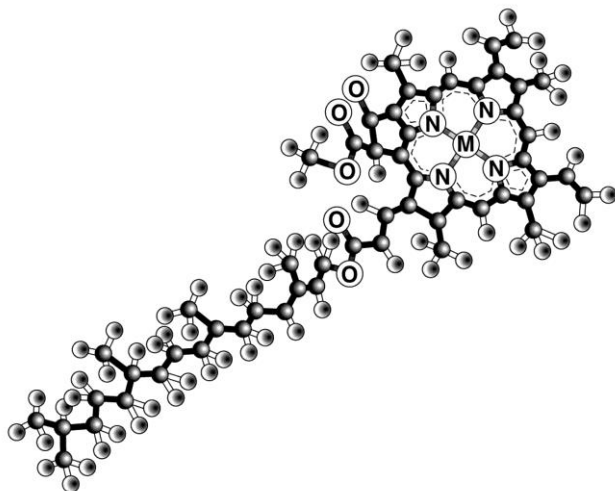
<sup>1</sup> Thylakoids

تیلاکوئیدها موتور فتوسنتز بوده و هنگامی که با فوتون‌های نور، سوخت‌رسانی می‌شوند، می‌توانند موجب از جا جستن اتم‌های کربن (جذب شده از دی اکسید کربن هوا) گردیده و ساخت قندهایی که در میوه شیرین سیب آن‌ها را می‌چشیم، ایجاد کنند. سطح غشایی تیلاکوئیدها با جزایر سبز ناهمواری آذین شده است. این جزایر دارای ساختارهای درختی‌ای هستند که به صفحات پنج وجهی آنتن ماندنی منتهی می‌گردند. این صفحات آنتن همانند ملکول‌های برداشت نور به کروموفورها<sup>۱</sup> هستند که کلروفیل مشهورترین مثال آن است و در واقع این‌ها هستند که اولین گام اساسی را در فتوسنتز (یعنی به دام انداختن نور) به انجام می‌رسانند.

احتمالاً پس از DNA، ملکول کلروفیل مهم‌ترین ملکول در سیاره ما باشد و از این لحاظ نگرستن به آن ارزشمند است (شکل ۵). کلروفیل یک ساختار دو بعدی ساخته شده از آرایه‌های پنج وجهی عمدتاً اتم‌های کربنی و نیتروژنی (N) است که یک اتم منیزیم (M) مرکزی را احاطه کرده که یک دم دراز از اتم‌های کربن، اکسیژن (O) و هیدروژن نیز دارا می‌باشد. بیرونی‌ترین الکترون اتم منیزیم به صورت سستی به مابقی اتم اتصال دارد و می‌توان آن را از قفس کربنی به واسطه جذب یک فوتون از انرژی خورشیدی، به بیرون فرستاد تا یک شکافی ایجاد کرد تا اتمی مثبت هم اکنون در آن قرار داشته باشد. این شکاف یا حفره الکترونی یک حفره

<sup>1</sup> Chromophores

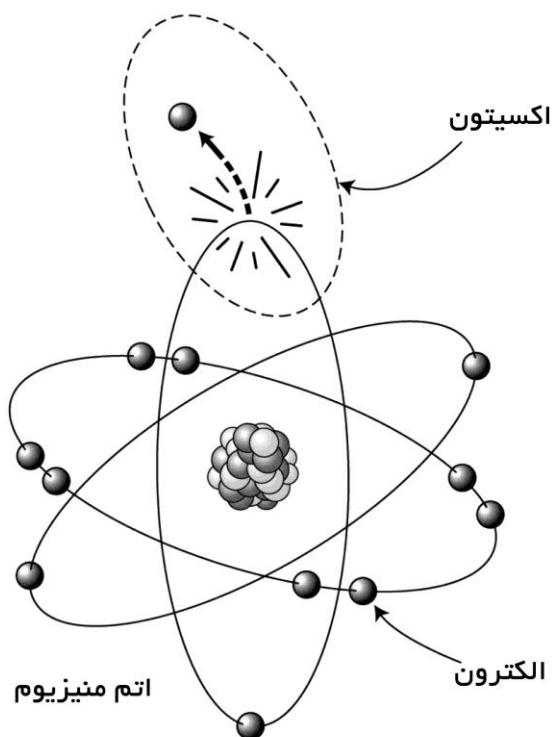
با بار مثبت است. اما در واقع با الکترون منفی بیرون جسته و حفره<sup>۱</sup> مثبت در پشت رها شده، یک سامانه<sup>۲</sup> دوگانه‌ای به نام اکسیتون<sup>۱</sup> را پس از جذب فوتون می‌سازند که برانگیخته بوده و مانند یک باتری ریز با قطب‌های مثبت و منفی عمل می‌نماید که قادر به ذخیره‌سازی انرژی برای استفاده بعدی می‌باشد.



شکل ۵: ملکول کلروفیل

اکسیتون‌ها ناپایدار هستند. الکترون و حفره‌ش یک نیروی الکترواستاتیک جذب کننده که آن‌ها را به یکدیگر می‌کشاند، ایجاد می‌کنند. چنانچه با یکدیگر ترکیب شوند، انرژی خورشیدی فوتون اولیه به شکل گرما هدر می‌رود (شکل ۶).

<sup>۱</sup> Exciton



شکل ۶: یک اکسیتون شامل یک الکترون است که از اوربیتالش در یک اتم بیرون رانده شده است، همراه با حفره‌ای که در پشت از خود گذشته است.

از این رو، گیاه در پی آن است تا انرژی به دام افتاده را رام سازد و این کار را با انتقال اکسیتون به شکل بسیار سریع به واحد کارخانهٔ ملکولی‌ای به نام «مرکز واکنش»<sup>۱</sup> انجام می‌دهد که ضرورتاً شامل از جا کندگی یک الکترون حاوی انرژی به صورت کامل از اتمش و انتقال دادن

<sup>۱</sup> Reaction center



آن به یک ملکول همسایه است که همانند همان واکنش آنزیمی می‌باشد که مشاهده می‌کنیم. این فرایند موجب خلق یک باطری شیمیایی به نام NADPH می‌شود که پایدارتر از یک اکسیژن بوده و از آن برای پیش‌ران همه واکنش‌های شیمیایی مهم فتوسنتز استفاده می‌گردد. اما «مراکز واکنش»، معمولاً تقریباً دور بوده و یا به زبان ملکولی در مسافت‌های نانومتری از ملکول‌های کلروفیل برانگیخته، قرار دارند و بنابراین انرژی می‌بایست از یک ملکول آنتن مانند به دیگری که در جنگلی از کلروفیل قرار دارد برای رسیدن به مرکز واکنش انتقال بیابد. در واقع، به دلیل ماهیت به شدت انباشته کلروفیل، این فرایند رخ می‌دهد. ملکول‌های همسایه آن که فوتون را جذب کرده‌اند خودشان می‌توانند برانگیخته شوند و با بهره‌وری بالایی انرژی اولیه الکترون از جا جسته را به ارث برده و سپس به الکترون اتم منیزیم خودشان انتقال دهند. اما مسلماً، مسئله آن است که چه مسیری می‌بایست این انتقال انرژی طی کند. چنانچه به مسیری اشتباه برود یعنی رقص تصادفی از یک ملکول به دیگری در جنگل کلروفیلی، آن گاه در نهایت به جای این که انرژی‌اش را در «مرکز واکنش» آزاد سازد آن را از دست می‌دهد. پس از چه مسیری می‌بایست گذر کند؟ می‌دانیم زمان طولانی‌ای تا یافت مسیرش به سوی مقصد، در پیش از این که برانگیختگی به فنا برود، برایش وجود ندارد.

تا این اواخر، فکر می‌شد که این رقص انرژی از یک ملکول کلروفیل به دیگری به صورت تصادفی بوده است یعنی یک راه‌پیمایی تصادف گونه

مانند شیوهٔ راه رفتن یک فرد مست که با خروج از میخانه تلو تلو خوران از این راه به آن راه می‌زند تا راه خانهٔ خود را بیابد. اما راه‌پیمایی‌های تصادف گونه همیشه موفقیت‌آمیز نیستند و چنانچه خانهٔ آن فرد مست در دوردست باشد در سپیده‌دم وی در گوشه‌ای دیگر از شهر، در بوته‌زاری ممکن است یافت شود. یک شیء هنگامی که شیوهٔ راه‌پیمایی تصادفی را بر می‌گزیند تمایل به حرکت از نقطهٔ آغازین حرکت در یک تناسب با مسافت با جذر زمان طی شده را دارد. چنانچه فرد مست، در یک دقیقه، یک متر جلو می‌رود آن گاه پس از چهار دقیقه او دو متر و بعد از نه دقیقه نیز فقط سه متر جلوتر رفته است. با در نظر گرفتن این پیشرفت کند و آهسته، شگفتی‌آور نخواهد بود که جانوران و میکروب‌ها به ندرت برای یافت غذا و شکار، این شیوهٔ راه‌پیمایی را بر می‌گزینند و این شیوه را فقط در هنگامی گزینش می‌کنند که گزینه‌ای دیگر در دسترس نباشد.

در آغاز فکر می‌شد که انرژی اکسیژن از طریق جنگل کلروفیل به شیوهٔ راه‌پیمایی مست‌گونهٔ تصادفی باشد ولی از آنجا که این اولین رخداد فتوسنتز با بهره‌وری بسیار خارق‌العاده توأم است، چنین به نظر نمی‌رسد. در واقع، انتقال انرژی به دام انداخته شدهٔ فوتون از یک ملکول آنتن مانند کلروفیل به «مرکز واکنش»، بالاترین بهره‌وری شناخته شده در هر واکنش طبیعی یا مصنوعی را نمایان می‌سازد که نزدیک به صد درصد است. در شرایط بهینه، تقریباً هر محمولهٔ انرژی جذب شده توسط یک ملکول کلروفیل به مرکز واکنش تحویل داده می‌شود. چنانچه مسیر گزینش یافته

یک راه پرپیچش بود، اگر نگوئیم همه آن‌ها، مسلماً عمده آن‌ها، از دست می‌رفتند. چگونه این انرژی فتوسنتزی می‌تواند راهش را به مقصد، بسیار بهتر از آن مرد مست یا در واقع بالاتر از بهره‌ورترین فناوری انرژی کنونی پیدا کند، خود این یکی از بزرگترین معماهای زیست‌شناسی می‌باشد.

### تپش کوانتومی<sup>۱</sup>

گراهام فلمینگ<sup>۲</sup> که نامی شناخته شده در گستره پژوهش‌های فتوسنتز است با استفاده از یک تکنیک نیرومند با عنوان تأثیرگذار «طیف‌سنجی الکترونیک تبدیل فوریه دو بعدی<sup>۳</sup>» (2D-FTES)، درون ساختار و دینامیک ریزترین سامانه‌های ملکولی را با هدف قراردادن آن‌ها با ضربان‌های لیزری کوتاه‌مدت، به پژوهش پرداخت. گروه پژوهشی فلمینگ، اکثر کار خود را نه بر روی گیاهان بلکه بر روی کمپلکس فتوسنتزی به نام پروتئین<sup>۴</sup> FMO انجام داد که توسط میکروپ‌های فتوسنتز کننده موسوم به باکتری‌های سولفوری سبز که در ژرفای آب‌های غنی از سولفور (مانند دریای سیاه) یافت می‌شوند، ساخته می‌شود.

برای کاوش در نمونه کلروفیل، پژوهشگران سه پالس متوالی از نور لیزر را به کمپلکس فتوسنتز آتش کردند. این پالس‌ها، انرژی خود را به صورت شلیک‌های زمان‌دار دقیق با سرعت زیاد گذاشتند و یک سیگنال

<sup>1</sup> The quantum beat

<sup>2</sup> Graham Fleming

<sup>3</sup> Two-Dimensional Fourier Transform Electronic Spectroscopy

<sup>4</sup> Fenna-Mattews-Olson (FMO)

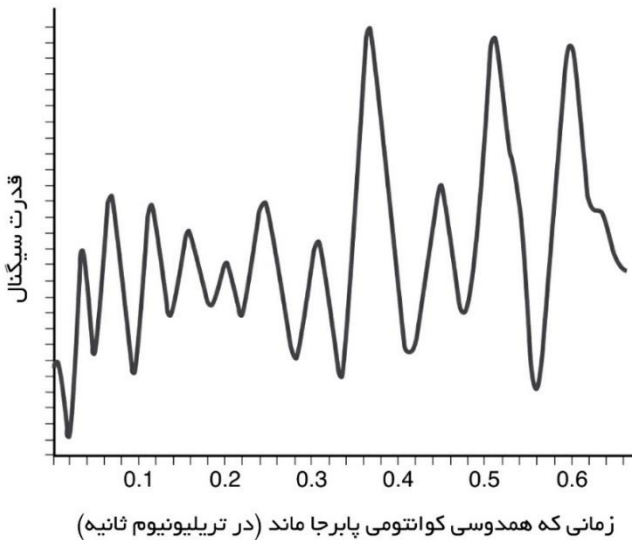
نوری از نمونه را که قابل برداشت توسط شناسانگرها بود، تولید کردند. گرگ انگل<sup>۱</sup> که در این گروه پژوهشی بود تمام شب را با کوک زدن اطلاعات حاصله از سیگنال‌ها که پنجاه تا ۶۰۰ فمتوثانیه<sup>۲</sup> را پوشش می‌دادند، گذراند تا طرحی از نتایج تولید نماید. آن چه که او دریافت یک سیگنال افزایش یابنده و کاهنده بود که برای ۶۰۰ فمتوثانیه نوسان کرده بود (شکل ۷).

آن چه که مهم است شکل غیرمنظم نوسانات است. این یک واقعیت است که نوساناتی در همه جا است.

این نوسانات همانند الگوی تداخلی کناره‌های روشن و تاریک آزمایش دو شکاف معروف در فیزیک کوانتوم بود که همسان کوانتومی کوبش‌های صوت در حال نوسان شنیده شده در هنگامی است که یک ابزار موسیقی کوک می‌شود. این «تپش کوانتومی» نشان داد که اکسیتون یک مسیر واحدی را از پیچ و خم کلروفیلی طی نمی‌کند بلکه برعکس، راه‌های چندگانه را به صورت همزمان، گذر می‌کند (شکل ۸). این مسیرهای جایگزین تا حدی مانند نت‌های ضرب‌آهنگ گیتار در واقع کوک شده عمل می‌کنند؛ آن‌ها هنگامی که تقریباً طول همسانی دارند، ضرب‌آهنگ‌ها را ایجاد می‌کنند.

<sup>1</sup> Greg Engel

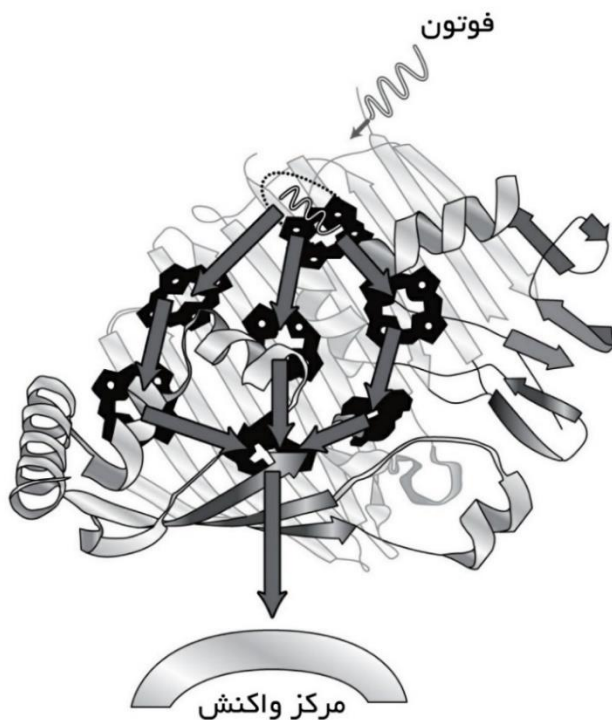
<sup>2</sup> Femtoseconds



شکل ۷: ضربان‌های کوانتومی دیده شده توسط گراهام فلمینگ و همکارانش در آزمایش ۲۰۰۷ آن‌ها.

اما به یاد داشته باشید که چنین هم‌نوسانی یا همدوسی کوانتومی‌ای بسیار ظریف بوده و به طور فوق‌العاده‌ای برقراری آن دشوار است. آیا واقعاً عملی است که یک میکروب یا گیاه بتواند به تلاش‌های قهرمانانه با استعدادترین و بهترین پژوهشگران محاسبه‌گر کوانتومی MIT تنه زده و ناهمدوسی را در تنگنا قرار دهد؟ در واقع، گروه پژوهشی فلمینگ در برکلی این را پیشنهاد دادند که کمپلکس FMO به عنوان یک رایانه کوانتومی برای پیدا کردن سریع‌ترین راه به «مرکز واکنش» عمل می‌کند. تپش‌هایی که گروه فلمینگ در کمپلکس FMO کشف کرده بودند در

واقع یک نشانگانی از همدوسی کوانتومی بود و پنداشتند که ملکول کلروفیل از طریق راهبرد راهپیمایی کوانتومی<sup>۱</sup> عمل می‌نماید.



شکل ۸: اکسیتون از طریق پروتئین FMO از مسیرهای چندگانه‌ای در یک زمان عبور می‌کند.

کشفیات گروه فلمینگ موجب برانگیختن شگفتی و حیرت شد ولی بلافاصله مفسرین به این اشاره کردند که آزمایش با کمپلکس‌های FMO

<sup>۱</sup> Quantum walk

جداسازی شده که تا ۷۷ کلوین (۱۹۶- درجه سانتی گراد) سرد شده بود، انجام شده است که آشکارا سردتر از هر درجه حرارت سازگار با فتوسنتز گیاهی یا حتی حیات است ولی به اندازه کافی نبوده است تا ناهمدوسی آزار دهنده را در تنگنا قرار دهد. پس چگونه می توان این باکتری های سرد شده را به آن چه که در درون سلول های گیاهی گرم و آشفته رخ می دهد، مرتبط دانست؟ به زودی آشکار شد که همدوسی یا هم نوسانی کوانتومی، محدود به کمپلکس FMO سرد نیست. در سال ۲۰۰۹، ایان مرسر<sup>۱</sup> در دانشگاه کالج دبلین، تپش کوانتومی را در سامانه فتوسنتزی با کمک باکتریایی (یا به اختصار سامانه نوری)<sup>۲</sup> دیگری به نام کمپلکس برداشت کننده نور II (LHC<sub>2</sub>)<sup>۳</sup>، مورد شناسایی قرار دارد که بسیار همانند سامانه نوری گیاهی است ولی شرایط گرمایی طبیعی که گیاهان و میکروبها به شکل معمول فتوسنتز انجام می دهند را دارا است. سپس گرگ شولز<sup>۴</sup> در دانشگاه اونتاریو، تپش کوانتومی را در سامانه نوری یک گروه از جلبک های آبی مشاهده کرد که برعکس گیاهان با سطح تکاملی بالا، فاقد ریشه، ساقه و برگ می باشند و کریپتوفیت<sup>۵</sup> نامیده می شوند. آن ها به شکل خارق العاده ای فراوان بوده و به حدی که مسئول سوزاندن مقدار فراوانی از کربن جو زمین هستند؛ به زبان دیگر دی اکسید کربن جو را مانند

---

<sup>1</sup> Ian Mercer

<sup>2</sup> Photosystem

<sup>3</sup> Light Harvesting Complex II (LHC<sub>2</sub>)

<sup>4</sup> Greg Scholes

<sup>5</sup> Cryptophyte

گیاهان عالی‌تر بیرون می‌کشند.

در حدود همین زمان، گرگ انگل، تپش کوانتومی را در همین کمپلکس FMO در درجه حرارت بسیار بالاتری که حامی حیات بود، در آزمایشگاه فلمینگ مشاهده کرد. این پدیده چشمگیر منحصر به باکتری‌ها و آگ‌ها نبوده و در آزمایشگاه فلمینگ نشان داده شده است که تپش کوانتومی در یک سامانه دیگری از  $LHC_2$ ، رخ می‌دهد و این بار در اسفناج،  $LHC_2$  در تمام گیاهان عالی‌تر وجود دارد و حاوی ۵۰ درصد از همه کلروفیل سیاره زمین است.

اکنون ببینیم که چگونه انرژی اکسیژن از خورشید برخاسته می‌شود. پس از این که انرژی کافی به «مرکز واکنش» می‌رسد، موجب می‌شود تا یک جفت ویژه از ملکول‌های کلروفیل (به نام P680) الکترون پرتاب کنند. منبع این الکترون‌ها آب است. می‌دانیم که کسب الکترون از هر ماده‌ای، اکسیداسیون نامیده می‌شود و این همان فرآیندی است که در زمان سوختن انجام می‌شود. برای مثال، هنگامی که چوب در هوا می‌سوزد، اتم‌های اکسیژن، الکترون‌ها را از اتم‌های کربن بیرون می‌کشند. الکترون‌های اربیتال بیرونی کربن، به سستی اتصال دارند و به همین دلیل است که کربن به آسانی می‌سوزد. اما آن‌ها در آب، به سختی گرفته شده‌اند: سامانه‌های فتوسنتز در این که آن‌ها تنها جایی در جهان طبیعی هستند که آب سوخته می‌شود تا الکترون‌ها حاصل آیند، منحصر به فرد می‌باشند.

در هر صورت، ما هم اکنون ذخیره‌ای از الکترون‌ها را به پاس انرژی



رهايش يافته توسط اكسيتون‌ها، در كلروفيل داريم. سپس، گياه نياز دارد تا اين الكترون‌ها در جايي كه مي‌توانند به كار آيند فرستاده شوند. آن‌ها در نخست توسط انتقال دهنده الكترون سلولي يعني NADPH به دام انداخته مي‌شوند. NADPH الكترون‌هايي كه حمل مي‌كند را در زنجيره‌اي از آنزيم‌ها، تغذيه مي‌كند و به شكل مشابه‌اي پروتون‌ها را از غشاء كلروپلاست به بيرون پرتاب مي‌نمايد. جريان پشتي اين پروتون‌ها براي توليد ملكول‌هاي ATP، استفاده مي‌شود. سپس اين ملكول‌ها مي‌توانند بسياري از فرايندهاي گرسنه انرژی در سلول گياهي را توان بخشند. اما فرايند واقعي تثبيت كربن، به دام‌اندازی اتم‌های كربن از دی اكسيد كربن هوا و استفاده از آن‌ها جهت ساخت ملكول‌هاي آلي غني از انرژی مانند قندها، در بيرون از تيلاکوئيدها (هرچند هنوز در درون كلروپلاست)، انجام مي‌پذيرد. اين فرايند به واسطه آنزيم تنومند بزرگي به نام RuBisCO انجام مي‌گيرد كه احتمالاً فراوان‌ترين پروتئين در روي زمين است زيرا مي‌بايست وظيفه‌اي بزرگ را انجام دهد يعني ساخت تقريباً همه توده زيستي (بيوماس)<sup>۱</sup> جهان. اين آنزيم اتم كربن برخاسته از دی اكسيد كربن را از جا پرتاب مي‌كند و به يك ملكول قند پنج كربنه ساده به نام ريبوز-۵،۱- بيسفوفات مي‌دهد تا يك قند شش كربنه ساخته شود.

برای نیل به این کار برجسته از دو جزء که برای آن تأمین گردیده، استفاده می‌کند: الكترون‌ها (رهايش يافته توسط NADPH) و يك منبع

---

<sup>1</sup> Biomass

انرژی (ATP). هر دو جزء ترکیبی، محصولات فرایندهای پیش‌ران یافته با نور در فتوسنتز هستند. قند شش کربنه ساخته شده توسط RuBisCO بلافاصله به دو قند سه کربنه شکسته می‌شود که سپس به مسیرهای گوناگون برای ساخت همهٔ ملکول‌های زیستی در جهان حیات به کار برده می‌شوند. هوا و آب بی‌جان، با مدد نور و افشانش مکانیک کوانتومی، بدل به بافت زنده یک درخت می‌شوند. به زبان دیگر، چنین به نظر می‌آید که حیات، فرایندهای کوانتومی را مطیع نموده است تا به شیوه‌ای بسیار کارآمدتر، بهره‌وری خارق‌العاده‌ای را خلق نماید. کشف همدوسی کوانتومی در سامانه‌های گرم، مرطوب و آشفته مانند گیاهان و میکروب‌ها، یک شوک بزرگ را به فیزیکدانان کوانتومی وارد آورده است و هم اکنون، یک بحث داغ پژوهشی با دقتی سرسام‌آور بر روی این متمرکز است که چگونه سامانه‌های زیستی، حالت‌های همدوس کوانتومی ظرفیشان را مورد محافظت و استفاده قرار می‌دهند. پاسخ به این پرسش‌ها، فیزیکدانان را قادر خواهد ساخت رایانه‌های کوانتومی عملی‌ای بسازند که به جای آن که در سرمای شدید کار کنند بتوان آن‌ها را بر روی میز کار قرار داد. این پژوهش‌ها، احتمالاً از یک نسل نوین فناوری‌های مصنوعی فتوسنتزی الهام می‌پذیرند. سلول‌های خورشیدی کنونی به شکل سستی بر پایهٔ اصول فتوسنتزی بوده و در حال رقابت با پانل‌های خورشیدی برای اشتراک در بازار انرژی پاک می‌باشند ولی کارایی آن‌ها با از دست دادن انتقال انرژی، محدود می‌باشد که در بهترین حالت، بازده آن‌ها حدود ۷۰ درصد در

مقایسه با نزدیک به ۱۰۰ درصد بازده به داماندازی انرژی فوتون در فتوسنتز است.

با آوردن همدوسی کوانتومی الهام یافته از زیست‌شناسی به سلول‌های خورشیدی، این پتانسیل وجود دارد تا به شکل عظیمی بازده انرژی خورشیدی را افزوده و بدین سان یک جهان پاک‌تر خلق نمود. دوباره در نظر بگیرید که این تپش‌های کوانتومی که گرگ انگل نخستین بار در داده‌های کمپلکس FMO مشاهده کرد، نشان دادند که ذرات در سلول‌های زنده به شکل موج حرکت می‌کنند. این اغوا وجود دارد که به آن‌ها به صورت پدیده‌های محدود به آزمایشگاه فکر شود که هیچ اهمیتی در بیرون از تجربه بیوشیمیایی ندارند؛ اما پژوهش‌های بعدی نشان داده‌اند که در واقع در جهان طبیعی، آن‌ها نیز وجود دارند، در درون برگ‌ها، آگ‌ها و میکروب‌ها و بدین سان آن‌ها نقشی احتمالاً اساسی‌ای در ساخت بیوسفر ما بازی می‌کنند.

### محاسبه‌گری طبیعی؟

یافته‌های گروه فلمینگ چشمگیر به نظر می‌رسید زیرا همدوسی کوانتومی میان بیت‌های کوانتومی (کیوبیت‌ها)<sup>۱</sup> قرار گرفته شده در حالت‌های درهم‌تنیده چیزی است که فیزیکدانان در رایانه‌های کوانتومی در جستجوی آشکاری آن هستند. اما کیوبیت‌ها معمولاً ظرف کسری از

<sup>۱</sup> Qubits

یک درجه از صفر مطلق سرد می‌شوند و حتی آن گاه همدوسی<sup>۱</sup> فقط برای دمی کوتاه در میان تنی چند از بیت‌ها بقا دارد، در پیش از این که ناهمدوسی به دلیل آشوب محیط اطراف حاکم شود. بنابراین، این دیدگاه به نظر می‌رسد که بر این پافشاری داشته باشد که یک اثر کوانتومی شبیه این نمی‌بایست در شرایط سلول‌های زنده گرم و مرطوب وجود داشته باشد. چگونه ارگانسیم‌های فتوسنتز کننده آن را نگه می‌دارند؟

اما هر چقدر پژوهشگران بر آن نگریسته‌اند، پیچیدگی و نکات ظریف و دقیقی از آن برخاسته شده است. اصلاً آیا کار اولیه (گروه فلمینگ)، واقعاً تپش کوانتومی الکترونیک را مورد شناسایی قرار داده بود؟ آن چه واقعاً اندازه‌گیری شده بود یک سیگنال طیف‌سنجی در حال نوسان بود؛ پرسش آن است که چگونه آن را باید تفسیر نمود. در سال ۲۰۱۳، دیوید جوناس<sup>۲</sup> از دانشگاه کلرادو در بولدر و همکاران، چنین استدلال کردند که «تپش‌ها» کاملاً محصول ارتعاش‌های ملکولی هستند (فرآیند پراکندگی رامان) و نه نتیجه‌ای که از همدوسی کوانتومی در میان حالت‌های الکترونیک برانگیخته شده است. انگل پذیرفت که در آزمایشات اولیه، تشخیص مطلق میان این دو احتمال، امکان‌پذیر نبوده است. یک راه جداگانه که می‌توان به آن‌ها پرداخت، ساخت سامانه‌های شیمیایی جذب کننده نور صناعی است که به گونه‌ای کوچک شوند تا از هر هم‌رخدادی<sup>۳</sup>

---

<sup>1</sup> Coherence

<sup>2</sup> David Jonas

<sup>3</sup> Coincidence

در انرژی‌های اکسیتونی و انرژی ارتعاشی ملکولی اجتناب ورزیده شود و در این صورت این دو تیپ حالات کمتر مستعد جفت شدن<sup>۱</sup> شوند. انگل و همکارانش دقیقاً آن را انجام دادند و دایمرهایی<sup>۲</sup> از دو ملکول مختلف ساختند که گروه‌های جذب کننده نور سامانه‌های نوری را شدیداً پیوسته به یکدیگر، تقلید می‌کردند. در سال ۲۰۱۳، آن‌ها گزارش کردند که این سامانه نیز «تپش‌های کوانتومی» را نشان می‌دهد که در سیگنال‌های ارتعاشی رامان پدیدار نشدند.

اما هنگامی که چنین ایده‌ای توسط دواین میلر<sup>۳</sup> از بنیاد ماکس پلانک برای ساختار دینامیک ماده در هامبورگ آلمان آزمون گردید و گروه پژوهشی‌اش با استفاده از ملکول‌های رنگ که توسط یک پیوند دهنده انعطاف‌پذیرتر به صورت جفت به یکدیگر اتصال یافته بودند انجام گردید، به نتیجه گوناگونی دست یافتند. آن‌ها چنین استدلال کردند که همدوسی کوانتومی که پیش از این مشاهده شده بود، از لحاظ دامنه نوسان، چنان کوچک بوده که نمی‌توان تصور نمود از اکسیتون‌ها منشأ گرفته باشد و در واقع فقط یک اثر رزونانس بوده که شامل ارتعاش‌های ملکولی بوده است. افزون بر این، آن‌ها بیان نمودند که هر همدوسی الکترونیکی، آن چنان به سرعت به فنا می‌رود نمی‌تواند پیامدهای معنادار زیست‌شناسی داشته باشد.

---

<sup>1</sup> Coupling

<sup>2</sup> Dimers

<sup>3</sup> Dwayne Miller

خود میلر، رفتار کمپلکس FMO را مورد بررسی قرار داد و چنین بیان نمود: "ما به عقب بازگشتیم و کار اولیه را در درجه حرارت اتاق و شرایط فیزیولوژیک واقعی دوباره انجام دادیم و به قطعیت می‌توان گفت که هیچ همدوسی‌های الکترونیک دیرزیستی وجود ندارد که انتقال انرژی را هدایت نماید. تپش‌ها از لحاظ دامنه نوسان، فرکانس و میزان فنا با ارتعاشات ناچیز رامن حالت زمینه‌ای الکترونیک برانگیخته شده در فرایند، قابل مقایسه هستند. این رامن بوده است که آن‌ها مشاهده کردند و نه همدوسی الکترونیک طولانی‌مدت."

### بیان‌های ابراز شده مخلوط

نظریه پرداز کوانتومی، میخائیل ثوروارت<sup>۱</sup> از دانشگاه هامبورگ، با این نظر موافق است. در سال ۲۰۱۱، او محاسباتی از حالات الکترونیک و ارتعاشی در پروتئین FMO گزارش کرد که بر آن اساس عملی نبودن همدوسی دیرزیست را بیان می‌کرد. او گفت: "در آن زمان، این محاسبات نظری، بهترین‌های در دسترس بودند" او با میلر در ترجمان اندازه‌گیری‌های اخیر تجربی اکسیتون‌های FMO مشارکت کرد و گفت که یافته‌ها با پیش‌بینی‌های اولیه همخوانی دارند. هر همدوسی‌ای ناچیز است و از جفت‌سازی ارتعاشی حالات الکترونیکی بر می‌آیند، تا حدی مانند هم‌رخدادی و همگامی ساعت‌های دیواری که توسط کریستیان

<sup>1</sup> Michael Thorwart

هوگنز<sup>۱</sup> در سده هفدهم، مشاهده شد که به دلیل جفت‌سازی ارتعاشی<sup>۲</sup> از طریق تخته چوبی‌ای که آن‌ها بر آن نصب شدند، حاصل آمده بود.

به شکل فزاینده‌ای، چنین به نظر می‌آید که اجماع بر این است که این ارتعاش‌های ملکولی هستند که در هسته مشاهدات مورد مشاجره قرار دارند. با تمام این اوصاف، الیزابت رومرو<sup>۳</sup> از دانشگاه آزاد آمستردام و همکارانش، آزمایشات طیف‌سنجی را انجام داده‌اند و آن‌ها را این گونه تفسیر کردند که به عنوان شاهدهی هستند که ارتعاشات در «مرکز واکنش» سامانه نوری اسفناج، همدوسی کوانتومی میان حالات اکسیتونی را مورد حمایت قرار می‌دهند و این کار را با تقویت کردن برهم‌کنش‌ها میان آن‌ها و ارتقاء انتقال انرژی همدوس انجام می‌دهند.

اخیراً، شولز<sup>۴</sup> (که هم اکنون در دانشگاه پرینستون است) و همکاران، شامل رابرت بلنکن شیپ، خیره فتوسنتز از دانشگاه واشنگتن در سنت لوئیس میسوری، داستان دیگری را تعریف نموده‌اند. آن‌ها پروب - پمپ طیف‌سنجی را بر نسخه‌های جهش یافته ساختگی کمپلکس پروتئین FMO هدایت نمودند. این گونه‌ها، حالات الکترونیک متفاوتی از یک صورت دومی دارند و بدین سان، اگر اکسیتون‌ها در تپش‌های مشاهده شده طیف‌سنجی دخالت داشته باشند (نشانه ویژه همدوسی) آن گاه این تپش‌ها می‌بایست یک فرکانس جابه‌جا شده‌ای داشته باشند. اما آن‌ها

<sup>1</sup> Christiaan Huygens

<sup>2</sup> Vibrational coupling

<sup>3</sup> Elisabet Romero

<sup>4</sup> Scholes

ندارند: سیگنال درست در همان مکان می‌ایستد. شولز بیان می‌دارد که این نشانگر آن است که نوسانات به صورت خالص از ارتعاشات حالت زمینه‌ای الکترونیک برمی‌خیزند (پایین‌ترین حالت انرژی). میلر چنین اظهار می‌کند که این با نتایج کارهای اولیه ارائه شده از سوی چندین گروه دیگر همخوانی دارد و این که «کنون چنین به نظر می‌آید که جماعی بر این وجود دارد که تپش‌های اولیه، ارتعاشات بودند و نه اکسیتون‌ها».

از این رو، هر چند که یافته‌های رومرو و همکاران همانند چیزی بودند که پیش از این انگل ادعا کرده بود، گروه‌های پژوهشی میلر و شولز بر این قطعیت هستند که این جفت‌سازی ارتعاشی است که نقش بازی می‌کند؛ هر چند که تپش‌ها به اندازه کافی واقعی هستند، ولی این که چگونه آن‌ها را ترجمان کنیم، مسئله‌ساز می‌باشد.

### کوانتومی شدن

با این اوصاف، شولز تصدیق می‌کند که نتایج جدیدش، مشاجره اولیه را حمایت می‌نماید که «ملکول‌های پروتئین FMO به شیوه ویژه‌ای جفت می‌شوند و این ممکن است در انتقال انرژی به طریق هدایت کردن آن یا سریع‌تر کردنش، کمک نماید». بر اساس بیان رومرو، این کوک کردن ارتعاشات ملکولی برای فرکانس‌های درست جهت انتقال دادن انرژی، سامانه نوری را به صورت چیزی می‌سازد که او آن را «تله نوری طراحی شده کوانتومی» می‌نامد. هنگامی که شما به مراکز واکنش فتوسنتزی در



گستره‌ای از ارگانسیم‌ها می‌نگرید، او چنین بیان می‌دارد "فقط یک طرح وجود دارد که حفظ گردیده که نشانگر آن است که طبیعت طرحی را یافته است تا بتواند تفکیک بار<sup>۱</sup> با کارآیی بالایی را انجام داده و آن را حفظ نماید." به زبان دیگر، او می‌گوید انتخاب طبیعی به نظر می‌آید موافق این فرایند بهینه شده کوانتومی باشد.

اما میلر برهان می‌آورد که قدرت جفت‌سازی ارتعاشی آن چنان پایین است که نمی‌تواند انتقال انرژی را فزونی دهد. او نقشی از بهینگی<sup>۲</sup> تکامل یافته را در نبود همدوسی کوانتومی می‌بیند، در واقع این خیلی سریع بعد از جذب نور (از طریق ناهمدوسی<sup>۳</sup>) از دست می‌رود. او می‌گوید: "آشکار می‌شود که طبیعت تکامل یافته است که ناهمدوسی را ضربت نزند بلکه آن را نمایان سازد." این بسیار ظریف و دقیق است زیرا ناهمدوسی موجب پراکنش نیرومایه (اتلاف انرژی) می‌شود و به گونه‌ای انتقال انرژی راه خودش را می‌تواند به آرامی در سرایشی در راستای کارآمدترین مسیر انرژی پیدا کند که این کار به واسطه این که چگونه ویژگی‌های الکترونیک از مکانی به مکان دیگر در محیط ملکولی تغییر می‌نماید، هدایت می‌گردد. او می‌گوید: "این تا حدی مانند قرار دادن سنگ فرش‌های یک شیب تپه برای هدایت افرادی است که پیاده‌روی می‌کنند تا در راه باریک بمانند و همه منظرها را مورد جستجو و کاوش قرار ندهند."

---

<sup>1</sup> Charg separation

<sup>2</sup> Optimality

<sup>3</sup> Decoherence

## حلقه کامل

خوب آیا فتوسنتز کوانتومی است یا خیر؟ رومرو بیان می‌دارد که “مشاهدات نشان می‌دهند که همبستگی‌ای میان عملکردهای موجی حالات درگیر در انرژی یا انتقال الکترون وجود دارد ولی این اثرات، به عنوان همدوسی کوانتومی واقعی که در حالات درهم‌تنیده محاسبه‌گری کوانتومی درک می‌گردند، توسط بعضی از دانشمندان در نظر گرفته نمی‌شوند.” انگل نیز بر این موافق است که مقایسه این دو به مانند فراخواندن یک “زبان اشتباه” می‌باشد.

ممکن است این گونه باشد یا ممکن است این همبستگی‌ها و همدوسی‌ها به واسطه ارتعاشات باشند، اما به هر حال آن‌ها چنان ضعیف هستند که ممکن است ربط زیست‌شناسی نداشته باشند ولی ما هنوز می‌بایست به حالات اکسیتون در سامانه نوری فکر کنیم که کم و بیش به گروه‌های خاص ملکولی معطوف بوده و انتقال انرژی بین آن‌ها به صورت ناهمدوس حاکم است. این چیزی است که میلر و ثوروارت فکر می‌کنند. میلر بیان می‌دارد که “ما به حلقه کامل آمده‌ایم، و چنین به نظر می‌آید که تصویر اولیه از انتقال انرژی به صورت یک فرایند عمدتاً ناهمدوس، بر چالش موجود، تاب‌آوری از خود نشان داده است.”

رومرو بیان می‌دارد که استدلال نمودن بر این که آیا انتقال انرژی یک اثر کوانتومی واقعی است یا خیر به شکل وحشتناکی به هیچ عنوان سازنده نیست. او می‌گوید که “به نظر من، موضوع مرتبط این است که

درک شود چگونه گیاهان و دیگر ارگانیسم‌های فتوسنتز کننده می‌توانند انرژی و الکترون‌ها را در مقیاسی فراسریع در مسیری درست با کارایی کوانتومی بالایی، انتقال دهند.“ چنانچه ما آن را درک کنیم، آن‌گاه قادر خواهیم بود با آن کار مفیدی انجام دهیم. رومرو چنین اظهار می‌دارد: “این دانش، درس‌های اساسی‌ای در خود نهفته دارد پیرامون این که چگونه سامانه‌های انسان ساخت را با ظرفیت تبدیل انرژی نور خورشیدی به انرژی الکتروشیمیایی جهت تولید برق یا حتی بهتر، در تولید سوخت‌های خورشیدی به صورت کاتالیتیکی، مهندسی نمود.“ این ایده‌ای است که هر کس می‌تواند آن را داشته باشد ولی نخست ما نیاز داریم بدانیم که چگونه طبیعت آن را انجام می‌دهد.



فصل پنجم

## حس گیرندگی مغناطیسی



امروزه، سفر پروانه شهریار<sup>۱</sup> به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مهاجرت‌های جهان شناخته می‌شود. میان سپتامبر و نوامبر هر سال، میلیون‌ها پروانه شهریار در جنوب شرق کانادا به سوی جنوب غرب، سفری چند هزار مایلی را آغاز می‌کنند که از میان مزارع، صحراها، چمن زارها و کوهستان‌ها می‌گذرد. پس از زمستان گذرانی بر فراز کوهستان‌های مکزیک، سفر معکوس را در بهار برای بازگشت به زمین‌های تغذیه‌ای تابستانی‌شان، انجام می‌دهند. بسیار قابل توجه است که هیچ پروانه‌ای همه سفر را انجام نمی‌دهد. در عوض، در راه مسیر، زاد و ولد می‌کنند به گونه‌ای که پروانه‌هایی که به تورنتو باز می‌گردند، نوادگان پروانه‌های شهریار هستند که در نخست، کانادا را ترک کردند. چگونه این حشرات به چنان دقتی ناوبری می‌کنند و می‌توانند به نقطه هدف کوچک خود در هزاران مایل از منشأ سفرشان برسند، جایی که فقط نیاکانشان پیش از این آنجا را دیده بودند؟ این یکی دیگر از رازهای سترگ طبیعت است که تازه رازگشایی از آن آغاز گشته است و آن نیز گستره گیرندگی مغناطیسی<sup>۲</sup> در موجودات زنده است.

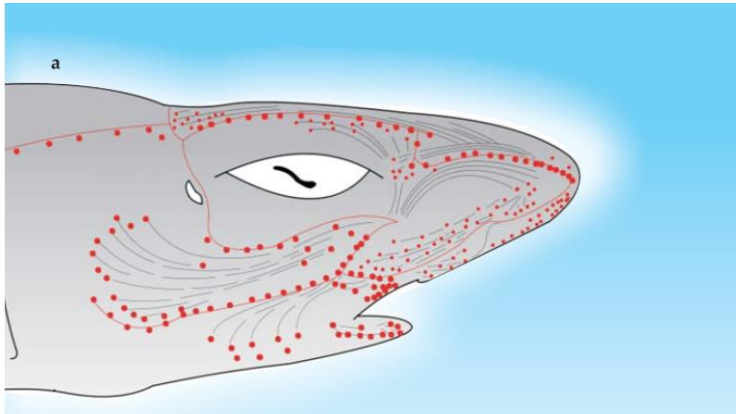
گیرندگی مغناطیسی، توانایی گونه‌های مهاجرت کننده است که از میدان مغناطیسی زمین استفاده می‌کنند. این حس به جانوران ناوبری

---

<sup>1</sup> Monarch butterfly

<sup>2</sup> Magnetoreception

دقیق از مسیرهای بسیار دور را می‌دهد. لاک‌پشت‌ها، کوسه‌ها و پرندگان، پاره‌ای از جانوران هستند که با استفاده از حس گیرندگی مغناطیسی، سفرهای طولانی را انجام می‌دهند. لاک‌پشت‌ها با همین حس و استفاده از میدان مغناطیسی زمین قادر هستند که به صورت بالغین به همان سواحلی بازگردند که سر از تخم در آورده بودند. کوسه‌ها نیز به میدان‌های مغناطیسی پاسخ می‌دهند و گفته شده است که آن‌ها از گیرندهای ویژه الکترومغناطیسی به نام آمپول لورنزینی<sup>۱</sup> برای ناوبری استفاده می‌کنند؛ هر چند که هنوز این موضوع مورد بحث می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹: حس گیرندگی القایی در کوسه‌ها؛ نمایی جانبی از سر کوسه که نشانگر گیرنده‌های الکتریکی آمپول‌های لورنزینی (نقاط) و کانال‌های هدایتی پر شده از ژل (خطوط خاکستری) هستند. خطوط معروف به خطوط جانبی نیز که برای شناسایی ارتعاشات آب محیط استفاده می‌شوند نیز نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Ampullae of Lorenzini



بسیاری از پرندگان از شاهکارهای تأثیر برانگیز ناوبری در مهاجرت‌های سالانه خود بهره می‌برند. هم اکنون، مسیر سفرهای باور نکردنی بسیاری از پرندگان نقشه‌برداری شده است و از فناوری‌های روزآمدی همچون ردیابی با GSM یا ماهواره‌ای برای این منظور استفاده می‌شود. هر چند که پرندگان از تعدادی از نشانگان محیطی شامل خورشید و ستارگان برای ناوبری استفاده می‌کنند، عموماً بر این توافق وجود دارد که آن‌ها به صورت اولیه از میدان مغناطیسی زمین بهره می‌برند. هم اکنون دو تئوری وجود دارد که چگونه پرندگان این کار را انجام می‌دهند. احتمالاً هر دوی این تئوری‌ها در گونه‌های جانوران گوناگون دخالت دارند. اولین تئوری بر این استوار است که این حس همانند یک قطب‌نمای مغناطیسی معمولی عمل می‌نماید در حالی که دومین تئوری آن است که حس گیرایی مغناطیسی با قطب‌نمای شیمیایی سروکار دارد.

اولین ایده که یک شکل از مکانیسم قطب‌نمای معمولی در جایی از بدن یک جانور قرار دارد با کشف کریستال‌های خرد و کوچک مگنتیت<sup>۱</sup> که ماده معدنی اکسید آهن مغناطیسی طبیعی می‌باشد، تقویت گردید. در بسیاری از جانوران و میکروب‌ها که دارای حس مغناطیسی هستند این ماده موجود می‌باشد. برای مثال، باکتری‌ها که از حس مغناطیسی برای جهت‌دهی خودشان در رسوبات گلی دریایی استفاده می‌کنند اغلب با

---

<sup>1</sup> Magnetite

کریستال‌های گلوله شکل مگنتیت پر شده‌اند. پیشنهاد شده است جانورانی مانند ماهی‌ها، لاک‌پشت‌ها و پرندگان ممکن است از عملکرد این اکسیدهای آهن برای ناوبری و جهت دهی خودشان استفاده می‌کنند. مگنتیت در سلول‌ها به میدان مغناطیسی پاسخ داده و به شکل مکانیکی کانال‌های یونی را باز می‌کند و پیام‌های عصبی را تغییر داده و به عنوان یک حس مغناطیسی عمل می‌نماید.

بر پایهٔ این تئوری، کار پرنده‌شناس آلمانی ولفگانگ ویلشکو<sup>۱</sup> بسیار حائز اهمیت است. در پاییز ۱۹۶۳، این دانشمند، آزمایش‌هایی با پرندگان سینه سرخ<sup>۲</sup> که میان اروپای شمالی و شمال آفریقا مهاجرت می‌کنند، ترتیب داد. او آن‌ها را در میانهٔ مهاجرتشان به دام انداخت و در محفظه‌های حفاظ شدهٔ مغناطیسی قرار داد و پرندگان را با میدان مغناطیسی استاتیک مصنوعی ضعیفی که توسط دستگاهی به نام سیم‌پیچ هلمهولتز<sup>۳</sup> تولید می‌شد که می‌توانست میدان مغناطیسی زمین را شبیه‌سازی کند ولی قدرت و جهت‌دهی آن قابل تغییر بود، تحت تأثیر قرار داد. آن چه که او یافت آن بود که پرندگان به دام افتاده در هنگام مهاجرت در پاییز یا در بهار ناآرام شده و در سویی از محفظه تجمع می‌کردند که در پشت به میدان مصنوعی منطبق بر مسیر مهاجرتی آن‌ها بود. بر پایهٔ یافته‌های این دانشمند، پرندگان به مسیر میدان برقرار شده حساس بودند و به همین

<sup>1</sup> Wolfgang Wiltschko

<sup>2</sup> Robin

<sup>3</sup> Helmholtz

منوال می توانستند میدان مغناطیسی زمین را مورد شناسایی قرار دهند. در حالی که مواد مغناطیسی مانند مگنتیت به قطب‌های میدان مغناطیسی حساس هستند، پژوهشگران در گستره زیست‌شناسی کوانتومی یک قطب‌نمای پرنده‌ای<sup>۱</sup> را پیشنهاد داده‌اند که یک جایگزین دیگر است که به زاویه شیب<sup>۲</sup> میدان مغناطیسی زمین پاسخ می‌دهد. هر چند که هنوز پرسش‌های بسیاری مانده است تا پاسخ داده شود، توافقی بر این وجود دارد که هر دوی این مکانیسم‌ها ممکن است مهم باشند. قطب‌نمای زاویه شیب که به این بستگی دارد چقدر خطوط میدان مغناطیسی نسبت به زمین شیب می‌یابد، مکانیسم جفت رادیکال<sup>۳</sup> نامیده می‌شود و بر اساس دانش شیمی اسپین<sup>۴</sup> استوار است.

این مکانی است که با تئوری کوانتومی تلاقی ایجاد می‌شود. پیش از پرداختن به قطب‌نمای شیمیایی و مکانیسم جفت رادیکال بر پایه فیزیک کوانتومی به ویژگی‌های قطب‌نمای پرنده‌ای می‌پردازیم که در فراتر از قطب‌نمای مغناطیسی معمولی جای دارد.

### قطب‌نمای پرنده‌ای

قطب‌نمای پرنده‌ای از آنجا مطرح می‌گردد که چندین نمای رازآمیز وجود دارند که این نماها منطبق بر قطب‌نمای مغناطیسی معمولی

<sup>1</sup> Avian compass

<sup>2</sup> Inclination

<sup>3</sup> Radical pair mechanism

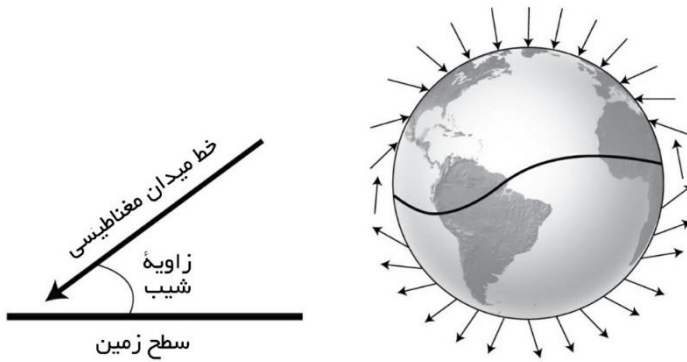
<sup>4</sup> Spin chemistry

نمی‌باشند. حداقل آن که پرندگان توانایی خود را هنگامی که چشمشان بسته می‌شوند در جهت‌یابی از دست می‌دهند. این پدیده نشانگر آن است که می‌بایست توانایی «دیدن» میدان مغناطیسی را داشته باشند. اما چگونه پرنده یک میدان مغناطیسی را می‌بیند؟

در سال ۱۹۷۲ بود که ویلشکو به همراه همسرش، روزویتا<sup>۱</sup> کشف کردند که قطب‌نمای پرندگان سینه سرخ با آن چه در پیش از این مطالعه قرار گرفته بود، مشابه نیست. یک قطب‌نمای طبیعی، یک سوزن مغناطیسی دارد که یک انتهای آن (قطب جنوب آن) به سمت قطب شمال زمین جذب می‌گردد در حالی که انتهای دیگر به سمت قطب جنوب نشانه می‌رود. این در حالی است که قطب‌نمای پرنده‌ای نوع متفاوتی از قطب‌نما است که میان قطب‌های مغناطیسی تمایزی قائل نمی‌شود و از این رو قطب‌نمای شیب<sup>۲</sup> نامیده می‌شود و به سوی قطبی که نزدیک‌تر است نشانه می‌رود و این فقط به شما نشان می‌دهد که آیا به سوی آن قطب در حرکت بوده‌اید یا از آن دور می‌شوید. یک شیوه فراهم آوردن این گونه اطلاعات، اندازه‌گیری زاویه خطوط میدان مغناطیسی زمین در رابطه با سطح زمین است (شکل ۱۰). این زاویه شیب (بدین قرار نام این گونه قطب‌نما) تقریباً عمودی (نشانه رفته به زمین) در مجاورت قطب است ولی در استوا، در موازات زمین قرار دارد.

<sup>1</sup> Roswitha

<sup>2</sup> Inclination compass



شکل ۱۰: خطوط میدان مغناطیسی زمین و زاویه شیب

میان استوا و قطب‌ها، خطوط میدان مغناطیسی به زمین در زاویه‌ای کمتر از ۹۰ درجه وارد می‌شود و این زاویه به نزدیک‌ترین قطب، نشانه می‌رود. بدین سان، هر دستگاهی که این زاویه را اندازه‌گیری کند می‌تواند به عنوان یک قطب‌نمای شیب عمل نماید و اطلاعات جهت‌ی را فراهم نماید. همان‌گونه که اشاره شد، پرنده‌گان رفتار مهاجرتی را حتی هنگامی که در قفس گرفتارند، از خود نشان می‌دهند و بی‌قراری فصلی‌شان با مسیری که می‌بایست پرواز کنند، تطابق دارد. با اتصال کاغذ کربنی به دیوارهٔ این قفس‌ها و بررسی نشانه‌هایی که توسط پرنده‌گان در هنگام تلاش به فرار از خود برجای می‌گذارند، دانشمندان می‌توانند فعالیت در جهات خاص را تحت شرایط گوناگون تفسیر کنند. با ترتیب دادن چنین آزمایشات رفتاری با پرنده‌گان مهاجر و در معرض قرار دادن پرنده‌گان مورد آزمون در شرایط مغناطیسی متفاوت و مشاهدهٔ پاسخ‌های آن‌ها، سه

ویژگی زیر از قطب‌نمای پرنده‌ای آشکار شده است:

۱/ قطب‌نمای مغناطیسی پرندگان، قطبیت میدان مغناطیسی را درک نمی‌کند ولی مسیر محوری خطوط میدان را درک می‌نماید؛ چنین است که قطب‌نمای شیب نامیده شده است که جهت‌های این محور را به واسطه شیب مخلوط میدان تصمیم می‌گیرد. برای پرندگان، قطب‌نمای مغناطیسی نشان دهنده شمال و جنوب مغناطیسی نمی‌باشد؛ یعنی چیزی که قطب‌نمای معمولی آن‌ها را می‌شناسد به عوض «جهت قطب» را نشان می‌دهد، جهتی که خطوط میدان به سمت پایین میل می‌کنند و نیز «جهت استوا»، جایی که این خطوط سمت بالا را نشانه می‌روند.

۲/ قطب‌نمای مغناطیسی پرنده‌ای فقط در یک پنجره عملکردی حول شدت محلی مغناطیس زمین کار می‌کند و میدان‌هایی که بیش از ۲۰ تا ۲۵ درصد ضعیف‌تر و قوی‌تر از میدان محلی باشند، موجب سردرگمی می‌شوند.

۳/ قطب‌نمای مغناطیسی پرندگان وابسته به نور است. در تابش آفتاب روشن تحت طیف نوری کامل کار می‌کند ولی مطالعات بعدی نشان دادند که نور انتهای طول موج کوتاه طیف لازم است و شدت‌های نوری لازم، بسیار پایین هستند.

مسلماً در اواسط دهه ۱۹۷۰ هیچ کس نشانه‌ای نداشت از این که چگونه یک قطب‌نمای مغناطیسی زیست‌شناسی کار می‌کند. اما در همان

سالی که ویلشکوها و استفن املن<sup>۱</sup> کارهای پژوهشی خود را چاپ کردند، شیمیدان آلمانی، کلوس شولتن<sup>۲</sup> یک مکانیسم شیمیایی که نور را با حس گیرایی مغناطیسی پیوند می‌داد، ارائه داد.

در واقع، مکانیسم پیشنهادی شولتن و همکاران وی که سپس توسط ریتز<sup>۳</sup> و همکارانش توسعه داده شد آن بود که قطب‌نمای شیمیایی‌ای در پرنده وجود دارد که یک مکانیسم جفت رادیکالی برانگیخته با نور می‌باشد و یک گسست در ترکیب جفتی در نتیجه اثرات میدان مغناطیسی موجب ایجاد تفسیر و شناخت در دستگاه عصبی پرنده می‌شود. در واقع، در پاسخ به تجربیات اولیه که حاکی از ویژگی‌های وابسته به نور حس گیرایی مغناطیسی پرندگان بود، شولتن و گروه پژوهشی‌اش، مکانیسم جفت رادیکالی را به عنوان قطب‌نمای شیمیایی زیست‌شناسی منطقی ارائه دادند. شواهدی وجود دارد که پروتئینی به نام کریپتوکروم<sup>۴</sup> که در چشم پرندگان یافت می‌شود، مکان قطب‌نمای جفت رادیکال است. کریپتوکروم به نور، به ویژه نور آبی، حساس است. نور وارد شده به چشم پرنده می‌تواند انرژی خود را به یکی از جفت الکترون‌ها در کریپتوکروم بدهد و موجب شود که این الکترون برانگیخته شده و جفت الکترونی که از لحاظ فضایی جدا بوده ولی از لحاظ اسپین همبستگی دارد و جفت رادیکالی نامیده

---

<sup>1</sup> Stephen Emlen

<sup>2</sup> Klaus Schulten

<sup>3</sup> Ritz

<sup>4</sup> Cryptochrome

می‌شود، ساخته شود. این جفت الکترونی در حالت یک‌تایی<sup>۱</sup> کار را آغاز می‌کند که به این معنا است که اسپین‌های دو الکترون در مسیری خاص نسبت به یکدیگر ترتیب می‌یابند. اما اسپین‌ها می‌توانند به طریقی متفاوت به نام حالت سه‌تایی<sup>۲</sup> ترتیب بیابند. حالات یک‌تایی و سه‌تایی تحت اثر اسپین‌های هسته‌ای اتم‌های دیگر در پروتئین اطراف و نیز میدان مغناطیسی زمین می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند. آیا این که اسپین‌های جفتی در حالت یک‌تایی یا سه‌تایی باشد، فرآورده شیمیایی ساخته شده را تعیین می‌کند و آن گاه بدین سان، اطلاعات جهت‌یابی برای مغز پرنده، تأمین می‌گردد.

در واقع، این کلوس شولتن که فارغ‌التحصیل هاروارد با یک PhD در شیمی - فیزیک بود که به اروپا بازگشته و در مؤسسه ماکس پلانک شیمی - بیوفیزیک گوتینگن جایگاهی یافته بود این را ارائه داد که الکترون‌های خلق شده در واکنش سه‌تایی سریع<sup>۳</sup> تحت تأثیر نور، می‌توانند درهم‌تنیده کوانتومی<sup>۴</sup> باشند. محاسبات او بیانگر آن بود که درهم‌تنیدگی کوانتومی در واکنش‌های شیمیایی دخالت داشته و آن گاه سرعت این واکنش‌ها می‌تواند توسط میدان مغناطیسی خارجی تحت تأثیر قرار گیرد. او شیوه‌ای را برای اثبات تئوری‌اش ارائه داد. در واقع، ویژگی رازآمیز درهم‌تنیدگی کوانتومی می‌تواند بر این واکنش‌های شیمیایی اثر بگذارند.

---

<sup>1</sup> Singlet

<sup>2</sup> Triplet

<sup>3</sup> Fast triplet

<sup>4</sup> Quantum entangled



شولتن به روشنی نشان داد که این واکنش شیمیایی به میدان‌های مغناطیسی حساس است. او با آگاهی از کارهای پژوهشی ویلشکوها و مسئله یافت یک مکانیسم شیمیایی منطقی برای قطب‌نمای زیست‌شناسی، دریافت که این الکترون‌های درحال چرخش، چنین مکانیسمی را فراهم می‌آورند و در مقاله سال ۱۹۷۸ خودش ارائه داد که قطب‌نمای پرندهای به مکانیسم جفت رادیکال درهم‌تنیده شده کوانتومی مرتبط می‌باشد.

پیش از آن که ببینیم چگونه کار این دانشمندان کمک به توضیح این که پرندگان چگونه مسیریابی می‌کنند، نیاز داریم به جهان رمزآلود کوانتومی بازگردیم و نگاهی دقت‌آمیزی به پدیده درهم‌تنیدگی کوانتومی داشته باشیم. همان گونه که پیش از این اشاره شد، درهم‌تنیدگی کوانتومی چنان شگفت‌آور و عجیب است که انیشتن بر این پافشاری می‌کرد که این تئوری نمی‌تواند درست باشد. پیش از این که ما به مکانیسم جفت رادیکال و چگونگی ناوبری پرندگان بر پایه رویدادهای کوانتومی بپردازیم، نیاز است که به ویژگی خاص دیگری از جهان کوانتوم یعنی «اسپین»<sup>۱</sup> نیم نگاهی داشته باشیم.

### اسپین کوانتومی و کنش شبج‌وار

همان‌گونه که زمین به دور خورشید می‌گردد بر محورش نیز می‌چرخد، بر همین شکل الکترون‌ها و ذرات ریز اتمی دیگر دارای

<sup>۱</sup> Spin

ویژگی‌ای به نام اسپین هستند که از حرکت طبیعی آن‌ها متمایز است؛ اما این «چرخش کوانتومی» مشابه چیز دیگری نیست که ما بتوانیم بر پایهٔ تجربهٔ روزانهٔ اجسام در چرخش مانند توپ تنیس یا سیارات تصور آن را کنیم. برای آغاز بحث باید گفت که نمی‌توان هنگامی که در مورد سرعت چرخش یک الکترون صحبت می‌شود، حس واقعی به دست آورد زیرا چرخشش می‌تواند فقط یکی از دو مقادیر ممکن را داشته باشد: الکترون کوانتیده<sup>۱</sup> است مانند انرژی که در سطح کوانتومی کوانتیده شده است. در یک حس غیرزرف، الکترون‌ها فقط می‌توانند در جهت چرخش ساعت یا جهت مخالف آن حرکت کنند که معمولاً مترادف با آن است که گفته شود حالات چرخش «بالا» یا چرخش «پایین» و از آنجا که این جهان کوانتوم است، یک الکترون، در هنگامی که نگریسته نمی‌شود، می‌تواند در هر دو جهت در یک زمان بچرخد. ما می‌گوییم که حالت چرخش آن‌ها در برهم‌نهی<sup>۲</sup> (ترکیب یا مخلوط) چرخش بالا و چرخش پایین است. از دیدگاه احساسی، بسیار رمزآلود می‌نماید که گفته شود یک الکترون می‌تواند در دو مکان در یک زمان باشد زیرا چگونه یک چرخش الکترون واحد می‌تواند در یک زمان در جهت چرخش عقربه‌های ساعت و خلاف آن باشد؟

برای این که نشان داده شود چقدر در خلاف واقع این چرخش کوانتومی است آن است که با چرخش ۳۶۰ درجه، یک الکترون را به حالت اولیه‌اش بر نخواهد گرداند؛ برای انجام آن، این به دو چرخش کامل

---

<sup>1</sup> Quantized

<sup>2</sup> Superposition

نیاز دارد. این شگفت‌آور به نظر می‌آید زیرا ما هنوز تمایل داریم که یک الکترون را به صورت یک کره کوچک تصور کنیم، چیزی شبیه یک توپ تنیس خیلی کوچک. اما توپ‌های تنیس از ساکنین جهان ماکروسکوپی هستند و الکترون‌ها در جهان کوانتومی زیر اتمی زندگی می‌کنند جایی که قوانین آن متفاوت هستند. در واقع، الکترون‌ها نه تنها کره‌های کوچکی نیستند، به آن‌ها حتی نمی‌توان گفت که اصلاً اندازه‌ای داشته باشند. از این رو، هر چند که چرخش کوانتومی یک «واقعیت» مانند چرخش یک توپ تنیس است ولی مترادفی در جهان معمول روزانه ما ندارد، نمی‌توان آن را ترسیم کرد.

با این وجود، این گونه تصور نکنید که این فقط یک چکیده مفهوم ریاضی است که در کتب مرجع و مباحث فیزیکی غیرقابل رسوخ، وجود دارد. هر الکترون در بدن شما و در هر جای دیگر گیتی، به این شیوه مخصوص می‌چرخد. در واقع، اگر آن‌ها نچرخند جهانی که ما می‌شناسیم، شامل وجود خود ما، وجود نمی‌داشت زیرا چرخش کوانتومی نقش کلیدی در یکی از مهم‌ترین ایده‌های علم معروف به «اصل طرد پاولی»<sup>۱</sup> ایفا می‌کند که در کل شیمی سایه افکنده است. یکی از پیامدهای اصل طرد پاولی این است که چنانچه دو الکترون در یک اتم یا ملکول جفت هستند و انرژی یکسانی دارند (به یاد داشته باشید که پیوندهای شیمیایی که ملکول‌ها را به یکدیگر نگه می‌دارند از الکترون‌هایی ساخته شده‌اند که

---

<sup>۱</sup> Pauli Exclusion Principle

میان اتم‌ها به اشتراک گذاشته می‌شوند) آن گاه آن‌ها مجبورند که اسپین‌های متفاوت داشته باشند. پس ما می‌توانیم تصور کنیم که اسپین‌های آن‌ها، یکدیگر را خنثی می‌نمایند و به آن‌ها می‌گوییم که در حالت «تک‌تایی اسپین<sup>۱</sup>» قرار دارند چون که فقط می‌توانند در یک حالت واحد، ساکن باشند. این حالت طبیعی است که در جفت‌های الکترون‌ها در اتم‌ها و اکثر ملکول‌ها وجود دارد. اما هنگامی که با یکدیگر در یک سطح انرژی جفت نیستند، دو الکترون می‌توانند در یک جهت چرخش داشته باشند و گفته می‌شود که در «حالت سه‌تایی اسپین<sup>۲</sup>» می‌باشند و ما در واکنش مورد مطالعه شولتن به آن اشاره کردیم و مفصل‌تر در بخش بعدی به آن می‌پردازیم.

شما ممکن است با ادعاهای بسیار مشکوک که دوقلوهای همسان می‌توانند حالت هیجانی یکدیگر را حس کنند حتی هنگامی که در مسافت‌های زیادی از هم جدا هستند، آشنا باشید. چگونه دوقلوا به یکدیگر در یک سطح روحی به یکدیگر می‌پیوندند که علم هنوز نمی‌تواند درک کند. ادعاهای مشابه برای توضیح آن که چگونه یک سگ به صورت آشکار حس می‌کند چه وقتی صاحبش به خانه می‌آید نیز وجود دارد. ما باید به روشنی اظهار نماییم که هیچ کدام از این مثال‌ها شایستگی علمی ندارند، هر چند که بعضی از مردم به اشتباه تلاش می‌کنند آن‌ها را بر پایه مکانیک کوانتومی توصیف نمایند. گرچه چنین کنش‌های همزمان در یک

---

<sup>1</sup> Spin singlet state

<sup>2</sup> Spin triplet state

مسافت، در جهان کلاسیک روزانه ما یافت نمی‌شوند، این‌ها سیمایی کلیدی در دامنه کوانتوم هستند. واژه فنی آن «بی‌جایگاهی<sup>۱</sup>» یا «درهم‌تنیدگی<sup>۲</sup>» است و به این ایده ارجاع دارد چیزی که در این جا رخ می‌دهد می‌تواند یک اثر «آنی» در آنجا داشته باشد و مهم نیست که چه قدر آن مکان از اینجا دور است.

در نظر بگیرید که یک جفت طاس دارید. احتمال ریاضی پرتاب یک دوتایی به سادگی امکان‌پذیر است. برای هر عددی که یکی از طاس‌ها بر روی زمین می‌افتد یک ششم شانس وجود دارد که طاس دیگر نیز بر روی همان عدد بر روی زمین بیفتد. برای مثال احتمال طاس اول که چهار باشد  $\frac{1}{6}$  است و شانس یک دوتایی چهار،  $\frac{1}{36}$  است (زیرا  $\frac{1}{6} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{36}$ ). از این رو، شانس برای پرتاب هر جفت عدد، یک دوتایی، مسلماً  $\frac{1}{6}$  است. برای محاسبه احتمال یک جفت عدد در یک ردیف ده‌تایی (بدون در نظر گرفتن این که چه عددی باشد برای مثال یک دوتایی چهار، سپس یک دوتایی یک و ادامه به همین صورت) کافی است که  $\frac{1}{6}$  را در  $\frac{1}{6}$ ، ده بار ضرب کرد که حاصل آن یک بر شصت میلیونم ( $\frac{1}{60,000,000}$ ) است! این به معنای آن است که در انگلستان با ۶۰ میلیون جمعیت، پرتاب یک جفت از طاس در ده دور متوالی، از لحاظ آماری، فقط یک شخص وجود دارد که در هر زمان از پرتاب ده‌گانه، همه آن‌ها را دوتایی به دست می‌آورد.

اما تصور کنید که شما یک جفت طاس دارید که همیشه هنگامی

<sup>1</sup> Nonlocality

<sup>2</sup> Entanglement

که با یکدیگر پرتاب می‌شوند به صورت عدد دوتایی بر روی زمین می‌نشینند که معمولاً در هر پرتاب تغییر می‌کند ولی هر دو طاس همیشه بر روی یک عدد یکسان می‌نشینند. قطعاً شما مطمئن خواهید بود که نیرنگی وجود دارد. شاید این طاس‌ها یک مکانیسم درونی پر مایه داشته باشند که حرکت آن‌ها را کنترل می‌کند به گونه‌ای که آن‌ها بر روی عددهایی با توالی از پیش برنامه‌ریزی شده بر روی زمین فرود می‌آیند. برای آزمودن این تئوری شما یکی از طاس‌ها را در دست می‌گیرید و این در حالی است که دیگری را پرتاب می‌کنید، ولی پس از آن جفت طاس را به زمین می‌اندازید. هم اکنون هر سریال پیش برنامه‌ریزی شده‌ای متوقف خواهد شد، بنابراین حيله کارساز نمی‌باشد. ولی با وجود این تدبیر جنگی، طاس‌ها بر روی عدد یکسان بر زمین فرود می‌آیند. وجود احتمال دیگر این است که طاس‌ها به شیوه‌ای می‌توانند پیش از این که هر کدام پرتاب شوند یک پیام از راه دور را با یکدیگر جهت بازهم‌انطباقی، تبادل کنند. هر چند که وجود چنین مکانیسمی پرمغز به نظر می‌آید ولی حداقل امکان تصور آن در اصل وجود دارد. چگونه مکانیسمی موضوع محدودیت برقرار شده توسط تئوری نسبیت انیشتن قرار می‌گیرد زیرا بر طبق آن هیچ پیامی نمی‌تواند سریع‌تر از نور حرکت کند. از این رو، می‌بایست تمهیدی برای آزمون این که آیا پیامی میان دو طاس گذر می‌کند، فراهم نمود: آن چه که شما به انجام آن نیاز دارید تضمین آن است که طاس‌ها به اندازه کافی جدا باشند که

زمان کافی برای هر پیام هم انطباقی که میان ردیف‌ها تبادل شود وجود نداشته باشد. از این رو، بگذارید تصور کنیم که شما تلاش می‌کنید همین نیرنگ بالایی را انجام دهید ولی به طریقی ترتیب می‌دهید که یک طاس بر روی زمین و دیگری همزمان در مریخ فرود آید. حتی در نزدیک‌ترین فاصله از زمین، نور چهار دقیقه فاصله را میان دو سیاره طی می‌کند، بنابراین شما می‌دانید که هر پیام هم انطباقی می‌بایست یک تاخیر مشابه را داشته باشد. برای چیرگی بر آن شما به سادگی برای دو طاس به گونه‌ای ترتیب می‌دهید که در فواصل پیش‌تر تکرار شونده از این پرتاب شوند. این تدبیر موجب می‌شود که از هر پیام انطباق‌پذیری طاس‌ها در میان پرتاب‌ها پیشگیری شود. چنانچه آن‌ها در عددهای دوتایی فرود آیند، آن گاه به نظر می‌رسد که یک ارتباط ذاتی میان آن‌ها وجود داشته باشد که از محدودیت معروف انیشتین نیز چشم‌پوشی می‌کند. گرچه تجربه فوق‌الذکر با طاس‌های میان سیاره‌ای انجام نشده است اما آزمایشات همسان آن با ذرات درهم‌تنیده کوانتومی بر روی زمین ترتیب داده شده‌اند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهند ذرات جدا شده می‌توانند چنین نیرنگی که برای طاس‌ها مفروض داشتیم را انجام دهند. این رفتار غیرمأنوس جهان کوانتومی به نظر می‌آید که به حد سرعت کیهانی انیشتین احترام نمی‌گذارد زیرا یک ذره در یک مکان می‌تواند به صورت «آنی» بر دیگر اثر گذارد و این فرق نمی‌کند که چه قدر این دو ذره از یکدیگر دور باشند. واژه «درهم‌تنیدگی» برای توصیف این

پدیده توسط شرودینگر<sup>۱</sup> ابداع گردید که در برابر «عمل شب‌خوار در یک فاصله<sup>۲</sup>» توصیف شده توسط انیشتین قرار می‌گیرد. با وجود شکوک بر آن‌ها، درهم‌تنیدگی کوانتومی در بسیاری از آزمایشات ثابت شده است و یکی از ایده‌های بنیادین در مکانیک کوانتومی است که کاربردها و مثال‌های فراوانی در فیزیک و شیمی دارد و همان گونه که خواهیم دید، احتمالاً در زیست‌شناسی نیز مصادیقی از خود نمایان می‌نماید.

برای درک این که چگونه درهم‌تنیدگی کوانتومی با زیست‌شناسی درهم‌آمیختگی می‌یابد ما می‌بایست دو ایده را ترکیب کنیم. نخستین ایده پیوند آنی میان دو ذره در ماوراء مکان است که آن درهم‌تنیدگی می‌نامیم و دومین ایده توانایی یک ذره کوانتومی واحد در وضعیت برهم‌نهی<sup>۳</sup> دو یا چند حالت متفاوت در یک زمان می‌باشد: برای مثال، یک الکترون می‌تواند در هر دو مسیر در یک زمان چرخش بیابد، بدین سان ما بیان می‌داریم که آن ذره در حالات «اسپین بالا» و «اسپین پایین» بوده است. ما این دو ایده را ترکیب می‌کنیم به این صورت که دو الکترون درهم‌تنیده در یک اتم داریم که هر یک در حالات اسپین دوتایی خودش است. گرچه هیچ کدام یک جهت اسپین مسلم ندارد اما هر چه باشد اثرات خودش را برقرار می‌سازد و توسط دیگر اسپین جفت خودش تحت تأثیر قرار می‌گیرد. اما به خاطر داشته باشید که هر جفت

<sup>1</sup> Schrodinger

<sup>2</sup> Spooky action at a distance

<sup>3</sup> Superposition



الکترون در یک اتم واحد همیشه در یک حالت تک‌تایی<sup>۱</sup> است که این به معنای آن است که آن‌ها در همهٔ زمان‌ها اسپین مخالف دارند: یکی می‌بایست اسپین بالا و دیگری بایست در اسپین پایین باشد. از این رو، هر چند که هر دو الکترون در یک برهم‌نهی هر دوی بالا و پایین در یک زمان است، در طریقت خاص کوانتومی، آن‌ها می‌بایست در همهٔ زمان‌ها اسپین مخالف داشته باشند.

اکنون اجازه دهید تا دو الکترون در هم تنیده شده را جدا سازیم به گونه‌ای که آن‌ها دیگر در یک اتم واحد نباشند. اگر آن گاه ما تصمیم به اندازه‌گیری حالت اسپین یکی از الکترون داشته باشیم ما مجبور خواهیم شد که «برگزینیم» در چه مسیری آن الکترون در حال چرخش است. فرض بر این گذاریم که پس از اندازه‌گیری دریابیم که اسپین بالا دارد. از آنجا که الکترون‌ها در یک حالت اسپین یک‌تایی درهم‌تنیده قرار داشتند، این به معنای آن است که الکترون دیگر می‌باید اکنون در اسپین پایین باشد. اما به خاطر بیاورید پیش از «اندازه‌گیری» هر دو الکترون در یک برهم‌نهی اسپین بالا و پایین قرار داشتند. پس از اندازه‌گیری، هر دو، حالات متمایزی دارند: یکی از آن‌ها اسپین بالا و دیگری اسپین پایین. بدین صورت، دومین الکترون به صورت آنی و از راه دور، حالت فیزیکی خود را از بودن در یک برهم‌نهی چرخش هر دو مسیری در یک زمان تغییر داده و به صورت اسپین پایین بدون این که لمس شود قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> Singlet state

تمام چیزی که ما انجام دادیم «اندازه‌گیری» حالت جفتش بود و در اصل این مهم نیست که چقدر دومین الکترون دور باشد، می‌تواند در سوی دیگر گیتی باشد و اثر همان خواهد بود: یعنی اندازه‌گیری فقط یکی از جفت درهم‌تنیده «بلافاصله» برهم‌نهی دیگری را بدون در نظر گرفتن آن که چه قدر دور باشد، فرو می‌پاشد.

در اینجا یک مثال همسان را ارائه می‌دهیم که ممکن است تا حد ناچیزی به شما کمک کند. یک جفت دستکش را تصور کنید که هر دستکش در یک جعبه مهر و موم شده قرار داده شده است و مایل‌ها از یکدیگر فاصله دارند. شما یکی از جعبه‌ها را در اختیار دارید، پیش از باز کردن آن نمی‌دانید آیا دستکش شما مربوط به دست چپ یا راست است. هنگامی که جعبه را باز می‌کنید و در می‌یابید که دستکش دست راست را دارید شما بلافاصله «می‌دانید» که دستکش دیگر در جعبه‌ی باز نشده مربوط به دست چپ است و این مهم نیست که چه قدر جعبه‌ی دیگر در فاصله‌ی دوری باشد. آن چه در اینجا اساسی است آن است که آن چه که تغییر کرده است دانش شما است.

جعبه‌ی راه دور همیشه مربوط به دست چپ بوده است بدون در نظر گرفتن این که آیا شما باز کردن جعبه‌ی خود را برگزینید یا خیر. درهم‌تنیدگی کوانتومی متفاوت است. پیش از اندازه‌گیری، هیچ کدام از الکترون‌ها مسیر اسپین قطعی نداشتند که به هر دو الکترون‌ها فشار آورده شود تا حالت خودشان را از بودن در یک برهم‌نهی کوانتومی هر

دوی اسپین بالا و پایین تغییر دهند و در یک حالت قطعی بالا یا پایین قرار گیرند؛ این در حالی است که در مثال دستکش‌ها، این فقط جهل شما از حالت قطعی پیش موجود دستکش‌ها بود که رخت بر بست. نه تنها اندازه‌گیری کوانتومی یک الکترون بر آن فشار نمی‌آورد تا «برگزیند» در سوی بالا یا پایین اسپین داشته باشند بلکه آن «گزینش» به صورت آنی بر جفتش فشار می‌آورد تا حالت مکمل را برگزیند و این مهم نیست که چقدر در فاصله دوری باشد.

یک تیزبینی بیشتری وجود دارد که نیاز است افزوده گردد. همان گونه که تاکنون بحث کرده‌ایم، دو الکترون با چندگانگی اسپینی یک‌تایی در هنگامی که جفت با یکدیگر هستند قرار دارند و در جهات مخالف می‌چرخند و در هنگامی که در حالت سه‌تایی قرار می‌گیرند در جهت یکسان چرخش می‌یابند. اگر یک الکترون از یک جفت یک‌تایی که در یک اتم واحد نشسته‌اند به اتم مجاور جهش یابد، اسپینش می‌تواند بچرخد به گونه‌ای که هم اکنون در همان مسیری می‌چرخد که دوقلوی ترک کرده‌اش می‌چرخد و آن‌ها یک حالت اسپین سه‌تایی را خلق می‌کنند. با وجودی که هم اکنون در اتم‌های مختلف قرار دارند، جفت هنوز حالت درهم‌تنیده ظریف خودشان را برقرار می‌دارند که در آن، آن‌ها با یکدیگر به صورت مکانیک کوانتومی جفت می‌مانند.

اما این جهان کوانتومی است و فقط به خاطر این است که الکترون از اتم، جهیده است و اکنون نیز می‌تواند به اسپین خود تلنگر بزند، البته

این به معنای آن نیست که به صورت مطلق آن را دارد. هر دو الکترون هنوز در یک برهم‌نهی چرخشی در هر دو مسیر در یک زمان قرار دارند و بدین ترتیب، از آنجا که این جفت در یک برهم‌نهی بودن در یک یک‌تایی و حالت سه‌تایی زیست خواهند کرد و به صورت همزمان در مسیری یکسان و مخالف در همان زمان چرخش می‌کنند! بدین گونه اکنون شما به صورت مناسبی آماده و احتمالاً دچار سردرگمی شده‌اید و اکنون زمان آن فرا رسیده است که شما را با عجیب‌ترین و مطرح‌ترین ایده در گستره زیست‌شناسی کوانتومی آشنا سازیم.

### مدل «جفت رادیکال»

ویژگی‌های قطب‌نمای مغناطیسی پرنده‌گان به یک مکانیسم حسی غیرمعمول اشاره دارد و بدین سان ریتز<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۰، مدل «جفت رادیکال» بر پایه فرایندهای شیمیایی اسپین در رنگدانه‌های نوری که با میدان مغناطیسی زمین برهم‌کنش دارند، پیشنهاد دادند. جذب فوتون‌ها به ساخت رادیکال‌های جفت، منتهی می‌شود که در دو حالت نمایان می‌شوند یکی به شکل یک‌تایی با اسپین‌های غیرموازی و سه‌تایی با اسپین موازی که نسبت یک‌تایی به سه‌تایی بستگی به ارتباط جهت‌دار جفت رادیکالی نسبت به میدان مغناطیسی محیط دارد. از آنجا که فرآورده‌های یک‌تایی و سه‌تایی متفاوت هستند، این نسبت می‌تواند بیانگر

<sup>1</sup> Ritz

مسیرهای مغناطیسی باشد. ریتز و همکارانش، چشم را به عنوان جایگاه حس گیرایی مغناطیسی مطرح کردند زیرا نور در دسترس چشم‌ها بوده و همچنین شکل چشم‌ها گرد می‌باشند و سلول‌های گیرنده در همه جهات فضایی ترتیب یافته‌اند. این موجب ایجاد الگوی فعال‌سازی خاصی در سراسر شبکیه چشم می‌گردد که نسبت به مسیر بردار مغناطیسی به صورت مرکزگرا، قرینه می‌باشد و از این رو، می‌تواند نشانگر محور خطوط میدان باشد.

کریپتوکروم به عنوان رنگدانه نوری که مسیرهای مغناطیسی را میانجی‌گری می‌کند، پیشنهاد شد زیرا تنها رنگدانه نوری شناخته شده در جانوران است که رادیکال‌های جفت را می‌سازد. این مدل می‌تواند ویژگی‌های خاص قطب‌نمای مغناطیسی پرندگان را توضیح دهد. از آنجا که رابطه جفت رادیکال در خطوط میدان و بدین سان نسبت یک‌تایی به سه‌تایی از قطبیت، چشم‌پوشی می‌کند، پیامد آن یک قطب‌نمای شیب<sup>۱</sup> است که در پرندگان یافت می‌گردد. این واقعیت که الگوی فعال‌سازی با شدت تغییر می‌یابد، پنجره عملکردی انعطاف‌پذیر را توضیح می‌دهد؛ پرندگان که یک تغییر شدت ناگهانی را تجربه می‌کنند با یک الگوی فعال‌سازی نوین روبه‌رو می‌شوند. در نخست این ممکن است گیج‌کننده باشد ولی از آنجا که این الگوی قرینگی مرکزیت خود را نسبت به بردار مغناطیسی حفظ می‌کند، پرندگان سرانجام می‌توانند تفسیر و ترجمان

---

<sup>1</sup> Inclination compass

آن را یاد بگیرند.

وابستگی جهت قطب‌نمای مغناطیسی به نور با طول موج کوتاه به شکل عظیمی در توافق با طیف جذبی کریپتوکروم است که در چشمان پرندگان یافت شده است. در همین زمان، شواهد تجربی نیز از مدل جفت رادیکال، حمایت می‌کنند. در یک مطالعه<sup>۱</sup> الکترورتینوگرافی، تفاوت‌هایی در پاسخ‌ها به جهات متنوع مغناطیسی در شبکیه با نور آبی و نه با نور قرمز ثبت شدند. میدان‌های فرکانس رادیویی در محدوده مگاهرتز یک تست تشخیصی برای دخالت فرایندهای جفت رادیکال می‌باشند؛ چنین میدان‌های فرکانس رادیویی در واقع موجب عدم جهت‌یابی در پرندگان می‌شوند.

### جفت رادیکال‌های حاصله از کریپتوکروم

همانند داربست پروتئینی در ترکیبات پیچیده فتوسنتزی که ملکول‌های کلروفیل را با یکدیگر نگه می‌دارد، پروتئین کریپتوکروم در اطراف یک ملکول رنگدانه به نام FAD (دی نوکلئوتید آدنین فلاوین)<sup>۲</sup> پیچیده شده است که نور آبی را جذب می‌کند. مانند فتوسنتز، جذب نور موجب پرش یک الکترون از رنگدانه می‌شود که منجر به یک پیام می‌گردد. در واقع، FAD رنگ‌ساز<sup>۳</sup> کریپتوکروم است. FAD تحت یک

<sup>۱</sup> Electro-retinographic

<sup>۲</sup> Flavin adenine dinucleotide

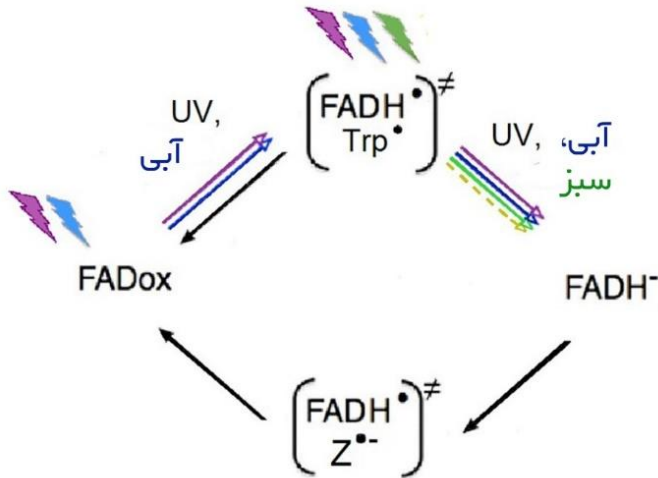
<sup>۳</sup> Chromophore

چرخه اکسایشی<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد که به خوبی در گیاهان مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل اکسیده آن (FADox)، یک شکل استراحتی تاریک آن است. جذب فوتون با طول موج‌های از نور ماوراء بنفش تا حدود ۵۰۰ نانومتر آبی، موجب احیاء نوری FADox به سمی‌کوینون<sup>۲</sup> FADH\* می‌شود که اولین جفت رادیکال را با رادیکال تریپتوفان (TRP\*) شکل می‌دهد. FADH\* می‌تواند به صورت مستقل از نور دوباره اکسیده شود و یا این که در یک گام بعدی توسط نور با طول موج از ماوراء بنفش تا سبز به FADH<sup>-</sup> احیاء نوری شود که شکل کاملاً احیاء شده می‌باشد.

FADH<sup>-</sup> سپس به شکل مستقل از نور به FADox دوباره اکسیده می‌شود. در طی این گام، یک جفت رادیکال ثانویه احتمالاً با O<sub>2</sub>\* شکل می‌گیرد (شکل ۱۱) ولی همراه واقعی FADH\* و جزئیات این فرایند، هنوز در حاله‌ای از ابهام است. با این دیدگاه، این پرسش بر می‌خیزد که کدامیک از جفت رادیکال‌ها میانجی مسیر میدان مغناطیسی می‌باشند. تجربیات آزمایشگاهی نشان دادند که بسیاری از پرندگان تحت نور طیف باریک با اوج طول موج‌های نور آبی و سبز، جهت‌یابی می‌کنند. از آنجا که نور سبز نمی‌تواند FADox را احیاء کند و فقط نور آبی این کار را می‌کند (شکل ۱۰)، به نظر می‌آید که بر ضد درگیر بودن جفت رادیکال تشکیل شده در طی احیاء نوری در میانجی نمودن حس گیرایی مغناطیسی پرندگان باشد و به جفت رادیکال دیگر اشاره می‌دارد.

<sup>1</sup> Redox cycle

<sup>2</sup> Semiquinone



شکل ۱۱: چرخه اکسایش - کاهش (Redox) ملکول FAD، کروموفور کریپتوکروم. جفت‌های رادیکالی در پرانتز گذاشته شده‌اند؛ پیکان‌های رنگی نمایانگر احیاء نوری توسط طول موج‌های مربوطه است؛ پیکان‌های سیاه نشانگر واکنش‌های وابسته نوری اکسیداسیون دوباره است. (Z) در جفت رادیکال که در هنگام اکسیداسیون دوباره تولید شده است بیانگر یک رادیکالی است که ماهیت آن هنوز روشن نیست.

اما تجربیات رفتاری بیشتر بر روی پرندگان نشان داد که جهت‌یابی آن‌ها تحت نور سبز تا زمانی امکان‌پذیر است که مقدار کافی از  $FADH^*$  برای احیاء نوری به بعدی در طی واکنش به سوی شکل کاملاً احیاء  $FADH^-$  به واسطه نور سبز وجود داشته باشد و این دوباره اشاره به این دارد که جفت رادیکال تشکیل شده در دوباره اکسید شدن غیروابسته به نور آن جفت رادیکالی است که جهت‌یابی مغناطیسی در پرندگان را میانجی می‌کند. آزمایشات جدید نیز نشان می‌دهند که فرایند واقعی حس



جهت‌یابی مغناطیسی می‌تواند در تاریکی رخ دهد و این نشانگر آن است که جفت رادیکالی که در هنگام اکسیداسیون دوباره ساخته می‌شود، جفت رادیکال اساسی برای حس جهت‌یابی است. اما وجود نور برای احیاء نوری جهت فراهم آوردن شکل کاملاً احیاء  $FADH^-$  که برای ساخت این نوع جفت رادیکال دوباره اکسید می‌شود، لازم و ضروری می‌باشد.

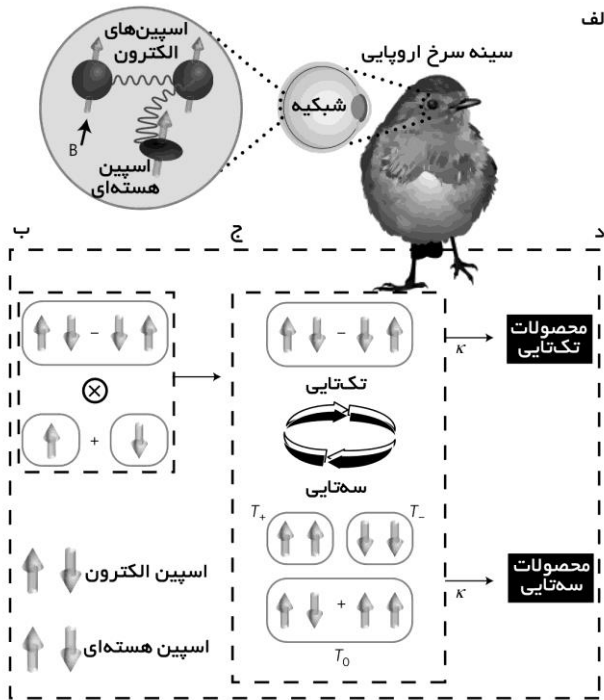
### نقش کریپتوکروم

تا کنون دانستیم که میدان مغناطیسی زمین اطلاعات مسیریابی را برای پرندگان فراهم می‌سازد. قطب‌نمای مغناطیسی پرندگان یک قطب‌نمای شیب بود که از قطبیت میدان مغناطیسی استفاده نمی‌کند ولی از مسیر محوری خطوط میدان و شیب آن‌ها در فضا بهره می‌برد. این قطب‌نما در یک پنجره عملکردی انعطاف‌پذیر کار می‌کند و به نور با طول موج کوتاه نیاز دارد. این ویژگی‌ها از مکانیسم حسی موجود بر پایه فرایندهای جفت رادیکال در چشمان پرندگان حاصل می‌آید و کریپتوکروم به عنوان ملکول گیرنده این واکنش پیشنهاد شده است. رنگسازه کریپتوکروم یعنی FAD تحت یک چرخه نوری قرار می‌گیرد یعنی جایی که جفت‌های رادیکالی در طی احیاء نوری و نیز در هنگام اکسیداسیون دوباره ساخته می‌شوند و همان گونه که در بالا اشاره شد داده‌های تجربی رفتاری بر پرندگان بیانگر آن است که جفت رادیکال در هنگام اکسیداسیون دوباره برای شناسایی جهت‌های مغناطیسی اساسی

می‌باشد. پنج تیپ از کریپتوکروم در شبکیه پرنندگان یافت می‌شود که شامل کریپتوکروم a1 (Cry1a)، کریپتوکروم یک b، کریپتوکروم ۲، کریپتوکروم a4 و کریپتوکروم b4 می‌باشند.

به دلیل جایگاه کریپتوکروم a1 در سگمان‌های بیرونی مخروطی‌های ماوراء بنفش با قطرات کوچک شفاف روغنی‌شان، به نظر می‌آید که این محتمل‌ترین گیرنده ملکولی برای اطلاعات قطب‌نمای مغناطیسی باشد. در واقع در پرنندگان، سلول‌های گیرنده نوری حاوی قطرات کوچک روغنی هستند که مقادیر متفاوتی از طول موج‌های کوتاه را جذب می‌کنند تا حداکثر جذب نوری گیرنده‌های رنگ را برای دید رنگی بهتر داشته باشند. فقط مخروطی‌های UVS/VS دارای قطرات روغنی شفاف هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهد همه طول موج‌های نور گذر کند. این گونه از گیرنده‌های نوری در سراسر شبکیه وجود دارد یعنی در جهات ارتباطی مختلف نسبت به بردار مغناطیسی و بدین طریق آن‌ها می‌توانند موجب ایجاد الگوی فعال‌سازی شوند که توسط ریتز و همکارانش در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد گردید.

در یک فراگرد کلی، اگر کریپتوکروم در واقع ملکول گیرنده در پرنندگان است، شواهد موجود در دسترس نشان می‌دهد که کریپتوکروم a1 محتمل‌ترین گیرنده برای حس جهت‌یابی باشد (شکل ۱۲).



### قطب‌نمای کوانتومی پرندگان:

شکل ۱۲ - الف) یک مکانیسم جفت رادیکالی شماتیک برای توصیف حس گیرایی مغناطیسی که احتمالاً توسط سینه سرخ‌های اروپایی و دیگر گونه‌ها به کار برده می‌شود. تصور می‌رود که این مکانیسم در درون کریپتوکروم‌ها که پروتئین‌های مقیم شبکه هستند، رخ می‌دهد. سه گام اصلی در این مکانیسم وجود دارد. اول، انتقال الکترونی القاء شده با نور از یک ملکول شکل دهنده جفت رادیکالی (برای مثال، در یک کریپتوکروم موجود در شکبیه یک پرنده) به یک ملکول گیرنده، تولید یک جفت رادیکالی می‌کند. ب و ج) دوم، حالات اسپین - الکترونی تک‌تایی (S) سه‌گانه ( $T$ ) به یکدیگر به لحاظ داشتن جفت‌سازی بیرونی و درونی، تبادل‌پذیر می‌شوند. ج) جفت‌های رادیکالی تک‌تایی و سه‌تایی به محصولات تک‌تایی و سه‌تایی، به ترتیب، ترکیب می‌گردند که از لحاظ زیست‌شناسی قابل شناسایی هستند.

### دیدگاه کوانتومی به حس گیرایی مغناطیسی

اکنون که با آناتومی و جایگاه حس گیرایی مغناطیسی و فرایند ملکولی آن آشنا شدیم جا دارد که از زاویه دید کوانتومی به آن بنگریم. در موشکافی پدیده حس گیرایی مغناطیسی پرندگان به این موضوع بر می‌خوریم که چگونه میدان مغناطیسی ضعیف زمین می‌تواند انرژی کافی را برای تغییر پیامد یک واکنش شیمیایی فراهم آورده و بدین طریق یک پیام زیست‌شناسی را خلق کند که برای مثال به یک پرنده سینه سرخ بگوید که در چه جهتی بایستی پرواز کند. شیمیدان اکسفوردی، آقای پیتر هور<sup>۱</sup> یک همانندی جالب از این که چگونه این فرایند صورت می‌پذیرد، ارائه می‌دهد:

”تصور کنید که ما یک بلوک گرانیته با وزن یک کیلوگرم داریم و پرسش این است که آیا یک مگس می‌تواند آن را واژگون کند. حس عمومی بر پاسخ مسلماً خیر، حاکی می‌باشد ولی تصور کنید که من آن را بر یک لبه‌اش نگه داشته باشم. آشکارا، در چنین وضعیتی ثابت نخواهد بود و به سمت چپ یا راست، چنانچه به حال خود رها شود، می‌افتد. حال فرض کنید که در حالی که این بلوک به این طریق پس و پیش می‌رود، یک مگس در سمت راست‌اش بنشیند. با وجودی که انرژی وارد کرده توسط مگس ناچیز خواهد بود، اما برای این که بلوک به سمت راست تا چپ بیفتد می‌تواند کافی باشد.“

<sup>1</sup> Peter Hore

برداشت اخلاقی آن خواهد بود که انرژی‌های ناچیز می‌توانند اثرات چشمگیری داشته باشند چنانچه فقط سیستمی که آن‌ها بر آن عمل می‌کنند به شکل ظریفی در دو حالت پیامدی در توازن باشد. بدین سان، برای شناخت از اثر بسیار ضعیف میدان مغناطیسی زمین ما نیاز داریم که مترادف شیمیایی بلوک گرانیتهی را در حالت ظریف متوازن داشته باشیم که در چنین شرایطی، به شکل چشمگیری کوچک‌ترین اثر خارجی (مانند یک میدان مغناطیسی ضعیف) می‌تواند بر آن اثر گذارد. با این پیش‌زمینه، اکنون به واکنش سه‌تایی سریع کلوس شولتن باز می‌گردیم. می‌دانیم که پیوندهای الکترونیک میان اتم‌ها اغلب با اشتراک‌گذاری یک جفت الکترون شکل می‌گیرند. این جفت الکترون همیشه درهم‌تنیده بوده و تقریباً همیشه در حالت اسپین یک‌تایی هستند یعنی الکترون‌ها اسپین مخالف دارند. قابل توجه است که دو الکترون حتی پس از این که پیوند میان اتم‌های آن‌ها شکسته می‌شود به صورت درهم‌تنیده می‌توانند بر جای بمانند. اتم‌های جدا شده، که اکنون «رادیکال‌های آزاد» نامیده می‌شوند، می‌توانند از یکدیگر رانده شوند و این امکان برای اسپین یکی از الکترون‌ها به وجود می‌آید که وارونه شود به گونه‌ای که الکترون‌های درهم‌تنیده (الکترون در اتم‌های متفاوت) خود را در یک برهم‌نهی از هر دوی حالات یک‌تایی و سه‌تایی یافت می‌کنند مانند آن چه که در واکنش سه‌تایی سریع شولتن دیده می‌شود.

یک نمای مهم این برهم‌نهی کوانتومی این است که لزوماً نمی‌بایست

به شکل مساوی در توازن باشند: یعنی احتمالات یافت جفت درهم‌تنیده الکترون‌ها در حالت یک‌تایی یا سه‌تایی مساوی نمی‌باشند و از همه اساسی‌تر آن که توازن میان این دو احتمال به هر میدان مغناطیسی بیرونی حساس است. در واقع، زاویهٔ میدان مغناطیسی با توجه به جهت جفت جدا شده به شکل قوی‌ای بر احتمال یافت آن در یک حالت یک‌تایی یا سه‌تایی اثر می‌گذارد. جفت‌های رادیکال تمایل دارند که بسیار ناپایدار باشند و بدین گونه الکترون‌های آن‌ها اغلب ترکیب می‌گیرند تا فرآورده‌های واکنش شیمیایی را بسازند. اما ماهیت شیمیایی دقیق محصول آن گاه به توازن تک‌تایی - سه‌تایی با همهٔ حساسیت آن به میدان‌های مغناطیسی بستگی دارد. برای درک آن که چگونه کار می‌کند، ما می‌توانیم هنگامهٔ میانی رادیکال آزاد حالت واکنش را به شکل ظرافت‌مندانه‌ای برقرار کنیم که حتی یک میدان مغناطیسی ضعیف (که در اینجا نقش همان مگس را دارد) کمتر از ۱۰۰ میکروتسلا مانند میدان مغناطیسی زمینی کافی خواهد بود که بر مسیری که پرتاب سکهٔ حالت تک‌تایی - سه‌تایی برای تولید فرآورده‌های واکنش شیمیایی می‌افتد، اثر بگذارد.

این حداقل یک مکانیسمی است که به واسطهٔ آن میدان‌های مغناطیسی می‌توانند بر واکنش‌های شیمیایی اثر گذاشته و بدین وسیله همان گونه که شولتن ادعا نمود، یک قطب‌نمای مغناطیسی برای پرندگان فراهم شود. به صورت اساسی، کریپتوکروم به عنوان نوعی پروتئین

شناخته شده است که قادر است رادیکال‌های آزاد را در طی واکنشش با نور بسازد. این موضوع توسط شولتن و همکارانش برای ارائه کریپتوکروم به عنوان گیرنده زیرک قطب‌نمای شیمیایی پرندگان اخذ گردید. کار آن‌ها در سال ۲۰۰۰ به چاپ رسید و یکی از مقالات کلاسیک زیست‌شناسی کوانتومی شد. نویسنده اصلی آن مقاله ریتز بود که در این نقطه بر روی تز پی‌اچ‌دی خود با کلوس شولتن کار می‌کرد. مقاله سال ۲۰۰۰ در زیست‌شناسی کوانتومی از دو دلیل حائز اهمیت است. نخست آن که کریپتوکروم را به عنوان ملکول کاندید برای قطب‌نمای شیمیایی پیشنهاد داد و دوم آن که به زیبایی، گرچه به صورت گمانی، به جزئیات این که چگونه جهت‌یابی پرندگان در میدان مغناطیسی زمین بر دیدن پرنده اثر می‌گذارد، توصیف نمود.

بر اساس این توصیف، اولین گام جذب یک فوتون نور آبی توسط ملکول رنگدانه حساس به نور FAD است که در درون پروتئین کریپتوکروم سکنی گزیده است. انرژی این فوتون برای پرتاب یک الکترون از یکی از اتم‌های درون ملکول FAD استفاده می‌شود. در پشت خود یک خلاً الکترونی می‌گذارد. این می‌تواند با الکترون دیگر اهدایی از جفت درهم‌تنیده شده الکترون‌ها در یک آمینواسید به نام تریپتوفان که در درون پروتئین کریپتوکروم است، اهدا شود. اساساً، الکترون اهدایی می‌تواند به صورت درهم‌تنیده با جفتش بر جای بماند. این جفت الکترون‌های درهم‌تنیده آن گاه می‌تواند یک برهم‌نهی از حالات تک‌تایی -

سه‌تایی را شکل دهد که سیستم شیمیایی می‌باشد که کلوس شولتن دریافت نمود بسیار حساس به میدان مغناطیسی است. یک بار دیگر، توازن ظریف میان حالات تک‌تایی - سه‌تایی بسیار حساس به قدرت و زاویه میدان مغناطیسی زمین می‌باشد به گونه‌ای که مسیری که پرنده‌گان پرواز می‌کنند بر اساس ترکیب نهایی فرآورده‌های شیمیایی که توسط واکنش شیمیایی تولید می‌شوند، فرق می‌کند. به طریقی که تاکنون مکانیسم آن آشکار نشده است، این اختلاف (که به چه سویی بلوک گرانیتهی بغلند) یک پیامی تولید می‌کند که به مغز پرنده فرستاده می‌شود تا بگوید که در کجای نزدیک‌ترین قطب مغناطیسی قرار دارد.

این مکانیسم جفت رادیکال پیشنهادی توسط ریتز و شولتن، مسلماً بسیار زیبا و ظریف بود ولی آیا فرآیند توصیف شده عیناً بر مکانیک کوانتوم برای کارکردن اتکا دارد؟ ریتز برای کار کردن با ویلشکوها رفت تا تلاش کند تفاوت میان قطب‌نمای مغناطیسی معمولی را با قطب‌نمای شیمیایی بر پایه مکانیسم رادیکال آزادشان آشکار نماید. قطب‌نماها مسلماً با هر مغناطیسی منحرف می‌شوند: یک قطب‌نما را نزدیک به یک مغناطیس نگه دارید و قطب‌نما به قطب شمال مغناطیس تا زمین، میل می‌کند. یک میله مغناطیس استاندارد یک میدان مغناطیسی استاتیک تولید می‌کند که به معنای آن است با زمان تغییر نمی‌کند. اما این امکان وجود دارد تا یک میدان مغناطیسی نوسانی را برای مثال با چرخاندن یک میله مغناطیسی تولید کرد و اینجا است که جالب می‌شود. یک قطب‌نمای



معمولی هنوز ممکن است با میدان مغناطیسی نوسانی درهم گسیخته شود اما فقط اگر که نوسانات برای سوزن قطب‌نما به اندازه کافی جهت ردیابی آهسته باشند. اگر نوساناتی که انجام می‌شوند بسیار سریع باشند یعنی صدها بار در ثانیه، آن گاه سوزن قطب‌نما نمی‌تواند آن‌ها را دیگر دنبال نماید و اثر آن‌ها به صورت میانگین به صفر میل می‌کند. بنابراین یک قطب‌نمای معمولی ممکن است توسط میدان‌های مغناطیسی نوسان کننده با فرکانس‌های پایین واکنش نشان دهد ولی با فرکانس‌های بالا خیر.

یک قطب‌نمای شیمیایی پاسخ بسیار متفاوتی دارد. قطب‌نمای شیمیایی همان گونه که ارائه گردید به جفت رادیکال‌ها در یک برهم‌نهی حالات یک‌تایی و سه‌تایی بستگی دارد. از آنجا که دو حالت در انرژی‌هایشان تفاوت دارند و انرژی به فرکانس ارتباط دارد، سامانه با یک فرکانس همبستگی دارد. با در نظر گرفتن انرژی‌های درگیر، انتظار می‌رود در یک محدوده میلیون‌ها نوسان در ثانیه باشد. یک شیوه کلاسیک تفکر پیرامون آن چه که در اینجا رخ می‌دهد شاید ساده‌تر باشد این گونه تصور شود که (گرچه کاملاً درست نیست) جفت درهم‌تنیده الکترون‌ها در میان حالات یک‌تایی و سه‌تایی، میلیون‌ها بار در ثانیه در حال عوض کردن باشد. در این حالت، سامانه می‌تواند با یک میدان مغناطیسی در حال نوسان با فرآیند رزونانس برهم‌کنش نشان دهد ولی فقط اگر که میدان با همان فرکانس جفت رادیکال نوسان کند: چنانچه از همانندی موسیقیایی

استفاده شود باید گفت که فقط اگر آن‌ها در حالت «همنوايي<sup>۱</sup>» باشند، رزونانس آن گاه انرژی را به سامانه پمپاژ خواهد کرد و توازن بحرانی میان حالات یک‌تایی و سه‌تایی که قطب‌نمای شیمیایی ضرورتاً به آن بستگی دارد را تغییر خواهد داد. بنابراین، برعکس یک قطب‌نمای مغناطیسی، یک قطب‌نمای جفت رادیکال با میدان مغناطیسی که در فرکانس‌های خیلی بالا نوسان می‌کند، واکنش نشان خواهد داد.

گروه ریتز - ویلشکو آزمایشی برای آزمون این پیش‌بینی بسیار روشن از تئوری جفت رادیکال، با استفاده از پرندۀ سینه سرخ اروپایی، ترتیب دادند. آیا قطب‌نمای این پرنده، به میدان‌های مغناطیسی با نوساناتی پایین یا بالا، حساس می‌باشد؟ آن‌ها تا پاییز منتظر ماندند یعنی هنگامی که این پرندگان برای مهاجرت به جنوب، بی‌تابی می‌کنند و آن گاه آن‌ها را در داخل محفظه‌های قیفی تحقیقاتی املن<sup>۲</sup> قرار دادند. میدان‌های نوسانی را از جهات گوناگون در فرکانس‌های متنوع برقرار کردند و منتظر ماندند تا ببینند آیا میدان‌ها می‌توانند بر توانایی طبیعی پرندگان در جهت‌یابی‌شان اختلال ایجاد کنند. نتایج شگفت‌آور بود: یک میدان مغناطیسی با ۱/۳ مگاهرتز (یعنی نوسان کردن ۱/۳ میلیون بار در هر ثانیه) هم‌نوا گردید، هزاران بار ضعیف‌تر از حتی میدان مغناطیسی زمین و با این وجود توانست در توانایی پرندگان در جهت‌یابی‌شان، اختلال ایجاد کند.

اما فزونی یا کاهش فرکانس میدان آن را کمتر مؤثر نمود. از این رو،

<sup>1</sup> In tune

<sup>2</sup> Emlen

میدان مغناطیسی به نظر می‌آید که با چیزی که در فرکانس‌های خیلی بالا در قطب‌نمای پرندگان در ارتعاش است، رزونانس می‌یابد: به روشنی این یک قطب‌نمای بر پایه مغناطیس معمولی نبود بلکه چیزی است که با یک جفت رادیکال درهم‌تنیده در حالات برهم‌نهی یک‌تایی و سه‌تایی منطبق است. این نتیجه دسیسه‌وار نیز نشان می‌دهد که چنانچه وجود داشته باشد، جفت درهم‌تنیده می‌بایست بتواند در هنگام رویارویی با ناهم‌دوسی<sup>۱</sup> برای حداقل یک میکروثانیه (یک میلیونوم ثانیه) بقا داشته باشد زیرا در غیر این صورت، زمان حیاتش برای تجربه بالا و پایین آمدن‌های میدان مغناطیسی نوسانی به کار برده شده کوتاه خواهد بود.

هنوز منظره‌هایی از سامانه وجود دارند که رمزآمیز مانده‌اند؛ برای مثال، چرا قطب‌نمای سینه سرخ می‌بایست این گونه به میدان مغناطیسی در حال نوسان حساسیت بالا داشته باشد؛ و چگونه رادیکال‌های آزاد می‌توانند برای زمان کافی طولانی در هم تنیده بمانند تا یک تفاوت زیست‌شناسی خلق نمایند؟ در سال ۲۰۱۱، در مقاله‌ای از آزمایشگاهی در آکسفورد، محاسبات تئوریک کوانتومی از قطب‌نمای جفت رادیکال پیشنهادی عرضه نمود و نشان داد که برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی می‌بایست برای حداقل ده‌ها میکروثانیه برقرار باشد که به شکل عظیمی از زمان‌های به دست آمده در بسیاری از سامانه‌های قابل مقایسه ملکولی دست‌ساز، پیشی می‌گیرد و احتمالاً به اندازه کافی طولانی است که به سینه سرخ

---

<sup>1</sup> Decoherence

بگوید چه مسیری نیاز است که پرواز کند. این مطالعات چشمگیر موجب انفجاری از علاقه در حس‌گیری مغناطیسی گردید که هم‌اکنون در گستره‌ای از گونه‌ها شامل گونه‌های پرندگان، خرچنگ‌های دراز‌خاردار، سفره‌ماهیان، کوسه‌ها، وال‌های باله‌دار، دلفین‌ها، زنبورها و حتی میکروب‌ها نشان داده شده است. در اکثر موارد، مکانیسم‌های موجود هنوز مورد کاوش قرار نگرفته‌اند ولی حس‌گیری مغناطیسی وابسته با کریپتوکروم در گستره‌ای از موجودات از سینه‌سرخ دلیر تا جوجه‌ها و مگس‌های میوه و چندین ارگانیزم دیگر شامل گیاهان بیان شده‌اند.

### چشم‌انداز

بیش از ۵۰ سال که از کشف قطب‌نمای مغناطیسی پرندگان گذشته است، ما در نهایت یک ایده منسجم پیرامون مکانیسم اولیه منجر به شناسایی جهت‌یابی به واسطه میدان مغناطیسی در پرندگان داریم: یک فرایند جفت‌رادیکال که کریپتوکروم نقش اساسی در این فرایند ایفا می‌کند. هنوز یافته‌های ضد و نقیضی وجود دارند که می‌بایست حل شوند و تعدادی پرسش‌های باز که باید پاسخ داده شوند. یکی از مهم‌ترین پرسش‌ها پیرامون مکانیسم‌هایی متمرکز است که چگونه اطلاعات به دست آمده از جفت‌رادیکال به شکل پیام زیست‌شناسی انتقال می‌یابد. کریپتوکروم در سگمان‌های بیرونی سلول‌های مخروطی (سلولی که برای

دید رنگی مهم است) یافت می‌شود. آیا اطلاعات دیداری از اپسین<sup>۱</sup> و اطلاعات مسیرهای مغناطیسی از کریپتوکروم به شکل جداگانه یا با یکدیگر، انتقال می‌یابند؟

از آنجا که سلول‌های مخروطی تنها راه شناخته شده انتقال اطلاعات هستند ممکن است چنین برداشت شود که انتقال اطلاعات به شیوه دوم یعنی با یکدیگر انجام می‌شود. اما با این وجود، این به معنای آن است که دو دسته اطلاعات، به شیوه‌ای می‌بایست جدا از هم گردند چه در خود چشم‌ها صورت گیرد یا بعدتر در مراکز بالاتر در مغز این انتقال انجام پذیرد. فرضیاتی درباره این احتمالات وجود دارند ولی این به بسیاری از ملاحظات و آزمایشات نیاز دارد تا ما به یک درک کامل از این که چگونه پرندگان جهت میدان مغناطیسی زمین را حس می‌کنند، نائل شویم.

---

<sup>1</sup> Opsin



فصل ششم

بویایی





بویایی قدیمی‌ترین و بنیادی‌ترین حس شیمیایی است که به واسطه آن اشکال حیات، محیط اطراف خود را ترجمه می‌کنند. این حس همیشه علوم را مجذوب خود کرده است و تعداد فراوانی از نظریه‌های منحصر به فرد پیرامون سازوکار این فرایند ارائه شده‌اند. ریچارد آکسل<sup>۱</sup> و لیندا بی‌باک<sup>۲</sup>، مقاله برجسته‌ای به چاپ رساندند و کشف و کلونینگ کد ژنتیکی چند گیرنده بویایی پستانداران را در یک خانواده بزرگتر ژنی گزارش کردند. به زودی پس از آن، اولین گیرنده‌های بویایی حشرات به شکل مستقل توسط سه تیم پژوهشی کشف شدند که همگی آن‌ها در مگس *Drosophila melanogaster* قرار داشتند.

بویایی در مهره‌داران و حشرات از لحاظ گونه‌های گیرنده‌های مورد استفاده، با یکدیگر تفاوت دارند؛ در انسان بویایی از طریق گیرنده‌های جفت یافته با پروتئین G<sup>۳</sup> انجام می‌شود و این در حالی است که بویایی به صورت اولیه در حشرات از طریق گیرنده‌های بویایی حشره‌ای<sup>۴</sup> صورت می‌گیرد. ماهی‌ها دارای یک حس خوب بویایی هستند و به آن‌ها کمک می‌کند تا خانه خود را هنگامی که جریان‌های اقیانوس آن‌ها را می‌رانند،

---

<sup>1</sup> Richard Axel

<sup>2</sup> Linda B. Buck

<sup>3</sup> G-Protein coupled receptors

<sup>4</sup> Insect olfactory receptors

پیدا کنند. در سال ۲۰۰۷، گابریله گرلاک<sup>۱</sup> آزمایشی را طراحی کرد تا تئوری موجود در پشت این که چگونه «لارو ماهی تشکیلات مرجانی» مکان زیست خود را شناسایی می‌کند، مورد بررسی قرار گیرد. او دو ناودان از آب دریا را جمع‌آوری کرد یکی از تشکیلات مرجانی‌ای که این لاروها زاده شده بودند و دیگری از مکانی دورتر از تشکیلات مرجانی. آن گاه او لاروها را در بخش پایینی دو ناودان قرار داد و مشاهده نمود که لارو ماهی تشکیلات مرجانی می‌تواند این دو ناودان را مورد شناسایی قرار داده و ناودانی را بر می‌گزیند که حاوی آب دریایی است که در آنجا زاده شده بودند و این توانایی به حس بویایی آن‌ها نسبت داده شد.

در همین راستا، دانیلا دیکسون<sup>۲</sup> تأیید نمود که دلقک ماهی<sup>۳</sup> می‌تواند تفاوت آب گردآوری شده از تشکیلات مرجانی‌ای که مکان زیستش است را از آب فراساحل، تشخیص دهد. میکائیل آودلند<sup>۴</sup> آزمایشی مشابه گابریله گرلاک طراحی نمود تا توانایی دلقک ماهی در شناسایی گونه‌های خودشان را درک نماید. این مورد تأیید قرار گرفت که دلقک ماهی می‌توانست گونه‌های میزبان خودشان را از دیگر گونه‌های غیرکلنی تشخیص دهد. این آزمایشات همراه با دیگر آزمایشات اولیه و تئوری‌ها، این که ماهی‌ها یک رایحه را برای شناسایی گونه‌ها و مکان‌های زیست خودشان دنبال می‌کنند، مورد تأیید قرار داد.

---

<sup>1</sup> Gabriele Gerlach

<sup>2</sup> Daniella Dixon

<sup>3</sup> Anemonefish

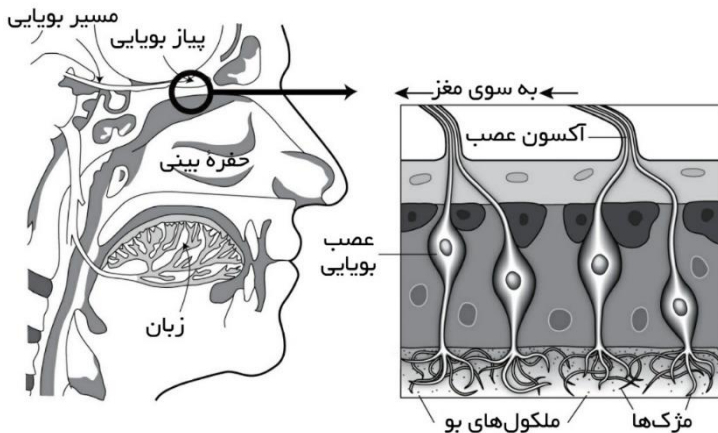
<sup>4</sup> Michael Arvedlund

کوسه‌ها به همین طریق توانایی حس بویایی شگرفی دارند. آن‌ها می‌توانند یک قطره خون را از بیش از یک کیلومتری با بوی خود مورد شناسایی قرار دهند. در واقع، دو سوم از مغز آن‌ها به حس بویایی اختصاص یافته است. گونه انسان گفته می‌شود که حس بویایی بسیار فقیرتری از خویشاوندان خود داشته باشد. چندین میلیون سال پیش هنگامی که هومو اکتوس<sup>۱</sup> بدن خود را از کف جنگل بلند کرد تا سر راست راه برود او نیز بینی‌اش را از زمین بلند کرد و بدین سان حس بینایی و شنوایی‌اش بر بویایی برای کسب اطلاعات برتری یافتند. از این رو، پوزه انسان کوتاه‌تر و سوراخ‌های بینی‌اش تنگ‌تر شدند و جهش‌ها در اکثر یک هزار ژن دودمانی پستانداران که گیرنده‌های بویایی را کد می‌کنند، انباشته شدند. خود عضو بینی در بویایی نقش مستقیمی ندارد و فقط هوا را به سوی اپیتلیوم بویایی که در پشت بینی قرار دارد، هدایت می‌نماید. این بافت کوچک بوده و فقط سه سانتی‌متر مربع (حدود اندازه یک تمبر پستی) در انسان اندازه دارد و با غدد ترشح‌کننده موکوس و میلیون‌ها نرون بویایی پوشانده شده است. دو گونه سلول عصبی برای ایجاد حس بویایی وجود دارند؛ همان‌گونه که سلول‌های مخروطی و میله‌ای بینایی در ایجاد حس بینایی مشارکت می‌کنند. انتهای جلویی نرون بویایی مقداری همانند یک جاروب است با یک سر دارای شاخه‌های بسیار که غشاء سلولی به مژک‌های مو مانند بسیاری تا زده شده است. این جاروب با قلم مو

---

<sup>1</sup> Homo erectus

مژه‌های‌اش از لایه سلولی بیرون زده شده است و این جایی است که می‌تواند ملکول‌های بو دهنده گذری را به دام اندازد. انتهای پشتی سلول مانند دسته جاروب است و آکسون سلول یا عصب را شکل می‌دهد که از راه یک استخوان کوچک در پشت حفره بینی امتداد یافته تا به مغز وارد شود و در آنجا با منطقه‌ای به نام پیاز بویایی<sup>۱</sup> در ارتباط قرار می‌گیرد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: آناتومی بویایی

برای درک فرایند کلاسیک بویایی، تصور کنید که شما یک پرتقال را به تکه‌هایی می‌برید و با این کار خوشبویی تند آن آزاد گردیده و از راه بینی به اپی‌تلیوم بینی شما می‌رسد. ممکن است حتی با گذاشتن تکه‌ای از آن در دهان اجازه دهید که مواد معطر فرار آن، راه خود را از طریق

<sup>۱</sup> Olfactory bulb

پشت بینی<sup>۱</sup> به همان بافت دست‌یابی پیدا کنند. مانند همه رایحه‌های طبیعی، بوی پرتقال بسیار پیچیده بوده و از صدها ترکیب فرآر ساخته شده است که یکی از معطرترین آن‌ها لیمونین<sup>۲</sup> است که همان گونه که از نام آن بر می‌آید در میوه‌های خانوادهٔ مرکبات مانند لیموها و پرتقال‌ها فراوان است و مسئول خوشبویی تند و طعم آن‌ها می‌باشد. این مادهٔ شیمیایی به طبقهٔ ترکیبات شناخته شده تحت عنوان ترپین‌ها<sup>۳</sup> تعلق دارد که جزء بو دهندهٔ اسانس روغن‌های بسیاری از گیاهان و گل‌ها می‌باشد. لیمونین یک مایع فرآر است که به آهستگی در حرارت اتاق تبخیر می‌شود و تعدادی از ملکول‌های آن با جریان‌های هوا، در معرض بینی شما قرار می‌گیرند و با کشیدن نفس، این مادهٔ معطر با اپی‌تلیوم بینی که با تقریباً ده میلیون نرون بویایی پوشانده شده است، تماس می‌یابد. هنگامی که ملکول‌های لیمونین از قلم موهای اپی‌تلیوم بویایی گذر می‌کنند بعضی از آن‌ها توسط نرون‌های بویایی به دام می‌افتند. به دام افتاده شدن یک ملکول واحد لیمونین برای آغاز کردن باز شدن یک کانال کوچک در غشاء سلولی این نرون‌ها کافی است تا به یون‌های کلسیم با بار مثبت از بیرون به درون سلول اجازه دهد جریان یابند.

هنگامی که حدود سی‌وپنج ملکول لیمونین به دام افتاده باشند، جریان بعدی یون‌ها به درون سلول به مقدار جریان الکتریکی حدود یک

---

<sup>۱</sup> Retronasal

<sup>۲</sup> Limonene

<sup>۳</sup> Terpenes

پیکوآمپر<sup>۱</sup> در مجموع می‌رسد. این سطح از جریان مانند یک سوئیچ برای آغاز یک سیگنال الکتریکی به نام پتانسیل عمل کار می‌کند که در رسته سلول قلم مو مانند یعنی اکسونش، جاری می‌شود. این پیام تا پیام بویایی در مغز شما سیر می‌کند. پس از فرآوری عصبی، شما این «پیام از واقعیت مادی» را به صورت خوشبویی تند پرتقال تجربه می‌کنید. رویداد کلیدی در کل این فرایند مسلماً به دام‌اندازی ملکول بو دهنده توسط نرون بویایی است؛ ولی آن چگونه کار می‌کند؟ با همانندی با سلول‌های مخروطی و میله‌ای حساس به نور (که خود گونه‌ای از نرون‌ها می‌باشند)، انتظار می‌رود که حس بویایی نیز به همین منوال از طریق بعضی از گیرنده‌های بویایی قرار گرفته بر سطح، اعمال شود. این گیرنده‌ها، انواعی از پروتئین‌هایی هستند که از غشاء سلولی بیرون زده شده‌اند و می‌توانند به ملکول‌های بو دهنده گذری اتصال بیابند که به خانواده‌ای از پروتئین‌ها به نام گیرنده‌های جفت شده پروتئین G تعلق دارند و در شناسایی دیگر انواع پیام‌های شیمیایی مانند هورمون‌ها نیز درگیر هستند.

لیندا باک در شناسایی یک خانواده کاملاً جدید از ژن‌هایی که این گونه گیرنده را کد می‌کنند و فقط در نرون‌های گیرنده بویایی بیان می‌شوند، اقدام نمود. او کار را به آنجا کشاند تا نشان دهد که این ژن‌ها در واقع گیرنده‌های بو دهنده را کد می‌کنند. تجزیه و تحلیل بعدی نشان داد که ژنوم موش صحرائی<sup>۲</sup> حدود یک هزار از این گیرنده‌های

<sup>1</sup> Picoamp

<sup>2</sup> The rat's genome

به تازگی شناخته شده را کد می‌کند، به گونه‌ای که هر کدامیک با دیگری مقداری جزئی تفاوت داشته و احتمالاً هر کدام برای مورد شناسایی قرار دادن یک بو دهنده واحد کوک شده است. انسان تعداد مشابه‌ای ژن‌های گیرنده بویایی دارد ولی دو سوم از آن‌ها تحلیل رفته‌اند و به نام شبه ژن‌ها<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند گونه‌ای از فسیل ژنی بوده و جهش‌های بسیاری را انباشت نموده‌اند که دیگر کار نمی‌کنند.

اما چه سیصد یا یک هزار ژن گیرنده باشد، این هنوز از سیمای ده هزار رایحه گوناگون که انسان می‌تواند بشناسد بسیار فاصله دارد. کاملاً آشکار است که یک نقشه‌بندی یک به یک میان تیپ‌های گیرنده‌های بو دو تیپ از بوها وجود ندارد؛ پس چگونه پیام‌های دریافتی توسط گیرنده‌های بویایی به بوها تبدیل می‌شوند هنوز به صورت یک راز پابرجا مانده است. همچنین آشکار نیست که چگونه کار شناسایی تمام انواع ملکول‌های بو میان سلول‌های گوناگون به اشتراک گذاشته می‌شود.

ژنوم هر سلول مجموعه کامل ژن‌های گیرنده بویایی را دارد و بدین سان می‌تواند احتمالاً هر بویی را مورد شناسایی قرار دهد یا این که آیا تقسیم کار خاصی وجود دارد؟ برای پاسخ دادن به این پرسش‌ها، گروه پژوهشی دانشگاه کلمبیا آزمایش مبتکرانه‌تری را ترتیب داد. آن‌ها به صورت ژنتیکی، موش‌ها را به گونه‌ای تغییر دادند که همه نرون‌های بویایی که یک گیرنده بوی خاصی را بیان می‌کردند، به رنگ آبی باشند. اگر همه

---

<sup>1</sup> Pseudogens

سلول‌ها به رنگ آبی رنگ‌آمیزی می‌شدند این بیانگر آن بود که همه آن‌ها این گیرنده را بیان می‌کردند. پاسخ در هنگامی که گروه، سلول‌های بویایی موش‌های مهندسی شده را بررسی کردند، روشن شد: تقریباً یک سلول از هر هزار سلول به رنگ آبی بود. به نظر می‌آمد که هر نرون بویایی یک حالت عام ندارد و به صورت تخصصی کار انجام می‌دهد.

زمان زیادی طول نکشید که لیندا باک از کلمبیا برای برقراری آزمایشگاهش در هاروارد جابه‌جا شد و دو گروه هم راستا به کار کردن ادامه دادند و بسیاری از رموز باقی مانده بویایی را موشکافی کردند. آن‌ها تکنیک‌هایی را برای جداسازی تک نرون‌های بویایی تدبیر کردند و به صورت مستقیم حساسیت آن‌ها را به معطرهای خاصی مانند لیمونین بررسی نمودند. آن‌ها کشف کردند که هر ماده معطر شیمیایی نه تنها یکی بلکه چندین نرون را فعال می‌سازد و نیز این که نرون‌های واحد به چندین معطر گوناگون پاسخ می‌دهند. این یافته‌ها به نظر می‌آمد که چیستان‌های این که چگونه فقط سیصد گیرنده بویایی می‌توانند ده هزار بوی گوناگون را مورد شناسایی قرار دهند، هدف قرار داده‌اند؛ مانند آن که فقط ۲۶ حرف را می‌توان در شیوه‌های گوناگون برای نوشتن هر واژه این کتاب ترکیب کرد و به همین منوال نیز چند صد گیرنده بویایی را می‌توان در تریلیون‌ها ترکیبات گوناگون فعال نمود تا از پس گستره رایحه‌ها برآیند. ریچارد آکسل و لیندا باک در سال ۲۰۰۴ برای اکتشافات پیشگامانه‌شان در گیرنده‌های معطر و سازماندهی سامانه بویایی، جایزه



نوبل را دریافت کردند. در گستره شناخت فرایند بویایی آن چه که بیشترین علاقه را بر می‌انگیزد پیرامون عملکرد به دام‌اندازی یک معطر توسط نرون عصبی می‌باشد. آیا این فرایند شامل پدیده کوانتومی است؟ برای پرداختن به این پرسش به تئوری‌های مطرح در زمینه بویایی نگاهی می‌افکنیم.

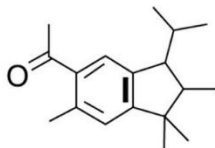
### تئوری‌های بویایی

#### الف / مدل «قفل و کلید»

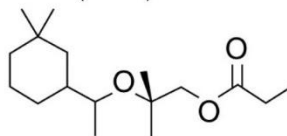
یک پرسش کنجکاوانه که ممکن است پرسیده شود آن است که چگونه هر گیرنده مجموعه معطر خود را می‌شناسد و به آن‌ها اتصال می‌یابد؟ در سال ۱۹۶۳ آمو<sup>۱</sup> نخستین بار این را پیشنهاد داد که پاسخ به رایحه توسط سازوکار یک «کلید و قفل» کار می‌کند. این مدل توضیح می‌دهد که اشکال ملکول‌های گیرنده و معطرها، مکمل یکدیگر هستند و به این صورت معطرها به گیرنده بویایی که شکل خود را دارد، محکم می‌شوند؛ درست مانند یک کلید که در قفل جا می‌افتد. این ایده از سازوکار ملکولی رفتار آنزیمی حاصل آمد. از آنجا که معطرها به اشکال گوناگون می‌آیند، یک فرض منطقی آن است که ملکول‌های یک شکل می‌بایست همسان بوییده شوند و معطرهایی که اشکال گوناگونی دارند نیز بوهای متمایز آشکاری داشته باشند.

<sup>1</sup> Amoore

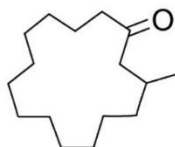
ب (مشک)



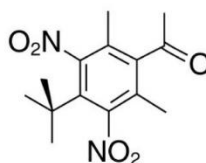
الف (مشک)



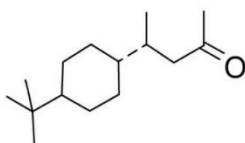
د (مشک)



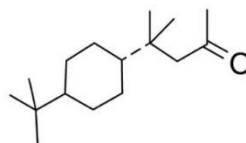
ج (مشک)



و (بوی ادرار)



هـ (بی‌بو)



شکل ۱۴: ملکول‌های (الف) تا (د) دارای اشکال گوناگونی هستند ولی یکسان بوییده می‌شوند. ملکول‌های (هـ) و (و) تقریباً اشکال یکسانی دارند ولی بوهای بسیار متفاوتی دارند.

مطالعه ساختار ملکول‌های گوناگون نشان داده است که این فرضیه درست نمی‌باشد. قابل توجه است که نشان داده شده است ملکول‌هایی با اشکال مختلف وجود دارند که هنوز مشابه یکدیگر بوییده می‌شوند و ترکیبات با ساختارهای مشابه هنوز به صورت گوناگون بوییده می‌شوند.

معطرهایی مانند فروسین<sup>۱</sup> و نیکلوسین<sup>۲</sup> ساختار مشابه دارند و بوهای متفاوتی نشان می‌دهند. نیکلوسین یک بوی سیکلو آلکان<sup>۳</sup> دارد و این در حالی است که فروسین کافوری بوییده می‌شود. همچنین سیانید هیدروژن و بنز آلدئید<sup>۴</sup> ساختارهای گوناگونی دارند ولی بو (بادام تلخ) یکسانی از خود نشان می‌دهند. شکل ۱۴ مدل فضایی این معطرها را نشان می‌دهد. مثال‌های دیگر در تصویر نشان داده شده است. ترکیبات (الف) - (د) ساختارهای مشابه دارند ولی یکسان بوییده (بوی مشک) می‌شوند و این در حالی است که (و) و (ه) اشکالی یکسانی دارند ولی هنوز بوهای متمایزی دارا می‌باشند. ترکیب (ه) بدون بو می‌باشد و این در حالی است که ترکیب (و) بوی ادرار می‌دهد. این یافته‌ها در تئوری «کلید و قفل» ضربه وارد می‌آورند.

### ب/ تئوری ارتعاشی

در سال ۱۹۳۸، مالکوم دیسون<sup>۵</sup> پیشنهاد داد که بینی، فرکانس ارتعاشی یک ماده معطر را و نه ضرورتاً شکل آن، مورد شناسایی قرار می‌دهد. این پیشنهاد، دانش بویایی را از تئوری پذیرفته شده «کلید و قفل» سنتی متحول نمود و تئوری ارتعاشی ملکولی را عرضه کرد. دیسون

<sup>1</sup> Ferrocene

<sup>2</sup> Nickelocene

<sup>3</sup> Cycloalkene

<sup>4</sup> Benzaldehyde

<sup>5</sup> Malcolm Dyson

مشاهده کرد که مواد شیمیایی با بوی یکسان، معمولاً ترکیباتی هستند که گروه‌های شیمیایی یکسانی (مانند  $C=O$ ) دارند. این گروه‌های شیمیایی تا حد زیادی ویژگی‌های این ملکول‌ها را تعریف می‌کنند که بویایی نیز یکی از این ویژگی‌ها است. افزون بر این، گروه‌های شیمیایی دیگری (مانند گروه تیول  $SH$ ) وجود دارند که بوی یک معطر را بدون در نظر گرفتن شکل آن تعیین می‌نمایند. دیسون آن را در بعضی از گروه‌های شیمیایی که سولفیدریل ( $SH$ ) دارند، مشاهده کرد که یک اتم هیدروژن به اتم سولفور دارند. این موجب ایجاد بوی تخم مرغ گندیده می‌شود. او فرکانس‌های ارتعاشی ترکیبات را با اصل رامان<sup>۱</sup> پیرامون پراکنش نور، اندازه‌گیری کرد.

نور هنگامی که به شکل کشسان<sup>۲</sup> بر سطح بر می‌خورد از یک اتم کمانه می‌کند، درست مانند یک توپ که به یک سطح سخت برخورد می‌کند و از آن کمانه می‌کند. این بدون از دست دادن انرژی رخ می‌دهد و به معنای آن است که انرژی محفوظ می‌ماند. چاندراسخارا ونکتارامان<sup>۳</sup> در سال ۱۹۳۰ جایزه نوبل را برای کاوش در گستره پراکنش نور دریافت کرد. او متوجه شد که طول موج بعضی از نور بازتابی هنگامی که از یک ماده شفاف عبور می‌کند، تغییر می‌یابد. این پدیده به نام او پراکنش رامان<sup>۴</sup> نامیده شد. در اصل این به معنای این است که نور نیز می‌تواند به صورت

<sup>1</sup> Raman principle

<sup>2</sup> Elastically

<sup>3</sup> Chandrasekhara Venkata Raman

<sup>4</sup> Raman Scattering

غیرکشسان<sup>۱</sup> پراکنش بیابد و بدین طریق مقداری از انرژی را به پیوندهای ملکولی بدهد که به آن برخورد می‌کنند. این کاهش انرژی موجب کاهش در فرکانس فوتون می‌شود. مقدار انرژی از دست رفته، طیف رامان را می‌دهد. این طیف یک نمای ویژه که اثر انگشت مربوط به پیوندهای شیمیایی خاص را دارد، ارائه می‌دهد.

بر همین پایه، تئوری دیسون شکل یافت که بینی نیز می‌تواند واقعاً به صورت یک طیف‌سنجی دیده شود که فرکانس‌های اثر انگشت ارتعاشی پیوندهای شیمیایی مختلف را مورد شناسایی قرار می‌دهد. او متوجه شد که همبستگی قوی‌ای میان بعضی از فرکانس‌های طیف‌ها رامان با یک بوی خاص وجود دارد. تمام ترکیباتی که یک پیوند سولفور - هیدروژنی دارند، مشخص گردید که یک فرکانس رامان در همان محدوده دارند. اما کاربرد تئوری دیسون برای توصیف بویایی با دشواری‌هایی توأم است. یکی از آنها، شیوه‌ای است که بینی همانند طیف‌سنجی عمل می‌نماید تا بو را به شکل نور پراکنش یافته گردآوری نماید. دشواری دیگر، درگیر شدن نور در فرایند است؛ یعنی هنگامی که مشاهده گردید ملکول‌های کایرال<sup>۲</sup> با داشتن ساختار شیمیایی یکسان دارای طیف رامان همانند هستند و می‌توانند به سادگی از طریق بینی مورد شناسایی قرار گیرند.

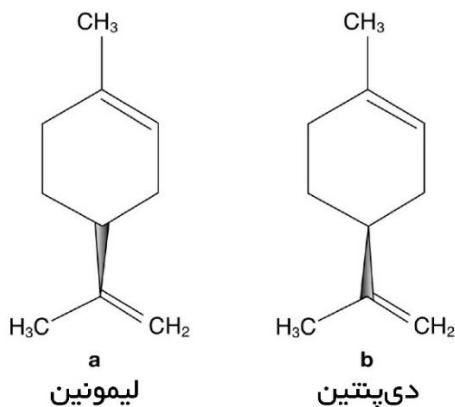
این نشان می‌دهد که ملکول‌ها حتی هنگامی که ساختار شیمیایی یکسان و طیف‌های رامان همانندی دارند می‌توانند بوهای مختلفی داشته

---

<sup>1</sup> Inelastically

<sup>2</sup> Chiral

باشند. یک مثال عمومی آن لیمونین است که ملکول‌های راست‌گرد دارد و ملکول چپ‌گرد (تصویر آینه‌ای) آن دای‌پنتین<sup>۱</sup> است (شکل ۱۵). هر دوی آن‌ها پیوند ملکولی یکسانی دارند و بدین سان طیف رامان همانندی را از خود نشان می‌دهند ولی بوهای متفاوتی دارند.



شکل ۱۵: لیمونین (الف) و دی‌پنتین (ب) ملکول‌های آینه‌ای یکدیگر هستند که بوهای مختلفی دارند.

### ج/ تئوری «شکل ضعیف» یا مدل آدوتپ

دلیل آن که چرا ملکول‌ها با اشکال گوناگون توسط گیرنده‌های بویایی با بوی یکسان مورد شناسایی قرار می‌گیرند منجر به ارائه تئوری «شکل ضعیف»<sup>۲</sup> یا «آدوتپ»<sup>۳</sup> توسط کنساکوموری<sup>۴</sup> و گوردن شفرده<sup>۵</sup> در

<sup>1</sup> Dipentene

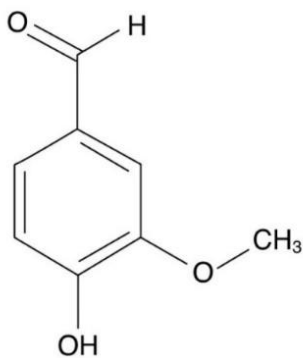
<sup>2</sup> Weak shape

<sup>3</sup> Odotope theory

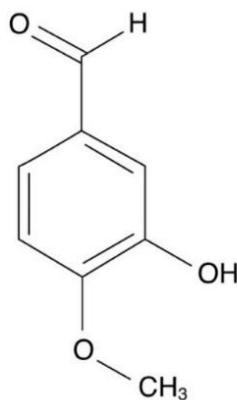
<sup>4</sup> Kensaku Mori

<sup>5</sup> Kensaku Mori

سال ۱۹۹۴ شد. این تئوری بر این بحث دارد که می‌بایست شناخت شکل ملکولی تا حدی در شناسایی بو وجود داشته باشد. بر پایهٔ این تئوری، اتصال ملکول به گیرندهٔ بویایی بر اساس شکل زیرساختار (مانند گروه شیمیایی ترکیبی) است تا شکل کامل ملکول. این تئوری از ارائه توضیح پیرامون آن که چرا ملکول‌های با گروه شیمیایی ترکیبی یکسان ولی ترتیب یافته با الگوی مختلف، بوهای گوناگون دارند، ناتوان می‌باشد. برای مثال، وانیلین<sup>۱</sup> و ایزووانیلین<sup>۲</sup> دارای گروه‌های شیمیایی یکسان ولی با الگوی متفاوت هستند ولی بوهای گوناگونی دارند (شکل ۱۶). تئوری ارتعاشی نیز هنوز نتوانسته است بر این مشکل چیرگی یابد.



وانیلین



ایزووانیلین

شکل ۱۶: ملکول‌هایی با بخش‌های پایه‌ای یکسان مانند وانیلین و ایزووانیلین که در این شکل نشان داده شده‌اند می‌توانند بوهای بسیار متفاوتی داشته باشند.

<sup>1</sup> Vanillin

<sup>2</sup> Isovanillin

## د/ تئوری طیف‌سنجی تونل‌زنی الکترون غیرکشسان تورین

۱/ بوئیدن با یک بینی کوانتومی

به شکل مستقیم، شناخت از طریق شکل برای درک کردن ساده می‌باشد. آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها، گیرنده‌های هورمونی و دیگر ملکول‌های زیستی، به شکل اولیه، از طریق ترتیب یافتگی هندسی اتم‌ها و ملکول‌هایشان شناخته می‌شوند و بدین سان شگفت‌آور نیست که تئوری شکل (کلید و قفل) بویایی مورد حمایت بسیاری از زیست‌شناسیست‌ها بوده است که از میان آن‌ها باید به برندگان جایزه نوبل، ریچارد آکسل و لیندا باک برای کارهای ارزشمندشان بر روی گیرنده بویایی نام برد.

با وجودی که ارتباط بر پایه ارتعاش حداقل برای دو حس بینایی و شنوایی ما بنیادی می‌باشد کمتر ما با آن آشنایی داریم، فیزیک آن که چگونه چشم فرکانس ارتعاش نور و گوش فرکانس ارتعاشی هوا را ثبت می‌کند به خوبی شناخته شده می‌باشند اما این که چگونه بینی ممکن است فرکانس یک ارتعاش ملکولی را مورد شناسایی قرار دهد تا همین اخیراً ناشناخته بوده است. لوکا تورین<sup>۱</sup> که در سال ۱۹۵۳ در لبنان زاده شده بود و در کالج دانشگاهی لندن فیزیولوژی تحصیل کرده بود مانند دیسون بر این باور قرار گرفت که همبستگی‌هایی میان طیف‌های ارتعاشی و رایحه نمی‌توانند فقط هم‌رخدادی باشند. او با بحث دیسون که گیرنده‌های بویایی می‌بایست به طریقی ارتعاشات ملکولی را مورد شناسایی قرار دهند،

<sup>۱</sup> Luca Turin



ترغیب گردید ولی بر عکس دیسون، او یک سازوکار ملکولی منطقی نظری را پیشنهاد داد که به واسطه آن ملکولی‌های زیستی می‌توانند ارتعاشات پیوندهای شیمیایی را از طریق تونل‌زنی کوانتومی الکترون‌ها، مورد شناسایی قرار دهند.

ما پیش از این در مورد تونل‌زنی الکترونی صحبت کردیم. تونل‌زنی کوانتومی نمای ویژه مکانیک است که از توانایی ذراتی همچون الکترون‌ها یا پروتون‌ها بر می‌خیزد که همچون موج‌های احتمالاتی رفتار نموده و قادرند از موانعی که از هر راه کلاسیکی قابل گذر نیستند، تراوش کنند. در بخش آرزیم‌ها، نقش اساسی آن را در واکنش‌های بسیاری از آرزیم‌ها نشان دادیم. در حالی که تورین از راز رایحه‌ها سردرگم بود به مقاله‌ای رسید که یک تکنیک شیمی تجزیه‌ای جدید به نام «طیف‌سنجی تونل‌زنی الکترون غیرکشسان»<sup>۱</sup> (IETS) توصیف می‌کرد. در این تکنیک، دو صفحه فلزی بسیار نزدیک یکدیگر قرار داده می‌شوند که توسط یک شکاف بسیار کوچکی جدا شده‌اند. اگر یک ولتاژ میان دو صفحه برقرار گردد، الکترون‌ها بر روی یک صفحه گرد می‌آیند و آن را به صورت منفی باردار می‌کنند (دهنده) و از سمت صفحه دیگری که به صورت مثبت باردار شده است، دریافت می‌کند (گیرنده). از دیدگاه کلاسیک، الکترون‌ها فاقد انرژی برای پرش از میان شکاف عایقی میان صفحات می‌باشند ولی الکترون‌ها اشیاء کوانتومی هستند و اگر شکاف به اندازه کافی کوچک باشد، آن‌ها می‌توانند

<sup>1</sup> Inelastic electron tunneling spectroscopy

از میان آن‌ها از دهنده به گیرنده، تونل‌زنی کوانتومی انجام دهند. این فرایند تونل‌زنی کشسان<sup>۱</sup> نامیده می‌شود زیرا الکترون‌ها در طی این فرایند نه انرژی به دست می‌آورند و نه از دست می‌دهند.

یک شرط اساسی اضافی نیز وجود دارد: یک الکترون می‌تواند به صورت کشسان از یک مکان دهنده به مکان گیرنده گذر کند اگر که یک جاخالی برای آن در همان سطح دقیق انرژی در دسترس باشد. اگر نزدیک‌ترین شکاف در سطح انرژی پایین‌تر در گیرنده وجود داشته باشد در آن صورت الکترون مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد تا پرش انجام دهد. این فرایند به نام تونل‌زنی غیرکشسان<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. انرژی تخلیه شده نیاز دارد که به یک جایی برود در غیر این صورت الکترون نمی‌تواند تونل‌زنی کند. چنانچه یک ماده شیمیایی در شکاف میان صفحات گذاشته شود آن گاه یک الکترون می‌تواند مادامی که قادر است انرژی اضافی خود را به ماده شیمیایی اهدا کند، تونل‌زنی کند و این کار را مادامی که ملکول‌های موجود در شکاف، پیوندهایی داشته باشند که بتوانند کاملاً در فرکانس درست مربوط به انرژی تخلیه شده ارتعاش کنند، انجام می‌گیرد. با گذر نمودن با انرژی اضافه‌شان به این شیوه، این الکترون‌های تونل‌زنده غیرکشسان به صفحه گیرنده، با مقدار کمی پایین‌تر انرژی، می‌رسند؛ بنابراین با تجزیه و تحلیل اختلاف انرژی میان الکترون‌های ترک‌کننده از مکان دهنده و رسیدن به مکان گیرنده،

<sup>1</sup> Elastic tunneling

<sup>2</sup> Inelastic tunnelling

طیف‌سنجی تونل‌زنی الکترونی غیرکشسان، ماهیت پیوندهای ملکولی یک ماده شیمیایی را مورد کاوش قرار می‌دهد.

در IETS، الکترون فقط چنانچه ماده شیمیایی میان دو صفحه یک پیوند کوک شده کاملاً در فرکانس درست برای آن جهت پرش داشته باشد، از مکان دهنده جدا می‌شود. در نتیجه این عمل، الکترون تونل‌زننده، انرژی را با نواختن یک پیوند ملکولی در طی سفر کوانتومی‌اش از میان صفحات از دست می‌دهد. تورین تصور نمود که گیرنده‌های بویایی به شیوه مشابه ولی با یک ملکول واحد (گیرنده بویایی) که جای صفحات IETS و شکاف را می‌گیرد، کار می‌کنند. او نخست یک الکترون در مکان دهنده در گیرنده ملکولی مجسم نمود. همانند IETS، الکترون می‌توانست بالقوه به مکان گیرنده در همان ملکول تونل‌زنی کند ولی او تصور نمود که این کار با وجود تفاوت انرژی میان دو مکان، پیشگیری می‌شود؛ اما چنانچه گیرنده یک ملکول معطر دارای یک پیوند کوک شده کاملاً با فرکانس ارتعاشی درست را به دام اندازد آن گاه الکترون می‌تواند از دهنده با تونل‌زنی به گیرنده جدا شود و همزمان درست همان مقدار انرژی را به معطر انتقال دهد و به صورت مؤثر یکی از پیوندهای ملکولی‌اش را بنوازد. تورین طرح نمود که الکترون تونل‌زده اکنون در مکان گیرنده می‌نشیند و موجب آزادسازی پروتئین G افسار زده در اثر در ملکولی می‌شود و این عمل به شلیک نرون بویایی منجر گردیده و بدین سان یک پیام به سوی مغز گسیل می‌گردد و به ما اجازه «تجربه» رایحه پرتقالی که با کارد شکاف

می‌دهیم را می‌دهد.

تورین به گردآوری شواهد فرعی برای تئوری ارتعاشی کوانتومی‌اش اقدام نمود. برای مثال، همان گونه که اشاره شد، ترکیبات حاوی سولفور - هیدروژن معمولاً بوی تخم مرغ گندیده قوی‌ای دارند و همه آن‌ها یک پیوند ملکولی سولفور-هیدروژن دارند که در حدود ۷۶ تراهرتز<sup>۱</sup> (۷۶ تریلیون نوسان در ثانیه) ارتعاش می‌کند. تئوری او پیش‌بینی قوی‌ای دارد: هر ترکیب دیگر که با فرکانس ارتعاشی پیوندی ۷۶ تراهرتز<sup>۱</sup> همبسته باشد می‌بایست بوی تخم مرغ گندیده (بدون در نظر گرفتن شکل ملکولی آن) داشته باشد. بدبختانه، تعداد اندکی ترکیب دیگر وجود دارند که همان باند ارتعاشی در طیف خود داشته باشند. تورین در نوشتارهای طیف‌سنجی برای یک ملکول با همان ارتعاش جستجو نمود. در نهایت، او کشف کرد که پیوندهای بور - هیدروژن<sup>۲</sup> در مواد شیمیایی به نام «بوران<sup>۳</sup>» دارای ارتعاشاتی هستند که در ۷۸ تراهرتز متمرکز است که کاملاً به ارتعاش ۷۶ تراهرتز S-H نزدیک می‌باشد. اما بوران‌ها چه بویی دارند؟ این اطلاعات در نوشتارهای طیف‌سنجی در دسترس نبود و این مواد شیمیایی چنان عجیب و غریب بودند که نتوانست هیچکدام را برای استشمام کردن به دست آورد ولی او مقاله‌ای قدیمی یافت که آن را با بوی زننده توصیف می‌کردند؛ واژه‌ای که اغلب برای توصیف یک بوی سولفوری

<sup>1</sup> Terahertz

<sup>2</sup> Boron-hydrogen

<sup>3</sup> Boranes

به کار برده می‌شود. در واقع، روشن گردید که بوران‌ها تنها ملکول‌های غیرسولفوروی هستند که همان تعفن تخم‌مرغ گند کرده هیدروژن سولفوروی را دارند. تئوری تورین یک مکانیسم کوانتومی پذیرفتنی از دید زیست‌شناسی را فراهم نمود که امکان مورد شناسایی قرار دادن یک ارتعاش ملکولی توسط یک ملکول زیستی را می‌داد. برای بررسی دقیق‌تر تئوری تورین در گسترهٔ زیست‌شناسی به IETS زیست‌شناسی نظر می‌افکنیم.

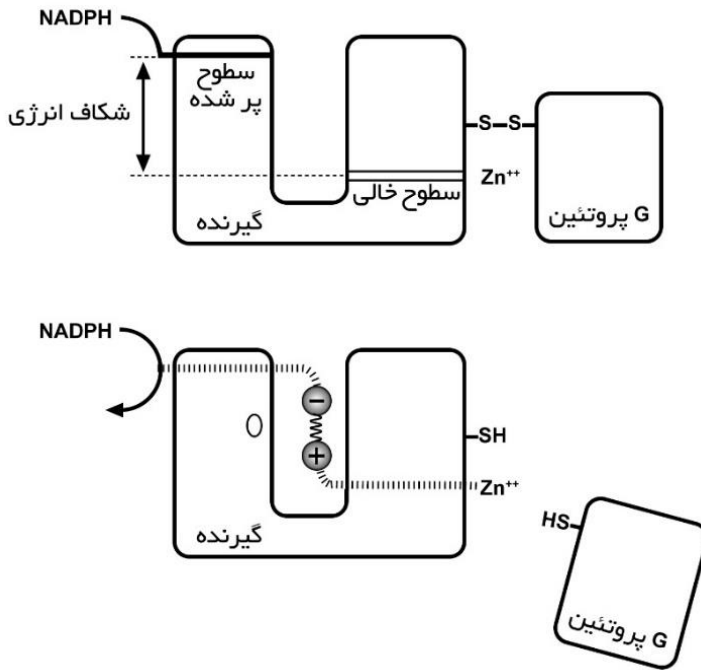
## ۲ / IETS زیست‌شناسی

تولید الکترون توسط یک منبع که امکان جریان بار را قادر می‌سازد به مقداری درون‌داد انرژی، نیاز دارد. تصور بر این است که از آنجا که سلول‌های انسانی مقداری ولتاژ تا حد  $0/5$  ولت دارند آن گاه منبع ولتاژ مسئله‌ای قلمداد نمی‌شود. در سامانه‌های زیست‌شناسی، برای این که تونل‌زنی الکترون غیرکشسان تورین رخ دهد، ما به منبعی از الکترون، مکانیسم برداشت از منبع الکترون، سطوح درست انرژی و یک دهنده و گیرندهٔ احتمالی، نیاز داریم. این پذیرفته شده است که انتقال الکترون در زیست‌شناسی توسط سریال واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء در چندین ملکول زیستی یاری داده می‌شود. هر پدیدهٔ انتقال تا مقدار زیادی از متالو پروتئین‌ها<sup>۱</sup> استفاده می‌کند؛ از این رو، تئوری IETS را می‌توان در سامانه‌های زیست‌شناسی به کار برد. تورین پیشنهاد داد که منبع الکترون می‌تواند نیکوتین آمید آدنین دی

<sup>1</sup> Metalloproteins

نوکلوئید فسفات (NADPH) باشد. NADPH به دهنده الکترون در یک سوی شکاف از طریق چندین موتیف اسید آمینه‌ای که ساختار سوم یک پروتئین را می‌سازد، اتصال می‌یابد و در سوی دیگر شکاف یک گیرنده قرار داد که حاوی عنصر روی می‌باشد. روی پروتئین G را همان گونه که در طرح تورین در شکل ۱۶ نشان داده شده است را محکم می‌دارد (شکل ۱۷).

پروتئین G در نتیجه اکسیداسیون پل دی سولفیدی با تونل‌زنی الکترون به گیرنده آن رها می‌شود. این مسیر انتقال پیام‌دهی بویایی که به واسطه آن معطرها به گیرنده‌های خاص اتصال می‌یابند و پروتئین‌های G ویژه را فعال می‌نمایند را نشان می‌دهد که سپس موجب انتقال یک پیام درون سلولی شده و سامانه‌های ثانویه پیام‌رسان را برای ترجمان احتمالی توسط مغز فراهم می‌سازد. فرکانس ارتعاشی معطر را می‌توان با در نظر گرفتن پروتئین گیرنده که به عنوان یک اسپکترومتر عمل می‌نماید و برای شناسایی یک ارتعاش کوانتیده که به اختلاف انرژی ارتباط دارد، طراحی شده است را اندازه‌گیری نمود. تورین فرض نمود که حدود ۱۰ گیرنده وجود دارد که در طی فرایند انتقال الکترون کوک می‌شوند و پیام تولیدی ترکیبی از پیام‌های هم‌پوشاننده از سلول‌های مختلفی است که در فرایند درگیر می‌شوند. چندین گیرنده درگیر می‌شوند تا طیف ارتعاشی را پوشش دهند و هر کدامیک می‌توانند در محدوده خاصی از طیف ارتعاشی کوک شوند. در هر صورت باید توجه نشان داد که چنانچه دهنده با سطح انرژی خاصی پر نباشد، انتقال الکترون اصلاً رخ نمی‌دهد



شکل ۱۷: مدل تورین IETS.

یک الکترون از NADPH در گیرنده پروتئین پذیرفته می‌شود. الکترون نخواهد توانست در هنگامی که مکان اتصال گیرنده خالی است (در بالا نشان داده شده است) تونل‌زنی کند زیرا هیچ سطح خالی در دسترس با انرژی مناسب وجود ندارد. این به معنای آن است که هیچ بویی وجود ندارد تا اختلاف انرژی در گیرنده و پذیرنده را طبیعی سازد و تونل‌زنی رخ نمی‌دهد. در حضور یک معطر (که با دو قطبی نشان داده شده است) در مکان اتصال (در پایین نشان داده شده است)، الکترون تونل می‌زند و در طی تونل‌زنی از طریق برانگیختن مد ارتعاشی معطر انرژی از دست می‌دهد و شکاف انرژی میان دهنده و پذیرنده تطبیق می‌یابد. الکترون‌ها از طریق پروتئین جریان یافته و پل دی‌سولفیدی را از طریق یک یون «روی» احیاء نموده و بدین طریق، رهاسازی پروتئین G برانگیخته می‌شود.

و گیرنده آن نیز می‌بایست سطوح انرژی خالی مانند آن چه که در مورد IETS معمولی گفته شد دارا باشد. در هر صورت، در حمایت از تئوری تونل‌زنی الکترون غیرکشسان تورین، آزمایشات با مگس‌های میوه نشان داده‌اند که شکل و اندازه معطرها برای شناسایی آن‌ها کافی نمی‌باشند. برای مثال، جایگزینی نمودن دوتریوم<sup>۱</sup> به جای هیدروژن، با وجودی که دو ملکول شکل یکسانی دارند، منجر به تغییر بو گردید. افزون بر این، ملکول‌های با فرکانس‌های ارتعاشی مشابه مشاهده شده‌اند که واکنش‌های مشابهی را در مگس‌های میوه نشان داده‌اند با وجود این که از لحاظ شیمیایی غیروابسته بوده‌اند.

داده‌های تجربی شواهد قوی‌ای را برای هر تئوری از بویایی که شامل هر دوی «شکل» و «ارتعاش» باشند فراهم می‌آورند. هیچ آزمایشی تا کنون به صورت مستقیم این را آزمون نکرده است که آیا تونل‌زنی کوانتومی در بویایی دخالت دارد یا خیر؟ با این وجود، حداقل تا کنون تونل‌زنی کوانتومی غیرکشسان توسط الکترون‌ها تنها مکانیسم شناخته شده‌ای است که توضیح پذیرفتنی‌ای را برای این که چگونه پروتئین‌ها می‌توانند ارتعاشات در ملکول‌های معطر را مورد شناسایی قرار دهند، ارائه می‌دهد. بنابراین، با وجودی که این بحث‌های ضدونقیض برجای می‌مانند، تنها تئوری‌ای که توضیح می‌دهد چگونه مگس‌ها و انسان‌ها می‌توانند بوهای ترکیبات طبیعی دوتریوم‌دار (سازواره‌ای که در آن همه یا بخشی

---

<sup>1</sup> Deuterium



از اتم‌های هیدروژن جای خود را به دوتریوم داده‌اند) را تشخیص دهند بر پایه مکانیسم مکانیک کوانتومی تونل‌زنی الکترون غیرکشسان است. آزمایشات اخیراً نشان داده‌اند که مانند مگس‌ها و انسان‌ها، دیگر حشرات و حتی ماهی‌ها می‌توانند تفاوت پیوندهای هیدروژنی و دوتریومی را استشمام کنند. اگر بویایی کوانتومی در چنین گستره‌ای از مخلوقات یافت می‌شود این احتمال وجود دارد که حضور مکانیک کوانتومی در جهان زیست‌شناسی بسیار گسترده باشد. با توجه به این که یک پیوند ناگسستنی میان اصل مکانیک کوانتومی و بویایی وجود دارد، یافت مکانیسم‌های زمینه‌ای در فرایند بویایی می‌تواند به ارائه راه‌حل‌های دائمی به پرسش‌های بی‌پاسخی که در گستره زیست‌شناسی کوانتومی وجود دارند، منجر شود.



فصل هفتم

# ژن‌های کوانتومی



همه ژن‌های سلولی توسط رشته‌های نوکلئوتیدی از بازهای گوانین (G)، سیتوزین (C)، آدنین (A) و تیمین (T) در ملکول‌های DNA کدگذاری می‌شوند. هر ملکول DNA از دو رشته مکمل تشکیل شده است که در آن A با T (A - T) و C با G (C - G) جفت شده و ساختار معروف مارپیچ دوگانه DNA را شکل می‌دهند. در هنگام هم‌تاسازی DNA، رشته‌ها از هم جدا می‌شوند و آنزیم DNA پلی‌مراز، نسخه مکمل هر رشته مادر را سنتز می‌کند. ماده پیش‌نیاز آنزیم‌ها، دی‌اکسی نوکلئوزید تری فسفات‌ها (dNTP)<sup>۱</sup> هستند که با استفاده از رشته مادری به عنوان الگو، پلی‌مریزه می‌شوند و به این صورت که به صورت متناوب بازهای نوکلئوتیدی مربوطه هر کدام در یک زمان، در رشته در حال رشد، هم‌گذاری می‌شوند. اهمیت مکمل یافتگی میان بازهای DNA و نقش اساسی آن در هم‌تاسازی در نخست توسط واتسون و کریک<sup>۲</sup> در مقاله نوآورانه خودشان در سال ۱۹۵۳ پیشنهاد شد و در آنجا آن‌ها این را ارائه دادند که ساختار مارپیچ دوگانه با برهم‌کنش‌های ویژه میان جفت بازها، شکل داده می‌شود. جفت بازهای G - C و A - T دارای ویژگی هندسه معروف به واتسون و کریک هستند. پایبندی هم‌تاسازی در نخست به توانایی پلی‌مرازها در گزینش و ادغام باز مکمل مربوطه بستگی دارد. این واقعیت که چگونه

<sup>۱</sup> Deoxynucleoside Triphosphates (dNTPs)

<sup>۲</sup> Watson and Crick

اطلاعات ژنتیکی می‌تواند به صورت پایبندانه‌ای از یک نسل به نسل بعد انتقال یابد؛ معمای وراثت است که اروینگ شرودینگر را بر این باور رساند که ژن‌ها، هستی‌های مکانیک کوانتومی هستند. آیا او درست می‌پنداشت؟ آیا ما به مکانیک کوانتوم برای پرداختن به وراثت نیاز داریم؟ این پرسش‌هایی است که ما در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت.

نسخه‌برداری و هم‌تاسازی پایبندانه برای حیات، اساسی می‌باشد زیرا پیچیدگی بی‌نهایت و خارق‌العادهٔ بافت زنده به وجود ماهیت ساختار پیچیدهٔ موجود نیاز دارد چون که حتی یک خطای واحد می‌تواند کشنده باشد. ژنوم سلول‌های ما حاوی ۲۵ هزار ژن است که حدود ۱ تا ۲ درصد از سه میلیارد حرف ژنتیکی ژنوم را شامل می‌شود. با این وجود، میزان خطاهای نسخه‌برداری از ژن‌ها در هنگام هم‌تاسازی DNA که ما آن را جهش‌ها<sup>۱</sup> می‌نامیم حدود یک خطا<sup>۲</sup> در هر  $10^{11}$  -  $10^8$  باز هم‌تاسازی شده می‌باشد و به جهش خودبه‌خودی<sup>۳</sup> معروف است. هر چند که اکثر موجودات اندکی از جهش‌ها را در هر نسل تحمل می‌کنند ولی فزونی در جهش‌ها می‌تواند مسائل جدی‌ای را برای نسل بعدی فراهم آورد شامل بیماری‌های ژنتیکی یا حتی موجب غیرقابل زیست شدن محصول لقاح شوند.

همچنین هر زمان که سلول‌های بدن ما مانند سلول‌های خونی پوست و غیره تکثیر می‌یابند، آن‌ها DNA خودشان را همانندسازی

<sup>1</sup> Mutations

<sup>2</sup> Error

<sup>3</sup> Spontaneous mutation

می‌نمایند تا در سلول‌های دختر خود قرار دهند. خطا در این فرایند می‌تواند موجب سرطان شود. اما زیست‌شناسی ملکولی مدعی است که سازمان همانندسازی و ترجمان کدهای ژنتیکی دارای یک پایبندی<sup>۱</sup> در سطح بالا می‌باشد. با این وجود، تعداد قابل چشمگیری از منابع گوناگون برای آسیب‌زایی درونی DNA مورد شناسایی واقع شده‌اند که می‌توانند یکپارچگی ژنوم را هدف قرار داده و جهش‌هایی را در هنگام همانندسازی القاء نمایند که شامل اشعهٔ ماوراءبنفش، تابش‌های یونیزان و گونه‌های اکسیژن فعال می‌باشند. جفت‌سازی DNA که کد ژنتیکی را نگه داشته است ریشه در پیوندهای شیمیایی دارد که بازهای مکمل را با یکدیگر نگه می‌دارد. این پیوندها که پیوندهای هیدروژنی نامیده می‌شوند توسط پروتئین‌های واحد که ضرورتاً هسته‌های اتم‌های هیدروژن هستند و میان دو اتم به اشتراک گذاشته می‌شوند، شکل می‌یابند.

هر کدامیک از این دو اتم در بازهای مکمل در رشته‌های روبه‌روی هم قرار دارند. این سازمان‌بندی است که بازهای جفت شده را با یکدیگر نگه می‌دارد (شکل ۱۸). باز A مجبور است با باز T جفت شود زیرا هر A پروتون‌ها را دقیقاً در مکان‌های درست نگه می‌دارد تا پیوندهای هیدروژنی را با T شکل دهد. یک باز A نمی‌تواند با C جفت شود زیرا پروتون‌ها در جایگاه‌های درست نمی‌نشینند تا پیوندها شکل بگیرند. جفت شدن به واسطهٔ پروتون بازهای نوکلئوتیدی همان کد ژنتیکی است که

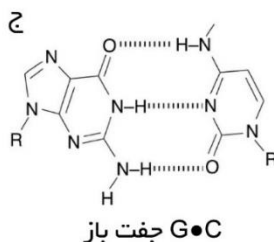
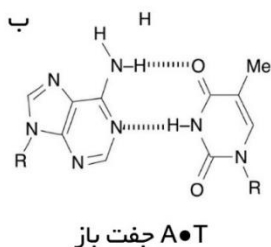
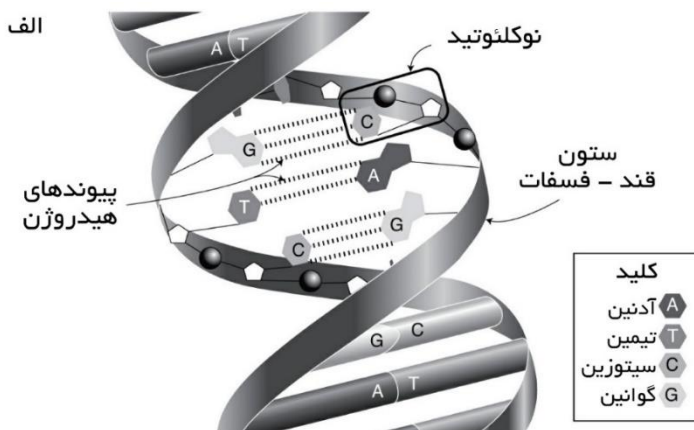
---

<sup>1</sup> Fidelity

همانندسازی می‌شود و به هر نسل انتقال می‌یابد. این کد ژنتیکی البته می‌بایست در سراسر طول حیات سلول به صورت مداوم خوانده شود تا ماشین ساخت پروتئین را برای ساخت آنزیم‌ها هدایت نماید. همان گونه که اشاره شد این آنزیم‌ها هستند که موتور حیات می‌باشند و تمام فعالیت‌های سلولی را هماهنگ می‌سازند. این فرایند خوانش کدهای ژنتیکی در طول زندگی توسط RNA پلی‌مراز انجام می‌شود که همانند آنزیم DNA پلی‌مراز، جایگاه‌های پروتون‌های کد کننده را در طول زنجیره DNA، خوانش می‌کند.

در ادامه خواهیم دید که این جایگاه پروتون است که توسط کوانتوم تعیین می‌شود و نه قوانین کلاسیک. بدین سان، کد ژنتیکی که زندگی را امکان‌پذیر می‌نماید به صورت اجتناب‌ناپذیری یک کد کوانتوم است. شرودینگر درست گفته بود که ژن‌ها با حروف کوانتومی نوشته می‌شوند و پایبندی وراثت با کوانتوم تا قوانین کلاسیک فراهم می‌گردد. همان گونه که مکانیک کوانتومی منبع پایبندی وراثت است، اروینگ شرودینگر پیشنهاد برجسته دیگری را در کتاب خود تحت عنوان «حیات چیست؟» در سال ۱۹۴۴ ارائه داد. او چنین فرض نمود که جهش‌ها نیز ممکن است گونه‌ای از پرش کوانتومی در ژن باشند. پیش از آن که به این پرسش کوانتومی و به مکانیسم جهش‌زایی بر پایه‌های مکانیک کوانتومی بپردازیم، به کدگذاری با پروتون‌ها نیم‌نگاهی می‌افکنیم.





شکل ۱۸: ساختار DNA: (الف) مارپیچ دوگانه واتسون - کریک (ب) یک نمای نزدیک از جفت القبای ژنتیکی A و T (ج) یک نمای نزدیک از جفت القبای ژنتیکی G و C. در هر دو مورد، پیوندهای هیدروژن (پروتون‌های به اشتراک گذاشته شده) که دو باز را پیوند می‌دهند به صورت خطوط منقطع نشان داده شده‌اند. در این حالت استاندارد جفت شدن باز واتسون - کریک، این بازها در حالت طبیعی، غیرهمسان پار خودشان هستند.

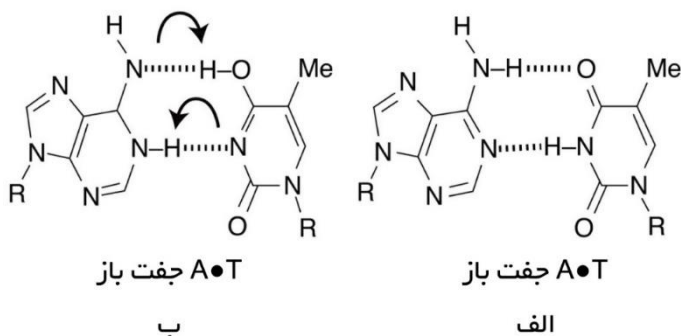
### کدگذاری با پروتون‌ها

دوباره به جفت بازهای موجود در زیر شکل ۱۸ بنگرید. در می‌یابید که پیوند هیدروژنی که به صورت یک پروتون به اشتراک گذاشته توصیف

گردیده با خطوط نقطه‌ای میان دو اتم (اکسیژن یا نیتروژن) در جفت بازها ترسیم شده است. اما آیا یک پروتون یک ذره نیست؟ پس چرا به صورت خط نقطه‌ای تا یک نقطه واحد ترسیم شده است؟ مسلماً دلیل این است که پروتون‌ها، هستی‌های کوانتومی هستند که هر دو ویژگی ذره‌ای و موجی بودن را دارند: از این رو، پروتون بی‌مکان گشته و مانند یک هستی موج مانند، رفتار کرده و در میان هر دو باز، چلپ چلپ می‌کند. جایگاه هیدروژن در شکل ۱۸ نمایانگر محتمل‌ترین جایگاه پروتون است که در میانه بین دو باز نیست و بیشتر به یک سو گرایش دارد، نزدیک‌تر به یک رشته یا رشته دیگر از DNA. این عدم تقارن برای نمای DNA بی‌نهایت مهم است.

بگذارید یک جفت باز ممکن را مانند A - T در نظر بگیریم که A در یک رشته و T در رشته دیگر با دو پیوند هیدروژنی (پروتون‌ها) به یکدیگر نگه داشته شده باشند یعنی جایی که یک پروتون به یک اتم نیتروژن در A نزدیک‌تر است و دیگری به یک اتم اکسیژن در T نزدیک‌تر بوده است (شکل ۱۹ الف) و شکل‌یابی پیوند هیدروژنی A:T امکان‌پذیر می‌شود. اما به یاد داشته باشید که در «نزدیک تراز» یک مفهوم لغزنده در جهان کوانتومی است جایی که ذرات جایگاه‌های ثابت شده‌ای ندارند ولی در یک محدوده‌ای از احتمالات ساکن می‌باشند که در یک زمان در مکان‌های گوناگون بسیاری وجود دارند شامل آن‌هایی که فقط با تونل‌زنی می‌توان به آن رسید. اگر هر دو پروتون که حروف ژنتیکی را به یکدیگر نگه

می‌دارند هر کدامیک به دیگر سوی پیوندهای هیدروژنی مربوطه خود پرش می‌کردند، آن گاه آن‌ها می‌توانستند به باز مخالف نزدیک‌تر شوند. این منجر به شکل‌یابی اشکال جایگزین برای هر باز می‌گردد که به نام همسان‌پارها (توتومرها)<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند (شکل ۱۹ ب).



شکل ۱۹ - الف) یک جفت باز A•T استاندارد با پروتون‌ها در موقعیت‌های طبیعی‌شان؛ ب) در اینجا پروتون‌های جفت شده از مارپیچ دوگانه DNA پرش یافته‌اند تا شکل همسان‌پار (توتومری) هر دوی A و T را بسازند.

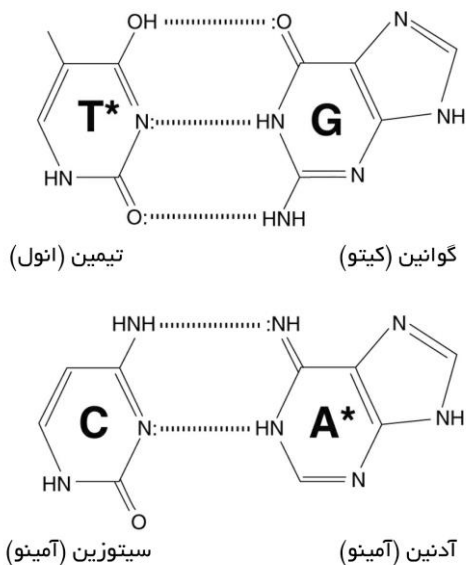
بنابراین، هر کدامیک از بازهای DNA در دو شکل وجود دارند یکی در شکل استاندارد که در ساختار مارپیچ دوگانه واتسون و کریک دیده می‌شود و دیگر در همسان‌پار نادرتر که پروتون‌های کد کننده آن به جایگاه‌های جدیدی تغییر مکان یافته‌اند. اما به یاد داشته باشید که پروتون‌های سازنده پیوندهای هیدروژنی در DNA مسئول ویژگی جفت شدن بازی است که برای هم‌تاسازی کد ژنتیکی استفاده می‌شود. بنابراین،

<sup>1</sup> Tautomers

اگر جفت پروتون‌های کد کننده شرکت نمایند (در مسیرهای مخالف)، آن‌ها به صورت کارآمدی کد ژنتیکی را بازنویسی می‌کنند برای مثال، اگر یک حرف ژنتیکی در رشته DNA تیمین (T) است آن گاه در شکل طبیعی‌اش به شکل درست با A جفت می‌شود. اما اگر یک جابه‌جایی پروتون دوگانه‌ای رخ دهد آن گاه هر دوی T و A اشکال همسان‌پار (توتومر) را به خود خواهند گرفت.

مسلماً، پروتون‌ها ممکن است به جای پیش خود پرش کنند ولی اگر این اتفاق در هنگامی که رشته DNA نسخه برداری می‌شود در اشکال همسان‌پار نادر خودشان باشند آن گاه بازهای اشتباه در رشته‌های DNA جدید، ادغام می‌یابند. همسان‌پار T می‌تواند با G به جای A جفت شود و بدین سان G در رشته جدید ادغام می‌شود یعنی جایی که در رشته کهنه، A قرار داشت. به همین شکل، چنانچه A در زمانی که DNA همسان‌سازی می‌کند در حالت همسان‌پار خودش باشد آن گاه A با C به جای T جفت خواهد شد و بدین سان رشته جدید C دارا خواهد داشت یعنی جایی که رشته کهنه، T داشت (شکل ۲۰). در هر مورد، رشته‌های DNA تازه ساخته شده حامل موتاسیون‌ها خواهد بود یعنی تغییرات در توالی DNA که در پروژنی به ارث خواهد رسید. گرچه این فرضیه کاملاً پذیرفتی است اما بسیار دشوار است که شاهد مستقیم آن را به دست آوریم ولی در سال ۲۰۱۱، تقریباً ۶۰ سال پس از این که واتسون و کریک

مقاله خود را به چاپ رساندند، گروهی در مرکز طبی دانشگاه دوک<sup>۱</sup> در ایالات متحده آمریکا اقدامی انجام دادند تا نشان دهند که جفت بازهای DNA نادرست با پروتون‌ها در جایگاه همسان‌پار واقعاً می‌توانند در مکان فعال آنزیم DNA پلی‌مراز (آنزیمی که DNA جدید می‌سازد) جای‌گیری کرده و بدین طریق این احتمال وجود دارد که در DNA به تازگی همسان‌سازی شده، ادغام شده و ایجاد موتاسیون کنند.



شکل ۲۰: در شکل همسان‌پار (انول) که با T\* در شکل نشان داده شده است، T می‌تواند به شکل نادرستی با G جفت شود به جای جفت معمولش A. همین‌طور شکل همسان‌پار A (A\*) می‌تواند به شکل نادرستی با C جفت شود به جای T. اگر این خطاها در هنگام همانندسازی DNA رخ دهند آن‌گاه یک جهش نتیجه خواهد داد.

<sup>1</sup> Duke University Medical Center

از این رو، همسان‌پارها (با جایگاه‌های پروتونی جایگزین) به نظر می‌آیند که پیش‌ران موتاسیون باشند و بدین طریق فرایند تکامل را موجب می‌شوند. اما این پرسش وجود دارد که چه چیزی پروتون‌ها را وادار می‌نماید تا در موقعیت اشتباه حرکت کنند؟ این امکان روشن «کلاسیک» وجود دارد که آن‌ها با ارتعاش‌های دائم ملکولی که دورتادور آن‌ها را فرا گرفته‌اند گاهی «تکان داده» شوند. اما این به دسترس‌پذیری به انرژی حرارتی کافی نیاز دارد تا نیروی جنبش «تکان دادن» را فراهم سازد. همانند آن که در بخش آنزیم‌ها اشاره شد، پروتون مجبور است که بر مانع انرژی با شیب کاملاً تند چیرگی یابد تا حرکت کند. به صورت دیگر، پروتون‌ها ممکن است در برخورد با ملکول‌های آب مجاور به آن‌ها ضربت وارد شود ولی تعداد فراوانی از ملکول‌های آب در نزدیکی پروتون‌های کد کننده در DNA وجود ندارد تا جنبش ضربتی را برای آن‌ها فراهم سازند.

اما مسیر دیگری وجود دارد که آشکار گردید در مسیری که آنزیم‌ها، الکترون‌ها و پروتون‌ها را انتقال می‌دهند، نقش مهمی بازی می‌کند. یکی از پیامدهای ماهیت موج مانند ذرات زیراتمی مانند الکترون‌ها و پروتون‌ها این است که احتمال تونل‌زنی کوانتومی دارند، فازی بودن در موقعیت هر ذره به آن اجازه نشت‌یابی از طریق مانع انرژی را می‌دهد. در بخش آنزیم‌ها مشاهده کردیم که چگونه آنزیم‌ها از تونل‌زنی کوانتومی الکترون‌ها و پروتون‌ها، با آوردن ملکول‌ها به اندازه کافی در نزدیکی یکدیگر، برای انجام

تونل‌زنی استفاده می‌کنند. یک دهه پس از واتسون و کریک که مقاله اصلی خود را به چاپ رساندند، فیزیکدان سوئدی، پر اولوف لودین<sup>۱</sup>، این را مطرح نمود که تونل‌زنی کوانتومی می‌تواند مسیر جایگزینی برای پروتون‌ها باشد تا از میان پیوندهای هیدروژنی گذر نموده و اشکال همسان‌پار جهش‌زای نوکلئوتیدی را خلق کنند.

لازم است که بر این نکته تاکید شود که جهش‌های DNA توسط مکانیسم‌های گوناگون و متنوعی شامل ایجاد صدمه توسط مواد شیمیایی، نور ماوراءبنفش، ذرات فروپاشی رادیواکتیو و حتی تابش‌های کیهانی، رخ می‌دهند. همه این تغییرات در سطح ملکولی انجام می‌شوند و بدین سان درگیر شدن فرایندهای مکانیک کوانتومی در آن‌ها دور از ذهن نیست؛ هر چند که تا کنون نشانی که این منظرهای خارق‌العاده در این جهش‌ها نقشی بازی می‌کنند، وجود ندارد. اما اگر تونل‌زنی کوانتومی نشان داده شود که در تشکیل همسان‌پارهای بازهای DNA ای درگیر باشد آن‌گاه خارق‌العاده بودن کوانتوم می‌تواند نقشی را در جهش‌ها (که پیش‌ران تکامل هستند)، ایفاء نماید.

با این وجود، اشکال همسان‌پار بازهای DNA حدود ۰/۰۱ درصد از همه بازهای طبیعی DNA ای را شامل می‌شوند که به صورت بالقوه به خطاهایی در همین مقیاس منجر می‌شوند که این میزان بسیار بالاتر از یک خطا در میلیارد یا در همین حدود از جهش است که ما در طبیعت

---

<sup>1</sup> Per-Olov Lowdin

می‌بینیم؛ بنابراین چنانچه بازهای همسان پار واقعاً در مارپیچ دوگانه DNA وجود داشته باشند آن گاه می‌بایست خطاهای حاصله به وسیله فرایندهای متنوع تصحیح خطا، برداشته شوند؛ می‌دانیم این فرایندها به تضمین پایبندی بالای همسان‌سازی DNA کمک می‌کنند. در این صورت، آن خطاهایی که توسط تونل‌زنی کوانتومی به وجود آمده و از دستگاه تصحیح خطا گریز می‌نمایند ممکن است منبع جهش‌های رخ داده طبیعی باشند. خطاهایی که پیش‌ران تکامل برای همه زیست‌مندان بر روی زمین هستند. کشف مکانیسم‌های زمینه‌ای جهش نه تنها برای درک ما از تکامل مهم است بلکه ممکن است بینش ما را در مورد این که چگونه بیماری‌های ژنتیکی برمی‌خیزند و این که چگونه سلول‌ها سرطانی می‌شوند، افزایش دهند زیرا هر دوی این پدیده‌ها توسط جهش‌ها ایجاد می‌شوند. مسئله‌ای که با آزمون این که آیا تونل‌زنی کوانتومی در جهش‌ها مؤثرند وجود دارد این است که برعکس عوامل دیگر جهش، مانند جهش‌زاهای شیمیایی یا تابشی، جهش‌های بر پایه مکانیک کوانتومی را نمی‌توان به سادگی روشن یا خاموش نمود. بنابراین، اندازه‌گیری نرخ جهش با و بدون تونل‌زنی که آیا تفاوتی ایجاد می‌شود، ساده نمی‌باشد. اما یک راه جایگزین برای شناسایی منشأ مکانیک کوانتومی ممکن است وجود داشته باشد؛ راهی که به وجود تفاوت میان اطلاعات کلاسیک و اطلاعات کوانتومی باز می‌گردد. اطلاعات کلاسیک را می‌توان خواند و دوباره خواند، بدون این که پیامش تغییر یابد و این در حالی است که سامانه‌های کوانتومی همیشه



با اندازه‌گیری آشفته می‌شوند. از این رو، هنگامی که آنزیم DNA پلی‌مراز یک باز DNA را اسکن می‌کند تا جایگاه پروتون‌های کد کننده را تعیین کند، یک اندازه‌گیری کوانتومی صورت می‌دهد که در اصل با هنگامی که یک فیزیکی‌دان، جایگاه یک پروتون را در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌کند، تفاوتی وجود ندارد. در هر دوی این فرایندها، فرایند اندازه‌گیری، هرگز بی‌ضرر نیست؛ طبق مکانیک کوانتومی، هر اندازه‌گیری چه توسط آنزیم DNA پلی‌مراز در داخل یک سلول باشد یا توسط یک شمارشگر گایگر<sup>۱</sup> در یک آزمایشگاه، به شکل اجتناب‌ناپذیری حالت ذره‌ای که اندازه‌گیری می‌شود را تغییر می‌دهد. اگر حالت آن ذره مربوط به یک حرف کد ژنتیکی خاصی باشد آن گاه اندازه‌گیری، به ویژه اندازه‌گیری‌های مکرر، انتظار می‌رود که آن کد را تغییر دهد و بالقوه موجب جهش شود. آیا شاهدهی برای این مدعا وجود دارد؟

گرچه همه ژنوم ما در هنگام همانندسازی DNA نسخه‌برداری می‌شود، عمده خوانش‌های ژن ما در هنگام همانندسازی DNA انجام نمی‌شود بلکه در هنگام فرایندهایی است که در آن این اطلاعات ژنتیکی برای هدایت سنتز پروتئین‌ها استفاده می‌شوند. فرایند اول، به نام رونویسی<sup>۲</sup> شناخته می‌شود و شامل نسخه‌برداری از اطلاعات کد گذاری شده DNA به RNA است. ملکول RNA آن گاه به ماشین سنتز پروتئین سفر می‌کند تا پروتئین‌ها را بسازد و این فرایند دومی است که به فرایند

---

<sup>1</sup> Geiger counter

<sup>2</sup> Transcription

ترجمه<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. یک ویژگی کلیدی این فرایند آن است که بعضی از ژن‌ها بیش از دیگر ژن‌ها اغلب مورد خوانش قرار می‌گیرند. اگر خوانش کد DNA در هنگام رونویسی شامل اندازه‌گیری کوانتومی شود آن گاه ژن‌هایی که به صورت مکرر خوانش می‌یابند، انتظار می‌رود که مورد آشفستگی‌های برخاسته از اندازه‌گیری بیشتری قرار گرفته و به میزان‌های بالاتری جهش‌ها منتهی شوند. این در واقع چیزی است که ادعا می‌شود در تعدادی از مطالعات یافت شده است. برای مثال، گروه پژوهشگران دانشگاه اموری<sup>۲</sup> آتلانتا در آمریکا یک ژن واحد را در سلول‌های مخمر دستکاری کردند، به گونه‌ای که یا فقط چند باری برای ساخت مقادیر اندکی پروتئین در سلول خوانش شود و یا این که زمان‌های فراوانی برای ساخت انبوهی از پروتئین، مورد خوانش قرار گیرد. این گروه پژوهشگران کشف کردند که میزان جهش در ژن مورد نظر ۳۰ بار بالاتر است در هنگامی که در سطوح بالاتری خوانده می‌شود.

در مطالعه‌ای مشابه در سلول‌های موش همین اثر یافت گردید و یک مطالعه اخیر بر روی ژن‌های انسانی به این نتیجه‌گیری دست یافت که ژن‌هایی که در بالاترین سطح خوانده می‌شوند، تمایل دارند بیشترین ژن‌هایی باشند که جهش می‌یابند. این حداقل در راستای اثر اندازه‌گیری مکانیک کوانتوم است ولی مسلماً اثبات نمی‌کند که مکانیک کوانتوم در آن درگیر می‌باشد. خوانش DNA شامل واکنش‌های بیوشیمیایی است که

---

<sup>1</sup> Translation

<sup>2</sup> Emory University

ساختار ملکولی ژن‌ها را آشفته نموده یا به آن‌ها به شیوه‌های گوناگونی صدمه می‌زند و موجب ایجاد جهش بدون هیچ ارجاعی به مکانیک کوانتوم می‌شود. برای آزمودن این که آیا مکانیک کوانتومی در یک فرایند زیست‌شناسی درگیر است ما به شاهدهی نیاز داریم که محکم بوده یا امکان‌ناپذیر باشد بتوان بدون در نظر گرفتن مکانیک کوانتومی آن را توجیه نمود.

### آذرخش‌های کوانتومی در جهش DNA

همواره این پرسش ژرف برجای مانده است که آیا تونل‌زنی کوانتومی نقشی در جهش DNA دارد؟ همان‌گونه که اشاره شد، نقش تونل‌زنی کوانتومی در ایجاد جهش، بر زمینه‌های کارهای تئوریک لودین<sup>۱</sup> بر پا گردید و از آن هنگام با چندین مطالعه نظری تأیید شده است و در مطالعات تجربی نیز با آن چه که معروف به «مدل جفت‌های باز<sup>۲</sup>» است مورد حمایت قرار گرفته است. مدل جفت‌های باز، مواد شیمیایی طراحی شده‌ای هستند که خصوصیات جفت شدن بازی مانند بازهای DNA ای دارند ولی تابع آزمایش کردن هستند. با این وجود، هنوز کسی ثابت نکرده است که تونل‌زنی پروتون موجب جهش می‌شود، مسئله این است که می‌بایست با چندین عوامل دیگر جهش‌ها و مکانیسم‌های ترمیم رقابت نمود که این موضوع نقش حل‌کردنی آن را چنانچه موجود باشد، دشوارتر می‌نماید.

---

<sup>1</sup> Lowdin

<sup>2</sup> Model base pairs

برای بررسی این موضوع، جوانجو مک‌فادن<sup>۱</sup>، ایده‌هایی را از تجربیات آنزیم‌ها که در فصل ۳ به آن پرداختیم قرض گرفت؛ همان گونه که در آنجا درگیری تونل‌زنی پروتون بعد از کشف «اثرات کینتیک ایزوتوپی» استنتاج گردید. چنانچه تونل‌زنی کوانتومی در سرعت بخشی به یک واکنش آنزیمی درگیر است آن گاه جایگزین کردن یک هسته هیدروژنی (یک پروتون واحد) با هسته دوتریوم (شامل یک پروتون و یک نوترون) می‌بایست واکنش را کاهش دهد زیرا تونل‌زنی کوانتومی به دو برابر شدن جرم ذره که به تونل‌زنی تلاش می‌کند، بسیار حساس است. مک‌فادن هم اکنون در رهیافتی مشابه برای جهش در تلاش است تا بررسی کند آیا میزان‌های جهش در آب دیوتریومی ( $D_2O$ ) تا آب معمولی ( $H_2O$ ) تفاوت می‌کنند. تا اینجا به نظر می‌رسد که واقعاً این میزان‌ها با جایگزینی تفاوت می‌کنند ولی کار بیشتری می‌بایست انجام شود تا مطمئن شد این اثر واقعاً به دلیل تونل‌زنی کوانتومی است زیرا جایگزین کردن هیدروژن با دوتریوم می‌تواند به فرایندهای زیست‌ملکولی دیگری بدون ارجاع به توضیح مکانیک کوانتومی، اثر نماید.

فعالیت‌های جیم الخلیلی<sup>۲</sup> در مورد بررسی این که آیا انجام تونل‌زنی پروتون‌ها در مارپیچ دوگانه DNA، از لحاظ تئوری، امکان‌پذیر است تمرکز یافته است. هنگامی که یک فیزیک دان نظری به یک مسئله پیچیده‌ای مانند این موضوع دست به گریبان می‌شود او تلاش می‌کند تا یک مدل

<sup>1</sup> Johnjoe McFadden

<sup>2</sup> Jim Al Khalili

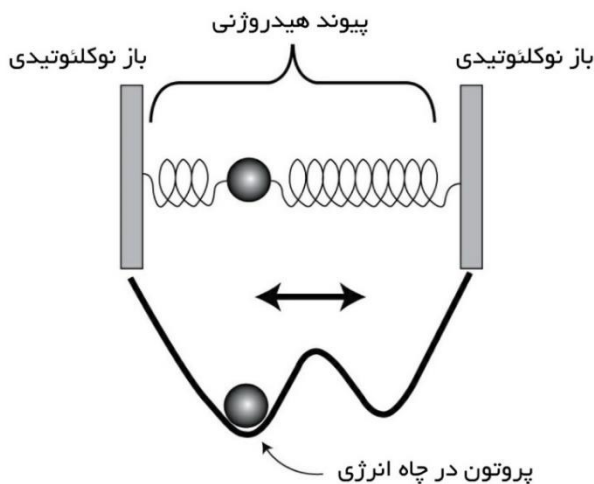
ساده شده را خلق کند که به صورت ریاضی قابل ردیابی باشد و در عین حال آن چه که مهم‌ترین نماهای سامانه یا فرایند هست را هنوز نگهداری کند. چنین مدل‌هایی را آن گاه می‌توان در کمال و پیچیدگی با افزودن جزئیات بیشتر به منظور نزدیک شدن به چیز واقعی به گونه‌ای که آن را شبیه‌سازی نماید، بالا و پایین برد.

مدل‌گزینی برای آغاز جهت تجزیه و تحلیل ریاضیاتی در این مورد را می‌توان با یک توپ به تصویر کشید که نمایانگر پروتون است که در مکان خود با دو فنر اتصال یافته به دیواره‌ها (شکل ۲۱) نگه داشته شده است هر کدامیک از این فنرها در یک طرف قرار داشته و توپ را به جهات مخالف می‌کشند. توپ تمایل دارد که در مکانی آرام گیرد که کشش از هر دو فنر یکسان باشد؛ از این رو چنانچه یک فنر مقداری کمتر از فنر دیگر سفت‌تر باشد آن گاه توپ نزدیک‌تر به دیواری می‌نشیند که فنر سفت‌تر به آن اتصال دارد. اما هنوز مقداری «دهش»<sup>۱</sup> در این فنر وجود خواهد داشت به گونه‌ای که برای توپ امکان‌پذیر می‌باشد که در موقعیت کمتر پایدار، نزدیک‌تر به دیواره دیگر، استقرار یابد. این آن چیزی است که در فیزیک کوانتوم به نام «چاه انرژی پتانسیل دو گانه» نامیده می‌شود و با وضعیت پروتون کد کننده در رشته DNA انطباق می‌یابد به این صورت که چاه سمت چپ در تصویر مربوط به جایگاه طبیعی پروتون است و چاه سمت راست مربوط به موقعیت همسان‌پار (توتومری) نادرتر

---

<sup>1</sup> Give

می‌باشد. به شکل کلاسیک، گرچه پروتون اکثراً در چاه سمت چپ یافت خواهد شد ولی چنانچه انرژی کافی‌ای از یک منبع بیرونی دریافت کند، گاهی در سوی دیگر (همسان‌پار) یافت می‌گردد. ولی این پروتون همیشه در یک چاه یا سوی دیگر یافت خواهد شد.



شکل ۲۱: پروتون مربوط به یک پیوند هیدروژن که دو مکان باز DNA ای را اتصال می‌دهد را می‌توان به صورتی بر روی دو فنر در نظر گرفت که از یک سو به سوی دیگر می‌تواند نوسان کند. این دارای دو مکان محتمل پایدار است که در اینجا به صورت یک چاه دو گانه انرژی، مدل‌سازی شده است. چاه سمت چپ (مربوط به موقعیت غیرجهش یافته است) مقداری از چاه سمت راست (موقعیت همسان‌پار) ژرف‌تر است و بنابراین پروتون ترجیح می‌دهد که در سمت چپ بنشیند.

با این وجود، مکانیک کوانتومی این اجازه را به پروتون می‌دهد که خود به خودی از مانع تونل‌زنی کند؛ حتی اگر انرژی کافی برای این که

به سختی به بالا رود نداشته باشد چون که ضرورتاً به ضربه نیاز ندارد. نه تنها این موضوع بلکه این پروتون می‌تواند در یک برهم‌نهی<sup>۱</sup> دو حالت مکانی (چاه‌های سمت راست و چپ)، به صورت هم زمان باشد.

مسلماً، ترسیم یک تصویر، از نوشتن یک مدل ریاضی ساده‌تر است که بتواند به صورت دقیق وضعیت را توصیف کند. برای درک رفتار پروتون ما نیاز داریم شکل چاه پتانسیل یا سطح انرژی را به شکل خیلی دقیقی ترسیم کنیم. این یک چیز بی‌اهمیت و جزئی‌ای نیست زیرا شکل دقیق به بسیاری از متغیرها بستگی دارد. نه تنها پیوند هیدروژنی بخشی از یک ساختار پیچیده و بزرگ DNA متشکل از صدها یا حتی هزاران اتم است بلکه ملکول DNA در حمام گرم ملکول‌های آب و دیگر مواد شیمیایی درون سلولی غوطه‌ور است. افزون بر این، ارتعاشات ملکولی، نوسانات حرارتی، واکنش‌های شیمیایی که با آنزیم‌ها آغاز می‌شوند و حتی تابش ماوراءبنفش یا یونیزان همگی می‌توانند بر رفتار پیوند DNA، هم به صورت مستقیم و غیرمستقیم، اثر بگذارند.

یک رهیافت برای چیرگی بر این سطح از پیچیدگی توسط ادم گادبیر<sup>۲</sup> برگزیده شد که دانشجوی الخلیلی در مقطع Ph.D. بود. این روش شامل استفاده از یک رهیافت قوی ریاضیاتی بود که اکنون در میان فیزیکدانان و شیمیدانان برای مدل‌سازی ساختارهای پیچیده رایج است

---

<sup>1</sup> Superposition

<sup>2</sup> Adam Godbeer

و «نظریهٔ تابعی چگالی» (DFT)<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. این نظریه امکان محاسبهٔ شکل انرژی پیوند هیدروژنی را به شکل خیلی دقیقی با لحاظ نمودن تا آنجا که ممکن است اطلاعات ساختاری جفت باز DNA ای که به شکل محاسباتی انجام می‌شود، فراهم می‌سازد. تصور کنید که وظیفهٔ DFT فراهم آوردن یک نقشه از همهٔ نیروهای اعمالی بر پیوند هیدروژن به دلیل کشش، فشاردن و جنبیدن اتم‌های محیط DNA باشد. این اطلاعات سپس برای محاسبهٔ شیوه‌ای که تونل‌زنی پروتون در طی زمان رفتار می‌کند، استفاده می‌گردد. بغرنجی موضوع افزودن این است که حضور اتم‌های محیطی DNA و ملکول‌های آب به صورت پیوسته بر رفتار پروتون و توانایی تونل‌زنی آن از یک رشته DNA به رشتهٔ دیگر اثر می‌گذارد. اما این اثر دائم محیط خارجی را نیز می‌توان در معادلات مکانیک کوانتومی وارد نمود.

محاسبات گادبیر این را ارائه می‌دهد که گرچه برای دو پروتون این امکان وجود دارد تا از جایگاه‌های همسان‌پاری خودشان در پیوند A-T تونل‌زنی کنند، احتمال انجام این کار آن‌ها ناچیز است؛ با این وجود، کار مدل‌سازی محاسباتی بیشتری لازم است تا انجام شود. اما آن چه که مدل‌های نظری نشان می‌دهند آن است که کنش محیط اطراف در درون سلول به صورت فعال، بیشتر از این که مانع شود، به فرایند تونل‌زنی یاری می‌رساند. ما اکنون پیرامون پیوند میان مکانیک کوانتومی و ژنتیک چه

---

<sup>۱</sup> Density Functional Theory (DFT)



گمانه‌زنی‌ای می‌توانیم داشته باشیم؟ از آنجا که کد ژنتیکی ما با ذرات کوانتومی نوشته می‌شود، تا کنون مشاهده کرده‌ایم که این برای وراثت، بنیادی می‌باشد. درست همان گونه که اروین شرودینگر پیش‌بینی کرد، ژن‌های کوانتومی ساختار و عمل کلاسیک هر میکروب، گیاه و جانوری که تا کنون زیسته است را کد گذاری می‌کنند. این تصادفی یا بی‌ربط نیست زیرا نسخه‌برداری با پایبندی بالا ژن‌ها، چنانچه آن‌ها ساختارهای کلاسیک بودند، به سادگی انجام نمی‌پذیرفت. ماهیت کوانتومی ژن‌ها به موجودات این اجازه را می‌دهد که صادقانه و با پایبندی بالایی ژنوم خودشان را در طی میلیون‌ها سال و در واقع میلیاردها سال از زمانی که حیات در کرهٔ خاک شکل گرفت، نسخه‌برداری کنند. در واقع، چنانچه میلیاردها سال پیش، نیرنگ کد گذاری اطلاعات در قلمروی کوانتوم «کشف» نمی‌شد، امکان بقاء و تکامل بر روی زمین وجود نمی‌داشت.

### فراگرد کلی و نتیجه‌گیری

اخیراً، پراکنش آرام‌سازی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای<sup>۱</sup> (NMR) با موفقیت برای تصویرسازی بازهای همسان‌پار در DNA به کار برده شده است و تعادل دینامیک آن‌ها مورد پژوهش قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که ناهم‌جورهای همسان‌پار (توتومر) با وجود طول حیات کوتاه‌شان و جمعیت نسبتاً کمی که دارند ممکن است نقش جامع و مهمی

<sup>1</sup> NMR relaxation dispersion

در همانندسازی، رونویسی و ترجمه خطاها داشته باشند. فرایند همانندسازی شامل جابه‌جاسازی پروتون‌ها می‌باشد که ذرات زیراتمی بوده و از قوانین مکانیک کوانتومی تبعیت می‌کنند. در سال ۱۹۶۳، پر اولاف لودین<sup>۱</sup>، پیشنهاد داد که تونل‌زنی کوانتومی می‌تواند گذار به اشکال کمتر مطلوب همسان‌پار از لحاظ انرژی را تسهیل نماید. به شکل ویژه، او پیشنهاد داد که جفت بازهای واتسون - کرک استاندارد A - T و G - C می‌توانند به A ایمینو - T انول<sup>۲</sup> و G انول - C ایمینو<sup>۳</sup>، به ترتیب از طریق تونل‌زنی پروتون از میان پیوندهای هیدروژنی هر جفت باز تبدیل شوند (شکل‌های ۲۲ ج و د). چنانچه دو رشته جدا شوند در حالی که بازهای DNA در اشکال همسان‌پار خودشان باشند، آن‌گاه آن‌ها می‌توانند سپس هنگامی که به عنوان الگو در دور بعد همانندسازی عمل می‌کنند، منجر به جهش در ژن‌ها شوند.

فرضیه لودین موجب برانگیخته شدن گستره‌ای از مطالعات محاسباتی شد و هنوز به عنوان حوزه‌ای بسیار فعال در پژوهش‌های کوانتومی پابرجا مانده است. افزون بر این، نیم قرن پس از فرضیه لودین، دانش ما از این که چگونه همانندسازی DNA سلول‌های زنده انجام می‌شود، بی‌اندازه رشد یافته است. DNA پلی‌مراز یکی از ده آنزیم ضروری و دیگر پروتئین‌های درگیر در همانندسازی DNA است که مجموعاً

<sup>1</sup> Per-Olov Löwdin

<sup>2</sup> Amino-T enol

<sup>3</sup> G enol - C imino

رپلیزوم<sup>۱</sup> را شکل می‌دهند. این‌ها شامل آنزیم هلیکاز<sup>۲</sup> DNA است که مارپیچ دوگانه DNA را با جداسازی دو رشته باز می‌کند و می‌تواند بالقوه نیز بازهای همسان‌پار متصور شده توسط لودین را جدا نماید. با این وجود، همسان‌پاری می‌تواند موجب جهش نقطه‌ای خودبه‌خودی شود؛ اگر که این پدیده در درون جایگاه فعال DNA پلی‌مراز رخ دهد زیرا این گونه ناهمجوی بازها می‌توانند ترکیب ساختاری مانند واتسون-کریک را به خود گیرند و بدین سان می‌توانند پلی‌مراز را به اشتباه انداخته تا به شکل اشتباهی آن را در هنگام همانندسازی در رشته DNA ادغام نماید (شکل ۲۲). در هر صورت، چنانچه این ناهمجوی گذرا مانند G.T انول (شکل ۲۲ پایین سمت چپ) یا T.G انول (شکل ۲۲ پایین سمت راست) در درون جایگاه فعال یک پلی‌مراز رخ دهد، ترکیب شبه واتسون-کریک می‌تواند از مکانیسم‌های بازرسی به پایبندی<sup>۳</sup> DNA گریز جسته و موجب جهش نقطه‌ای خودبه‌خودی شود. در هر صورت، مطالعات بیانگر آن هستند که انتقال پروتون در میان بازهای ناهم‌جور در جایگاه فعال پلی‌مراز رخ می‌دهد. این مطالعات جدید که در سال ۲۰۲۰ توسط رانگادورال<sup>۴</sup> انجام گرفت، گستره دینامیک گذار میان یک شکل نیست و بازهای شبه واتسون-کریک G.T در مارپیچ دوگانه DNA را توسط تکنیک پراکنش آرام‌سازی NMR در هر دوی H<sub>2</sub>O و D<sub>2</sub>O مورد کاوش

---

<sup>1</sup> Replisome

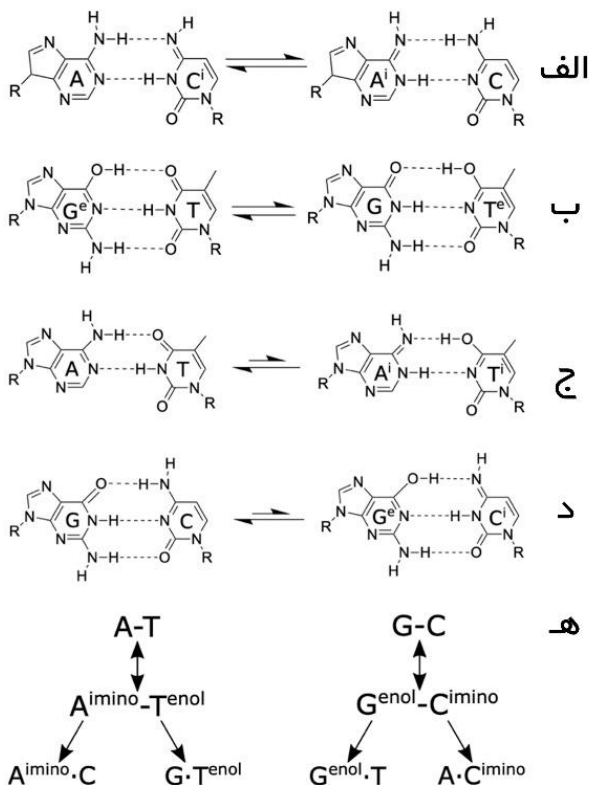
<sup>2</sup> DNA helicase

<sup>3</sup> Fidelity checkpoints

<sup>4</sup> Rangadural

قرار دادند و گزارش کردند که «اثر کینتیک ایزوتوپی» سه برابر در  $D_2O$  به نسبت  $H_2O$  آهسته‌تر بود. این نتیجه، اولین شاهد تجربی را در حمایت از درگیر بودن حالت گذار همسان‌پاری در انتقال پروتون، فراهم آورد. اما پیش از این که «اثر کینتیک ایزوتوپی» مشاهده شده را بتوان به تونل‌زنی پروتون منتسب نمود، آزمایشات تکمیلی می‌بایست انجام گیرد تا وابستگی حرارتی آن را اندازه‌گیری نمایند.

در جدیدترین پژوهش که توسط گروه الخلیلی در مجله فیزیک - شیمی و شیمی - فیزیک سال ۲۰۲۱ به چاپ رسید این گروه نقش تونل‌زنی کوانتومی را در جهش‌های DNA با استفاده از پیشرفته‌ترین شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای انجام دادند و این گروه نشان داد که تحت بعضی از شرایط، اتم‌های هیدروژن که یکپارچگی ساختاری رشته‌های دو گانه DNA را فراهم می‌سازند می‌توانند مانند موج‌های پراکنش یافته رفتار نمایند و بدین سان می‌توان گاهی اتم‌های هیدروژن را در رشته‌اشتباهی DNA یافت؛ یا به زبان دیگر، در حالتی که ژن جهش یافته است. اما آن چه که مهم است این گروه آشکار نمود این جهش‌ها گرچه طول حیات کوتاهی دارند ولی می‌توانند در مکانیسم‌های همانندسازی DNA در درون سلول بقاء یافته و پیامدهای بالقوه مهمی بر سلامت داشته باشند. همچنین همین گروه این را مورد تأیید قرار دادند که تونل‌زنی کوانتومی در DNA نیز در حرارت اتاق انجام می‌پذیرد.



شکل ۲۲ - الف و ب) فرضیه واتسون - کریک در مورد جهش‌زایی خودبه‌خودی: ناجورهای مشابه واتسون - کریک  $A \bullet C$  و  $G \bullet T$  که هندسه جفت بازهای واتسون - کریک استاندارد را حفظ کرده و می‌توانند به جهش‌های نقطه‌ای خودبه‌خودی منجر شوند. (ج - ه)، فرضیه لودین در مورد جهش‌زایی خودبه‌خودی: یک فرآیند تونل‌زنی، جفت بازهای استاندارد را به پروتون دوتایی جفت بازهای همسان‌پار تبدیل می‌کند که در هنگامی که به عنوان الگو در دور بعدی همانندسازی عمل می‌کنند، می‌توانند جهش‌زا باشند.

هنوز مانده است تا به این پرسش که چگونه اثرات کوانتومی در درجه حرارت اتاق رخ می‌دهند، به شکل جامعی پاسخ داده شود. سامانه‌های کوانتومی نیاز دارند که از جهان کلاسیک فیزیکی ایزوله شوند و عواملی مانند انحراف در درجه حرارت مسلماً موجب ناهمدوسی<sup>۱</sup> کوانتومی می‌گردد. در یک فراگرد کلی، همانندسازی DNA برای همهٔ حیات ضروری بوده و نقش مرکزی‌ای دارد. اثرات مکانیک کوانتومی ممکن است در حالت چشمگیری از کارآمدی و سرعت در درون ارگانسیم‌های زنده در سطح DNA درگیر باشند و در خلق جهش‌ها که پیش‌ران تکامل زیستی هستند نقش حیاتی‌ای را ایفا نمایند. با وجود توسعه‌های خارق‌العاده که تا کنون در درک تئوریک ما به وجود آمده‌اند و توانمندی‌های محاسباتی و تکنیکی فرا پیشرفته که در دسترسمان است اما تلاش‌های مضاعفی نیاز است انجام شوند تا بتوان به یک نتیجه‌گیری جامع پیرامون فرضیه‌های زیست‌شناسی کوانتومی، به ویژه در مورد نقش پدیده‌های مکانیک کوانتومی در جهش‌زایی، نایل شویم.

---

<sup>1</sup> Decoherence

فصل هشتم

# هوشیاری کوانتومی





آیا مطالعه پدیده هوشیاری در قلمروی علوم طبیعی است یا در حوزه فلسفه یا حتی متافیزیک جای می‌گیرد؟ در اوایل قرن بیست و یکم از آن چه که در مقاله<sup>۱</sup> پر استناد کریستف کوخ<sup>۱</sup> و کلاوس هپ<sup>۲</sup> برمی‌آید یک دوگانگی و جدایی میان فیزیکدانان از یک سو و دانشمندان علوم اعصاب و زیست‌شناسان اعصاب از سوی دیگر وجود داشت تا به جایی که دانشمندان قلمروی زیست‌شناسی منکر ارتباط میان جهان کوانتوم و فعالیت‌های برتر مغز مانند هوشیاری بودند و تلاش نمی‌کردند تا مفاهیم فیزیک کوانتومی را درک کنند. این در حالی است که در ادامه هزاره جدید، دانشمندان آرام آرام به نقش همبسته بودن علوم زیستی با فیزیک کوانتومی پی برده‌اند تا بتوانند بسیاری از پدیده‌های پر رمز و راز انسان را توضیح دهند.

هوشیاری نیز از مقولات پر رمز است و بسیار دشوار است تا بتوان آن را شناخت. خود مکانیک کوانتومی نیز بسیار اسرارآمیز جلوه می‌کند و درک آن دشوار است، بنابراین مسلماً این دو به طریقی به یکدیگر وابسته هستند. زیست‌شناسی کوانتومی به عنوان یک رشته نوپدید به آرامی در پاسخ به چالش‌های مهم و به دشواری قابل درک، مانند پدیده فتوسنتز، انرژی زیستی، بینایی، بویایی، ناوبری پرندگان و غیره جایگاه خود را یافته است. با این وجود، بزرگترین چالش در عرصه زیست‌شناسی، پاسخ به این

---

<sup>1</sup> Christof Koch

<sup>2</sup> Klaus Hepp

موضوع است که چگونه مغز کار می‌کند و به ویژه چگونه رفتار هوشیارانه از ساختار و عملکرد مغز پدید می‌آید و این که اجزاء سلولی و زیرسلولی هوشیاری کدامند؟ از این رو، جای شگفتی نیست که علاقه فزاینده‌ای به سوی این میل کرده است که جستجو شود آیا زیست‌شناسی کوانتومی می‌تواند در درک مکانیسم‌های فیزیولوژیک که سیستم اعصاب مرکزی را سامان می‌دهند، نقشی داشته باشد؟ به ویژه رفتارهای عالی‌تر مغز مانند هوشیاری<sup>۱</sup> و شناخت<sup>۲</sup>.

این هوشیاری است که به ما این اجازه می‌دهد تا ذهن<sup>۳</sup> ما توسط ایده‌ها و مفاهیم و نه فقط تحریکات حسی، شکل گیرد. ایده‌ها نمایانگر اطلاعات پیچیده‌ای هستند که در ذهن هوشیار ما به یکدیگر می‌پیوندند و مفاهیمی که برای ما معنا می‌یابند را شکل می‌دهند. اما چگونه اطلاعات پیچیده در ذهن هوشیارمان با یکدیگر تلاقی می‌کنند و می‌چسبند تا یک ایده شکل گیرد مثل ایده‌ای که «دانش» یک واژه است، حل یک مسئله یا درک یک گل سرخ. این پرسش از منظر اولین معمای هوشیاری بر می‌خیزد که اغلب با عنوان «مسئله همبندی<sup>۴</sup>» نامیده می‌شود: یعنی چگونه اطلاعات کد گذاری شده در مناطق جداگانه مغز ما در ذهن هوشیارمان به یکدیگر می‌پیوندند. نکته مهم این است که در ۱۰۰ میلیارد سلول عصبی مغز انسان که گستره‌ای از جریان حسی از محیط اطراف را

---

<sup>1</sup> Consciousness

<sup>2</sup> Cognition

<sup>3</sup> Mind

<sup>4</sup> Binding problem

برمی‌گیرد تا هوشیاری ما را از یک جسم یا پدیده شکل دهد، جایی برای آن یافت نشده است. این مسئله ذهن - مغز<sup>۱</sup>، از رازهای کشف نشده است؛ نه قشر خاکستری مغز که آناتومی آن را می‌توان در هنگام جراحی مغز مشاهده کرد و نه فعالیت الکتریکی کورتیکال که توسط الکتروانسفالوگرافی (EEG) ثبت می‌شود، مشابه تجربه هوشمندانه بصری برآمده از مشاهده یک گل سرخ می‌باشند (شکل ۲۳). این همان مسئله توصیف ارتباط میان مغز قابل رؤیت در هنگام جراحی و ذهن غیرقابل مشاهده است که افکار فلاسفه را قرن‌ها به خود مشغول داشته است. بی‌شک، فرمول‌بندی «مسئله همبندی» بیشتر در قالب ایده‌ها تا گمان‌های حسی، ما را به مسئله برجسته هوشیاری نزدیکتر می‌کند. این خود معمایی است که چگونه ایده‌ها می‌توانند ذهن و بدین سان بدن را به حرکت در آورند.

دقیقاً «هوشیاری» چیست و چگونه با ماده مغزمان در برهم‌کنش قرار می‌گیرد تا اجزاء بدن مان را به حرکت در آورد؟ این همان معمای سترگی است که به «مسئله ذهن - بدن<sup>۲</sup>» یا «مسئله سخت<sup>۳</sup>»، در گستره هوشیاری معروف است و مسلماً اسرارآمیزترین مسئله در همه وجودمان است. در این بخش از نوشتار، ما در جستجوی آن هستیم تا ببینیم آیا مکانیک کوانتومی می‌تواند پاسخی به این راز ژرف داشته باشد. در واقع

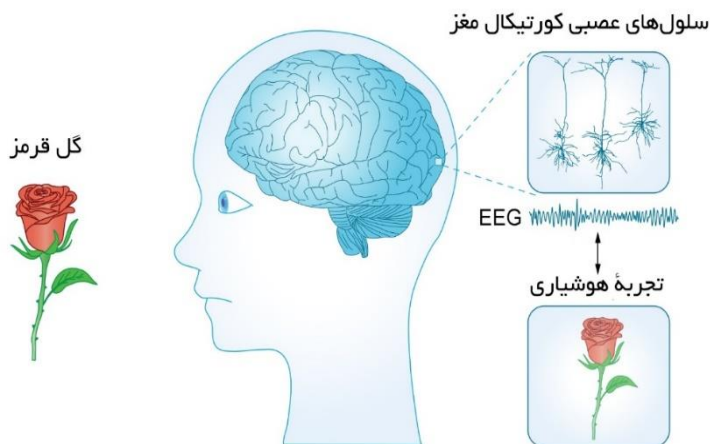
---

<sup>1</sup> Mid-brain

<sup>2</sup> Mind-body problem

<sup>3</sup> Hard problem

ما این را جستجو می‌کنیم که نقش اثرات کوانتومی را در مکانیسم‌های ساختاری که به واسطه آن‌ها مغز فعالیت‌های یکپارچه خود را شکل می‌دهد، دریابیم. از آنجا که «هوشیاری» به ماده فیزیکی به شکل ارگانیسم زنده و به ویژه مغز انسان نیاز دارد، زیست‌شناسی کوانتومی به نظر می‌آید که یک پیوند طبیعی میان فیزیک کوانتومی و تئوری کوانتومی هوشیاری ایجاد می‌کند. این در حالی است که مکانیک فیزیک کلاسیک چهارچوب مناسبی در قلمروی هوشیاری نیست تا بتواند به شکل جامعی آن را آشکار نماید.



شکل ۲۳: مسئله مغز - ذهن: نه قشر خاکستری مغز که آناتومی آن را می‌توان در هنگام جراحی باز جمجمه مشاهده کرد و نه فعالیت الکتریکی کورتیکال که توسط الکتروانسفالوگرافی (EEG) ثبت می‌گردد، مشابه تجربه هوشیاری دیداری برانگیخته شده با مشاهده یک گل سرخ است. توصیف ارتباط فیزیکی میان مغز قابل مشاهده و ذهن غیرقابل مشاهده برای قرن‌ها، فلاسفه را به دردسر انداخته است.

پیش از پرداختن به بنیان‌ها کوانتومی نورویست‌شناسی و به ویژه مسئله «هوشیاری»، لازم است در سه بخش بنیادی مورد لزوم برای فهم پیوند فیزیک کوانتومی با زیست‌شناسی عصبی، نگاهی گذرا داشته باشیم. یکی از آن‌ها، مفاهیم پایه در فیزیک کوانتومی است که در بخش دوم این نوشتار به آن‌ها پرداختیم ولی در اینجا نیز به صورت چکیده ارائه خواهند شد، دومین بخش بنیادی ضروری، آشنایی با ساختار آناتومیک و فیزیولوژی سیستم اعصاب و انتقال پیام‌های عصبی بر پایه الکتروفیزیولوژی است و سومین نیز آشنایی ابتدایی با مفهوم «کیوبیت» است:

الف/ تئوری کوانتوم، بنیادی‌ترین تئوری ماده است که تا کنون مطرح شده است. سه سطح اصلی بیان کوانتوم با گستردگی‌ای که متغیرهای پیوسته فیزیک کلاسیک به متغیرهای مجزا تبدیل می‌شوند (و به زبان دیگر کوانتیده می‌گردند)، تعیین می‌گردد. مکانیک کوانتومی اولین تئوری کوانتیده و نیمه کلاسیک فیزیک است که در آن خصوصیات ذره مجزا بوده ولی ویژگی‌های میدان و برهم‌کنش مجزا نیستند. تئوری میدان کوانتومی<sup>۱</sup>، دومین تئوری کوانتیده است که در آن همه ویژگی‌های ماده، ویژگی میدان و برهم‌کنش‌ها، مجزا هستند، به جز گرانش. گرانش کوانتومی<sup>۲</sup>، تئوری نیمه تمام سوم است که در آن گرانش نیز مجزا است. در فیزیک کوانتومی، اجسام، هم منظر موجی بودن و هم ذره‌ای دارند که

---

<sup>1</sup> Quantum field theory

<sup>2</sup> Quantum gravity

به اصل دوگانگی «ذره - موج» معروف است. تابع موج یک ذره احتمال یافت آن در یک مکان فضایی می‌باشد و بدین سان اطلاعات پیرامون ذره به صورت احتمالی توصیف می‌گردد تا به صورت قطعیتی. توابع موج می‌توانند دچار پراشیدن گردیده و با یکدیگر برهم‌کنش نموده و برهم‌نهی<sup>۱</sup> ایجاد کنند. این اشاره به آن است که ذرات کوانتومی در مکان‌ها و حالات فضایی چندگانه به صورت همزمان می‌توانند وجود داشته باشند. هنگامی که یک اندازه‌گیری انجام می‌شود، یکی از حالات چندگانه برگزیده شده و برهم‌نهی کوانتومی حالات به اتمام می‌رسد و به حالت کلاسیک، در فرایندی به نام «فروپاشی تابع موج»، قرار می‌گیرد. منظر دیگر تئوری کوانتومی این است که در هنگامی دو اندازه‌گیری متوالی بر جفت متغیرهایی به نام متغیرهای مکمل انجام می‌شود، یک محدودیت بنیادی در دقت دو اندازه‌گیری وجود دارد. بدین سان، هیچ حالتی وجود ندارد که دو متغیر مکمل را بتوان هم زمان با دقت انتخابی‌ای تعریف نمود. این ویژگی به نام اصل عدم قطعیت هایزنبرگ معروف است. این اصل بیان عدم توانایی ذاتی تعیین همزمان مقادیر دو جزء فیزیکی مکمل می‌باشد؛ برای مثال، زاویه و گشتاور چرخشی، دو جزء مستقل اسپین و احتمالاً مهمترین، انرژی و زمان که آکنده از عدم قطعیت می‌باشند.

هنگامی که مکانیک کوانتومی با در نظر گرفتن ذرات بنیادی توسعه یافت، کاربردهای بعدی آن به صحت آن در سیستم‌هایی از ذرات فراوان

---

<sup>1</sup> Superposition

مانند آن چه که در فیزیک ماده چگالیده برخورد می‌کنیم، امتداد یافت؛ مانند توصیف هدایت الکترونی «دریا»، اکسیتون‌ها و غیره. این موضوع از لحاظ اهمیت بالقوه اثرات کوانتومی در زیست‌شناسی و نیز در «هوشیاری»، بسیار مهم است؛ یعنی جایی که نه تنها سیستم‌هایی از ذرات فراوان در نظر گرفته می‌شوند بلکه آن‌ها در مقایسه با فیزیک کوانتومی در درجه حرارت بالا عمل می‌کنند. گونه‌های سیستم‌های کوانتومی بسیار تنه‌ای<sup>۱</sup>، مطالعه شده با فیزیک ماده چگالیده، از خودشان ویژگی‌های فیزیکی ماکروسکوپیکی به نام برانگیخته‌های جمعی<sup>۲</sup> نشان می‌دهند. یک سیستم از ذرات فراوان تحت شرایط خاص را می‌توان نه تنها به توابع موج واحد برای هر ذره جدا نمود بلکه با تابع موج واحدی تعریف کرد و بدین طریق رفتار جمعی این سیستم توصیف می‌شود. این ویژگی فیزیکی به نام همدوسی کوانتومی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود و با ذرات واحدی که هویت‌های جداگانه‌شان را از دست می‌دهند، مشخص می‌گردد؛ به گونه‌ای که همه سیستم به صورت یک کل عمل می‌کند.

ذراتی که زمانی در یک حالت کوانتومی مشترک بودند حتی در مسافت طولانی از یکدیگر نیز به صورت پیوسته با یکدیگر، پابرجا می‌مانند. اندازه‌گیری بر روی یک ذره موجب فروپاشی کل تابع موجی برای سیستم می‌شود که منجر به یک اثر فوری برای همه ذرات می‌گردد که فرقی

---

<sup>1</sup> Many-body systems

<sup>2</sup> Collective excitations

<sup>3</sup> Quantum coherence

نمی‌کند چقدر از لحاظ فضایی از یکدیگر دور باشند. این برهم‌کنش در ورای مسافت به «برهم‌تنیدگی کوانتومی غیرمکانی»<sup>۱</sup> ارجاع می‌گردد. ناهمدوسی<sup>۲</sup> هنگامی رخ می‌دهد که یک سیستم با محیط اطرافش به شیوه‌ای غیربازگشت از لحاظ ترمودینامیکی برهم‌کنش می‌کند که منجر به ذرات گوناگون در برهم‌نهی کوانتومی می‌شود که دیگر نمی‌توانند با یکدیگر تداخل کنند.

در هر صورت، در زمینه ارتباط زیست‌شناسی به عنوان یک موجودیت کلاسیک با جهان کوانتومی، یک بحث عمده وجود دارد که علت آن این است نمی‌توان هنوز یک مکان دقیق مرزی از لحاظ «اندازه» و «درجه حرارت» میان آن دو برقرار نمود. بنابراین، گسترش مکانیک کوانتومی به ماده زیست‌شناسی شامل فرایندهای شناختی و «هوشیاری»، یک چالش عمده دارد. با این وجود، باید این را به خاطر سپرد که «طبیعت»، میلیون‌ها سال راه تکامل پیموده است و شماری بی‌اندازه از تکرار تجربیات را در توشه دارد تا برای مشکلات دشوار، راه‌حل‌های مربوط به خود را فراهم سازد.

ب/ مغز انسان یک سازمان پیچیده‌ای از بافت عصبی است که تقریباً  $10^9 \times 86$  سلول عصبی دارد. سلول‌های عصبی (نرون‌ها) مسئول فعالیت الکتریکی مغز هستند و با سلول‌های گلیال<sup>۳</sup> که تعدادی از عملکردها را

<sup>1</sup> non-local quantum entanglement

<sup>2</sup> Decoherence

<sup>3</sup> Glial



دارند مورد حمایت قرار می‌گیرند. مادهٔ خاکستری اصولاً از جسم سلولی و مادهٔ سفید عمدتاً از اکسون‌های میلین‌دار است که امکان انتقال پیام‌ها را فراهم آورده و پیوند یافتگی بخش‌های مغز را موجب می‌شوند. مغز یک شبکه است که به برهم‌کنش اجزاء تشکیل دهندهٔ آن وابسته است؛ بدین سان، تعیین عملکرد خاصی به یک بخش ویژه، یک ساده انگاری است. اما مغز برای اهداف طبقه‌بندی، اغلب به بخش‌های جزء و زیرجزء تقسیم می‌شود. هر چند که علوم اعصاب در درک این که چگونه مغز کار می‌کند به پیشرفت‌هایی دست یافته است اما گستره‌های بی‌پاسخ بزرگی وجود دارند که بی‌شک بینش‌های برخاسته از کوانتوم می‌توانند بسیاری را پاسخگو باشند.

چالش اصلی آن است که چگونه مادهٔ مغز شامل شبکهٔ سلول‌ها و فرایند پیام‌دهی که اعصاب مرکزی و سامانه‌های مربوطه را می‌سازند، منجر به پدیدهٔ هوشیاری می‌شوند. چالشی که ما سعی خواهیم کرد در ادامه بر پایهٔ تعدادی از تئوری‌های مطرح، از زاویهٔ دید زیست‌شناسی کوانتومی، به آن‌ها بنگریم؛ به ویژه از این منظر که هم اکنون متخصصین علوم اعصاب بر این باورند که دوگانگی «بدن و ذهن» وجود ندارد و هر دو یک چیز هستند و کم‌کم این دیدگاه در حال شکل گرفتن است که «هوشیاری» یک پدیدهٔ مکانیک کوانتومی است. راجر پنروز<sup>۱</sup> در کتاب معروف خود تحت عنوان «ذهن نوین امپراطور» در سال ۱۹۸۹ بیان نمود

---

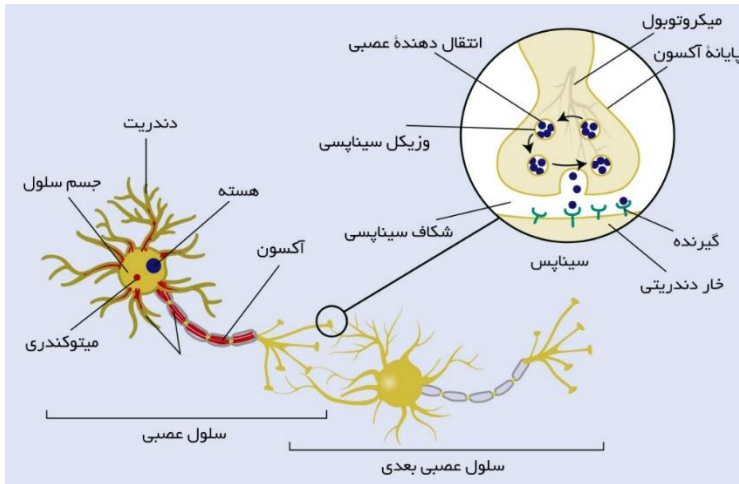
<sup>۱</sup> Roger Penrose

که ذهن انسان یک «رایانه کوانتومی» است. در واقع در میان ورودی‌های حسی و برون‌داده‌های حرکتی، «شبکه عصبی مغز»<sup>۱</sup> قرار دارد که محاسباتی را انجام می‌دهد تا تصمیمی صادر شود آیا برون‌داد به صورت یک حرکت باشد یا خیر، تا عملی انجام شود. هر چند این تصویرسازی از مرکز، بسیار پیچیده به نظر می‌آید اما از دیدگاه مکانیک کوانتومی این گونه نگاه به مغز ساده بوده و پیچیدگی آن به مراتب خارق‌العاده‌تر است. در اینجا سزاوار است که نگاهی نیز به سلول‌های عصبی داشته باشیم زیرا جزء تشکیل دهنده اصلی دستگاه اعصاب مرکزی می‌باشند و سلول‌های کشیده جسم سلولی، دندریتها و اکسون‌ها را شامل هستند. یک شبکه پیچیده‌ای از سلول‌های عصبی در سراسر بدن امکان انتشار اطلاعات را فراهم می‌سازند و این کار با تحریک شدن و عدم تحریک سلول‌های عصبی، تسهیل می‌گردد که با پتانسیل عمل سلول عصبی سنجیده می‌شود (شکل ۲۴).

برای این که یک سلول عصبی تحریک شود پتانسیل استراحت سلول نیاز دارد به یک آستانه نایل شود. این توسط گرادیان الکتریکی یون‌های باردار انتشار یافته در سراسر غشاء سلولی به وجود می‌آید. ارتباط میان سلول‌های عصبی از طریق رهاسازی انتقال دهنده‌های عصبی انجام می‌شود. هنگامی که یک پتانسیل عمل در سراسر یک سلول عصبی انتشار می‌یابد به پایانه اکسون رسیده و باز کردن کانال‌های یونی دروازه‌ای و

<sup>1</sup> The brain's neural network

وابسته به ولتاژ<sup>۱</sup> را برانگیخته می‌سازد که آن‌ها نیز به نوبه خود آگزوسیتوز<sup>۲</sup> یا رهاسازی انتقال دهنده‌های عصبی را در شکاف سیناپسی تحریک می‌کنند.

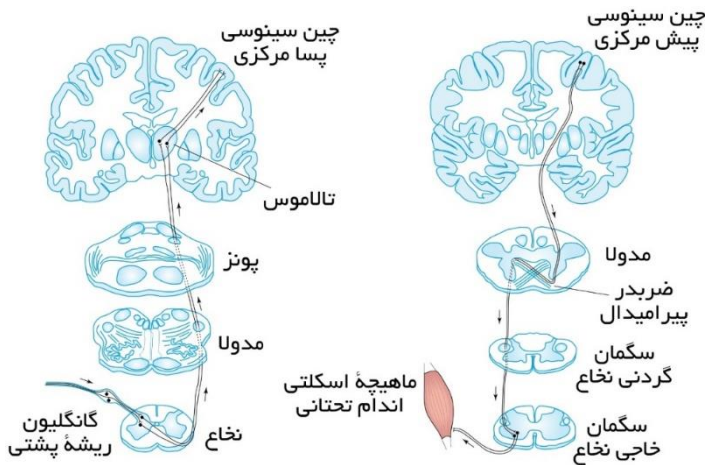


شکل ۲۴: ساختار و عمل یک سلول عصبی

این انتقال دهنده‌های عصبی از شکاف سیناپسی انتشار می‌یابند و به گیرنده‌های ویژه‌ای در خارهای دندریتی متصل می‌شوند و کانال‌های یونی دیگری را باز می‌کنند. یون‌ها اکنون می‌توانند به این سلول عصبی وارد شوند و پتانسیل غشاء را تغییر دهند و یک پتانسیل عمل در سلول عصبی پسا‌سیناپسی را تولید کنند. نتیجه این انتقال پیام عصبی یک کنش حسی یا حرکتی می‌تواند باشد (شکل ۲۵).

<sup>1</sup> Voltage gated ion channels

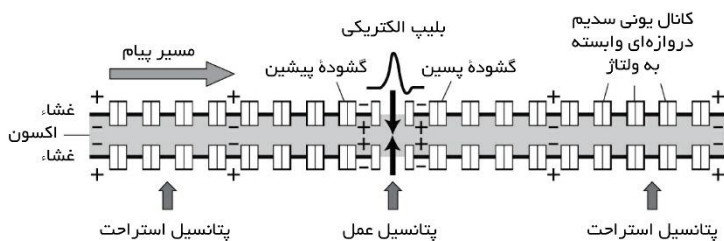
<sup>2</sup> Exocytosis



شکل ۲۵: مسیر حسی تنی، اطلاعات حسی را از بدن به بخش خاکستری حسی تنی در چین سینوسی پسا مرکزی می‌رساند (چپ) در حالی که مسیر حرکتی تنی، اطلاعات حرکتی را از قشر خاکستری در چین سینوسی پیش مرکزی به ماهیچه‌های بدن می‌رساند (راست).

حیات انتقال این پیام عصبی در طول آکسون، همان گونه که اشاره شد به عمل کانال‌های یونی دروازه‌ای وابسته به ولتاژ در غشاء سلول عصبی وابسته است. در حالت استراحت، این غشاء، یون‌های مثبت بیشتری در بیرون غشاء تا درون سلول دارد. با یک تغییر در ولتاژ در نتیجه پتانسیل عمل در بالا دست، باز کردن کانال‌های یونی برانگیخته می‌شود و موجب یورش یون‌های سدیم مثبت می‌گردد یعنی در واقع یک پتانسیل عمل رخ می‌دهد که به درون سلول کشانده شده و به صورت موقت ولتاژ غشاء را معکوس می‌نماید. این آذرخش الکتریکی، باز شدن کانال‌های یونی در پایین

دست را بر می‌انگیزد، این گونه اثر دمی‌نویسی تکانه الکتریکی که طول عصب را تا پایانه آن گذر می‌کند، موجب رهاسازی انتقال دهنده عصبی می‌شود. پس از این که پتانسیل عمل گذر کرد، پمپ‌های یونی موجب بازگشت غشاء سلولی به حالت استراحت در موقعیت طبیعی می‌شوند (شکل ۲۶).



شکل ۲۶: پتانسیل‌های عمل در سراسر آکسون‌ها از طریق کانال‌های یونی دروازه‌ای وابسته به ولتاژ در غشاء سلول عصبی طی مسیر می‌کنند. غشاء در حالت استراحت، غشاء یون‌های مثبت تری در بیرون دارد تا در درون. با این وجود، یک تغییر در ولتاژ در نتیجه پتانسیل عمل بالادستی، باز شدن کانال‌های یونی را برانگیخته خواهد ساخت و یک موج از یون‌های سدیم با بار مثبت (یک پتانسیل عمل) به درون سلول یورش می‌برد و به صورت موقت ولتاژ غشاء معکوس می‌شود. این آذرخش الکتریکی باز شدن کانال‌های یونی پایین دستی را برانگیخته خواهد ساخت، جایی که رهاسازی انتقال دهنده عصبی را برانگیخته می‌سازد. بعد از این که پتانسیل عمل گذشت، پمپ‌های یونی، غشاء را به حالت طبیعی استراحت، بازگشت می‌دهند.

ج/ رایانه‌های الکترونیکی می‌توانند بر پایه کد گذاری رقم دوتایی (بیت)<sup>۱</sup> به صورت یک یا صفر ترتیب داده شوند تا مدارهایی بسازند تا اعمال منطقی را انجام دهند و یا ترکیب شوند و برای عملیات حسابی

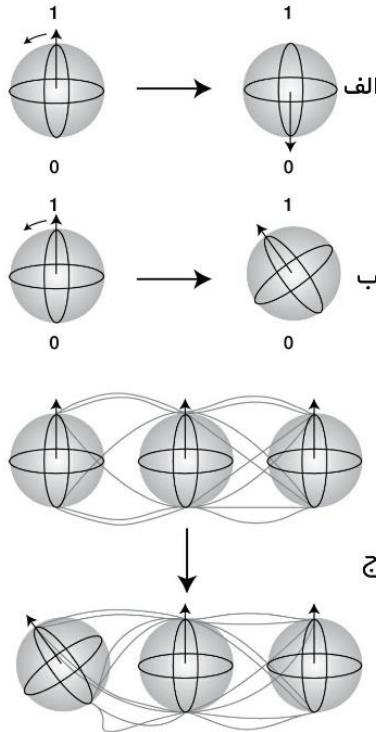
<sup>۱</sup> Binary digit (bit)

مانند جمع کردن و تفریق کردن و یا در واقع باز و بسته کردن دروازه‌هایی که برای سلول عصبی استفاده می‌شوند؛ اما نمی‌توانند پیچیدگی دنیای کوانتوم را با ابعاد همپوشان احتمالاتی آن دنبال نمایند. برای چیرگی بر این مسئله، ریچارد فاینمن، برنده نوبل فیزیک، پیشنهاد محاسبات در جهان کوانتوم با یک رایانه کوانتومی را ارائه داد. برای این که ببینیم که چگونه رایانه‌های کوانتومی کار می‌کنند بد نیست که به «بیت» رایانه‌های کلاسیک به صورت یک قطب‌نمای کروی که سوزن آن (قطب شمال) یا صفر (قطب جنوب) را ممکن است نشانه‌گیری نماید، تجسم کنیم که می‌تواند ۱۸۰ درجه بچرخد و یا در میان دو حالت جابه‌جا شود (شکل ۲۷ الف).

واحد فرآوری مرکزی (CPU) یک رایانه شامل میلیون‌ها از سوئیچ‌های یک بیتی است و بدین گونه، فرایند کل محاسباتی را می‌توان به صورت به کار بردن مجموعه پیچیده‌ای از قوانین سوئیچینگ (الگوریتم‌ها) متصور شد که بسیار فراوان می‌توانند در کره‌ها تا ۱۸۰ درجه به این سو و آن سو بروند. معادل محاسباتی کوانتومی بیت را «کیوبیت»<sup>۱</sup> می‌نامند. این شبیه کره کلاسیک است ولی حرکت آن محدود به ۱۸۰ درجه این سو و آن سو رفتن نیست. در عوض می‌تواند در هر زاویه اختیاری در فضا بچرخد و در منظر مکانیک کوانتومی می‌تواند بسیاری از جهات را همزمان در یک برهم‌نهی همدوسی کوانتومی نشانه برود (شکل ۲۷ ب). این انعطاف فزونی یافته، به یک «کیوبیت» اجازه می‌دهد

<sup>1</sup> Qubit

که اطلاعات بیشتری را از یک بیت کلاسیک، کد گذاری نماید. اما تقویت واقعی توان محاسباتی موقعی ظهور می‌یابد که شما بتوانید کیوبیت‌ها را با یکدیگر کنار هم قرار دهید.



شکل ۲۷ الف) یک بیت کلاسیک سوئیچ کرده از یک به صفر به شکل یک چرخش کره کلاسیک در مسیر  $180^\circ$  درجه‌ای نشان داده می‌شود. (ب) یک کیوبیت سوئیچ کرده به شکل چرخش یک کره در مسیر هر زاویه دلخواهی ممکن است نشان داده شود. (ج) سه کیوبیت همدوس که برهم‌کنش‌های درهم‌تنیده آن‌ها را به شکل رشته‌های فرضی که سطح هر کره را ارتباط می‌دهند، نشان می‌دهد. این تنش بر روی این رشته‌ها پس از چرخش‌ها است که محاسبات کوانتومی را عینیت می‌بخشد.

در حالی که حالت یک بیت کلاسیک اثری بر همسایگانش ندارد، کیوبیت‌ها ممکن است درهم‌تنیده<sup>۱</sup> شوند. همان‌گونه که در بخش اول این نوشتار اشاره شد، درهم‌تنیدگی یک ترتیب کوانتومی از همدوسی است که در آن ذرات کوانتومی فردیت خودشان را از دست می‌دهند و از این رو، آن چه که برای یکی رخ می‌دهد، بر همه آن‌ها اثر می‌گذارد. از منظر محاسبه‌گری کوانتومی، درهم‌تنیدگی را می‌توان یک کره کیوبیتی که با رشته‌های کشسان (الاستیک) به هر کیوبیت دیگری اتصال یافته، به تصویر کشاند (شکل ۲۷ ج). اکنون بگذارید تصور کنیم که ما فقط یکی از این کره‌ها را می‌چرخانیم. بدون درهم‌تنیدگی، چرخش، اثری بر روی کیوبیت‌هایی که در همسایگی قرار دارند نخواهد داشت. اما اگر کیوبیت ما با دیگر کیوبیت‌ها درهم‌تنیده شده باشد آن گاه چرخش، تنش‌ها را در همه رشته‌های اتصالی میان این کیوبیت‌های متصل شده، تغییر می‌دهد. مایه محاسباتی همه رشته‌های درهم‌تنیده به صورت نمایی<sup>۲</sup> با تعداد کیوبیت‌ها فزونی می‌یابد که این به معنای آن است که در واقع با سرعت بسیار بالایی افزایش پیدا می‌کند.

این از یک رایانه کلاسیک بسیار متفاوت است که قدرتش فقط به صورت «خطی» با تعداد بیت‌ها افزایش می‌یابد. برای مثال، با افزودن یک بیت بیشتر به ۸ بیت رایانه کلاسیک، قدرت آن با فاکتور یک هشتم افزوده خواهد شد؛ برای دو برابر شدن قدرت آن، تعداد بیت‌ها می‌بایست دو برابر

<sup>1</sup> Quantum entangled

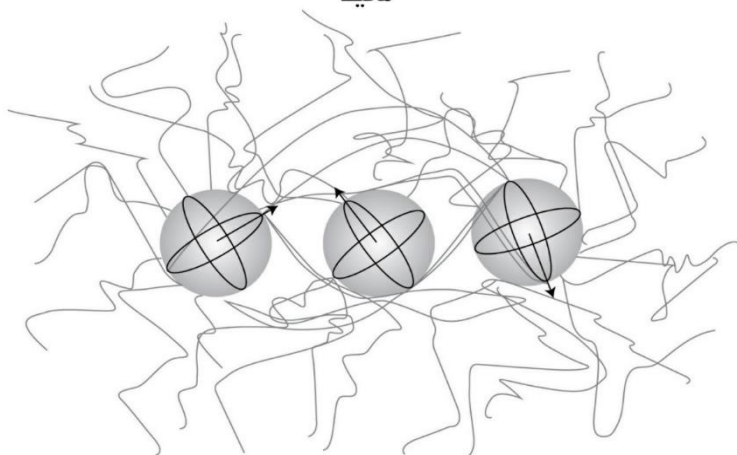
<sup>2</sup> Exponentially



شود. اما به سادگی با افزودن یک کیوبیت به رایانه کوانتومی قدرت آن دو برابر می‌شود. در واقع، اگر یک رایانه کوانتومی می‌توانست همدوسی و تنیدگی را در فقط ۳۰۰ کیوبیت نگه دارد می‌توانست به صورت نمایی شامل فقط ۳۰۰ اتم باشد و می‌توانست برای بعضی از وظایف از یک رایانه کلاسیک در اندازه کل گیتی پیشی گیرد. برای این که رایانه کوانتومی کار کند، کیوبیت‌ها می‌بایست فقط با یکدیگر برهم‌کنش کنند تا محاسبات را انجام دهند (از طریق رشته‌های درهم‌تنیده غیرقابل رؤیتشان). این به معنای آن است که آن‌ها می‌بایست کاملاً از محیط اطرافشان جدا باشند. مسئله این است که هر برهم‌کنشی با جهان بیرون موجب می‌شود که کیوبیت‌ها با محیط اطرافشان درهم‌تنیده شوند که ما می‌توانیم به شکل تشکیل بسیاری رشته‌های بیشتر در ذهن مجسم کنیم، همگی بر کیوبیت‌ها از جهات مختلف کشش می‌آورند، با رشته‌های میان کیوبیت‌ها رقابت کرده و بنابراین با محاسباتی که آن‌ها انجام می‌دهند، تداخل ایجاد می‌کنند. این ضرورتاً فرایند ناهمدوسی است (شکل ۲۸).

رفتار همدوسی کیوبیت‌ها با ظریف‌ترین برهم‌کنش با محیط پراغتشاش پیرامون متوقف می‌شود. به این ترتیب رشته‌های کوانتومی به طور مؤثری از هم جدا می‌شوند و شبیه به بیت کلاسیک و مستقل رفتار می‌کنند. فیزیکدانان کوانتومی، بالاترین سطح تلاش خود را معطوف می‌دارند تا همدوسی را در کیوبیت‌های درهم‌تنیده نگه دارند و این کار را به واسطه سامانه‌های فیزیکی به دقت کنترل شده و بسیار تصفیه شده

## محیط



شکل ۲۸: ناهمدوسی در یک رایانه کوانتومی را می‌توان این گونه تصور نمود که به درهم‌تنیدگی کیوبیت‌ها با یک کلاف از رشته‌های محیطی، به وجود می‌آید. این کنش و ببند در سطح کیوبیت‌ها به این سو و آن سو، آن چنان است که آن‌ها به ارتباطات درهم‌تنیده خودشان، دیگر پاسخ نمی‌دهند.

انجام می‌دهند و کیوبیت‌ها را در معدودی از اتم‌ها کد گذاری کرده و سامانه را تا قسمتی از صفر مطلق سرد نموده و اطراف دستگاه خودشان را با عایق‌بندی گسترده‌ای برای خفه نمودن هر اثر محیطی می‌پوشانند. سلول‌های زنده برای دور نگه داشتن ناهمدوسی، به خوبی تکامل یافته‌اند؛ برای مثال، در پدیده فتوسنتز مشاهده کردیم که چگونه گیاهان ناهمدوسی را از خود دور می‌دارند تا اکسیتون‌ها را در کمپلکس‌های فتوسنتزی یا الکترون و پروتون‌ها را در آنزیم‌ها انتقال دهند. آیا می‌توان مشابه با این پدیده‌ها، ناهمدوسی را در دستگاه اعصاب مرکزی به دور نگه داشت تا

امکان محاسبات کوانتومی در مغز فراهم شود؟ اکنون که پایه‌های ضروری برای فهم ارتباط فیزیک کوانتومی با هوشیاری را دریافتیم به تئوری‌های مطرح در این زمینه می‌پردازیم و به سه تئوری برجسته اشاره می‌کنیم.

### سه تئوری مطرح ارتباط فیزیک کوانتومی با هوشیاری

#### ۱/ گرانس کوانتومی<sup>۱</sup> و هوشیاری کوانتومی

راجر پنروز<sup>۲</sup> (۱۹۸۹، ۱۹۹۴) به ارتباط میان هوشیاری و فیزیک مدرن بر پایه قضیه<sup>۳</sup> «نا تمامیت گودل»<sup>۳</sup> پرداخت. بر اساس این قضیه، هوشیاری انسان غیرالگوریتمی است و از این رو تئوری‌های فیزیکی عملکرد مغز ناکامل هستند زیرا به قوانین الگوریتمیک محاسبه‌پذیر وابسته هستند. از نظر راجر پنروز، اثرات کوانتومی نقش بنیادینی در درک «هوشیاری انسانی» ایفا می‌کنند و این کار را با توانمند نمودن مغز به انجام اعمال غیرمحاسبه‌پذیر<sup>۴</sup> انجام می‌دهند. برای درک بهتر این که چگونه راجر پنروز تئوری خود را بر پایه<sup>۵</sup> «قضیه ناتمامیت گودل» بنیان گذاشت باید به این اشاره نمود که کورت گودل<sup>۵</sup> بر این پافشاری نموده است که هر سامانه<sup>۶</sup> منطقی پیچیده<sup>۶</sup> می‌تواند گزاره‌هایی خلق نماید که درست باشند ولی نمی‌توان این گزاره‌ها را با همان ابزارهایی که برای خلق آن‌ها در

<sup>1</sup> Quantum gravity

<sup>2</sup> Roger Penrose

<sup>3</sup> Godel's incompleteness

<sup>4</sup> Non-computable

<sup>5</sup> Kurt Godel

<sup>6</sup> Logical system complex

هنگامی که نخست از آن‌ها استفاده شدند، برای اثباتشان استفاده کرد. بر اساس همین قضیه، راجر پنروز به این اشاره نمود که رایانه‌های کلاسیک از سامانه‌های منطقی مرسوم (الگوریتم‌های رایانه‌ای) برای ساخت گزاره‌های خودشان استفاده می‌کنند که درست هستند ولی این رایانه‌ها نمی‌توانند آن‌ها را اثبات نمایند. این در حالی است که انسان می‌تواند درستی این گزاره‌های خلق شده با رایانه‌های کلاسیک را که غیراثبات‌پذیر توسط این رایانه‌ها هستند را به اثبات برساند. بر اساس این برهان، مغز انسان در فراتر از یک رایانه کلاسیک عمل می‌کند و از سامانه منطقی پیچیده‌ای در فراتر از الگوریتم‌های موسوم رایانه‌های کلاسیک، مشروب می‌شود؛ زیرا می‌تواند فرایندهای «غیرمحاسبه‌پذیر» را به انجام برساند و بر اساس نظر پنروز این غیرمحاسبه‌پذیری<sup>۱</sup> به چیزی فراتر نیاز دارد چیزی که فقط می‌تواند توسط مکانیک کوانتومی فراهم گردد. بدین سان، بر پایه برهان وی، مغز انسان به یک رایانه کوانتومی نیاز دارد و به زبان دیگر خود مغز همچون یک رایانه کوانتومی عمل می‌نماید.

اما مکان این رایانه کوانتومی در کجای مغز است و با چه سازوکاری عملیات رایانه کوانتومی را انجام می‌دهد. راجر پنروز در ترکیب با اندیشه‌های استوارت همروف<sup>۲</sup>، پروفیسور متخصص بیهوشی و روانشناسی در دانشگاه آریزونا یک سازوکار فیزیکی که مغز بر آن اعمال کوانتومی خود را انجام می‌دهد، معرفی کردند. ساختاری که آن‌ها معرفی کردند

<sup>1</sup> Non-computability

<sup>2</sup> Stuart Hameroff

میکروتوبول‌های<sup>۱</sup> سلول‌های عصبی هستند که نقش «کیوبیت‌های» مغز کوانتومی را بازی می‌کنند. میکروتوبول‌ها، رشته‌های درازی از پروتئین‌هایی به نام توبولین<sup>۲</sup> هستند که می‌توانند حداقل در دو شکل متفاوت کشیده و انباشت شده، بازی کنند و اصولاً می‌توانند به صورت اجسام کوانتومی رفتار کنند که در یک برهم‌نهی هر دو شکل در یک زمان قرار گرفته و نقش «کیوبیت‌ها» را ایفاء نمایند. آن‌ها همچنین فرض بر این گذاشتند که پروتئین‌های توبولین در یک سلول عصبی با پروتئین‌های توبولین، در مقادیری دیگر از سلول‌های عصبی نیز درهم‌تنیدگی<sup>۳</sup> دارند. همان گونه که در فصل دوم این نوشتار اشاره شد، درهم‌تنیدگی «عمل شبح‌وار در یک مسافت» است که اجسام را که از هم دیگر دور هستند به صورت بالقوه به یکدیگر ارتباط می‌دهد. اگر ارتباطات شبح‌وار میان میلیاردها سلول عصبی (نرون‌ها) در یک مغز انسان امکان‌پذیر باشد، آن‌گاه آن‌ها به صورت بالقوه می‌توانند با یکدیگر «همبندی» یافته و همه اطلاعات کد گذاری شده در سلول‌های عصبی که به صورت جداگانه هستند را گرد هم آورند و بدین‌سان «مسئله همبندی»<sup>۴</sup> اطلاعات در مغز را که پیش از این به آن اشاره نمودیم را حل نمایند؛ به زبان دیگر به این طریق آن‌ها می‌توانند ذهن هوشیار را با توانمندی بی‌نهایت خارق‌العاده یک رایانه کوانتومی، فراهم سازند.

---

<sup>1</sup> Microtubules

<sup>2</sup> Tubulin

<sup>3</sup> Entangled

<sup>4</sup> Binding problem

میکروتوبول‌ها بخشی از اسکلت سلولی یوکاریوت‌ها و بعضی از سلول‌های پروکاریوت هستند و در شکل و ساختار سلولی دخالت داشته و عملکردهای فراوانی دارند (مانند نقش در تقسیم سلولی، ساخت دستگاه دوکی که در تقسیم کروموزوم‌ها در سلول‌های دختر عمل می‌کنند و همچنین به عنوان خطوطی عمل می‌نمایند که پروتئین‌های محتویات درون سلولی را حرکت می‌دهند). در تئوری پنروز، میکروتوبول‌های سلول‌های عصبی مطرح می‌باشند و به ویژه آن‌هایی که در بخش دندریت‌ها و سوما (جسم سلولی) سلول‌های عصبی قرار دارند زیرا در این مکان‌ها، میکروتوبول‌ها غیرمنظم آرایه یافته‌اند و این آراستگی حامی فرآوری اطلاعات می‌باشد و از سوی دیگر میکروتوبول‌های این مکان‌ها در سلول‌های عصبی، به واسطه پروتئین‌های همراه، پایدارتر می‌باشند و به این طریق مورد کد گذاری اطلاعات به صورت طولانی‌مدت‌تر (که مورد نیاز ایجاد فرایند هوشیاری است)، قرار می‌گیرند. ترکیب ویژه توبولین نیز جالب است که بخشی از آن از رنگسازهایی همچون تریپتوفان<sup>۱</sup> تشکیل شده است که به شیوه‌ای همانند سیستم‌های فتوسنتزی گیاهان و باکتری‌ها، ترتیب یافته است. شیوه‌ای که می‌تواند اثرات همدوسی کوانتومی را مورد حمایت قرار دهد.

نکته جالب دیگر آن است که بعضی از مواد شیمیایی مانند مواد هوشبر که در بیهوشی عمومی استفاده می‌شوند و ترکیبات ضد افسردگی

<sup>1</sup> Tryptophan

که هر دو در هوشیاری و عملکرد شناختی مؤثرند، میکروتوبول‌ها را شامل می‌شوند. در هر صورت، ایده اصلی این است که میکروتوبول‌ها در سلول‌های عصبی مغز به عنوان رایانه‌های کوانتومی کار می‌کنند و توبولین‌ها به عنوان زیرواحدهای آن‌ها به صورت گذرا در برهم‌نهی کوانتومی دو یا چند حالت (مانند کیوبیت‌ها) قرار دارند؛ از این رو، میکروتوبول‌های درون سلول‌های عصبی برای مغز ساختارهایی فراهم می‌آورند که می‌توانند فروپاشی / فروکاست<sup>۱</sup> تابع موج را از طریق فرآوری اطلاعات کوانتومی هماهنگ‌سازی<sup>۲</sup> کنند.

این اتحاد را پنروز - همروف، «فروکاست عینی هماهنگ شده<sup>۳</sup>» (Orch OR) نامیده‌اند که تئوری آن‌ها به همین عنوان معروف است. بر اساس این تئوری، کیوبیت‌های توبولین در شبکه‌بندی‌های میکروتوبولی توسط درهم‌تنیدگی کوانتومی بی‌مکانی، در نهایت به حالت توبولینی کلاسیک خاصی پس از ۲۵ میلی‌ثانیه یا در همین حدود (در ۴۰ هرتز)، فرو می‌کاهند.<sup>۴</sup> فروکاست‌های حالت کوانتومی ادراک هوشمندانه و گزینش‌های اختیارمندانه‌ای خلق می‌کنند که بر روی برهم‌کنش‌های عصبی، فرمان می‌رانند. این ضرورتاً همان ایده‌ای است که بر آن فرآوری اطلاعات کوانتومی در گستره فناوری، استوار است؛ به جز آن که در این تئوری، کیوبیت‌های پیشنهادی شامل ترکیبات پروتئین توبولین است و

---

<sup>1</sup> Collapse/reduction

<sup>2</sup> Collapse

<sup>3</sup> Orchestrated Objective Reduction (Orch OR)

<sup>4</sup> Reduced

فروکاست/ واپاشی بیشتر به دلیل آستانهٔ عینی خاصی (فروکاست عینی) است تا برهم‌کنش‌های محیطی.

فروکاست عینی یک راه‌حل برای مسئله اندازه‌گیری در تئوری کوانتومی است که برهم‌نهی حالات کوانتومی را به عنوان یک جدایی در واقعیت زمینه‌ای در پایین‌ترین سطح پایهٔ آن لحاظ می‌نماید (مقیاس پلانک<sup>۱</sup>). راه‌حل شامل توصیف یک گرانش کوانتومی حلقوی است که برهم‌نهی‌های تابع موج را به صورت خمش‌های جهات مخالف در فضا - زمان مورد شناسایی قرار می‌دهد و بدین سان یک جدایی در هندسهٔ بنیادین فضا - زمان فراهم می‌آورد. این جدایی‌ها، ناپایدار قلمداد می‌شوند و به یک خمش واحد فضا - زمان در وهله‌ای که به یک آستانهٔ عینی می‌رسد، فرو می‌کاهند. این تئوری، رویداد هوشمندی را به عنوان یک فرآوری اطلاعات کوانتومی می‌انگارد که از طریق فروکاست حالت عینی منتج می‌شود. شرایط زیست‌شناسی در مغز شامل فعالیت سیناپسی در نظر گرفته می‌شوند که بر فرآوری اطلاعات کوانتومی اثر می‌گذارند و بدین سان فروپاشی کیوبیت‌ها را هماهنگ نموده و به رویداد هوشمندی منتهی می‌شود. تئوری Orch OR تلاشی است تا هوشیاری را در دانش‌های تجربی به صورت یک مفهوم بنیادی علم جای دهد.

فرض مرکزی این تئوری این است که مکان عمل هوشیاری در میکروتوبول‌های مغز قرار دارد که در حفاصل میان فیزیولوژی عصبی و

<sup>1</sup> Planck scale



نیروی گرانشی عمل می‌نماید. این‌ها ادعاهای بسیار برجسته‌ای هستند که هم حامیان تند و تیزی دارد و هم منتقدین زبانی در میان جامعه علمی. نگرانی‌های اصلی موجود در این تئوری را می‌توان در سه گروه تقسیم‌بندی کرد:

۱/ شاهد تجربه‌ای که نشان دهد چگونه فعالیت یک سپناپس در دینامیک هم‌گذاری‌های عصبی وارد می‌شود وجود ندارد و از این رو، مربوط دانستن فرایندهای کوانتومی در پدیده‌های روانی یک ادعایی است که به اعتباربندی نیازمند است.

۲/ تا کنون، چنین به نظر می‌آید که خواص مکانیک کوانتومی خاصی برای توضیح پدیده‌های روانی و نورولوژیک مورد نیاز نبوده‌اند. ارتباط اثرات کوانتومی در ساختار و عملکرد مغز به درگیری آن‌ها در توضیح هوشیاری لازم نمی‌آید.

۳/ ساختارهایی مانند میکروتوبول‌ها و سلول‌های عصبی، ساختارهای بزرگی هستند و از منظر مکانیک کوانتومی نیز سامانه‌هایی با درجه حرارت بالا محسوب می‌گردند و از این رو، برای آن‌ها غیرممکن است که در حالات برهم‌نهی خطی پابرجا بمانند تا بتوانند به صورت همدوسی‌وار اثرات کوانتومی با یکدیگر داشته باشند و بنابراین ناهمدوسی موجود در این ساختارها، وجود هر امکان اثرات کوانتومی برای ایفا نقش در فرایندهای مغزی را نابود می‌سازد.

ممکن است توانمندی آشکار تئوری‌های کوانتومی در پاسخ‌دهی به

این پرسش‌ها، گذرگاه‌های نوینی را برای پژوهش در مقوله پیچیده «هوشیاری» فراهم آورد. تگمارک<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۰، اعتراض اصلی ویژه‌ای را نسبت به تئوری Orch OR بیان نمود. او به موضوع ناهمدوسی در متن این تئوری پرداخت که محاسباتش نشان می‌دادند مقیاس زمان ناهمدوسی  $10^{-20}$  -  $10^{-13}$  بسیار کوتاه هستند تا اثرات کوانتومی نقشی را در فرایندهای شناختی داشته باشند. هیگن<sup>۲</sup> و همکاران به این نقد به این صورت پاسخ دادند که محاسبات تگمارک بر روی مدلی بوده است که کاملاً همانند مدل پیشنهادی آن‌ها نبوده است. پس از محاسبات دوباره بر روی مدل دقیق‌تر، آن‌ها زمان‌های ناهمدوسی را به  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  ثانیه نزدیکتر کردند که در خط زمان‌های دینامیکی مربوط به پدیده‌های زیست‌شناسی می‌باشند.

از سوی دیگر، در آزمایشات اخیر، رخداد پدیده کوانتومی فتوسنتز در درجه حرارت اتاق، نشان داده شده است. بنابراین، بحث بر سر ناهمدوسی در تئوری Orch OR به نسبت مباحث ضد و نقیض دیگر، وزن کمتری را دارد. در هر صورت، اعتبار اصلی یا نشان دادن مغلطه این تئوری می‌بایست از طریق سازمان‌دهی به تجربیات آزمایشگاهی فراهم آید و این بسیار چالش برانگیز است زیرا استاندارد طلایی در علوم اعصاب که fMRI می‌باشد دقت فضایی در مقیاس یک میلی‌متر و دقت زمانی در مقیاس یک ثانیه دارد که در مقادیری بسیار بالاتر از یک نانومتر و نانو ثانیه‌ای

<sup>1</sup> Tegmark

<sup>2</sup> Hagan

است که ابعاد عملکردی زمانی و اندازه‌ای توبولین در مطالعات بیوفیزیکی ملکولی قرار دارند و اثرات گرانش کوانتومی مفروض Orch OR در مقیاس پلانک هندسه فضا - زمان  $10^{-35}$  متر و  $10^{-44}$  ثانیه رخ می‌دهند. این شکاف عظیم در این تئوری، میان توانمندی‌های تجربی و پیش‌بینی‌ها، سرگ‌ترین چالش در پذیرش این مفروضات است.

## ۲/ تئوری ماتئو فیشر

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که همدوسی با زمان طولانی، در پدیده فتوسنتز و احتمالاً در میکروتوبول‌ها فقط در حد پیکوثانیه<sup>۱</sup> رخ می‌دهد و این احتمال به نظر نمی‌رسد که همدوسی در سامانه‌های زیست‌شناسی از این مقیاس زمانی‌ها، گذر کند. از آنجا که زمان تحریک سلول عصبی تقریباً در مقیاس زمانی میلی ثانیه‌ها قرار می‌گیرد همدوسی احتمالاً نمی‌تواند نقشی در تحریک آشکار سلول‌های عصبی و حالات شناختی وابسته داشته باشد؛ اما یک فرضیه جدید که بر فرایند درهم‌تنیدگی عصبی تمرکز یافته است همدوسی‌ای که می‌تواند چهار ساعت و یا حتی روزها به طول انجامد را پیشنهاد داده است. فرضیه این است که اسپین هسته‌ای فسفر به عنوان یک «کیوبیت عصبی<sup>۲</sup>» در «پدیده شناخت<sup>۳</sup>» نقش ایفا می‌کند. فیشر بر این بحث می‌کند که اسپین هسته‌ای<sup>۱</sup> در

<sup>1</sup> Picoseconds

<sup>2</sup> Neural qubit

<sup>3</sup> Cognition

فسفر به نظر می‌آید تنها کاندید احتمالی برای این نقش باشد. زیرا هسته‌های نیم اسپین برای زمان‌های ناهمدوسی بسیار مناسب‌تر هستند. از همه عناصر و یون‌های گوناگون که نقش ضروری در سامانه‌های زیستی دارند، فقط هیدروژن و فسفر است که هسته‌های نیم اسپین دارند.

از نظر ماتیو فیشر<sup>۱</sup>، فیزیکدان دانشگاه کالیفرنیا، مغز حاوی هسته‌های اتم فسفر است که برهم‌نهی‌های کوانتومی قدرتمندتری را متحمل می‌شود. اتم‌های فسفر در سلول‌های زنده در همه جا یافت می‌شوند. آن‌ها اغلب شکل یون‌های فسفر را به خود می‌گیرند که در آن هر اتم فسفر با چهار اتم اکسیژن ترکیب می‌شود. چنین یون‌هایی واحد اصلی انرژی در سلول‌ها هستند. عمده انرژی سلول در ملکول‌های ATP ذخیره می‌شود که حاوی توالی از سه گروه فسفر بوده که به یک ملکول آلی اتصال یافته‌اند. هنگامی که یکی از فسفرها بریده می‌شود، انرژی سلولی آزاد می‌شود. سلول‌ها دارای دستگاه‌هایی جهت هم‌آوری یون‌های فسفات در گروه‌هایی و نیز برای شکافتن آن‌ها هستند. فیشر طرحی پیشنهاد داد که دو یون فسفات می‌توانند در طریقی برهم‌نهی شوند: یعنی در حالت درهم‌تنیده شده. همان گونه که اشاره شد، هسته‌های فسفر ویژگی کوانتومی (اسپین) دارند که آن‌ها را همچون آهن ربا‌های کوچکی می‌نماید که با دو قطب در بعضی جهات نشانه رفته‌اند.

<sup>1</sup> Matthew Fisher

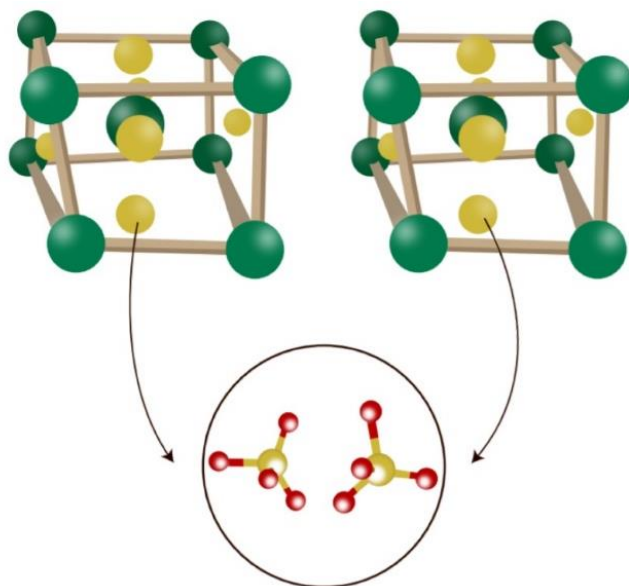
در حالت درهم‌تنیده، اسپین یک هستهٔ فسفر به دیگری بستگی دارد. به زبان دیگر، حالات تنیده حالتی از برهم‌نهی هستند که شامل بیش از یک ذرهٔ کوانتومی می‌باشد. فیشر بر این باور است که رفتار مکانیک کوانتومی این اسپین‌های هسته‌ای می‌تواند ناهمدوسی را متحمل شوند. او با تگمارک موافق است که ارتعاشات کوانتومی که پنروز و همروف دربارهٔ آن‌ها صحبت کردند بسیار وابسته به محیطشان بوده و تقریباً بلافاصله رمز آن‌ها گشوده می‌گردند. اما اسپین‌های این هسته‌ها چندان با محیط اطرافشان برهم‌کنش نمی‌کنند. با این وجود، رفتار کوانتومی اسپین‌های هسته‌های فسفر می‌بایست از ناهمدوسی «محافظت» شده باشند. ذرات کوانتومی می‌توانند اسپین‌های متفاوت داشته باشند. فیشر می‌گوید که این گونه می‌تواند رخ دهد اگر اتم‌های فسفر به ملکول‌های بزرگتر به نام ملکول‌های پوسنر<sup>۱</sup> ادغام شوند. ملکول‌های پوسنر، خوشه‌هایی از شش یون فسفر در ترکیب با نه یون کلسیم هستند (شکل ۲۹).

از نظر فیشر، اسپین‌های فسفر ناهمدوسی را برای یک روز یا در همین حدود حتی در سلول‌های زنده تحمل می‌کنند. در نتیجه، آن‌ها می‌توانند بر عملکرد مغز اثر بگذارند. این ایده وجود دارد که ملکول‌های پوسنر می‌توانند جذب سلول‌های عصبی (نرون‌ها) شوند. هنگامی که داخل باشند، این ملکول‌ها، پیامی به دیگر سلول عصبی، فعال خواهند ساخت و بدین طریق یون‌های کلسیم را فروپاشی و آزاد می‌سازند. به

---

<sup>۱</sup> Posner molecules

دلیل وجود درهم‌تنیدگی در ملکول‌های پوسنر، این دو را می‌توان چنین دریافت کرد که به نوبه خود درهم‌تنیده باشند: به طریقی این یک برهم‌نهی کوانتومی «تفکر» است. برای نخستین بار این ایده به ذهن او هنگامی آمد که درباره یک بیماری روانی فکر می‌کرد. او در جستجوی آن بود که بداند چگونه یون لیتیوم چنین اثر ژرفی در درمان بیماری‌های روانی دارد.



فسفات‌های در هم تنیده شده

شکل ۲۹: ساختار ملکولی پوسنر به شکل یک مکعب کج با شش یون کلسیم (گلوله‌های تیره رنگ) در هر کدامیک از رئوس و مرکز نشان داده شده است. یک یون فسفات در هر کدامیک از شش وجه قرار دارد. دو ملکول پوسنر یک جفت یون فسفات درهم‌تنیده را به اشتراک می‌گذارند.

لیتیوم به شکل گسترده در بیماری روانی دو قطبی به کار می‌رود. او بر اساس مطالعاتی که انجام شده بود دریافت که اشکال ایزوتوپی لیتیوم اثرات متفاوتی بر جانوران آزمایشگاهی دارد. این پدیده بسیار جالب بود زیرا از نظر شیمیایی، ایزوتوپ‌های متفاوت، تقریباً یکی هستند و اگر لیتیوم یک داروی معمولی باشد ایزوتوپ‌های آن نیز می‌بایست اثر یکسانی داشته باشد. اما فیشر پی برد که هسته‌های اتمی ایزوتوپ‌های متفاوت لیتیوم می‌توانند اسپین‌های متفاوتی داشته باشند. این ویژگی کوانتومی است که می‌تواند بر چگونگی عمل لیتیوم به عنوان یک دارو اثر بگذارد. برای مثال، در سال ۱۹۸۶، دانشمندان دانشگاه کرنل، اثرات دو ایزوتوپ لیتیوم را بر رفتار موش‌های آزمایشگاهی بررسی کردند. موش‌های حامله در سه گروه قرار گرفتند، به یک گروه لیتیوم-۷ و به گروه دیگر لیتیوم-۶ دادند و گروه سوم نیز به عنوان شاهد بود. با تولد نوزادان، مادرانی که لیتیوم-۶ دریافت کرده بودند رفتارهای مادری قوی‌تری نشان دادند. فیشر بر این باور است که راز تفاوت اثر ایزوتوپ‌های لیتیوم ممکن است در اسپین هسته‌ای آن نهفته باشد که یک ویژگی کوانتومی بوده و بر این که چه زمانی هر اتم می‌تواند در حالت همدوسی باشد، اثر می‌گذارد. هر چه قدر این اسپین کمتر باشد برهم‌کنش هسته با میدان‌های الکتریکی و مغناطیس کمتر بوده و سرعت ناهمدوسی شدنش کاهش می‌یابد. از آنجا که لیتیوم-۷ و لیتیوم-۶ تعداد نوترون‌های متفاوتی داشته و اسپین‌های متفاوتی نیز دارند، در نتیجه، لیتیوم-۷ به سرعت به دلیل اثر کوانتومیش

ناهمدوسی می‌یابد در حالی که لیتیوم-۶ طولانی‌تر درهم‌تنیده می‌ماند. در یک مدل مقایسه‌ای، اسپین‌های فسفر در ملکول‌های پوسنر می‌توانند همدوسی کوانتومی را برای زمان طولانی‌ای برقرار سازند. تئوری فیشر برای پذیرفته شدن نیاز به انجام پژوهش‌های بیشتری دارد و بی‌شک می‌تواند راه را برای ارتباط فیزیک کوانتومی با دانش نوروزیست‌شناسی، گشایش نماید.

### ۳/همدوسی کوانتومی در کانال‌های یونی عصبی

کانال‌های یونی عصبی نقش بنیادینی در فعالیت سلول‌های عصبی و مغز ایفا می‌کنند. با داشتن منافذی فقط در حدود  $0/1$  نانومتر که اجازه گذر یون‌ها به شکل واحد از طریق کانال را می‌دهند، منطقی می‌باشد که آن‌ها را در گستره کوانتومی مورد نگرش قرار داد. یک سلول عصبی در حالت استراحت، اختلاف ولتاژ غشایی حدود  $70$ - میلی‌ولت دارد (منفی در بخش سیتوپلاسمی غشاء). این اختلاف پتانسیل الکتریکی عمدتاً از طریق پمپ‌های سدیم - پتاسیم که در سطح غشاء پلاسمایی سلول قرار دارند، ایجاد می‌شود. با دریافت یک انتقال دهنده عصبی از سلول بالادست، یک سلول عصبی کانال‌های خود را باز یا بسته خواهد کرد که موجب افزایش یا کاهش ولتاژ غشایی می‌شود. چنانچه غشاء عصبی به حد کافی دپولاریزه شود (حدود  $55$ - میلی‌ولت) آن گاه کانال‌های یونی دروازه‌ای وابسته به ولتاژ در غشاء، به آن با باز شدن یا بسته شدن، پاسخ می‌دهند که موجب



یک موج از دپلاریزاسیون می‌شود که در سراسر اکسون عصبی به پایانه‌اش سفر می‌کند یعنی جایی که آزادسازی انتقال دهنده‌های عصبی را برانگیخته نموده و هدف پایین دستی را تحریک می‌نماید.

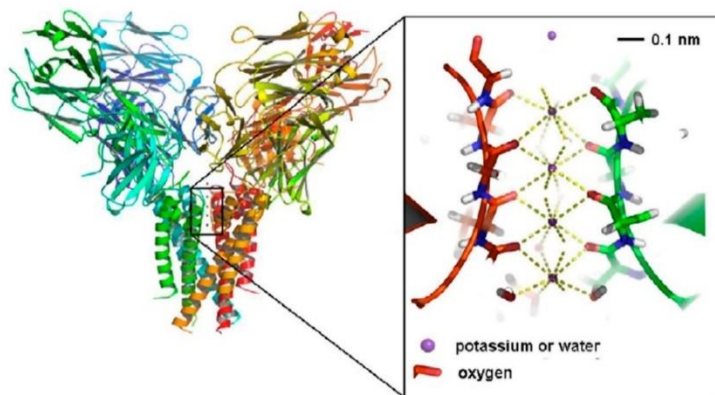
کانال‌های یونی دروازه‌ای وابسته به ولتاژ (VGCs)<sup>۱</sup>، پروتئین‌های میان غشایی بسیار حفظ شده در مسیر تکاملی هستند که از زیرواحدهایی تشکیل شده‌اند که با یکدیگر به شکل ساختار تونل ماندنی ترتیب یافته‌اند و کانال هیدروفیلکی را فراهم می‌سازند که از طریق آن یون‌ها می‌توانند بسته به گرادیان الکتروشیمیایی خودشان جریان یابند. ویژگی‌های مرکزی عملکردی VGCs، گزینندگی<sup>۲</sup> و هدایت یونی می‌باشند. گزینندگی یونی توسط بخش پروتئینی که به فیلتر گزینندگی معروف است ایجاد می‌شود (شکل ۳۰) که میان یون‌ها بر اساس قطر (چند آنگستروم) و بار الکتریکی‌شان افتراق می‌گذارد. گذر یونی از طریق کانال با برداشت پوسته هیدراسیونی‌شان در پیش از ورود به منفذ انجام می‌شود؛ به گونه‌ای که آن‌ها به صورت تک، وارد کانال می‌شوند. در درون فیلتر گزینندگی، موتیف‌های به خوبی حفظ شده در مسیر تکاملی واحدهای باردار، یون‌ها را به دلیل وجود نیروی جاذبه برهم‌کنش‌های کلمب<sup>۳</sup> به درون کانال می‌کشاند. تغییر ولتاژ در غشاء، کانال را بین حالت باز و بسته بودن از طریق حرکات پروتئین دامنه‌گستر در بخش ویژه‌ای به نام دامنه حسگری ولتاژ، سویچ می‌کند.

---

<sup>1</sup> Voltage-gated ion channels

<sup>2</sup> Selectivity

<sup>3</sup> Coulomb



شکل ۳۰: ساختار کانال پتاسیم باکتریایی KcsA با چهار زیرواحد میان غشایی (چپ) و فیلتر گزینندگی (راست).

فیلتر گزینندگی از چهار زنجیره اسید آمینه‌ای تشکیل شده است که یکی از هر چهار زیرواحد پروتئینی کانال یونی را ترکیب می‌دهند. هر زنجیره از چهار اسید آمینه ساخته می‌شود که از آن یک اتم اکسیژن گروه کربونیلی به سوی منفذ، جهت یافته است.

کانال‌های یونی‌ای همچون کانال پتاسیم KcsA باکتریایی که به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است چندین نمای استثنایی را از خود نشان می‌دهند که بیانگر احتمال فزونی مکانیک کوانتومی می‌باشند. کانال یک جریان یونی بالای  $10^8$  یون در ثانیه ترکیب می‌نماید که در حد انتشار<sup>۱</sup> است و با یک کارآمدی  $10^4:1$  برای افتراق میان پتاسیم و سدیم ترکیب می‌شود. این حتی از این منظر شگفت‌آور است که یون سدیم از یون پتاسیم کوچکتر بوده و انتظار می‌رود که به سادگی از طریق کانال‌های یونی پتاسیم عبور کند. از این رو، چنین بحث شده است که

<sup>1</sup> Diffusion limit

مقادیر قابل توجه گزینندگی<sup>۱</sup> و هدایت<sup>۲</sup> این کانال‌های یونی را به سختی می‌توان در چهارچوب سازوکارهای کلاسیک جای داد؛ به ویژه از این منظر که پروتئین‌های VGC انعطاف‌پذیر بوده و بدین سان موضوع نوسانات حرارتی قرار می‌گیرند.

افزون بر این، چندین ناهمانندی میان بلندی‌های مانع پتانسیلی توصیف شده با قوانین ترمودینامیک و میزان‌های جابه‌جایی یونی که در مقیاس تجربی در پروتئین‌های کانال مشاهده شده‌اند، رخ می‌دهند. بنابراین، مکانیک کوانتومی به عنوان مشارکت کننده احتمالی در عملکرد کانال‌های یونی مطرح گردیده است تا بتوان در پس ویژگی‌های استثنایی این کانال بر آمد. مفهوم کلیدی که در انتقال کانال یونی به کار برده شده است، «همدوسی کوانتومی» است که درباره آن در بخش‌های گوناگون این نوشتار بحث کردیم و دانستیم که «همدوسی کوانتومی» پدیده‌ای است که بی‌نهایت کوتاه زمان بوده و به ندرت بیش از چند فمتوثانیه در شرایط گرمایی محیط پابرجا می‌ماند که علت آن رخداد پدیده «ناهمدوسی<sup>۳</sup>» است. اما محاسبات اخیر، زمان موجود برای همدوسی کوانتومی را در سلول‌های عصبی به صورت چشمگیری افزایش داده و کانال‌های یونی را به عنوان جایگاهی انتخابی برای پژوهش بر روی اثرات کوانتومی غیرناچیز<sup>۴</sup> مورد شناسایی قرار داده‌اند. به صورت ویژه،

---

<sup>1</sup> Selectivity

<sup>2</sup> Conduction

<sup>3</sup> Decoherence

<sup>4</sup> Non-trivial quantum effects

رهیافت‌های تئوری بیانگر این بوده‌اند که همدوسی‌های کوتاه نه تنها ممکن است سودمند باشند بلکه برای توضیح نفوذ سریع جهت یافته یون‌ها از مانع پتانسیل فیلتر، ضروری می‌باشند. در مطالعه اخیر، نشان داده شد که فاصله  $0/3$  نانومتری میان دو یون در درون فیلتر گزینندگی کانال یونی به یون‌ها این اجازه را می‌دهد تا در یک حالت برهم‌نهی کوانتومی توصیف شوند و بدین سان با انتشار موج مانند یون‌ها از طریق کانال همخوانی می‌یابند. در جدیدترین مطالعات، نقش احتمالی تونل‌زنی کوانتومی یون‌ها از طریق کانال‌های بسته شده به صورت تئوریک مورد کاوش قرار گرفته است.

هر چند که یک درنگ زمانی میان تجربیات آزمایشگاهی با کار نظری در گستره پدیده‌های کوانتومی همدوسی و تونل‌زنی در کانال‌های یونی و در نتیجه در عملکرد مغز وجود دارد ولی بر پایه دستاوردهای جدید می‌توان به درک وجود اثرات مکانیک کوانتومی در نوروزیست‌شناسی به ویژه در پدیده «هوشیاری» پی برد. آیا از دید نظری این امکان وجود دارد که یون‌ها در یک کانال نه تنها در طول کانال همدوس باشند بلکه با یون‌ها در کانال‌های مجاور یا حتی سلول‌های عصبی کناری نیز همدوس بوده و حتی درهم‌تنیده باشند؟

چه پاسخ این موضوع منفی یا مثبت باشد باید به این نکته توجه نشان داد که برای حل «مسئله همبندی»<sup>۱</sup>، یک درهم‌تنیدگی میان

---

<sup>1</sup> Binding problem

کانال‌های یونی در سلول عصبی مختلف باید رخ دهد تا سرانجام به «هوشیاری» منتهی گردد. اما با دانش کنونی بر این اذهان داریم که در شرایط گرم، مرطوب و بسیار پویای محیط القاء کننده ناهمدوسی مغز زنده، درهم‌تنیدگی میان این کانال‌ها در میان سلول‌های عصبی مختلف کاملاً امکان‌ناپذیر است. از این رو می‌بایست برای چیرگی بر چگونگی رخداد پدیده‌های مکانیک کوانتومی در مغز زنده با شرایط القاء کنندگی ناهمدوسی، در جستجوی پدیده‌هایی بود که آن‌ها را در این شرایط امکان‌پذیر می‌نمایند. در پژوهش‌های مکانیک کوانتومی در رابطه با نوروزیست‌شناسی همواره این پرسش وجود دارد آیا شیوه‌ای پذیرفتنی از دیدگاه زیست‌شناسی وجود دارد تا اثرات کوانتومی با مقیاس کوچک بتوانند بر فعالیت عصبی در مقیاس بزرگ و رفتار اثر بگذارند؟ الخلیلی و مک فادن در کتاب پر مغز خود به چنین پیوند یافتگی‌ای اشاره نموده‌اند، بر اساس فرضیه آن‌ها، رویدادهای کوانتومی، مانند آن که در سطح کانال‌های یونی رخ می‌دهند، می‌توانند بر میدان‌های الکتریکی خارج سلولی که در سطح سلول‌های عصبی و شبکه‌هایشان خلق می‌شوند، اثر گذاشته یا اثر بپذیرند. این فرضیه بر اساس شواهد اخیر است که میدان‌های خارج سلولی می‌توانند بر پتانسیل عمل سلول‌های عصبی و فعالیت تحریک الکتریکی آن‌ها از طریق پدیده «جفت شدگی افایتیک» اثر بگذارند. شواهدی درست است که یک حلقه علیتی<sup>۱</sup> میان میدان‌های

---

<sup>۱</sup> Causal loop

الکتریکی درون‌زای مغز و تحریک عصبی به واسطه کانال‌های یونی دروازه‌ای وابسته به ولتاژ وجود دارد. میدان‌های الکتریکی ممکن است تحریک بسیاری از سلول‌های عصبی را هدایت و همزمان کرده و بدین سان بر شناخت و رفتار اثر بگذارند. از این رو، این احتمال وجود دارد که با تنظیم کردن (یا تنظیم شدن) فعالیت کانال یونی، میدان‌های الکتریکی با سطح رویدادهای همدوس کوانتومی در بسیاری از سلول‌های عصبی جفت شده و به صورت بالقوه بر همزمانی تحریک عصبی وابسته به رفتار اثر بگذارند. بنابراین بر اساس تئوری الخلیلی و مک فادن، مدل‌های موجود باید همدوسی کوانتومی در کانال‌های یونی و همچنین جفت شدگی افایتیک میان پتانسیل‌های میدان الکتریکی درون‌زا و پتانسیل‌های غشاء سلولی را لحاظ نمایند.

فصل نهم

# منشأ حیات





عموماً فرض بر این است که منشأ گیتی، منشأ حیات و منشأ هوشیاری، از بزرگترین رازهای موجود در علم هستند. مکانیک کوانتومی با منشأ گیتی ارتباط تنگاتنگی دارد و در مورد منشأ هوشیاری نیز در فصل پیش در پیوند با مکانیک کوانتومی گفتمانی داشتیم ولی در اینجا این پرسش وجود دارد که مکانیک کوانتومی با منشأ حیات چه پیوستگی دارد. پیش از پرداختن به این مقوله لازم است تا بر نظریات غیرکوانتومی که تفسیری جامع از منشأ حیات می‌دهند نیز نیم‌نگاهی داشته باشیم.

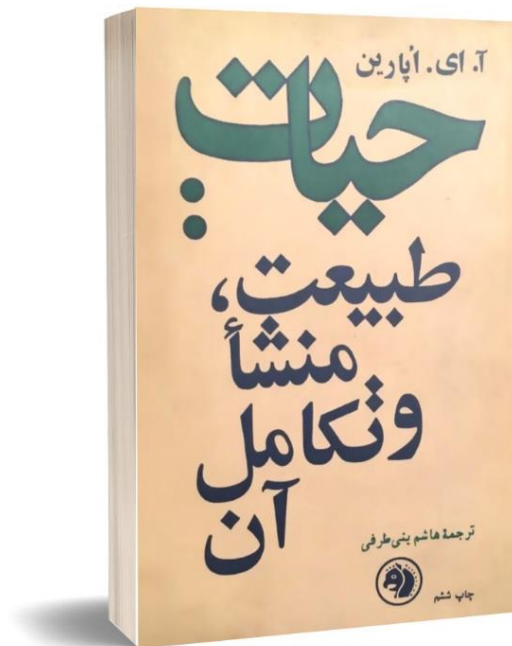
نخستین رهیافت علمی در سده نوزدهم توسط دانشمندانی همچون چارلز داروین در مورد منشأ هدایت ارائه گردید، فرضیه او بر این استوار بود که فرایندهای شیمیایی در «برکه‌ای کوچک و گرم» رخ داده‌اند و موجب خلق مواد زیستی شده‌اند. تئوری علمی رسمی‌ای که بر فرضیات داروین پایه گرفته بود به صورت جداگانه و مستقل توسط یک دانشمند روس به نام الکساندر اپارین<sup>۱</sup> و یک انگلیسی به نام جی‌بی‌اس هالدین<sup>۲</sup> در آغاز قرن بیستم پیشرفت داده شد و امروزه به عنوان فرضیه اپارین - هالدین معروف است (شکل ۳۱).

هر دوی آن‌ها این را پیشنهاد دادند که جو زمین اولیه از هیدروژن، متان و بخار آب مملو بوده است به طوری که هنگام قرار گرفتن در معرض

<sup>1</sup> Alexander Oparin

<sup>2</sup> JBS Haldane

آذرخش، تابش خورشیدی یا گرمای آتشفشانی، با یکدیگر ترکیب یافته و مخلوطی از ترکیبات آلی ساده را ساختند. آن‌ها همچنین این فرض را عنوان داشتند که این ترکیبات آن‌گاه در اقیانوس نخستین انباشته شده و یک سوپ آلی رقیق گرم را ساختند که در طی میلیون‌ها سال در درون آب این اقیانوس پخش گردید تا به صورت شانس، ترکیبی از اجزاء آن در نهایت یک ملکول جدیدی ثمر دادند که ویژگی خارق‌العاده‌ای داشت؛ یعنی توانایی همانندسازی خودش.



شکل ۳۱: کتاب «حیات: طبیعت، منشأ و تکامل آن» اثر ماندگار اپارین

هالدین و اپارین بر این فرض بودند که پدیداری همانندساز نخستین<sup>۱</sup>، رویداد کلیدی بود که منتهی به آن چیزی شد که ما منشأ حیات می‌نامیم. سرنوشت پسین این رویداد، موضوع انتخاب طبیعی داروینی قرار گرفت. به عنوان یک وجود ساده، این همانندساز، بسیاری از خطاها یا جهش‌ها را در همانندسازی خود متحمل گردید. این جهش‌یافته‌های همانندساز، آن‌گاه با اشکال غیرجهش یافته برای مواد شیمیایی رقابت کردند تا همانندسازهای بیشتری را بسازند. آن‌هایی که بیش از دیگران موفق بودند، بزرگ‌ترین تعداد نوادگان را از خود بر جای گذاشتند و یک فرایند ملکولی از انتخاب طبیعی موجبات پیش‌رانش همانندسازان به سوی کارآمدی بالاتر و پیچیدگی بیشتر گردید. همانندسازان که ملکول‌های ضمیمه‌ای را به دام انداختند، مانند پپتیدها که به صورت آنزیمی همانندسازی آن‌ها را کاتالیز می‌نمودند، به یک مزیت دست یافتند و پاره‌ای حتی ممکن است در درون وزیکول‌های (کیسه‌های کوچک پر از هوا یا مانع) محبوس گردیدند که با غشاء چربی، احاطه شده بودند (مانند سلول‌های زنده کنونی) که آن‌ها را از رویدادهای ناخواسته محیط بیرونی مورد محافظت قرار می‌دادند. هنگامی که محبوس گردیدند، محیط درون سلول توانست دگردیسی بیوشیمیایی (متابولیسم) را مورد حمایت قرار دهد تا ملکول‌های زیستی، خودشان ساخته شوند و از نشست به بیرون آن‌ها پیشگیری شود. با توانایی برقراری و حفظ حالت درونی و

---

<sup>1</sup> Primordial replicator

همزمان جداسازی آن از محیط اطراف، اولین سلول زنده تولید یافت. فرضیه اپارین - هالدین یک چهارچوب علمی فراهم نمود که می‌توانست به درک آن که چگونه حیات بر روی زمین منشأ یافت، کمک نماید. با این وجود، برای چندین دهه، این تئوری مورد آزمون قرار نگرفت تا دو شیمیدان آمریکایی به آن علاقه‌مند شدند.

استانلی میلر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۱ دانشجوی دکترای دانشگاه شیکاگو بود که با هرولد یوری<sup>۲</sup> به عنوان استاد راهنما برای پایان‌نامه<sup>۳</sup> مقطع Ph.D. بر روی فرضیه<sup>۴</sup> اپارین - هالدین به صورت تجربی کار کردند. استانلی میلر در تلاش به همانندسازی شرایطی که حیات بر روی زمین منشأ یافت، تلاش نمود. او یک بطری از آب (به عنوان اقیانوس) برداشت و آن را با گازهایی که فکر می‌کرد در این اتمسفر وجود داشته‌اند مانند متان، هیدروژن، آمونیاک و بخار آب پر کرد تا اتمسفر نخستین را شبیه‌سازی کند. او آن گاه برای شبیه‌سازی آذرخش، مخلوط را با جرقه‌های الکتریکی مشتعل نمود (شکل ۳۲). در کمال شگفتی، کشف کرد که پس از فقط یک هفته از جرقه زدن اتمسفر نخستین، بطری حاوی مقادیر چشمگیری از اسیدهای آمینه بود که می‌دانیم بلوک‌های ساختاری پروتئین‌ها هستند. مقاله<sup>۵</sup> این آزمایش در ژورنال ساینس در سال ۱۹۵۳ به چاپ رسید و به عنوان اولین گام در خلق حیات در آزمایشگاه، سروصدا به پا کرد و هنوز نیز به عنوان یک نقطه<sup>۶</sup> برجسته در زیست‌شناسی محسوب می‌گردد. هر

<sup>۱</sup> Stanley Miller

<sup>۲</sup> Harold Urey

چند که ملکول‌های «خود همانندساز» تولید نشدند، اما عموماً این باور وجود داشت که سوپ آمینو اسیدی نخستین میلر می‌بایست برای ساختن پپتیدها و پروتئین‌های پیچیده پلی‌مریزه شده، با داشتن زمان کافی و اقیانوس به اندازه کافی بزرگ، در نهایت به همانندسازهای اپارین - هالدین ثمر داده باشد.

از دهه ۱۹۵۰، آزمایش میلر - یوری به شیوه‌های گوناگونی توسط شماری از دانشمندان با استفاده از مخلوط‌های مختلف مواد شیمیایی، گازها و منابع انرژی انجام شده است که نه تنها اسیدهای آمینه بلکه قندها و حتی مقادیر ناچیزی اسیدهای نوکلئیک تولید شده‌اند ولی تاکنون که نزدیک به هفتاد سال از این آزمایش می‌گذرد، هیچ سوپ نخستینی که در آزمایشگاه خلق شده باشد به یک همانندسازی اپارین - هالدین ثمر نداده است. این تازه در حالی است که می‌دانیم ساده‌ترین اشکال زیستی حتی مانند یک میکوپلازما<sup>۱</sup> (باکتری‌ای که کریگ و نتر<sup>۲</sup> در تجربیات زیست‌شناسی سینتتیک از آن استفاده کرد)، فوق‌العاده پیچیده می‌باشند. ژنوم این باکتری تقریباً پانصد ژن را کد گذاری می‌کند که این ژن‌ها تعداد مشابهی از پروتئین‌های بسیار پیچیده مانند آنزیم‌ها، لیپیدها، قندها، DNA، RNA، غشاء سلولی، کروموزوم آن و یک هزار ساختار دیگر را تولید می‌کنند که هر کدام از آنها از موتور خودروی شما پیچیده‌تر هستند. در واقع میکوپلازما، واقعاً یک باکتری ضعیفی است که به تنهایی

<sup>1</sup> Mycoplasma

<sup>2</sup> Craig Venter

نمی‌تواند زیست کند و باید بسیاری از ملکول‌های زیستی مورد نیاز خود را از میزبان‌ش به دست آورد و می‌توان آن را یک انگل نامید و از این رو، این باکتری قادر نبوده است که در هر سوپ نخستین واقعی زیست کند. گزینه‌های محتمل‌تر دیگر، یک ارگانیزم تک سلولی به نام سیانو باکتری<sup>۱</sup> است که می‌تواند فتوسنتز کرده و تمام مواد بیوشیمیایی خود را بسازد. چنانچه در زمین اولیه موجود بوده باشد می‌تواند در قدیمی‌ترین صخره‌های کشف شده در روی زمین که نشانگان حیات را نشان داده‌اند و مربوط به ۳/۷ میلیارد سال پیش بوده است، زیست کرده باشد ولی این باکتری بسیار پیچیده‌تر از یک میکوپلاسم است و ژنوم آن تقریباً دو هزار ژن را کد گذاری می‌کند.

پس چگونه ممکن است یک سوپ غنی از ملکول‌های آلی، ساده‌ترین اشکال زیست را خلق کرده باشد؟ آیا فرایندهای شیمیایی تصادفی دارای این احتمال کافی است که با یکدیگر گرد هم آمده و حیات را خلق کرده باشند؟ شما یک جوجه را به دیگ آب جوش می‌اندازید و آن را با مواد دیگر به هم می‌زنید و یک سوپ جوجه درست می‌کنید اما آیا کسی تاکنون توانسته است یک قوطی سوپ را به درون یک دیگ بریزد و یک جوجه درست کند؟ سرفرد هویل<sup>۲</sup> که اصطلاح «انفجار بزرگ یا مهبانگ» را ابداع نمود به منشأ حیات علاقه‌مند بود. او این گونه بیان نمود که احتمال این که فرایندهای شیمیایی تصادفی گرد هم آیند تا حیات خلق

<sup>۱</sup> Cyanobacterium

<sup>۲</sup> Sir Fred Hoyle

شود مانند این است که یک گردباد در حیات خلوت مملو از وسایل اسقاطی وزیده و آن‌ها را سرهم کند تا یک جمبوجت ساخته شود. نکته‌ای که با زیبایی هوپل آن را بیان کرد آن است که حیات سلولی که ما امروزه می‌شناسیم آن چنان پیچیده است و سازمان‌بندی شده است که نمی‌تواند بر پایهٔ فقط شانس باشد و می‌بایست «خود همانندسازهای» ساده‌تری در پیش از این وجود داشته باشند.

## جهان RNA

پژوهش دربارهٔ منشأ حیات و یافت خود همانندسازهای ساده‌تر با این مانع روبه‌رو می‌گردد که امکان‌ناپذیر است تا نمونه‌های ساده‌تر «خود همانندسازها» را از سلول‌های زنده تشریح نموده و بیرون آورد زیرا هیچ کدام از این اجزاء سلولی نمی‌توانند به تنهایی خود همانندسازی کنند. ژن‌های DNA خودش را همانندسازی نمی‌کند و این کار آنزیم‌های DNA پلی‌مرز است. خود این آنزیم‌ها نیز خود همانندسازی ندارند زیرا به نسخه‌برداری به واسطهٔ RNA از رشته‌های کد گذاری شدهٔ DNA نیاز دارند. حداقل، در سلول زندهٔ کنونی، RNA یک واسطهٔ کلیدی میان کد ژنتیکی نوشته شده در DNA با پروتئین‌ها است که از اینجا تمام دیگر اجزاء سلول‌های ما، ساخته می‌شوند. با بازگشت به مسئله اصلی بحث ما که منشأ حیات چیست؟ گرچه یک سلول زنده به صورت کل یک موجود «خود همانندساز» است اما اجزاء آن، این گونه نیستند. بگذارید پرسش

را این گونه طرح کنیم که کدامیک در نخست آمد: ژن DNA، RNA یا آنزیم؟ اگر DNA یا RNA نخست آمدند آن گاه چه چیز آن‌ها را ساخت؟ اگر آنزیم در نخست آمد، آن گاه چگونه کد گذاری شد؟

یک راه‌حل این مسئله پیچیده توسط توماس چک<sup>۱</sup> شیمیدان آمریکایی، فراهم آمد که در سال ۱۹۸۲ کشف کرد افزون بر کد گذاری اطلاعات ژنتیکی، بعضی از ملکول‌های RNA می‌توانند کار آنزیم‌ها را در کاتالیز کردن واکنش‌ها انجام می‌دهند که به این کار او به صورت مشترک در سال ۱۹۸۹ جایزه نوبل اهدا گردید. نمونه‌های اولیه این نوع ملکول‌ها که به نام ریبوزیم‌ها<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند در ژن‌های ارگانسیم کوچک تک سلولی به نام Tetrahymena یافت شدند که یک نوع تک یاخته برکه‌های آب شیرین است و از آن زمان تا کنون پی برده شده است که ریبوزیم‌ها نقش در همه سلول‌های زنده دارند. کشف آن‌ها به سرعت برای راه‌حل مسئله جوجه- تخم‌مرغ مربوط به منشأ حیات، برگرفته شد. «فرضیه جهان RNA<sup>۳</sup>» بر این فرض قرار دارد که سنتز مواد شیمیایی نخستین موجب تولید یک ملکول RNA شده است که می‌توانسته است هم یک ژن و یک آنزیم بوده و بدین طریق ساختار خودش را کد گذاری می‌کرده است (مانند DNA) و نسخه‌هایی از خودش (مانند آنزیم‌ها) از مواد زیست شیمیایی در دسترس در سوپ نخستین ساخته است. این

<sup>۱</sup> Thomas Cech

<sup>۲</sup> Ribozymes

<sup>۳</sup> The RNA world hypothesis



فرایند نسخه‌برداری در هنگامه اول با افت و خیز توأم بوده است و به نسخه‌های جهش یافته فراوانی منتهی گردید که با یکدیگر به شیوه رقابت ملکولی داروینی، رقابت کردند.

با گذشت زمان، آن همانندسازهای RNA ایی که پروتئین‌ها را برای بهبودی کارآمدی همانندسازی خودشان به کار بردند منجر به ساخت DNA و در نهایت اولین سلول زنده شدند. این ایده که ملکول‌های خود همانندساز RNA در پیش از پیدایی DNA و سلول‌ها آمدند هم اکنون تقریباً به صورت یک اصل اعتقادی در پژوهش‌های منشأ حیات موجود می‌باشد. ریبوزیم‌ها نشان داده شده‌اند که می‌توانند همه واکنش‌های کلیدی مورد انتظار در هر ملکول خود همانندساز را انجام دهند. برای مثال، یک کلاس از ریبوزیم‌ها می‌توانند دو ملکول RNA را با یکدیگر متصل کنند در حالی که دیگری می‌تواند آن‌ها را از یکدیگر جدا سازد. شکل دیگر ریبوزیم می‌تواند نسخه‌هایی از رشته‌های کوتاه (در درازای چندین باز) از بازهای RNA بسازد. از این فعالیت‌های ساده ما می‌توانیم یک ریبوزیم پیچیده‌تر را تصور کنیم که می‌تواند مجموعه کامل واکنش‌های مورد لازم برای خود همانندسازی را کاتالیز کند.

با رقم خوردن خود همانندسازی آن گاه انتخاب طبیعی نیز آغاز به کار می‌کند؛ بدین سان است که جهان RNA در مسیری رقابت‌آمیز قرار داده شده است که در نهایت به اولین سلول زنده هدایت گشته است. با این سناریو، چندین مسئله وجود دارد. گرچه واکنش‌های بیوشیمیایی ساده

ممکن است توسط ریبوزیم‌ها کاتالیز شوند، «خود همانندسازی» یک ریبوزیم، یک فرایند بسیار پیچیده است که شامل مورد شناسایی قرار دادن مواد شیمیایی مشابه در محیط خود ریبوزیم و هم‌آرایی آن مواد شیمیایی در توالی درست برای ساخت یک همانند خودش است. این خودش یک دستور بلند حتی برای سامانه‌های پروتئینی موجود در سلول‌های انباشته از مواد بیوشیمیایی درست است. از این رو، این حتی دشوارتر است که ببینیم چگونه ریبوزیم‌ها در سوپ آشفته نخستین به چنین کار برجسته‌ای نایل شده باشند. تا کنون، هیچ کس یک ریبوزیم که بتواند چنین وظیفه پیچیده‌ای حتی در شرایط آزمایشگاهی انجام دهد را نه کشف کرده و نه ساخته است.

همچنین مسئله بنیادی‌تر این است که چگونه خودِ ملکول‌های RNA در سوپ نخستین ساخته شدند. این ملکول از سه جزء ساخته شده است؛ باز RNA که اطلاعات ژنتیکی خودش را کد می‌کند (درست مانند بازهای DNA که اطلاعات ژنتیکی DNA را کد می‌کند)، یک گروه فسفاتی و یک قند به نام ریبوز. گر چه موفقیت‌هایی در راه‌اندازی واکنش‌های شیمیایی انجام یافته در سوپ نخستین به دست آمده‌اند، باورپذیرترین واکنش که ریبوز را ثمر می‌دهد نیز کثرتی از دیگر قندها را تولید می‌کند. هیچ مکانیسم غیرزیست‌شناسی شناخته شده‌ای وجود ندارد که توسط آن قند ریبوز بتواند بر پایه خودش خلق شود و حتی اگر قند ریبوز ساخته شود، گذاشتن سه جزء با یکدیگر به درستی خودش

وظیفه‌های سهمگین است. هنگامی که اشکال پذیرفته این سه جزء RNA با یکدیگر آورده می‌شوند، آن‌ها فقط به شیوه‌های دلبخواهانه‌ای ترکیب می‌شوند. شیمیدان‌ها برای پرهیز از این مسئله از اشکال ویژه‌ای از بازها که گروه‌های شیمیایی‌شان تغییر یافته و از واکنش‌های ناخواسته دوری می‌جویند، استفاده می‌کنند. اما این هم فریبنده است و در هر مورد، این بازهای فعال شده حتی نامحتمل هستند که در شرایط نخستین ساخته شده باشند، چه برسد به بازهای RNA اصلی.

شیمیدان‌ها می‌توانند بازهای RNA را از مواد شیمیایی ساده از طریق مجموعه‌ای بسیار پیچیده از واکنش‌های به دقت کنترل شده سنتز کنند که در آن‌ها هر محصول مورد تقاضا از یک واکنش جداسازی شده و خالص‌سازی می‌شود، در پیش از این که واکنش بعدی نیز دنبال شود. گراهام کایرنز - اسمیت<sup>۱</sup>، شیمیدان اسکاتلندی برآورد کرد که حدود ۱۴۰ مرحله برای سنتز یک باز RNA از مواد شیمیایی ساده که احتمالاً در سوپ نخستین وجود داشته‌اند، مورد نیاز است. برای هر مرحله حداقل شش واکنش جایگزین وجود دارد که می‌بایست از آن‌ها پرهیز شوند. بدین گونه، بر اساس احتمالات، هر ۱۴۰ مرحله مورد لزوم، یکی از شش احتمال محصولات را خواهد داد؛ به زبان دیگر، یک در ۶<sup>۱۴۰</sup> (یا سر دستی ۱۰<sup>۱۰۹</sup>). با یک فرایند خالص تصادفی، شانس آماری برای ساخت RNA به حداقل ۱۰<sup>۱۰۹</sup> (۱ در ۱۰<sup>۱۰۹</sup>) عدد ملکول آغاز کننده در سوپ نخستین نیاز بوده است. اما ۱۰<sup>۱۰۹</sup>

---

<sup>۱</sup> Graham Cairns-Smith

عدد بزرگتر از حتی تعداد ذرات بنیادی در همهٔ جهان قابل رویت است (حدود  $10^{80}$ ). زمین به اندازهٔ کافی ملکول یا زمان کافی نداشته است که مقادیر چشمگیری از RNA را در طی میلیون‌ها سال در میان ساختش و پدیداری حیات در زمان مقرر ( $3/7$  میلیارد سال که از مطالعهٔ بقای حیات در صخره‌ها به دست آمده است) بسازد. با این وجود، تصور کنید که سنتز مقادیر چشمگیر RNA از طریق فرایند نامکشوف شیمیایی‌ای رخ داده باشد. ما اکنون می‌بایست بر مسئله به همان اندازه ترسناک به رشته کشیدن چهار باز مختلف RNA با یکدیگر در توالی درست برای ساخت یک ریبوزیم که قادر به خود همانندسازی باشد، چیره شویم. اکثر ریبوزیم‌ها رشته‌های RNAی هستند که حداقل  $100$  باز طول دارند. در هر جایگاهی در رشته، یکی از چهار باز می‌بایست حضور داشته باشد. از این رو،  $4^{100}$  (یا  $10^{60}$ ) شیوهٔ گوناگون وجود دارد تا با یکدیگر قرار داده شوند تا یک رشته RNA با طول  $100$  باز ساخته شود. چقدر محتمل است که تکان دادن با هم به صورت تصادفی بازهای RNA، توالی درست در امتداد طول رشتهٔ RNA خلق کند تا ریبوزیم «خود همانندساز» ساخته شود؟

آشکار می‌گردد که  $4^{100}$  رشتهٔ منفرد RNA به طول یکصد باز، یک جرم ترکیبی  $10^{50}$  کیلوگرم خواهد داشت. خوب این مقداری است که ما نیاز داریم تا یک نسخهٔ واحد از اکثر رشته‌ها داشته باشیم و بنابراین یک شانس منطقی وجود دارد که یکی از آن‌ها همهٔ بازهای اش به درستی ترتیب یافته باشد تا یک «خود همانندساز» باشد. این در حالی است که

جرم کلی کهکشان راه شیر تخمین زده می‌شود که حدود  $10^{42}$  کیلوگرم باشد. به روشنی ما نمی‌توانیم بر شانس خالص تکیه کنیم. مسلماً ممکن است یک ترتیب در میان این  $4^{100}$  رشته RNA به طول ۱۰۰ باز نباشد که بتواند به صورت یک خود همانندساز عمل کند؛ ممکن است بسیار بیشتر باشد. حتی ممکن است تریلیون‌ها همانندساز احتمالی باشد که از رشته‌های ۱۰۰ بازی RNA بتواند ساخته شود. شاید RNA خود همانندساز واقعاً شایع باشد و ما فقط به یک میلیون ملکول نیاز داریم تا شانس از ساخت یک خود همانندساز را داشته باشیم.

مسئله با این موضوع این است که این فقط یک بحث است. با وجود بسیاری از تلاش‌ها، هیچ کس هرگز یک RNA خود همانندساز منفرد (یا DNA یا پروتئین) نساخته است یا در طبیعت مشاهده نکرده است. امروزه، برای انجام این کار بزرگ به یک سلول زنده کامل نیاز است. آیا با وجود یک سامانه ساده‌تر در میلیاردها سال پیش این رویداد می‌توانسته انجام شده باشد؟ مسلماً می‌بایست انجام شده باشد تا ما بتوانیم در اینجا امروزه در مورد آن اندیشه کنیم. اما این که چگونه این کار در پیش از این که سلول‌ها تکامل بیابند انجام گیرد هنوز بسیار مانده است تا آشکار شود.

### آیا مکانیک کوانتومی می‌تواند کمک کند؟

با نگرش مقایسه‌ای در دنیای دیجیتال، یک مسئله‌ای ضروری در جستجوی منشأ حیات نمایان می‌شود و آن این است که ماهیت آن موتور

جستجوگر جهان زیست چیست که همهٔ تشکیل دهنده‌های ضروری را در پیکربندی درست گرد هم می‌آورد (مانند یک موتور جستجوگر دیجیتالی) تا یک خود همانندساز ساخته شود. هر قدر هم مواد شیمیایی در سوپ نخستین در دسترس بوده است آن‌ها می‌بایست فضایی عظیمی از احتمالات را می‌داشتند تا به طور شانسی یک موجود خود همانندساز بی‌نهایت نادر ظهور می‌یافت. با این منظر که ناممکن به نظر می‌رسد آیا مسئله این نیست که ما داریم جستجوی معمول خود را در گسترهٔ قوانین جهان کلاسیک دنبال می‌کنیم؟ همانند پدیدهٔ فتوسنتز که سامانه‌های فتوسنتز کننده راهبرد کوانتومی را برگزیدند، چندین پژوهشگر از جمله مک‌فادن و الخلیلی نیز ایدهٔ منشأ حیات را در نوعی از سناریوی کوانتومی جستجو می‌کنند.

یک برکهٔ نخستین کوچکی را تصور کنید که در درون منفذی از صخره‌های ماریپچی، بیرون زده از یک گل آتشفشانی، در زیر دریای باستانی ایسوا<sup>۱</sup> در ۳/۷ میلیارد سال پیش، در زمانی که لایهٔ سنگ نیس<sup>۲</sup> گرینلند<sup>۲</sup> ساخته شده بود، قرار گرفته است. این شاید برکهٔ کوچک گرمی باشد که داروین آن را توصیف کرد، در آن آمونیاک و نمک‌های فسفریک، نور، گرما، الکتریسیته و غیره وجود دارد که در آن یک ترکیب پروتئینی نامعلومی آماده است تا هنوز تغییرات پیچیده‌تری را متحمل گردد، ساخته شده است. هم اکنون باز تصور کنید که یک ترکیب پروتئینی (که امروزه

---

<sup>۱</sup> Isua

<sup>۲</sup> Greenland's gneiss strata

می‌دانیم می‌تواند به سادگی یک ملکول RNA هم باشد) با نوعی از فرایندهای شیمیایی که استانیلی میلر کشف نمود ساخته شده باشد و یک نوع پروتو آنزیم<sup>۱</sup> (یا ریبوزیم) باشد که مقداری فعالیت آنزیمی داشته باشد ولی هنوز یک ملکول خود همانندساز نباشد. همچنین تصور کنید که بعضی از ذرات در این آنزیم بتوانند به جهات مختلف حرکت کنند ولی از انجام این کار توسط موانعی کلاسیک از انرژی پیشگیری می‌گردد. اما همان گونه که در فصل دوم بحث گردید، هر دو الکترون‌ها و پروتون‌ها می‌توانند از موانع انرژی که انتقال کلاسیک آن‌ها منع شده بود تونل‌زنی کنند این خود یک نمایی است که برای عملکرد آنزیم، اساسی می‌باشد. در واقع، الکترون یا پروتون، در هر دو طرف مانع، به صورت همزمان، وجود دارند.

اگر ما تصور کنیم که این پدیده در پروتو آنزیم‌های ما رخ دهند آن گاه ما ترتیب‌های گوناگونی انتظار خواهیم داشت؛ یعنی یافت نمودن ذره در هر دو سوی مانع انرژی که با فعالیت‌های آنزیم متفاوتی توأم می‌باشد و این به معنای وجود توانمندی‌هایی برای تسریع گونه‌های گوناگون واکنش‌های شیمیایی می‌باشد که شاید شامل یک واکنش خود همانندسازی نیز باشد. بگذارید این مفهوم را با اعداد، ساده کنیم. تصور کنید که ۶۴ پروتون و الکترون در پروتو آنزیم خیالی ما است که هر کدام از آن‌ها می‌توانند در هر کدام از دو جایگاه گوناگون، تونل‌زنی کوانتومی کنند. تنوع ساختاری کل در دسترس پروتو آنزیم خیالی ما هنوز بسیار

---

<sup>1</sup> Proto-enzyme

عظیم است: ۲۶۴ که یک ترتیب سهمگینی می‌باشد. اکنون تصور کنید فقط یکی از این ترتیب‌ها، آن چه که یک آنزیم خود همانندساز شود را دارا باشد. پرسش این است: چقدر ساده است تا این ترتیب ویژه را پیدا کرد که می‌تواند به پدیداری حیات منتهی شود؟ آیا ساخت این خود همانندساز هرگز در برکهٔ کوچک گرم ما، انجام خواهد پذیرفت؟

در نظر بگیرید که نخستین پروتو آنزیم به صورت یک ملکول کاملاً کلاسیک باشد که نتواند فریبندگی‌های کوانتومی (مانند برهم‌نهی و تونلزنی) انجام دهد. این ملکول می‌یابد در هر لحظه فقط در یک ترتیب مختلف ۲۶۴ تایی ممکن باشد و احتمال این که این پروتو آنزیم یک خود همانندساز باشد یک تقسیم بر ۲۶۴ است که در واقع یک شانس بی‌نهایت کوچک است. با هر شکل غالب غیرعادی، پروتو آنزیم کلاسیک در یکی از ترتیب‌های ملول کننده‌ایی که نمی‌تواند خود همانندسازی کند، گیر خواهد افتاد. مسلماً، ملکول‌ها در نتیجهٔ قانون عمومی فرسودگی ترمودینامیک، تغییر می‌کنند ولی در جهان کلاسیک چنین تغییری نسبتاً آهسته است. برای این که یک ملکول تغییر کند، ترتیب اصلی اتم‌ها می‌بایست پیاده شود و اجزاء تشکیل دهندهٔ آن باز ترتیب‌بندی گردد تا یک شکل‌بندی ملکولی جدیدی شکل بگیرد.

چنین تغییرات شیمیایی که ما در کلاژن طولانی حیات دایناسورها مشاهده کرده‌ایم گاهی می‌توانند در مقیاس زمانی زمین‌شناسی رخ دهند. با در نظر گرفتن به شکل کلاسیک، پروتو آنزیم ما زمان بسیار طولانی‌ای



را می‌طلبید تا حتی یک جزء کوچکی از شکل‌بندی‌های شیمیایی<sup>۲۶۴</sup> را به خود ببیند. اما وضعیت به صورت بنیادی فرق می‌کند؛ اگر که ما ۶۴ ذره کلیدی را در پروتوآنزیم الکترون‌ها یا پروتون‌هایی که می‌توانند میان جایگاه‌های جایگزین خود تونل‌زنی کنند در نظر بگیریم. پروتوآنزیم با بودن در سیستم کوانتومی، می‌تواند در همه شکل‌بندی‌های ممکنش همزمان به صورت یک برهم‌نهی کوانتومی وجود داشته باشد. خود همانندساز ما می‌تواند اگر به اندازه کافی بقا بیابد به عنوان یک رایانه کوانتومی<sup>۶۴</sup> کیوبیتی عمل کند و می‌دانیم که چنین رایانه‌ای چقدر می‌تواند نیرومند باشد. ممکن است این بتواند توان عظیم محاسباتی کوانتومی‌اش را برای محاسبه پاسخ به این پرسش استفاده کند: شکل‌بندی ملکولی درست برای یک خود همانندساز چه چیز است؟ در این منظر، مسئله و راه‌حل احتمالی روشن‌تر می‌شود. در نظر بگیرید که پروتوآنزیم در یک چنین برهم‌نهی کوانتومی باشد و جستجوی مسئله با یافت یک در<sup>۲۶۴</sup> ساختار ممکن که خود همانندساز است، قابل حل می‌شود.

اما یک پیچ و خم دیگر هنوز وجود دارد. شما به خاطر دارید که کیوبیت‌ها می‌بایست در حالت همدوس و درهم‌تنیده بمانند تا محاسبات کوانتومی انجام دهند. هنگامی که ناهمدوسی سر می‌رسد، برهم‌نهی<sup>۲۶۴</sup> حالات گوناگون فرو می‌پاشد و فقط یکی می‌ماند. آیا این کمک می‌کند؟ در این دیدگاه، خیر؛ زیرا شانس برهم‌نهی کوانتومی به یک حالت منفرد خود همانندساز دوباره همان است که در پیش از این بود: یک تقسیم

بر ۲۶۴، مانند شانس به دست آوردن ۶۴ بار شیر در انداختن‌های متوالی یک سکه. اما آن چه بعداً رخ می‌دهد جایی است که توصیف کوانتومی از نمونه کلاسیک و اگرایی می‌یابد. اگر یک ملکول به صورت مکانیک کوانتومی رفتار نکند و خودش را با ترتیب غلط اتم‌ها بیابد (که تقریباً مسلماً این گونه است) نمی‌تواند خود همانندسازی کند و در نتیجه یک شکل‌بندی متفاوتی که شامل فرایند آهسته زمین‌شناسی به صورت پیاده کردن و باز ترتیب پیوندهای ملکولی است، پیگیری می‌نماید. اما پس از ناهمدوسی ملکول هم‌ارز کوانتومی، هر کدامیک از ۶۴ الکترون‌ها و پروتون‌های پروتو آنزیم ما تقریباً هم‌زمان آماده تونل‌زنی دوباره به یک برهم‌نهی از هر دو جایگاه‌های ممکنشان خواهند بود تا برهم‌نهی کوانتومی اصلی ۲۶۴ شکل‌بندی متفاوت را دوباره برقرار سازند. در حالت ۶۴ کیوبیتی‌اش، ملکول کوانتومی پروتو آنزیم برای خود همانندسازی در جهان کوانتومی مادام جستجو می‌کند. ناهمدوسی به سرعت برهم‌نهی را یک بار دیگر فروپاشی خواهد داد ولی در این زمان، ملکول خودش را در یکی از شکل‌بندی‌های متفاوت کلاسیک ۲۶۴ خود خواهد یافت. یک بار دیگر ناهمدوسی برهم‌نهی را فروپاشی خواهد داد و یک بار دیگر دوباره سیستم خود را در شکل‌بندی دیگری می‌یابد؛ و این فرایند به صورت بی‌انتهایی ادامه خواهد یافت. ضرورتاً، در این محیط نسبتاً محافظت شده، ساخت و شکست حالت برهم‌نهی کوانتومی یک پدیده برگشت‌پذیر است: سکه کوانتومی به صورت دائم با فرایندهای برهم‌نهی و ناهمدوسی پرتاب

می‌شود، فرایندهایی که از ساختن و شکستن پیوندهای شیمیایی بسیار تندتر انجام می‌شوند. اما یک رویدادی است که پرتاب سکه کوانتومی را پایان خواهد داد. اگر ملکول پیش - همانندساز کوانتومی در نهایت به یک حالت خود همانندساز فرو پاشد؛ آن ملکول خود همانندسازی را آغاز خواهد کرد و همانندسازی سیستم را از یک حالت گذار غیرقابل بازگشت به سوی جهان کلاسیک به پیش خواهد راند.

سکه کوانتومی به شکل غیرقابل بازگشتی پرتاب خواهد گردید و نخستین خود همانندساز در جهان کلاسیک تولد خواهد یافت. مسلماً این همانندسازی گونه‌ای از فرایند بیوشیمیایی در درون ملکول را شامل خواهد شد یا میان آن و محیط اطرافش که این محیط به صورت متمایزی از آن چه در پیش از این که ترتیب پیش - همانندساز شود، متناوب می‌باشد. به زبان دیگر، سازوکاری نیاز است وجود داشته باشد که این شکل‌بندی ویژه را در جهان کلاسیک لنگر اندازد؛ در بیش از این که از دست برود و ملکول به ترتیب کوانتومی بعدی حرکت نماید.

### نخستین خود همانندساز شبیه چه چیزی بود؟

برهم‌نهی‌ای که ما در بالا ترسیم کردیم فرضی است ولی اگر جستجو برای نخستین خود همانندساز در جهان کوانتومی به جای جهان کلاسیک انجام شود حداقل احتمالاً مسئله پژوهش خود همانندساز را حل می‌کند. برای این که این سناریو عمل کند، ملکول زیستی نخستین (پیش خود

همانندساز)<sup>۱</sup> می‌بایست بتواند تعداد فراوانی از ساختارهای متفاوت را با تونل‌زنی کوانتومی از ذراتش به جایگاه‌های گوناگون تجربه کند. آیا ما می‌دانیم چه گونه‌هایی از ملکول‌ها می‌توانستند چنین ترفندی را انجام دهند؟ خوب تا حدی ما می‌دانیم. تا آنجا که کشف کرده‌ایم، الکترون‌ها و پروتون‌ها در آنزیم‌ها نسبتاً به صورت سست نگه داشته شده‌اند. از این رو، آن‌ها برای تونل‌زنی در جایگاه‌های گوناگون توانمند می‌باشند. پروتون‌ها در DNA و RNA حداقل از میان پیوند هیدروژنی می‌توانند تونل‌زنی کنند. بنابراین، ما خود همانندساز نخستین‌مان را ممکن است این گونه تصور کنیم که چیزی همانند یک ملکول پروتئین یا RNA بوده که به سستی با پیوندهای هیدروژنی و پیوندهای ضعیف الکترونی به یکدیگر نگه داشته شده بود که به ذراتش (هر دوی پروتون‌ها و الکترون‌ها) اجازه حرکت آزادانه از میان ساختارش را می‌داده است تا یک برهم‌نهی از تریلیون‌ها شکل‌بندی متفاوت شکل دهد.

آیا هیچ شاهدهی برای چنین سناریوای وجود دارد؟ اپوروا دی. پتل<sup>۲</sup> فیزیکدان مرکز فیزیک انرژی بالا در بنیاد علوم بنگلور هندوستان یکی از خبرگان الگوریتم‌های کوانتومی (نرم‌افزار رایانه‌های کوانتومی) است. او پیشنهاد می‌کند که منظرهای کد ژنتیکی (توالی‌های بازهای DNA که برای یک اسید آمینه یا دیگری کد می‌گذارند)، منشأ آن را به عنوان یک کد کوانتومی فاش می‌سازند. در اینجا نمی‌توانیم به دلیل پیچیدگی

<sup>1</sup> Proto-self-replicator

<sup>2</sup> Apoorva D. Patel

ریاضیات تئوری اطلاعات کوانتومی، به صورت ژرف، به جزئیات فنی آن پردازیم. ولی این ایده نمی‌بایست چندان شگفتی‌آور باشد. ما در فصل چهارم دیدیم که چگونه در فتوسنتز، انرژی پروتون به «مرکز واکنش» از طریق طی مسیرهای چندگانه در یک زمان انتقال می‌یابد (یک راه‌پیمایی تصادفی کوانتومی). سپس، در مورد ایده محاسبات کوانتومی و آیا حیات ممکن است از الگوریتم‌های کوانتومی جهت فزونی در کارآمدی بعضی از فرایندهای زیست‌شناسی استفاده کند، بحث کردیم. به همین منوال، سناریوهای منشأ حیات که شامل مکانیک کوانتومی هستند گرچه نظری می‌باشند چیزی بیش از گسترش این ایده‌ها نیستند یعنی امکان این که همدوسی کوانتومی در زیست‌شناسی بتواند همین گونه نقشی را در منشأ حیات ایفا کند که هم اکنون در سلول‌های زنده می‌بینیم.

مسلماً، هر سناریوی که شامل مکانیک کوانتومی درباره منشأ حیات ۳/۷ میلیارد سال پیش باشد هنوز نظری است ولی ما بحث کرده‌ایم حتی توصیف کلاسیک منشأ حیات با مسائلی احاطه شده است: به سادگی نمی‌توان زندگی را از یک پیش‌نویس<sup>۱</sup> ساخت! با فراهم آوردن راهبردهای کارآمدتر، مکانیک کوانتومی ممکن است وظیفه ساخت یک خود همانندساز را مقداری ساده‌تر انجام داده باشد. مسلماً این همه داستان نیست ولی مکانیک کوانتومی، پدیداری حیات را در صخره‌های باستانی گرینلند را به مقدار زیادی محتمل‌تر نموده است.

---

<sup>1</sup> Scratch



## منابع گردآوری شده برای ترجمه

1. McFadden J, Al-Khalili J. *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*. USA, New York: the Crown Publishing Group, 2014.
2. Adams B, Petruccione F. Quantum effects in the brain: A review. *AVS Quantum Science*. 2020 Jun 1;2(2):022901.
3. Georgiev DD. Quantum information theoretic approach to the mind-brain problem. *Prog Biophys Mol Biol*. 2020 Dec;158:16-32.
4. Kim Y, Bertagna F, D'Souza EM, Heyes DJ, Johannissen LO, Nery ET, Pantelias A, Sanchez-Pedreño Jimenez A, Slocombe L, Spencer MG, Al-Khalili J, Engel GS, Hay S, Hingley-Wilson SM, Jeevaratnam K, Jones AR, Kattinig DR, Lewis R, Sacchi M, Scrutton NS, Silva SRP, McFadden J. Quantum Biology: An Update and Perspective. *Quantum Reports*. 2021; 3(1):80-126.
5. Sutcliffe MJ, Scrutton NS. Enzymology takes a quantum leap forward. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2000 Jan 15;358(1766):367-386.
6. 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. The future of quantum biology. *J R Soc Interface*. 2018 Nov 14;15(148):20180640.
7. McFadden J, Al-Khalili J. The origins of quantum biology. *Proc Math Phys Eng Sci*. 2018 Dec;474(2220):20180674.

8. Lambert, N., Chen, YN., Cheng, YC. et al. Quantum biology. *Nature Phys* 9, 10–18 (2013).
9. Al-Khalili, Jim & Lilliu, Samuele. (2020). Quantum Biology. *Scientific Video Protocols*. 1. 1-4. 10.32386/scivpro.000020.
10. Asogwa, Chukwuemeka. “Quantum Biology: Can we explain olfaction using quantum phenomenon?” *arXiv: Biological Physics* (2019): n. pag.
11. Wiltshcko R, Nießner C and Wiltshcko W (2021) The Magnetic Compass of Birds: The Role of Cryptochrome. *Front. Physiol.* 12:667000.
12. Ball P. Is photosynthesis quantum-ish? 2018 *Phys. World* 31 (4) 44.
13. Adams B, Petruccione F. Birds, brains and magnetic fields. *Quest* Vol. 17 No. 3 | 2021.
14. Fleming, Graham & Scholes, Gregory & Cheng, Yuan-Chung. (2011). Quantum effects in biology. *Procedia Chemistry*. 3. 38-57.
15. Cao J, Cogdell RJ, Coker DF, Duan HG, Hauer J, Kleinekathöfer U, Jansen TLC, Mančal T, Miller RJD, Ogilvie JP, Prokhorenko VI, Renger T, Tan HS, Tempelaar R, Thorwart M, Thyryhaug E, Westenhoff S, Zigmantas D. Quantum biology revisited. *Sci Adv.* 2020 Apr 3;6(14):eaaz4888.
16. Hoehn RD, Nichols DE, Neven H, Kais S (2018) Status of the Vibrational Theory of Olfaction. *Front. Phys.* 6:25.
17. Brookes JC. Quantum effects in biology: golden rule in enzymes, olfaction, photosynthesis and magnetodetection. *Proc Math Phys Eng Sci.* 2017 May;473(2201):20160822.
18. Slocombe, Louie & Sacchi, Marco & Al-Khalili, Jim. (2021). Quantum and classical effects in DNA point mutations: Watson-Crick tautomerism in AT and GC base pairs. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 23. 10.1039/D0CP05781A.
19. Hameroff SR, Craddock TJ, Tuszyński JA. Quantum effects in the understanding of consciousness. *J Integr Neurosci.* 2014 Jun;13(2):229-52.



20. Srivastava R (2019) The Role of Proton Transfer on Mutations. *Front. Chem.* 7:536.
21. Davies PC. Does quantum mechanics play a non-trivial role in life? *Biosystems.* 2004 Dec;78(1-3):69-79.
22. Jedlicka P. Revisiting the Quantum Brain Hypothesis: Toward Quantum (Neuro)biology? *Front Mol Neurosci.* 2017 Nov 7;10:366.
23. Molyakov, Andrey. (2020). Quantum Mechanics and the Human Brain. New Properties of Consciousness. 10.26717/BJSTR.2020.28.004639.
24. Offord C. Quantum Biology May Help Solve Some of Life's Greatest Mysteries. 2019. (Accessed at Quantum Biology May Help Solve Some of Life's Greatest Mysteries | The Scientist Magazine® (the-scientist.com)).
25. Ball, P. Physics of life: The dawn of quantum biology. *Nature* 474, 272–274 (2011).
26. Johnsen, S., and K. J. Lohmann. 2008. Magnetoreception in animals. *Physics Today* 61: 29–35.





# Quantum Biology



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
مرکز تحقیقات زیست فناوری خلیج فارس



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی تهران  
پژوهشگاه علوم نانو و فناوریسم



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر



بنیاد ملی نخبگان  
بنیاد نخبگان استان بوشهر



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت درمان و آموزش پزشکی  
معاونت آموزشی  
کلان منطقه پنج