

Идеите за комплексност от физиката на кондензираната материя и статистическата физика Лучиано Пиетронеро¹

В началото тази област на физиката се разпознаваше като физика на твърдото тяло. По-късно П. В. Андерсън изкова термина физика на кондензираната материя, а неотдавна тя се обедини със статистическата физика, за да се появи като физика на комплексните системи.

Тази област от физиката е в известен смисъл допълнителна² към физиката на елементарните частици, която се основава на редуционисткия подход. Наистина, традиционният подход във физиката е да се разглеждат най-простите системи и да се изучават в най-големи подробности. Този подход се фокусира върху елементарните “тухлички”, които изграждат материята. Този редуционистки възглед може да се приложи към огромен брой ситуации и той по необходимост предполага съществуването на характеристични мащаби: *размера* на атома, на молекулата или на някой макроскопичен обект.

От друга страна, съществуват много ситуации, в които познаването на отделните елементи не е достатъчно за характеризиране на свойствата на цялата система. Наистина, когато огромен брой елементи взаимодействат нелинейно, те могат да породят сложни структури, които не могат пряко да се обяснят с отделните елементи. В тези случаи бихме могли да мислим за някаква “архитектура” на природата, която зависи по някакъв начин от отделните елементи, но, в добавка, проявява свойства и фундаментални закони, които не могат да бъдат изведени от индивидуалните елементи. Тази гледна точка бе изразена първо в една прочута статия на П. В. Андерсън (PWA), която оказва силно влияние върху развитието на идеите за комплексност.

По-големият брой предизвиква различие³

Това е заглавието на прочутата статия на PWA (*Science* **177**, 393, 1972), която се смята за нещо като *манифест* първо на физиката на кондензираната материя, а по-късно – на комплексността. Тази статия влияе силно върху начина, по който учените мислят върху разглежданите от тях проблеми. В тази статия Андерсън изследва всеобхватността на редуционистката гледна точка, според която фундаментални закони са само тези, които се отнасят до елементарните частици. Основна негова идея е, че природата е организирана по йерархичен начин и има индивидуални елементи и колективни свойства, които възникват всеки път, когато се премине от едно йерархично равнище към следващото. По-късното развитие на ренорм-групата предостави формализъм, който позволява тези интуитивни представи да се интерпретират в едни строги рамки. Примери за тези различни равнища могат да бъдат кварките и ядрата, атомите, молекулите, протеините, възникването на живота и нагоре до макроскопичните мащаби и до цялата Вселена. Идеята е, че всяка научна дисциплина обяснява прехода от едно равнище към следващото. В този процес съществените понятия са основните елементи и техните взаимодействия. Те водят до поява на свойства и колективни поведения, които не могат да бъдат изведени от отделните елементи. От тези колективни свойства се извличат основните елементи на следващото йерархично равнище. Всяка от тези стъпки се характеризира с нейни собствени *фундаментални закони*. През последните години бяха направени множество опити за

¹ Превод от Europhysicsnews, 39/6, 2008. Авторът работи в Института по комплексни системи в университета в Рим. Неговият уеб-сайт адрес е <http://pil.phys.uniroma1.it>. (Бел. прев.)

² Допълнителна в смисъла, който Бор влага в това понятие (Бел. прев.)

³ Не мога да намеря по-кратък превод на английското “More is different”. Всъщност, малко по-многословно, но пък затова напълно ясно са го казали още старите диалектики: Количествените натрупвания водят до качествени изменения. (Бел. прев.)

прилагане на този начин на разсъждаване към области, които изглеждат твърде далеч от физиката – напр. социо-икономическите дисциплини.

На една конференция във Аспен през 2000 г. Андерсън припомни произхода на цитираната статия. В края на 60-е години на XX век се появили различни лозунги в областта на политиката и икономиката, като например издигнатите от британското екологично движение “Малкото е прелестно” или “По-голям брой е по-лошо”. Управляващите кръгове отговориха с “По-голям брой е по-добре” и, според Андерсън, най-естественото било да предложи “По-големият брой предизвиква различие”⁴. Статията се появява в известен смисъл като резултат от възмущението сред учените, работещи в областта на физиката на кондензираната материя, предизвикано от известна арогантност, проявена от специалистите по елементарни частици. Например В. Вайскопф (първи директор на ЦЕРН) дели науката на “интензивна” (елементарни частици) и “екстензивна” (всичко останало). Това гледище загатва общата представа, че физиката на елементарните частици е единственото истинско интелектуално предизвикателство, а всички други физични области са “просто химия”. Това йерархично гледище бе възприето в известен смисъл от Андерсън, но той разруши неговите устои: не е възможно да се приеме, че законите на дадена наука са просто следствия от тези на друга наука. Конкретен пример, с който се представя тази теза, бе нарушението на симетрията и свойствата на свръхпроводящото състояние. Този пример показва, че радикално нови свойства и представи могат да възникнат на относително проста основа. Наистина, през първата половина на XX век проблемът за свръхпроводимостта бе предизвикателство за най-добрите физици-теоретици като Блох, Вигнер и Хайзенберг, които обаче се придвижваха в погрешни посоки. Някои от тях дори допускаха, че решението е невъзможно. Накрая проблемът бе решен от “феноменолога” Джон Бардийн с една интуиция за природата на свръхпроводящото състояние, която не може да се изведе с традиционните методи, колкото и префинени да са те.

Понятието “възникване” пък бе взето на заем от биологията, където то се използва във връзка с възникването на живота от неживата материя. Това понятие бе привнесено във физиката и обобщено. По-сетнешните понятия на ренорм-групата и свързаните с нея свойства на универсалност осигуриха формализма за това ново виждане. Фактически универсалността съответства на най-простия начин да се демонстрира, че едни и същи макроскопични резултати може да се получат от съвсем различни микроскопични причини. Процесът, на който се основава това явление, е спонтанното нарушаване на симетрията. Всички свойства, които характеризират твърдите тела – като кристална структура, метални или изолаторни свойства, еластичност и макроскопична кохезия – са безсмислени в света на отделните атоми. Обратно, те се оформят по естествен начин като възникващи свойства на системи от множество взаимодействащи помежду си атоми.

Този процес достига своята завършеност само когато броят на частиците е много голям. В ядрото, което в типичния случай съдържа около стотина нуклона, има елементи и на геометрична структура, и на свръхфлуидност. Но при ограничения брой елементи, процесът остава незавършен, тъй като тези свойства са определени добре само за безкраен брой частици.

В резюме, целта бе да се покаже мисловната независимост на явленията от повисокото равнище по отношение на “тиранията” на фундаменталните уравнения, които се предполагаше да съставят “теорията на всичко” (един термин, който се появи по-късно).

⁴ Съжалявам за почти безсмислените и неблагозвучни преводи на английските “Small is beautiful”, “More is worse” и “More is better”. (Бел. прев.)

Също в случая на детерминистичния хаос, дори в класическите системи, може да се наблюдава съществено разкъсване на връзката между началните условия и еволюцията на системата.

В заключение: не съществуват абсолютни фундаментални закони, които, като се започне от най-дребния мащаб, позволяват (най-малкото по принцип) да се изведат всички други свойства при всички други мащаби. Съществуват различни равнища и фундаментални закони за всяко от тях, които позволяват преход към следващото равнище. От тази гледна точка различните научни дисциплини стават част от една обща глобална система с много повече възможности за интеграция помежду тях.

Науката за комплексността днес

Изследването на комплексните системи обяснява възникването на колективни свойства в системи с огромен брой взаимодействащи помежду си елементи. Във физичен или биологичен контекст тези елементи може да бъдат атоми или макромолекули, но също така хора, машини или компании в социо-икономичен контекст. Науката за комплексността се стреми да открие природата на възникващото поведение на комплексните системи, което често е невидимо за традиционния подход, като се фокусира върху архитектурата на вътрешните връзки и на общата архитектура на системите, а не толкова върху индивидуалните компоненти.

Става дума по-скоро за промяна на перспективата в начина на мислене на учените, отколкото за нова научна дисциплина. Традиционната наука се основава върху редуccionистки доводи, при което, ако се знаят основните елементи на системата, е възможно да се предскажат нейното поведение и свойства. Лесно е да се разбере обаче, че в случая на една клетка или за социо-икономическата динамика срещаме нова ситуация, в която познаването на отделните части не е достатъчно за описание на цялостното поведение на структурата. Като се започне от най-простите физични системи, каквито са кристалите, в които се състезават порядък и безпорядък, това възникващо поведение може да се проследи в много други системи – като се започне от екологията и имунната система, та до социалното поведение и икономиката. Науката за комплексността има за цел да разбере свойствата на тези системи. Какви правила управляват тяхното поведение? Как те се приспособяват към променящите се условия? Как те се обучават ефективно и как оптимизират поведението си?

Развитието на науката за комплексността не може да се сведе до отделно теоретично или технологично нововъведение: то предполага нов научен подход с огромни възможности да повлияе дълбоко на научната, социалната, икономическата и технологична дейности.

Статистическа механика

Науката за комплексността възниква по естествен начин от статистическата механика, която през 70-е години на XX век въведе фундаментална промяна на парадигмата по отношение на редуccionисткия научен подход. В равновесната точка между порядък и безпорядък може да се наблюдават флуктуации във всички мащаби; системата вече не може да бъде описана с обикновения формализъм, при който се опитваме да напишем прости уравнения за средните стойности. От това концептуално зрънце се развиха много нови понятия, които направиха революция в нашите възгледи за природата: закони за мащабна инвариантност, ренорм-група, фрактална геометрия, стъкловидни и зърнести системи, комплексни течности, колоиди и много други. Наскоро започна да става ясно, че тези понятия могат да имат много по-широко приложение, далеч извън физичните системи, от които водят началото си. Това доведе до голям брой междудисциплинни приложения, които понякога са изненадващи и които вероятно представляват началото на множество възможни приложения.

Комплексността⁵ в науката за нови материали

Свръхпроводимостта, която е като историческа парадигма на комплексното колективно поведение, се разви в последните години в новата област на високотемпературната свръхпроводимост. Тя представлява един от най-предизвикателните неразрешени проблеми в науката. В добавка, разработването на нови материали, като например новите въглеродни съединения, биомолекулните материали в електрониката, метаматериалите с наноструктура и фотонните кристали изискват коренно различен подход за тяхното приготвяне и разбиране. В действителност тяхното изготвяне съответства на дисипативната динамика далеч от равновесие с възможни елементи на самоорганизация. Тази възможност бе описана в статията “*Basic Research in the Information Technology Industry*” във *Physics Today* (July 2003, p. 44-49) от T.N. Teis P. M. Horn (IBM labs.). В тази статия се твърди, че дисипативните системи, йерархията на енергийните мащаби, критичната самоорганизация и вдъхновението от способните да еволюират биологични системи ще се окажат основни за развитието на нови наноматериали.

Самоорганизация в действие

Важен пример за гореописания сценарий е развитието на комплексни мрежи като интернет и World-Wide-Web, които днес представляват основа за всички видове комуникации – лични, бизнес и военни на планетарно равнище. Тези мрежи притежават забележителната особеност да не бъдат планирани от никого! Обикновеният подход “отгоре–надолу”, който се прилага при конструиране на един телефон или на спътникова комуникационна система тук се заменя с динамиката “отдолу–нагоре”, при която се добавят нови сървери или се отстраняват стари. Този тип динамика представя свойства на самоорганизация и биологична еволюция, която изисква съвсем нов и междудисциплинен подход.

Търсенето на полезната информация

Характерна черта на нашето общество, проявяваща се както в научните, така и в социо-икономическите дейности, е необходимостта от намиране на път в огромното количество налична информация, за да се извлече полезната информация. Това е епохален проблем, който изисква разработване на теория на информацията с нови характеристики, в която теория комплексността и критичните явления могат да играят ключова роля. Пример за тази ситуация е търсачката Гугъл, която, за да използва WWW, прилага понятия от статистическата физика и за йерархичната категоризация на информацията. В момента Гугъл е най-добрата търсачка поради качеството на подредбата на информацията и са в ход много усилия за усъвършенстването ѝ и за очертаване на едно ново поколение. Това най-вероятно ще изисква нови междудисциплинни усилия, при които в процеса на оптимизация се включват също лингвистични и семантични идеи.

Споменатите примери описват някои типични ситуации, в които се оказва особено съществен междудисциплинният подход, основан на понятията и методите на науката за комплексността. Лесно могат да се добавят много нови и положението е твърде динамично. Наистина, би било лесно да се спекулира относно потенциала на

⁵ Авторът дава един много нагледен пример за разликата между *комплексност* и *комплицираност* (сложност). Компютърът например, представлява несъмнено една много сложна, комплицирана система. За всеки компютър обаче съществува схема, план, по който той е произведен. И планирането е извършено отгоре–надолу, т.е. най-напред се планират основните му части, след това – съставките на всяка от основните части и т.н. до най-дребния детайл. За разлика от това, една комплексна система се строи в обратен ред, отдолу нагоре. Пример за такава е споменатият в текста интернет – в тази система връзките се добавят отдолу–нагоре и няма глобален проект за системата. (Бел. прев.)

тези методи в научните области, които все още не са били обследвани от тази гледна точка.

Превод Х.Д.