

Съобщение на Нобеловия комитет от 09.10.2012 г.:

Нобеловата награда за физика – 2012 бе присъдена съвместно на Серж Арош и Дейвид Дж. Уайнленд *“за основополагащи експериментални методи, които дават възможност да се измерват и управляват отделни квантови системи”*.

Контролиране на частица в един квантов свят¹

Серж Арош и Дейвид Уайнленд независимо един от друг откриха и развиха основополагащи методи за измерване и управляване поведението на отделни частици, запазвайки тяхната квантово-механична природа по начини, смятани по-рано за непостижими.

Арош и Уайнленд отвориха вратата към нова ера в експериментирането в квантовата физика, като демонстрираха пряко наблюдаване на отделни квантови системи, без това да ги разрушава. Чрез техните остроумни лабораторни методи те успяха да измерят и контролират твърде деликатни квантови състояния, давайки възможност на тяхната изследователска област да направи първите стъпки към създаването на свръхбързи компютри, основани на квантовата физика. Тези методи водят също така до конструиране на извънредно точни часовници, които в бъдеще биха могли да станат основа на нов стандарт за време, превъзхождащ стократно днешната точност на цезиевите часовници.

За отделните частици на светлината или веществото са неприложими законите на класическата физика – те се подчиняват на законите на квантовата физика. Не е лесно обаче да се изолират отделни частици от заобикалящата ги среда – щом взаимодействат с външния свят, те губят своите мистериозни квантови свойства. По този начин много от изглеждащите екзотични явления, предсказвани от квантовата механика, не биха могли да се наблюдават пряко, като на изследователите им оставаше единствено да правят “мисловни експерименти”, в които по принцип биха могли да се проявят тези странни явления.

И двамата лауреати работят в областта на квантовата оптика, изследвайки фундаменталното взаимодействие между светлината и веществото, една област, в която се наблюдава значителен напредък от средата на 80-те години на миналия век. Техните методи имат много общи неща. Дейвид Уайнленд улавя електрически заредени атоми, или йони, като ги контролира и прави измервания върху тях чрез светлина (фотони). Серж Арош следва обратния подход: той контролира и измерва захванати фотони, или частици светлина, като пропуска през тях атоми.

Управляване на отделни йони в уловка

В лабораторията на Дейвид Уайнленд в Боулдер, Колорадо, електрически заредени атоми, или йони, се удържат в една уловка, като се ограждат с електрични полета. Чрез провеждане на експериментите във вакуум при изключително ниски температури, частиците се изолират от топлината и лъчението в заобикалящата ги среда.

Един от секретите за големия успех на Уайнленд е майсторското използване на лазерни лъчи и създаване на лазерни импулси. Един лазер се използва за подтискане на топлинното движение на йона в уловката и поставянето му на неговото най-ниско енергетично ниво, като по този начин се дава възможност за изучаване на квантовите явления с този захванат йон. С помощта на добре настроен лазерен импулс йонът може

¹ Превод от http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/popular.html.

да се постави в състояние на *суперпозиция*, което включва едновременно съществуване на две съществено различни състояния. Например, йонът може да бъде принуден да заема едновременно две различни енергетични нива. Започва се от най-ниското енергетично ниво, като лазерният импулс само повдига йона на половината разстояние до по-високото енергетично ниво, така че да застане посредата между двете нива (в суперпозиция от енергетичните нива) като вероятността да се окаже в кое да е от тях е една и съща. По този начин може да се изследва квантова суперпозиция от енергетичните нива на йона.

Управляване на отделни фотони в уловка

За да разкрият тайните на квантовия свят, Серж Арош и неговата изследователска група използват друг метод. В лабораторията им в Париж в една малка камера фотони с честота от микровълновия диапазон се отразяват напред и назад между две огледала, поставени на около 3 cm едно от друго. Огледалата са направени от свръхпроводящ материал и са охладени до температура, само малко над абсолютната нула. Тези огледала са „най-блестящите“ на света. Те имат толкова висока отразяваща способност, че един фотон може да снове между тях почти една десета от секундата, преди да се изгуби или погълне. За това рекордно дълго време на живот фотонът изминава 40 000 километра, което е еквивалентно на околосветско пътешествие.

По време на неговия дълъг живот, върху заловения фотон може да се извършат множество квантови операции. Арош използва специално подготвени атоми, така наречените атоми на Ридберг (по името на шведския физик Йоханес Ридберг), които използва както за контролиране, така и за измервания върху микровълновия фотон в камерата. Един атом на Ридберг има радиус около 125 нанометра, което означава, че е около 1000 пъти по-голям от типичните атоми. Тези гигантски, имащи формата на поничка, атоми на Ридберг, се изпращат в камерата един по един с внимателно подбрана скорост, така че взаимодействието им с микровълновия фотон протича по един добре контролиран начин.

Ридберговият атом преминава през камерата и я напуска, а микровълновият фотон остава в нея. Взаимодействието между атома и фотона обаче променя фазата на квантовото състояние на атома: ако си представим квантовото състояние на атома като вълна, гребените и доловете на вълната се оказват отместени. Това фазово отместване може да бъде измерено, когато атомът напусне камерата, като по този начин разкрива наличието или отсъствието на фотон в нея. Когато няма фотон, няма и фазово отместване. По този начин Арош може да измерва отделен фотон, без да го унищожава.

По подобен начин Арош и групата му могат да преброят фотоните в камерата така както дете брои топчетата в една купа. Това може да изглежда лесно, но се изисква изключителна ловкост и умение, тъй като фотоните, за разлика от обикновените топчета, се разрушават незабавно при контакт с външния свят. Основавайки се на техните методи за броене на фотони, Арош и сътрудниците му създават методи за проследяване в реално време, стъпка по стъпка еволюцията на едно индивидуално квантово състояние.

Парадокси на квантовата механика

Квантовата механика описва един микроскопичен свят, невидим за невъоръженото око, където събитията се случват в противоречие с нашите очаквания и опита ни с физичните явления в макроскопичния, класическия свят. Физиката в квантовия свят притежава своя вродена неопределеност или хаотичност. Пример за такова противоречиво поведение е суперпозицията, при която една квантова частица може да бъде едновременно в няколко различни състояния. Обикновено ние не си

представяме едно топче да е едновременно и “тук”, и “там”, но ако това беше квантово топче, случаят би бил точно такъв. Състоянието на суперпозиция на това топче ни казва точно каква е вероятността то да бъде тук или там, ако ние искаме да измерим точно къде е то.

Защо ние никога не осъзнаваме тези странни аспекти на нашия свят? Защо не можем да наблюдаваме състояние на суперпозиция на квантово топче във всекидневния живот? Този въпрос е разглеждан още от австрийския физик и Нобелов лауреат (физика, 1933) Ервин Шрьодингер. Както и много други пионери на квантовата теория, той се мъчи да разбере и интерпретира неговите последствия. През 1952 г. той пише: “Ние никога не експериментираме с един електрон, или атом, или (малка) молекула. В мисловните експерименти понякога предполагаме, че правим това, но то неизбежно влече след себе си абсурдни последици...”.

С цел да илюстрира абсурдните следствия от прехода между микросвета на квантовата физика и нашия всекидневен макросвят, Шрьодингер описва мисловен експеримент с една котка: котката на Шрьодингер е абсолютно изолирана от външния свят в една кутия. В кутията има още бутилка със смъртоносен цианид, който се освобождава само в случай, че един радиоактивен атом, който също се намира в кутията, се разпадне.

Радиоактивният разпад се подчинява на законите на квантовата механика, според която във всеки момент състоянието на радиоактивния атом е суперпозиция от две възможности: да се е разпаднал и да не се е разпаднал. Следователно и състоянието на котката трябва също да бъде суперпозиция от това да бъде както мъртва, така и жива. Сега, ако надникнете в кутията, вие рискувате да убиете котката, тъй като квантовата суперпозиция е изключително чувствителна към взаимодействие с околната среда, и затова дори най-внимателният опит да се зърне котката би довел незабавно до “колапсиране” на “състоянието на котката” в един от двата възможни изхода – мъртва или жива. Според Шрьодингер този мисловен експеримент води до абсурдно заключение и казват, че по-късно той се опитвал да се извини за това, че е увеличил квантовата бъркотия.

И двамата Нобелови лауреати за 2012 г. се оказаха в състояние да планират квантовото състояние на котката, когато то се сблъска с външния свят. Те направиха експерименти и успяха да покажат с големи детайли как всъщност актът на измерването предизвиква колапс на квантовото състояние, изгубвайки характера си на суперпозиция. Вместо котката на Шрьодингер, Арош и Уайнленд затварят една квантова частица и я поставят в състояние на суперпозиция, подобно на състоянието на котката. В действителност, тези квантови обекти не са макроскопични както котката, но те са все още твърде големи според квантовите стандарти.

При опитите на Арош вътре в камерата микровълновите фотони се поставят в подобни на котката състояния, в които едновременно имат противоположни фази – подобно на хронометър, чиято стрелка едновременно се върти и по посока на часовниковата стрелка, и обратно. След това микровълновото поле в кухнята се изследва с атом на Ридберг. Резултатът е друг неразбираем квантов ефект, наречен заплитане (entanglement). То също е описано от Шрьодингер и може да настъпи между две или повече квантови частици, които не са в пряк контакт, но все още могат взаимно да се разпознават и да влияят на свойствата си. Заплитането на микровълновото поле и атомите на Ридберг позволява на Арош да планира живота и смъртта на котко-подобното състояние вътре в кухнята, като проследява крачка по крачка, атом след атом как то преминава от квантова суперпозиция на състоянията към едно добре определено от гледна точка на класическата физика състояние.

На прага на нова революция в компютрите

Едно възможно приложение на йонните уловки, което е мечта за много учени, е квантовият компютър. В днешните класически компютри най-малката единица информация е битът, който приема стойност или 1, или 0. В квантовия компютър обаче, основната единица информация – квантовият бит или кубит – може да бъде 1 и 0 едновременно. Два квантови бита могат едновременно да имат четири стойности – 00, 01, 10 и 11 – и всеки допълнителен кубит удвоява броя на възможните състояния. За n квантови бита съществуват 2^n възможни състояния, така че един квантов компютър със само 300 кубита би могъл да приема едновременно 2^{300} стойности – повече от броя на атомите във Вселената.

Групата на Уайнленд бе първа в света, която демонстрира работа с два квантови бита. Доколкото вече е постигнато контролирано управление с няколко кубита, по принцип няма причина да се съмняваме във възможността да постигнем подобно използване на много повече кубита. На практика обаче построяването на подобен квантов компютър представлява едно огромно предизвикателство. Необходимо е да се удовлетворят две противоречащи си изисквания: кубитите трябва да бъдат съответно изолирани от тяхното обкръжение, за да не се разрушат техните квантови свойства, като същевременно трябва да могат да общуват с външния свят, за да предават резултатите от извършените пресмятания. Вероятно е квантов компютър да бъде построен през това столетие. Ако това стане, то ще промени нашия живот по същия радикален начин, по който класическият компютър промени живота през последния век.

Нови часовници

Дейвид Уайнленд и неговата група изследователи използват също така йони в уловка, за да създадат часовник, който е стотици пъти по-точен от основаните на цезий атомни часовници – днешния стандарт за измерване на време. Времето се запазва еднакво, като всички часовници се нагласяват, или синхронизират в съответствие с един стандарт. Цезиевите часовници работят в областта на микровълните, докато йонните часовници на Уайнленд използват видима светлина – оттук и тяхното име: оптични часовници. Един оптичен часовник би могъл да се състои само от един или два йона в една уловка. При тези два йона, единият се използва като часовник, а другият – да отчита показанието му, без да нарушава неговото състояние, т.е. без да предизвика пропускане на едно тиктакане. Точността на един оптичен часовник е по-добра от едно към 10^{17} , което означава, че ако вие сте започнали да измервате времето в началото на Вселената, в момента на Големия взрив преди около 14 милиарда години, грешката на оптичния часовник днес би била около плюс–минус пет секунди.

С помощта на такава точност в измерването на времето са наблюдавани някои извънредно тънки и красиви природни явления, като например промяна на хода на времето, или нищожните промени на гравитацията, структурата на пространство–времето. Според Айнщайновата теория на относителността, ходът на времето се влияе и от движението, и от гравитацията. Колкото по-голяма е скоростта и колкото по-силна е гравитацията, толкова по-бавно тече времето. Ние може да не долавяме тези ефекти, но те фактически вече са част от нашето ежедневие. Когато се ориентираме с помощта на GPS, ние се осланяме на сигналите за време от разположени върху спътници часовници, които са коригирани по съответен начин, тъй като на височина от няколко стотици километра гравитацията е малко по-слаба. С един оптичен часовник е възможно да се измери разликата в хода на времето, предизвикана от промяна на скоростта на часовника с по-малко от 10 метра за секунда, или когато гравитацията се

промени поради разлика във височината над земната повърхност от само 30 сантиметра.

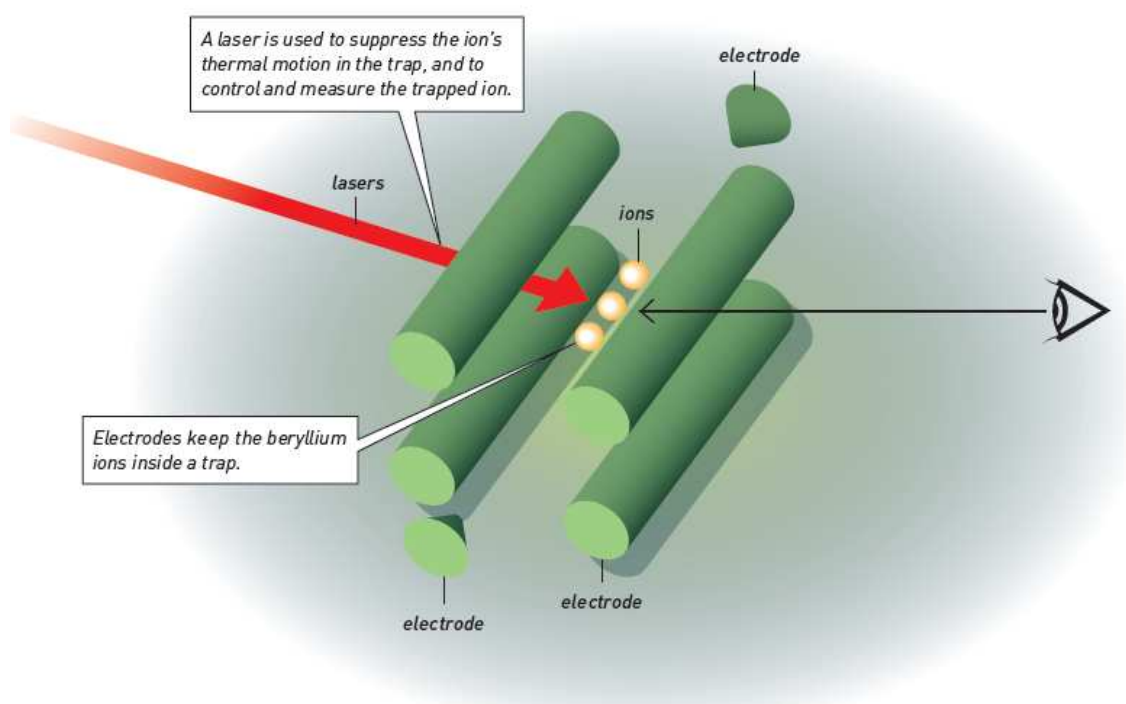
Текстове върху и под фигури

Фиг. 1.



Фиг. 1: Нобелова награда, присъдена за укротяване на частици. Лауреатите са успели да накарат отделни, затворени в уловка частици да се подчиняват на правилата на квантовата физика.

Фиг. 2.

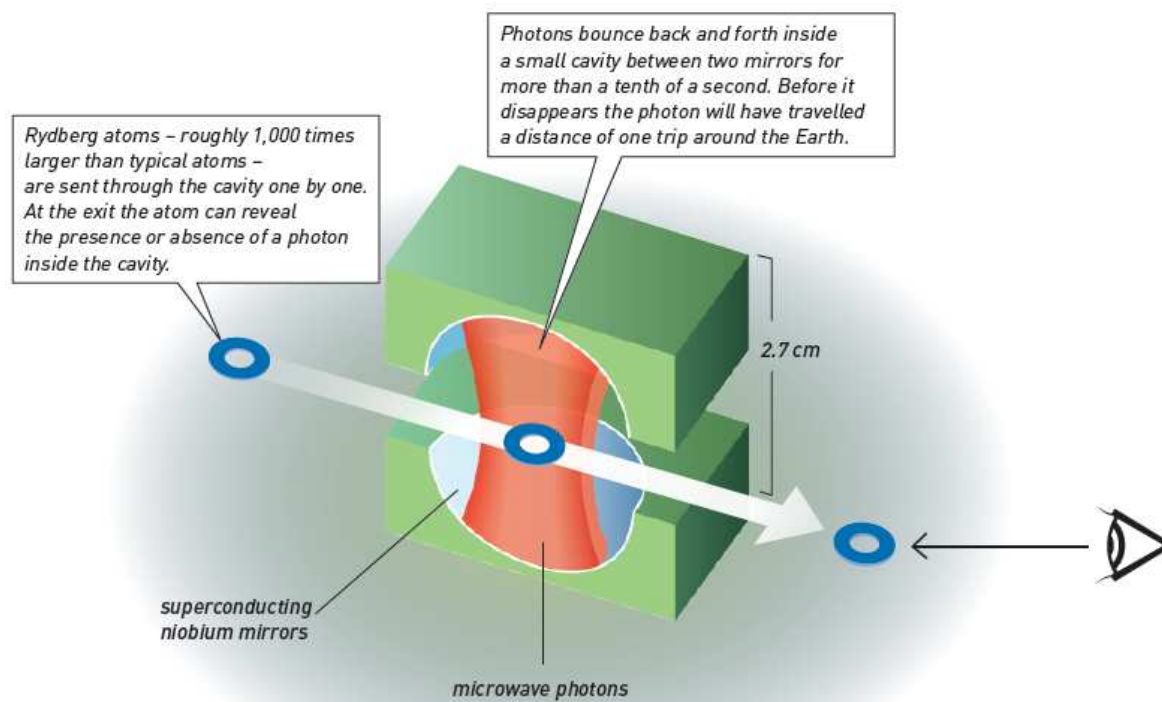


Горе в ляво: Един лазер се използва за подтискане топлинното движение на йоните в уловка, както и за контролиране и измерване на захванатия йон.

Долу в дясно: Електроди удържат берилиевите йони вътре в уловка.

Под фигурата: В лабораторията на Дейвид Уайнленд в Боулдър, Колорадо, с помощта на електрични полета във вътрешността на един уловка се удържат заредени атоми, или още – йони. Един от секретите, на който се основава осъщественият от Уайнленд успех, е овладяване на изкуството да се използват лазерни снопове и да се създават лазерни импулси. Лазер се използва, за да се постави йонът на най-ниското му енергетично ниво, като по такъв начин се даде възможност за изучаване на квантовите явления, в които участва плененият йон.

Фиг. 3.



Горе в ляво: Атоми на Ридберг – кръгло 1000 пъти по-големи от типичните атоми – се пропускат един по един през кухината. На изхода атомът може да разкрие наличието или отсъствието на фотон вътре в кухината.

Горе в дясно: Фотоните повече от една десета от секундата подскочат назад–напред в малка кухня между две огледала. За това време, преди да изчезне фотонът изминава разстояние колкото едно пътешествие около Земята.

По самата фигура: *свръхпроводящи ниобиеви огледала, микровълнови фотони.*

Под фигурата: В лабораторията на Серж Арош в Париж микровълнови фотони подскочат назад–напред в малка кухня между две огледала във вакуум и при температура почти абсолютна нула. Огледалата отразяват толкова добре, че един отделен фотон остава между тях за повече от една десета от секундата, преди да изчезне. По време на този дълъг живот върху фотона може да се проведат множество квантови операции, без той да бъде разрушен.

Фиг. 4.



Под фигурата: Шрьодингеровата котка. С цел да илюстрира абсурдните следствия при преход между микросвета на квантовата физика и нашия всекидневен макросвят, през 1935 г. австрийският физик и Нобелов лауреат Ервин Шрьодингер описва един мисловен експеримент с котка, затворена в кутия. Една квантова система – частици, атоми и други подобни неща от микросвета, може да се намира едновременно в две състояния, което физиците наричат суперпозиция от състояния. В мисловния експеримент на Шрьодингер състоянието на котката е суперпозиция: тя е или мъртва, или жива. Сега, ако вие надникнете в кутията, вие рискувате да убиете котката, тъй като квантовата суперпозиция е толкова чувствителна към взаимодействие с обкръжението, че и при най-малкия опит за наблюдение на котката нейното състояние мигновено би “колапсирало” в един от двата възможни изхода – мъртва или жива.

Фиг. 5.



Под фигурата:

Оптичен часовник. Една практическа полза от йони в уловка е да се построи часовник, който е стотици пъти по-точен от основаните на цезий атомни часовници, които понастоящем са стандартни за измерване на времето. Когато участват два йона, единият се използва като часовник, а другият отчита показанията му, без да нарушава състоянието на първия или да го кара да пропускат тиктакане.