

## Квантовият живот<sup>1</sup>

Пол Дейвис

За един физик животът изглежда като истинско чудо – всички тези безинтересни атоми да се насъберат заедно и да образуват такова хитро нещо! Столетия наред живите организми са разглеждани в известен смисъл като някаква магия. Днес ние знаем, че в биологията не действа никаква “жизнена сила”, че там всичко се състои от обикновени вещества, които обаче вършат необикновени неща, подчинявайки се през цялото време на законите на физиката. Каква тогава е тайната на забележителните свойства на живота?

В края на 40-е и през 50-е години на XX век бе модерно да се предполага, че квантовата механика – или вероятно някаква “пост-квантова механика”, която скоро ще бъде разработена, държи ключа към мистерията на живота. Възбудени от техния успех при обясняване на свойствата на неживата материя, основателите на квантовата механика се надяваха, че тяхната теория е и достатъчно необикновена, и достатъчно мощна, за да обясни и особеното живо състояние на веществото. Нилс Бор, Вернер Хайзенберг и Юджин Вигнер – всички те размишляваха по въпроса, докато прочутата книга на Ервин Шрьодингер *Какво представлява животът*, публикувана през 1944 година, проправи пътя за раждането през 1950 година на молекулярната биология.

Половин век по-късно, мечтата, че квантовата механика някак си с един замах ще обясни живота – така, както пълно и забележително обясни другите състояния на материята – все още не е осъществена. Несъмнено, квантовата механика е необходима, за да обясни размерите и формите на молекулите, както и подробностите на техните химически връзки, но от квантовата област не се появи никакъв ясен “принцип на живота”, който би могъл да разграничи живата материя по някакъв специален начин. Нещо повече, класическите модели от топчета и пръчици изглеждат достатъчни за повечето обяснения в молекулярната биология.

Въпреки това, винаги са съществували настойчиви твърдения, че квантовата механика може да играе фундаментална роля в биологията, например чрез кохерентните суперпозиции и заплитането. Тези твърдения обхващат както правдоподобни идеи, подобни на квантово-подпомогнатото нагъване на протеините, така и по-спекулативни предположения, като предложението от Роджер Пенроуз от

---

<sup>1</sup> Превод от публикация на 1 юли на страницата на PhysicsWorld. Авторът, Пол Дейвис е физик и астробиолог, директор на Центъра за фундаментални понятия в науката в Аризонския държавен университет, САЩ.

университета в Оксфорд и Стюарт Хамероф от Университета на Аризона, че квантовата механика обяснява съзнанието чрез действие в мозъка на макроскопично равнище. За нещастие, биологичните системи са толкова сложни, че е трудно да се разграничат “чисто” квантовите ефекти от променящата се бъркотия от по същество класическите процеси, които също са налице. По такъв начин има големи възможности за несъгласия относно това доколко животът си служи с нетривиалните квантови процеси.

Защо обаче квантовата механика би трябвало да бъде съществена за живота, освен че обяснява основната структура и взаимодействие на молекулите? Едно общо съображение е, че квантовите ефекти може да служат за улесняване на процеси, които според класическата физика са или бавни, или невъзможни. Физиците са наясно с факта, че дискретността, квантовото тунелиране, суперпозицията и заплитането водят до нови и неочаквани явления. Животът е имал на разположение три и половина милиарда години за решаване на проблемите и оптимизиране на ефективността. Ако квантовата механика може да усилва тяхното протичане, или да открие нови възможности, много вероятно е, че животът ще открие този факт и ще използва разкриващите се възможности. Щом основните биологични процеси стават на молекулно равнище, използването на квантовите ефекти не изглежда по начало неправдоподобно.

Дори ако животът не използва активно “квантовите трикове”, ние не можем да пренебрегнем влиянието на квантовата механика върху биологията. Квантовата неопределеност налага фундаментално ограничение върху прецизността на всички молекулни процеси. Една отличителна черта на биологията е изтънчената хореография, включена в свръх сложната молекулна самоорганизация и “самомонтиране”. За да може клетката да функционира правилно, от съществено значение е точно определени нейни части да бъдат на точното място и в подходящия момент. Квантовата механика налага фундаментални ограничения върху точността, с която молекулите могат да си сътрудничат по един колективен и организиран начин. Бихме могли да очакваме някои жизнени процеси да се разгръщат поне до “квантовия ръб”, където трябва да се прави компромис между скорост и точност на положението.

Възгледът от XIX век върху живота като за нещо “магическо”, илюстриран от употребата на термина “органична химия”, бе заменен от модела на клетката като комплексна система от свързани наномашини, действащи под контрола на цифровия софтуер, закодиран в ДНК. Тези лилипутски елементи, състоящи се предимно от протеини, включват помпи, ротори, зъбчатки, кабели, лостове, сензори и други

механизми, познати на физиците и инженерите. Тяхното изящно планиране, усъвършенствано в течение на еони еволюция, показва изключителна ефективност и гъвкавост, и представлява едно вдъхновение за нанотехнолозите. Интуицията, получена от макроскопичните и мезоскопичните механизми може да се окаже заблуждаваща в наномащабите, където квантови явления като ефекта на Казимир може да окажат влияние и съществено да променят природата на участващите сили.

### **Ранни спекулации**

Една ранна идея за квантовите ефекти в биологията бе предложена от Херберт Фрьолих от Университета на Ливерпул, който през 1968 г. подсказва, че модите на трептене на някои мембрани в клетката може да показват явлението Бозе–Айнщайн кондензат, в който много кванти се установяват в единствено квантово състояние с далеко разпростираща се кохерентност. Обикновено Бозе–Айнщайновият кондензат се свързва с много ниски температури, но Фрьолих предположи, че нелинейната връзка между набор от диполни осцилатори, трептящи в термично обкръжение може най-общо казано да насочи енергия към един единствен кохерентен осцилатор дори при биологични температури. Не е ясно какво точно преимущество би спечелил един организъм от този начин за натрупване на енергия, въпреки че вероятно с това биха могли да се контролират химичните реакции.

Друга ранна и повтаряща се спекулация е, че някои биологични мутации може да се резултат от квантово тунелиране. Генетичната основа на живота е написана с четирибуквената азбука на нуклеотидите А, Г, С и Т, които се сдвояват, за да образуват стъпалата на усуканата стълбична структура на ДНК. В нормалния случай Т се свързва с А, а Г с С, като двойките се държат заедно от две или три водородни връзки. В зависимост от положението на протона обаче, нуклеотидните основи обаче могат да съществуват в алтернативни, химически свързани форми, известни като тавтомери. Квантовата механика предсказва, че с крайна вероятност протонът може чрез тунелен ефект да премине през бариерата, разделяща двете състояния и тогава да се появят погрешни свързвания, например Т с Г, вместо с А. Мутациите са движещата сила на еволюцията, така че в този ограничен смисъл квантовата механика е фактор, който допринася за еволюционната промяна. Физикът Дж. Макфаден от Университета на Съри с помощта на този процес предлага квантов модел за адаптивна промяна, при която бактерии, подложени на натиска на околната среда като че ли са способни да изберат благоприятни мутации, които повишават тяхната способност да преживяват в променената обстановка.

Друг пример за квантово тунелиране, който има биологично значение, засяга химията на протеините – дълги молекули, които се нагъват в сложни триизмерни форми. Някои протеини съдържат активни страни, които се свързват с водород, но за да стигне тези страни, водородният атом трябва да преодолява един сложен и променлив релеф на потенциалната енергия. Квантовото тунелиране може да ускори този процес. Изследването доколко би могло да бъде важно квантовото тунелиране е едно голямо предизвикателство, тъй като множество сложни взаимодействия се осъществяват, докато протеиновата молекула се тресе и променя формата си в резултат на топлинните възбуждания. Един подход, възприет от химичката Юдит Климан от Университета на Калифорния в Бъркли, е да работи с деутерий вместо водород. Доколкото деутерият е грубо два пъти по-тежък от водорода, използването му предизвиква голяма разлика в скоростта на тунелирането. Като сравняват относителните скорости на реакциите с водород и с деутерий в широк температурен интервал, експериментаторите са в състояние да определят относителната важност на квантовите ефекти. Резултатите като че ли потвърждават важността на квантовото тунелиране, което повдига въпроса дали някои протеини наистина не са еволюирали да се възползват от това, което би ги направило “усилватели на тунелирането”. В еволюцията дори малко предимство в скоростта или точността може да доведе до съкрушителен успех, тъй като естественият подбор увеличава експоненциално относителният дял на победителите с прехода между поколенията.

### **Фотосинтеза и орнитология**

Въпреки че посочените примери са известни в литературата от много години, те не доведоха до широко разпространение на мнението, че квантовата физика е важна за биологията. Две почти драматични експериментални открития обаче стимулираха активността в тази област.

Първото се отнася до изучаването на фотосинтезата от химика Грахъм Флеминг и неговата група в Беркли. Фотосинтезата представлява във висша степен сложен и фин механизъм, който използва светлинна енергия, за да разложи вода, като използва отделни фотони, за да стартира поредица от реакции. Процесът е изключително ефективен и представлява класически пример за това как еволюцията е постигнала точна настройка на една физична система, за да постигне почти перфектно действие.

Първичният приемник на светлинната енергия е комплекс от пигментни молекули, известни като хромофори. Те могат да се възбудят и да преминат на високи енергетични нива в един многоетапен процес, който води до разделяне на

зарядите. Тъй като дължината на вълната на фотона е много по-голяма от групата молекули, в началото се създава суперпозиция от множество възбудени пигментни молекули и този процес еволюира във времето в един интервал от няколко стотици фемтосекунди. Флеминг и групата му използват лазерно възбуждане и пробни импулси, за да изследват тези събиращи светлинната енергия молекулни комплекси и наблюдават определен тип “квантови биения”, при които максимума на амплитудата на възбуждането преминава и се връща кохерентно между различни молекули на системата. Флеминг твърди, че при подходящо синхронизиране системата може да улови кохерентното възбуждане (което се задържа за няколко стотици фемтосекунди) с по-голяма вероятност, отколкото ако то бе разпределено просто по законите на класическата механика. Той вярва, че това може да ускори многократно скоростта на предаване на енергия. Наскоро тези резултати бяха допълнени от работата на Е. Колини и Гр. Шолес от Университета на Торонто, които демонстрираха кохерентно предаване на електронно възбуждане по полимерни вериги при стайна температура. Една важна особеност на фотосинтезата е, че архитектурата на свързаните с нея молекули е устроена по извънредно необикновен и компактен начин, което предполага, че тя е “създадена по поръчка”, за да използва квантови ефекти с далечно действие. Би могло да се окаже, че тази специална конфигурация е ефективна за запазване на кохерентността за изненадващо продължително време, давайки по такъв начин възможност на системата да се възползва едновременно от различни пътища и по такъв начин да ускори “решението”, т.е. да достави енергия в центъра на реакцията.

Второто скоротно откритие, което навежда на мисълта, че квантовата механика е съществена за биологията, засяга навигацията на птиците. Добре известно е, че някои птици проявяват учудващи постижения в навигацията, използвайки различна информация, включително за локалната посока на земното магнитно поле. Природата на съответния магнитен сензор обаче оставаше нещо като мистерия и проблемът е особено остър, като се има предвид, че магнитното поле пронизва целия организъм. Как например, ъгълът между полето и птицата се трансформира в невронна информация? Едно изследване на Т. Риц от Университета на Калифорния, Ървайн, на групата на Кр. Тимел от Оксфордския университет и Е. Рипер от Националния университет на Сингапур повдига завесата на загадката поне за европейската червеношийка, показвайки, че роля в случая играе клас протеини, открити в ретината на птицата.

Механизмът, който се изследва понастоящем, се позовава на фото-активирането над топлинния фон на една двумерна мрежа от подредени протеини, в резултат на

което се получават йонни двойки, съдържащи синглетни двуелектронни състояния. Спиновете на тези заплетени електрони са свързани и при наличие на хомогенно магнитно поле те биха прецесирали синхронно, поддържайки синглетната конфигурация. Ако обаче изхвърленият електрон се отмести малко, двата електрона може да се окажат в различно магнитно обкръжение. Въпреки че двата електрона се намират под въздействие на едно и също земно магнитно поле, свързаният с йона на протеина електрон ще се влияе също от магнитното поле на ядрото на йона, което предизвиква свръхфиното разцепване. Тази разлика между магнитните полета, в които се намират заплетените електрони, предизвиква осцилации между синглетното и триплетното състояние, като периодът на осцилациите частично зависи от силата и ориентацията на земното поле спрямо мрежата от протеини. Тогава системата може да се деактивира и да инициира реакция, която ефективно действа като химичен компас, защото относителното разпределение на продуктите от реакцията може да зависи от честотата на осцилациите между синглетното и триплетното състояние.

Тук остава известна неопределеност както относно механизма, така и за вида на участващите молекули. Въпреки това, общо доказателство в полза на един квантов модел от определен тип следва от опитите, проведени от В. и Р. Вилчко от Университета на Франкфурт, които изследват поведението на червеношийките в слаби променливи магнитни полета. Те откриха, че при честоти около 1,315 MHz прехвалената способност на птиците за ориентация се нарушава сериозно. Едно възможно обяснение на този резултат е, че смущаващото външно поле предизвиква резонанс в преходите между синглетно и триплетно състояние, разстройвайки по този начин химичния компас.

### **Как да се избегне декохерентност**

Въпреки че поне някои от тези примери могат да се представят като доказателства за това, че квантовата механика играе роля за биологията, всички те са изправени пред един сериозен и фундаментален проблем. Ефекти като кохерентност, заплитане и суперпозиция може да се запазят само ако квантовата система избегне декохерентността, предизвикана от взаимодействията с околната среда. При наличието на заобикалящия шум деликатните фазови съотношения, които характеризират квантовите ефекти се объркват, превръщайки чистите квантови състояния в комбинации и в резултат се получава класическо, вместо квантово поведение. Само докато декохерентността се държи притисната до стената, квантовите ефекти ще се проявяват явно. Следователно дали претенциите на квантовата биология ще устоят или

ще отпаднат зависи от точната времева скала на декорентността. Ако системата преминава в декохерентно състояние твърде бързо, тогава тя се превръща в класическа преди в нея да се случи нещо интересно от гледна точка на биохимията или биологията.

През последните години на декохерентността и нейното избягване бе отделено значително внимание от страна на физиците, работещи в бързо разрастващата се област на квантовите компютри и квантово-информационната наука. Квантовият компютър предоставя начин за обработка на информация по-ефективно, отколкото би позволила класическата физика, като се използват квантови състояния, които могат да извършват логически операции чрез кохерентна еволюция на квантови суперпозиции.

Декохерентността представлява източник на изчислителни грешки, така че физиците бяха заети да проектират среда, в която теоретически липсва декохерентност, или да минимизират влиянието ѝ. Ключов параметър е температурата: колкото по-висока е тя, толкова по-бърза е декохерентността. Поради тази причина повечето опити в областта на квантовите компютри използват среда при свръх ниски температури, като например свръхпроводници или капани за студени атоми.

На пръв поглед топлата и влажна вътрешност на една жива клетка изглежда твърде неподходяща среда за ниска декохерентност. Грубите пресмятания показват, че при температурата на кръвта за повечето биохимични процеси декохерентността би настъпила за времена, по-малки от  $10^{-13}$  s. Съществуват обаче съображения в полза на твърдението, че реалните биологични системи може да са по-слабо податливи на декохерентност, отколкото предсказват простите модели. Едно от тях е, че биологичните системи са във висша степен нелинейни, отворени системи, принудени да действат далеч от термодинамичното равновесие. Физиката на подобни системи не е добре проучена и би могла да крие непознати до сега квантови свойства, каквито животът е открил преди нас. Действително, сложните пресмятания показват, че, казано общо, простите модели силно надценяват времената за декохерентност. Например Дж. К. Х. Бригел от Университета на Инсбрук и С. Попоску от Университета на Бристол откриха, че една двуспинова квантова система, изкарана от равновесие, може да поддържа кохерентност дори когато е свързана с гореща и шумна среда, която бързо би разрушила кохерентността на една статична система. Едно пресмятане, основано на т. нар. спин-бозонен модел от А. Легет от Университета на Илинойс също предполага драматично удължено време за разрушаване на кохерентността за нискочестотни фотони. Легет показва също така, че поради доминантната мода на разрушаване на кохерентността чрез фононна връзка със средата, една акустична несъгласуваност между

прякото и по-далечното окръжение на квантовата система може да удължи времето за кохерентност при ниски честоти. По-нататък, не е необходимо всички степени на свобода да се радват на смекчена декохерентност: значителни квантови биологични ефекти може да изискват да бъдат защитени само малки подмножества.

### **Произходът на живота**

Век и половина след като Чарлз Дарвин публикува Произходът на видовете, произходът на живота остава крайно упорита мистерия и е дълбоко проблематичен. Най-простите познати живи организми са вече изумително сложни и е немислимо, че подобен обект може да възникне спонтанно, самоорганизирайки се съвсем случайно. Повечето изследователи предполагат, че животът е започнал или с редица самокопиращи се, носещи цифрова информация молекули, много по-прости от ДНК, или с един самокатализиращ се химичен цикъл, който не натрупва точна генетична информация, но е бил способен да произвежда допълнителни количества от същата химична смес. И двата подхода се фокусират върху възпроизвеждането на веществата, което е естествено, тъй като познатите форми на живот се възпроизвеждат чрез копиране на генетичния материал. Ключовото свойство на живота обаче – възпроизвеждането чрез вариране и естественият подбор – логически не изисква самите материални структури да се копират точно. Достатъчно е информацията да се копира. Това отваря възможността животът да е възникнал чрез някаква форма на квантово копиране: К-живот, ако предпочитате.

Добре известно е, че вълновите функции като такива не могат да бъдат клонирани, но дискретната квантова информация, например посоката на спина или заемането на нивата в една потенциална яма, могат да се копират. Преимуществото на простото копиране на информация на квантово равнище пред копирането на молекулни структури е в скоростта. Едно копиращо събитие може да протече на химичната или тунелираща времева скала за фемтосекунди. Това следва да се сравни с 10-е милисекунди, необходими за копиране на една ДНК базова двойка. Следователно К-животът би могъл да еволюира на много порядъци по-бързо, отколкото химическият живот. Нещо повече, квантовите флуктуации осигуряват естествен механизъм за промени, а кохерентните суперпозиции дават възможност на К-живота да еволюира бързо, използвайки едновременно цялата палитра от адаптивни възможности. Разбира се, окръжението на този хипотетичен К-живот е неизвестно, но повърхността на едно междузвездно зрънце или вътрешността на една комета в облака на Оорт предлагат едно нискотемпературно окръжение с богат физичен и химичен потенциал.



Как би могъл К-животът да еволюира до познатия ни химичен живот? Един възможен сценарий е, че органичните молекули са избрани принудително от К-живота като по-надеждни складове за информация. Една добра аналогия в това отношение е компютърът. Процесорът е невероятно малък и бърз, но деликатен: изключете захранването и данните са изгубени. Ето защо компютрите използват твърди дискове, за да натрупват числената информация. Твърдите дискове са относително големи и изключително бавни, но те са надеждни и запазват информацията в широк диапазон от външни въздействия. Възможно е органичният живот да е започнал като бавен, но надежден “твърд диск” на К-живота. Поради своята по-голяма гъвкавост и издръжливост той е бил евентуално способен буквално “да започне свой собствен живот”, откъснат от своя родоначалник К-живота и да се разпространи в по-малко специализирана и ограничителна среда – такава като тази на Земята. Върху нашата планета вали непрекъснат дъжд от междузвездни частици и кометен прах, така че доставката не е проблем. Що се касае до съдбата на К-живота, за нещастие той би бил напълно разрушен при навлизане в земната атмосфера.

Съществуват натрупващи е и възбуждащи интерес доказателства, че квантовата механика играе ключова роля тук-там в биологията. Това, което липсва, е така или иначе един общ “принцип на квантовия живот”, който би могъл да предложи нова концептуална рамка, с чиято помощ да се разберат забележителните свойства на живите системи, както Шрьодингер и другите се надяваха. Физиката на комплексните, силно неравновесни системи с нелинейни връзки обаче е все още в своето ранно детство и несъмнено ни очакват по-нататъшни изненади. През това време изследователите в областта на квантовата информация, стремейки се да намалят декохерентността, може да открият, че изследването на биологичните наномашини крие изненадващи възможности за отплата.

Превод: Х. Д.