

На 29-ти март 2020 г. почина на 96 години Филип Андерсън, може би най-прочутият физик по кондензирана материя от неговото поколение. Андерсън показа, че електроните в т.нар. неподредени решетки се захващат от определени атоми и в резултат на деструктивната интерференция между различните канали на разсейване в системата не протича ток. За този ефект, станал известен като “Андерсонова локализация”, в 1977 г. той раздели с Джон ван Флек и Невил Мот Нобеловата награда по физика за “фундаментални теоретични изследвания на електронната структура на магнитни и неподредени системи”. Андерсън има съществени приноси и в други области на физиката като спин-стъкла, високотемпературната свръхпроводимост и пр. Особено място заема неговата публикация от 1962 г. за това, как фотонът получава маса. Две години по-късно тя става основа на работата на Питър Хигс за механизма, чрез който възниква масата на частиците. Андерсън вярваше в теорията на “възникването”, според която всеки наблюдаем обект от дадено ниво удовлетворява законите, действащи на по-ниско ниво, но свойствата му не винаги могат да се изведат от първичното ниво. Виждането си за устройството на природата Андерсън артикулира в станалата класика за философията на науката статия “More is Different”. Превод именно на тази работа ви предлагаме по-долу.

Повечето е различно.

Нарушената симетрия и йерархичната структура на науката¹

Филип Уорън АНДЕРСЪН

Превод: Иля Петров

За философите редукионистката хипотеза все още може да е предмет на дискусия, но за преобладаващата част активни учени, мисля, че тя е безусловно приета. Поведението на мозъка и тялото ни, както и на всяка жива и нежива материя, за която имаме някакви по-детайлни знания, се приема, че се контролира от един и същ набор фундаментални закони, които с изключение на определени екстремни случаи са добре изучени.

¹P.W. Anderson (1972) More is Different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science* 177 393-396.

Изглежда неизбежно, без забележки, да стигнем до това, което на пръв поглед ни се струва очевидно следствие на редукционизма, т.е., ако всичко се подчинява на едни и същи фундаментални закони, тогава учените, които работят върху тези закони, са единствените, които изследват наистина фундаментални неща. На практика това се отнася за определени групи астрофизици, физици, занимаващи се с високи енергии и елементарни чатици, логици и някои математици, както и за още малко на брой други. Това виждане – главната цел на настоящата статия е да го обори – е изложено в известния цитат от Вайскопф [1]:

В развитието на науката през два века може да се разграничат две тенденции в научните изследвания, които поради липса на по-добра терминология ще нарека “интензивна” и “екстензивна”. На кратко: интензивните изследвания се занимават с фундаменталните закони, а екстензивните дават обяснение на явленията посредством установените фундаментални закони. Както обикновено това разграничение не е строго, но в повечето случаи е достатъчно ясно. Физиката на твърдото тяло, физиката на плазмата и вероятно биологията са екстензивни. Физиката на високите енергии и голяма част от ядрената физика са интензивни. Интензивните изследвания са винаги по-малко в сравнение с екстензивните. Когато се открият нови фундаментални закони, възниква мащабна и постоянно нарастваща активност, свързана с желанието да се приложат новите открития към необяснените досега явления. Така базисните изследвания имат две лица. Границата на науката се простира по цялата дължина на дългата линия от най-новите и най-модерни интензивни изследвания, като обхваща екстензивните изследвания, породени от интензивните постижения от вчерашния ден, до широката и добре развита мрежа от екстензивни изследвания, основани на интензивните резултати от изминалото десетилетие.

Значението на това послание може да се оцени по факта, че наскоро го чух, цитирано от водещ специалист в областта на материалознанието, който убеждаваше участниците от конференция по “фундаментални проблеми във физиката на кондензираната материя” да се съгласят, че подобни проблеми са или малко, или изобщо не съществуват и че единственото, което е останало, е екстензивна наука, под която той най-вероятно разбираще приборостроене.

Грешката на този тип мислене е, че редукционистката хипотеза по никакъв начин не предполага “конструкционизъм”. С други думи, въз-

можността всичко да се редуцира до прости фундаментални зависимости не предполага, че може, започвайки с тези закони, да възстановим (реконструираме) вселената. Всъщност колкото повече физиката на елементарните частици ни казва за природата на фундаменталните закони, толкова по-малко тя ни се струва приложима към реалните задачи на другите науки, а още по-малко към социалните проблеми.

Конструкциониската хипотеза търпи неуспех, когато се сблъска с проблемите, породени от размера и сложността. Оказва се, че поведението на големи и сложни ансамбли от елементарни частици не може да се опише с проста екстраполация на свойствата на система от малко на брой частици. Напротив, на всяко ниво на сложност се проявяват абсолютно нови характеристики и разбирането на новите свойства изисква изследвания, които са толкова фундаментални по своята същност, колкото и всяко друго. Мисля, че можем грубо да подредим науките в линейна йерархия, следвайки идеята: елементарните единици на науката X удовлетворяват законите на науката Y .

X	Y
физика на твърдото тяло (физика на кондензираната материя)	физика на елементарните частици
химия	физика на кондензираната материя
молекулярна биология	химия
клетъчна биология	молекулярна биология
⋮	⋮
психология	физиология
обществени науки	психология

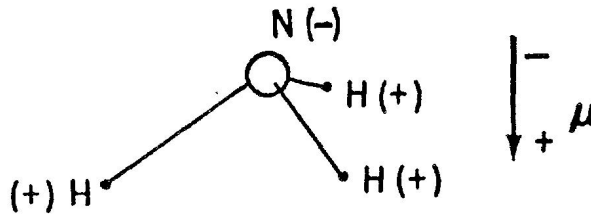
Разбира се, тази йерархия не означава, че науката X е “просто приложение на Y ”. На всяко ниво са необходими изцяло нови закони, концепции и обобщения, изискващи вдъхновение и творчество точно толкова дълбоки и значими, колкото и на предишното ниво. Психологията не е приложна биология, както и биологията не е приложна химия.

В моята собствена област – физика на кондензираната материя (many-body physics), ние сме, може би, по-близо до нашите фундаментални интензивни принципи в сравнение с другите науки, където се

наблюдават нетривиални сложности. В резултат ние започнахме да формулираме обща теория за това, как количествените разлики преминават в качествени. Тази формулировка, наречена теория на “нарушената симетрия”, може да е полезна при изясняването на конструкциониската необратимост на редукионизма. Ще дам елементарно и непълно обяснение на тези идеи и ще продължа с по-общи спекулативни коментари и аналогии за други нива и други подобни явления.

Но преди да започнем ми се иска да посоча две възможни причини за неправилно разбиране. Първо, когато говоря за промяна в мащаба, водеща до фундаментална промяна, нямам предвид достатъчно добре осъзнатото схващане, че явленията при различните мащаби могат да удовлетворяват принципно различни фундаментални закони – например общата теория на относителността се прилага при космологичните мащаби, а квантовата механика при атомните. Мисля, че може да приемем, че обичайната материя се описва с обикновена електродинамика и квантова теория и това обхваща в голяма част онова, което ще дискутирам. (Както казах, трябва да се започне с редукионизма, който изцяло приемам.) Втората идва от факта, че концепцията за нарушената симетрия е заимствана от физиката на елементарните частици, но там терминът се използва строго по аналогия; дали е съществен, или спекулативен предстои да разберем.

Позволете ми да започна дискусиата с пример от възможно най-ниско ниво, което ми е близко, тъй като съм се занимавал с него, когато бях студент: молекулата на амоняка. По онова време всичко бе известно за амоняка и всички го използваха за проверка на своите теории или апаратура. Аз не бях изключение. Химиците ще ви кажат, че амонякът “е” триъгълна пирамида



с отрицателно зареден азот и положително зареден водород така, че има електрически диполен момент (μ), насочен обратно от върха на пирамидата. Това ми се струваше повече от странно, тъй като току-що ми бяха преподавали, че няма тяло с електрически диполен момент. В действителност професорът ни по ядрена физика доказа, че ядрата не притежават диполен момент, но тъй като аргументите му се основаваха на симетрии

на пространството и времето, те би трябвало да са валидни и в общия случай.

Много скоро научих, че наистина аргументите са коректни (може би по-точният израз е не са некоректни), тъй като професорът ни бе достатъчно акуратен да ни каже, че не съществува стационарно състояние (т.е., състояние, което не се мени с времето), в което системата да притежава диполен момент. Ако началното състояние на амонячната молекула е показаното на фигурата несиметрично състояние, тя няма да остане дълго време в него. В резултат на квантово-механичното тунелиране азотът може да премине през водородния триъгълник от другата страна, обръщайки пирамидата, а процесът може да става много бързо. Това е така наречената “инверсия”, която се реализира с честота около 3×10^{10} в секунда. Стационарното състояние е суперпозиция на равновероятните несиметрична пирамида и нейната обратна. Това смесено състояние няма диполен момент. (Отново предупреждавам читателя, че това е свръхопростяване и препращам към учебниците за детайли.)

След като видяхме как амонячната молекула удовлетворява теоремата, че няма диполен момент, може да разгледаме други случаи и в частност да изследваме прогресивно увеличаващи се системи, за да проверим, дали състояние и симетрия са винаги свързани. Съществуват други подобни пирамидални молекули, изградени от по-тежки атоми. Водородният фосфид, PH_3 , който е два пъти по-тежък от амоняка също се инвертира, но с десет пъти по-малка честота. При фосфорния трифлуорид, PF_3 , в който водородът е заместен с много по-тежкия флуор, не се наблюдава обръщане на пирамидата с измерима честота, въпреки че по теория състояние, имащо дадена ориентация, със сигурност ще се инвертира за някакво време.

Може да продължим с по-сложни молекули, например със захар, съдържаща около 40 атома. Безсмислено е да очакваме подобни системи да се самоинвертират. Захарната молекула, синтезирана от жив организъм, е спирална и никога не се инвертира както от квантово-механичното тунелиране, така и от топлинното движение при нормални температури. От този момент трябва да забравим за инверсията и да игнорираме симетрията по четност. Законите, отразяващи симетрията, не са отхвърлени, а нарушени.

Но, ако синтезираме захарните молекули чрез химична реакция, която е малко или повече в топлинно равновесие, ще открием, че броят на ляво-ориентираните е средно равен на броя на дясно-ориентираните молекули. Изобщо за система от свободни молекули законите за симет-

рия никога не се нарушават. За да получим истинска асиметрия в популацията, е необходима жива материя.

В реално големите, но все още неживи съвкупности от атоми, се наблюдава друг тип нарушена симетрия, която също води до поява на диполен момент, оптична поляризация, или и двете. Много кристали имат диполен момент за всяка елементарна клетка (пироелектрети), а при някои този момент може да се мени под действието на електрично поле (фероелектрети). Асиметрията е спонтанен резултат на стремежа на кристалите да са в състояние с минимална енергия. Разбира се, съществува и състоянието с обратен момент, което по симетрия има същата енергия, но системата е толкова голяма, че нито термичните, нито квантово-механичните сили са способни да предизвикат преход от едното в другото състояние за време, да кажем, сравнимо с възрастта на вселената.

Поне три извода може да направим от казаното. Единият е, че симетриите са много важни във физиката. Под симетрия се разбира съществуването на различни гледни точки, от които системата изглежда една и съща. Няма да се сгреша много, ако се каже, че физиката изучава симетриите. Първата демонстрация на силата на тази концепция е свързана с Нютон, който може да си е задал въпроса: Дали материята тук – в мите ръце, се подчинява на същите закони както тази в небето, т.е. дали пространството и материята са хомогенни и изотропни?

Вторият извод е, че не е задължително вътрешната структура на част от системата да е симетрична, въпреки че тоталното състояние е симетрично. Бих ви провокирал да предскажете инверсията на амоняка и неговите леснонаблюдаеми свойства без да изпозвате асиметричната пирамидална структура, прилагайки фундаменталните закони на квантовата механика, въпреки че “състояние” с подобна структура изобщо няма. Изненадващо е, че едва преди двадесетина години [2] ядрените физици престанаха да разглеждат ядрото като симетрична, лишена от всякакви особености малка топчица и осъзнаха, че, макар и да не притежава диполен момент, то има форма или на елипсоид, или на чиния. Тази състояния намериха потвърждения в изследваните от ядрената физика реакции и енергетични спектри, въпреки че в сравнение с инверсията на амоняка е много по-трудно да се демонстрират директно. По мое мнение, независимо дали ще наречем тази идея интензивно изследване, тя е фундаментална по своята същност, както и много други, подобни на нея. Тя обаче не изисква нови фундаментални закони и би било изключително трудно да я получим като синтез на известните закони. Това

е просто просветление, основано на всекидневната ни интуиция, което напасва всичко.

Главната причина, защо е трудно да изведем този резултат, е важна за целите на нашите последващи разсъждения. Ако ядрото е достатъчно малко, няма как строго да определим формата му. Три или четири, или десет частици, въртящи се една спрямо друга, не дефинират въртяща се “чиния” или “елипсоид”. Това е възможно само когато разглеждаме ядрото като многочастична система в така наречената $N \rightarrow \infty$ граница. Ние си казваме: “макроскопично тяло с подобна форма ще има такъв и такъв ротационен и вибрационен спектър, изцяло различен от този, който характеризира система без особености”. Когато видим подобен спектър, който дори не е разделен и често не е идеален, ние разбираме, че ядрото все пак не е макроскопично, а по-скоро се доближава до макроскопично поведение. Тръгвайки от фундаменталните закони и с компютър, би трябвало да направим две невъзможни неща: да решим задачата за безкрайно много тела; и след това да приложим получения резултат към крайна система преди да синтезираме поведението ѝ.

Третият извод е, че състоянието на истински голяма система изобщо не трябва да има симетрията на законите, на които тя се подчинява; обикновено тя е с по-малка симетрия. Класическият пример е кристал: Изграден от слоеве атоми, съгласно със закони, които отразяват идеалната хомогенност на пространството, кристалът неочаквано и непредсказуемо разкрива изцяло нова и много красива симетрия. Общото правило, обаче, дори и в случая на кристал е, че голямата система е по-несиметрична от тази, която предполага първичната структура. Макар и симетричен, кристалът е по-малко симетричен от идеалната хомогенност.

Примерът с кристалите може да изглежда малко объркващ. Подредеността на кристалите е изведена полуемпирично в средата на 19-ти век без никакви сложни разсъждения. Но понякога, както е в случая със свръхпроводниците, новата симетрия (наречена нарушена симетрия, тъй като първоначалната не е вече наблюдаема) може да се окаже от абсолютно неочакван тип и изключително трудна за визуализация. Трябваше да изминат 30 години от откриването свръхпроводимостта до момента, когато физиците разполагаха с всички необходими за обяснението ѝ фундаментални закони.

Свръхпроводимостта е най-впечатляващият пример за нарушена симетрия при макроскопични обекти, но, разбира се, не е единствен. Антиферромагнетите, фероелектретите, течните кристали, както и много други състояния на материята се подчиняват на определена доста об-

ща схема от правила и схващания, за която теоретиците, занимаващи се с много-частични задачи, използват термина нарушена симетрия. Няма да продължа дискусиата, но давам в края на статията подходяща литература [3].

Ключовата идея, която е не само удобна, но е и решаваща е, че за големи системи (макроскопично ниво) при така наречената $N \rightarrow \infty$ граница веществото търпи математически рязък, сингулярен “фазов преход” към състояния, в които микроскопичните симетрии и даже микроскопичните уравнения на движение са в изветен смисъл нарушени. Симетрията се проявява само в определени характеристични поведения като: дълговълновите трептения (типичният пример е звуковата вълна); или в явленията, свързани с необикновената макроскопична проводимост при свръхпроводниците; или в стабилността на кристалната решетка за повечето твърди тела и т.н. Разбира се, не става дума за реално нарушаване на пространствената и времева симетрия на системата, но тъй като за отделни нейни части е енергетически по-изгодно да поддържат определени фиксирани връзки, симетрията разрешава единствено цялото да реагира на външните сили като едно цяло.

Това води до “твърдост”, която е също подходящо описание на свръхпроводимостта и свръхфлуидността въпреки очевидното им “течно” поведение. (За първия случай тази особеност е отбелязана още в работите на Лондон [4].) Наистина за един въображаем, съставен от газ, но разумен жител на Юпитер или на облак от водород някъде в центъра на галактиката, свойствата на обикновените кристали може да се окажат по-голяма загадка, отколкото тези на свръхфлуидния хелий.

Не смятам да създавам усещане, че всичко е изучено и установено. Смятам, че още има принципни въпроси, свързани със стъклоподобните и други аморфни фази, които могат да разкрият дори още по-сложни типове поведение. Все пак ролята на този тип нарушена симетрия по отношение на свойствата на инертни, но макроскопични материални тела е разбрана, поне по принцип. В този случай можем да видим как цялото става не само по-голямо, но и твърде различно от сумата на съставлящите го части.

Логично е следващата стъпка да е да се запитаме дали е възможно още по-пълно нарушение на фундаменталните пространствени и времеви симетрии и дали това ще доведе до нови явления, съществено различни от “простия” фазов преход, изразяващ кондензация в състояние с по-малка симетрия.

Вече изключихме очевидно несиметричните случаи на течности, газове и стъкла. (Макар те да са по същество най-симетрични.) Струва ми

се, че следващата стъпка е да разгледаме система, която е регулярна, но съдържа информация. Тоест, тя е пространствено регулярна в някакъв смисъл, така че може да бъде “прочетена”, но съдържа елементи, които се менят от “клетка в клетка”. С подобна структура са например ДНК, а в ежедневието: текстов ред или филмова лента и т.н. Този тип “информационно-заредена кристалност” изглежда съществена за живота. Дали за развитието му е необходимо допълнително нарушаване на симетрията засега не е ясно.

В опитите си да характеризирам типовете нарушена симетрия, реализиращи се в живите организми, открих, че поне още една особеност може да се определи като универсална, или като съществено обща, а именно подредеността (регулярност или периодичност) по време. В много теории на жизнените процеси регулярното пулсиране във времето играе съществена роля: теориите за биологичното развитие, за растежа и ограниченията му, за паметта. Времевата регулярност е типична за живите същества. Тя има поне две функции. Първо, в повечето процеси, осигуряващи непрекъснато, квази-стабилно получаване на енергия от околната среда, участват периодични по времето механизми (машинки) като осцилатори и генератори. Второ, времевата, подобно на пространствената регулярност, е средство за обработка на информацията. Човешкият език е пример за това, както и факта, че всички изчислителни машини използват времево пулсиране. В някои от споменатите теории се предполага и трета функция: използване на фазовите съотношения между импулсите за въздействие и контрол върху растежа и развитието на клетките и организмите [5].

В някаква степен структурата (функционалната структура в теологичен смисъл като опозиция на по-маловажната кристална форма) трябва също да се вземе под внимание; може би като възможно звено между кристалността и информационните низове в йерархията на нарушените симетрии.

За да натрупам купчина от спекулации, бих добавил, че следващата стъпка е йерархия или специализация на функциите, или и двете. В някакъв момент ще трябва да престанем да говорим за понижаване на симетрията, а да използваме нарастване на сложността. Така с нарастването на сложността с всяко ниво се изкачваме по йерархичния ред на науките. Очаквам да се натъкнем на неочаквани, а аз вярвам, и на доста фундаментални въпроси на всяко стъпка при сглобяването на по-простите елементи в по-сложната система и при осмислянето на получените при това принципно новите типове поведение.

Може би няма да е от голяма полза да се прави паралел между начина, по който сложността възниква в най-простите случаи в химията и в теорията на системите от много частици, и начина, по който тя възниква в наистина комплексите културни и биологични системи, с изключение че връзката между системата и нейните части е еднопосочна. Синтезът едва ли ще е възможен, докато анализът, от своя страна, не само ще е приложим, но и успешен. Например без осмислянето на ролята на нарушената симетрия при свръхпроводниците Джозефсон едва ли би открил ефекта си. (Другото наименование на Джозефсон ефекта е “макроскопични квантови интерференчни явления”; интерференчните ефекти, наблюдавани между макроскопичните вълнови функции на електроните в свръхпроводниците или между атомите в свръхфлуиден течен хелий. Тези явления повишиха с немислими порядъци точността на електромагнитните измервания и освен другите им приложения се очаква да играят важна роля в компютрите на бъдещето. Така че в дългосрочен план те може би ще доведат до някои от главните технологични постижения на това десетилетие [6]). Друг пример е биологията, която изцяло се преобрази в резултат на редуцията на генетиката до биохимия и биофизика – процес, което вероятно ще има нечувани последици. Така че не е вярно казаното в една скорошна работа [7], че всеки за себе си “трябва да култивира собствена ниша и да не се опитва да прокара пътища през планините ... между науките”. По-скоро трябва да си признаем, че подобни пътища, макар често да са най-кратките към друга част от собствената ни научна област, не се виждат лесно от позициите на една единствена наука.

Арогантността на физика, занимаваща се с елементарни частици, и неговите интензивни изследвания може да са позабравени (откривателят на позитрон беше казал “останалото е химия”), но трябва да се освободим и от подобните идеи на някои молекулярни биолози, които, изглежда, са решени да сведат всичко, което се отнася до човешкия организъм, “единствено” до химия – от обикновената настинка и всички душевни болести до религиозния инстинкт. Със сигурност има повече нива на организация между човешката етология и ДНК, отколкото между ДНК и квантовата електродинамика, а и всяко ниво може да изисква цяла нова структура от концепции.

В заключение предлагам два примера от икономиката за онова, което, надявам се, съм искал да кажа. Маркс учеше, че количествените изменения водят до качествени промени, но следният разговор в Париж през 20-те години на 20-ти век го резюмират още по-добре:

Фитцджерълд: Богатите се отличават.

Хемингуей: Да, те имат повече пари.

Литература

- [1] V. F. Weisskopf, in *Brookhaven Nat. Lab. Publ.* 888T360 (1965). Also see *Nuovo Cimento Suppl. Ser 1* 4, 465 (1966); *Phys. Today* 20 (No. 5), 23 (1967).
- [2] A. Bohr and B. R. Mottelson, *Kgl. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd.* 27, 16 (1953).
- [3] Broken symmetry and phase transitions: L. D. Landau, *Phys. Z. Sowjetunion* 11, 26, 542 (1937). Broken symmetry and collective motion, general: J. Goldstone, A. Salam, S. Weinberg, *Phys. Rev.* 127, 965 (1962); P. W. Anderson, *Concepts in Solids* (Benjamin, New York, 1963), pp. 175-182; B. D. Josephson, thesis, Trinity College, Cambridge University (1962). Special cases: antiferromagnetism, P. W. Anderson, *Phys. Rev.* 86, 694 (1952); superconductivity, —, *ibid.* 110, 827 (1958); *ibid.* 112, 1900 (1958); Y. Nambu, *ibid.* 117, 648 (1960).
- [4] F. London, *Superfluids* (Wiley, New York, 1950), vol. 1.
- [5] M. H. Cohen, *J. Theor. Biol.* 31, 101 (1971).
- [6] J. Clarke, *Amer. J. Phys.* 38, 1075 (1969); P. W. Anderson, *Phys. Today* 23 (No. 11), 23 (1970).
- [7] A. B. Pippard, *Reconciling Physics with Reality* (Cambridge Univ. Press, London, 1972).



Филип Андерсън (в центъра), заобиколен от известни учени, дошли в Принстън на семинара, посветен на 90-годишнината му. Отляво надясно: Антъни Лиджет (носител на Нобеловата награда по физика за 2003 г.), Уолтър Кон (носител на Нобеловата награда по химия за 1998 г.), Дениъл Цюи (носител на Нобеловата награда по физика за 1998 г.), Едуард Уитън (спечелил Филдс медала за 1990 г.), Франк Уилчек (носител на Нобеловата награда по физика за 2004 г.) и Дъглас Ошероф (носител на Нобеловата награда по физика за 1996 г.).