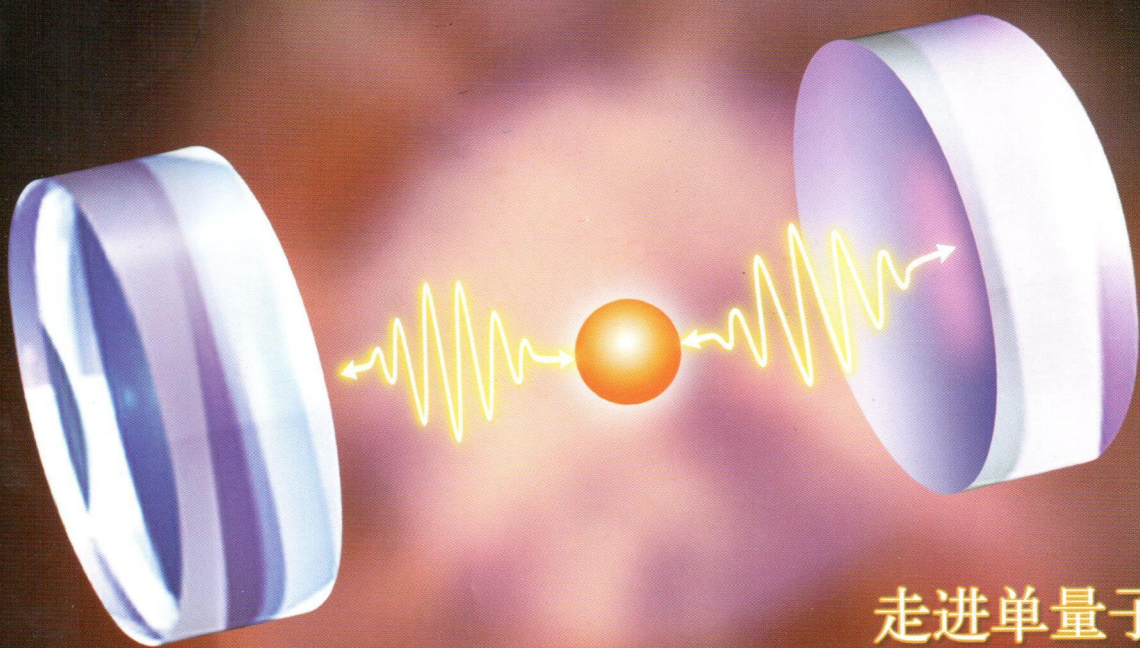


1915年创刊 SINCE 1915

科學

第65卷第1期 · Vol.65, No.1

SCIENCE 双月刊
BIMONTHLY



走进单量子世界
细胞表面的聪明受体
现代人类混血的群体基因组学研究
环境伦理与区域可持续发展

ISSN 0368-6396



9 770368 639136

www.kexuemag.com

2013年1月

走进单量子世界

◎张天才

因发明和实现突破性的实验技术和方法,使人们测量和操控单个量子系统成为可能,2012年度诺贝尔物理学奖颁发给巴黎高等师范学院的阿罗什和美国国家标准技术研究所的瓦恩兰。为了理解他们工作的科学意义,本文就量子世界发生的现象以及对这些现象的描述进行阐释。

在2012年的诺贝尔物理学奖公布之前,网上早就盛传有几个可能获奖的领域,比如希格斯玻色子或者量子信息中的主角。获奖者一经公布,很多人感到有点意外。巴黎高等师范学院的阿罗什(S. Haroche)和美国国家标准技术研究所的瓦恩兰(D. J. Wineland),他们没有在人们预测的热门人物范围内。有人还在网上为没有获奖的热门候选者抱不平,说某人的论文影响因子多么厉害,某人论文引用率有多高。很多人特别关注这些量化指标,并以此做出对某项研究或者某人工作的科学价值的判断。如果按照这些指标遴选诺贝尔奖,应该不需要瑞典皇家科学院干这件事情,每年请一个认真负责的图书馆情报员把指标统计出来就行了。

阿罗什和瓦恩兰都是从事实验量子光学的,对他们获奖的评价很短:“在实验方法上的基础性突破,使得单量子系统的测量和操控成为可能。”这是继2005年诺贝尔物理学奖颁发给量子光学领域的科学家之后,该领域再次获此殊荣。这些科学家通过他们的实验和理论,向人们呈现了一个越来越令人感到真实的量子世界。

“体验”量子

对于没有学习过量子物理基本理论的人(大学物理系学生通常在三年级下学期开始学习,被认为是物理系最难的课程之一),要理解此项获奖工作的意义,还是很困难的。本文从一些常识说起,希望将20世纪早期一批优秀物理学家建立的量子力学,与我们日常

张天才:教授,量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西大学光电研究所,太原 030006. tcahang@sxu.edu.cn

Zhang Tiancai: Professor, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006.

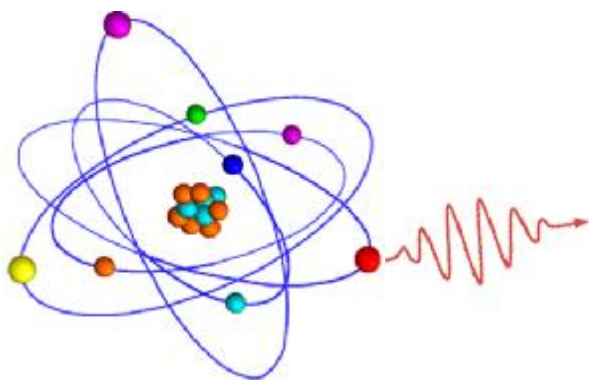
生活中的一些体验拉近一点,消除大部分人觉得量子世界离我们生活的错觉,也可以理解阿罗什和瓦恩兰两位教授的获奖工作。

我们在玩手机、上网冲浪、打越洋电话,或者用激光影碟看大片时,一般不会想到这是受益于量子物理的成果。没有量子物理学的理论和实验技术的发展,就没有这些司空见惯的东西。当我们感叹神舟飞船发射时的壮观场景时,未必能体会到另外一个事实:相比之下,驾驭一个微小的原子可能更具挑战!

显微镜的发明让生物学发生了很大变化,但是像细菌和病毒之类的对象离物理学家面对的原子分子内部发生的事情还是太远,它们之间还差一万倍。就算我们能造出一个超级显微镜把原子放大到乒乓球那么大,也无法亲眼看见,因为用于观察原子的光子的尺度(光波长)比原子的尺度大一万倍,就像无法用一个普通镊子夹住一个病毒。看不见的微观世界似乎总是遥不可及。用碳素墨水在纸上写一个“碳”字,里面大约包含 5×10^{19} 个碳原子,也就是目前世界上70亿人每个人可以分得差不多70亿个。每个碳原子的半径大约是 0.69×10^{-10} 米,质量 1.99×10^{-26} 千克。这些事实让人将信将疑。因为我们都没有亲眼见过单个孤立的原子。

有不少间接的证据证实在尺度为纳米和亚纳米的范围,确实存在一个与众不同的世界。比如:1827年英国植物学家布朗(R. Brown)用显微镜观察液体表面的花粉时,无意中发现那些花粉在作无规运动,好像这些尺度为几十微米的花粉是“活”的一样。有人干脆把这些花粉在高温下烫死以后再作观察,发现它们还是在动。1905年爱因斯坦根据扩散方程建立了布朗运动的统计理论,法国物理学家佩兰(J. B. Perrin)的实验进一步证实了这一点。布朗运动间接证实了分子的无规

则热运动。另一件事情是卢瑟福(E. Rutherford)1911年完成的 α 粒子的散射实验。加上许多化学家的努力,19世纪末,已经很少有人怀疑原子的存在。许多实验都间接、却强烈地证明了原子的存在。但是仍然有些卓越的实证派人士不相信原子存在,他们觉得原子不过是希腊哲学家们头脑中的一个概念,可以用来解释一些现象,但未必真的存在,就像“燃素”或者“以太”一样。量子力学的创立者之一薛定谔(E. Schrödinger)也说过:“我们从来没有做过单个原子或者粒子的实验,尽管我们在理论实验中有时假设能够这么做,可结果总是荒谬的。”



单个原子和单个光子的示意图 它们与真实的原子和光子有多大区别?假如我们真的变成孙悟空,钻进一个原子内部,“骑”到一个电子身上,看到的真是如左图所示的原子模型吗?

希望亲眼“看见”一个原子才能接受原子的存在,不纯粹是为了较真。完成这个检验任务似乎成了科学家追求的梦想!但是实现这个梦想的难度超乎想象。

300多年前,当苹果掉到牛顿头上时,牛顿就在想一个问题:苹果会掉下来,但月亮为什么没有呢?他最后找到了牛顿定律,把地上发生的事和天上天体的运行变化都给解释清楚了。就是说牛顿定律可以很好地适用于比我们周遭环境尺度(比如1米),扩大100亿倍(10^{10} 倍)的范围,差不多就是太阳系的尺度,甚至更大的银河系和宇宙。那么,牛顿定律似乎理所当然也应该适用于缩小到我们周遭环境尺度百亿分之一(10^{-10})的世界,也就是一个原子的内部。

事实证明不可以!为什么不可以呢?

1920年代人们建立了量子力学,微观世界发生的事情需要用量子力学来解释。这个量子力学让很多希望牛顿定律到处都管用的人很失望,这个理论跟经典牛顿力学理论之间似乎找不到一点共性。这门很多人觉得难于理解的理论被证明很成功,但是玻尔(N. Bohr)说:“没有什么量子世界,只有一种抽象的量子物

理的描述。如果认为物理学家的任务是发现自然是什么,那就错了。物理学关心的是我们关于自然能说什么。”这种说法让一些人感觉很不舒服,好像人类在自然面前退缩了。

微观世界发生的事情到底跟寻常世界中发生的事情有什么区别,为什么一定要建立量子力学,用那些高深的“算符”和“量子态”来解释微观现象?一个很大的东西和一个很小的东西有什么本质区别吗?是的,我们在认识一个“小东西”和一个“大东西”时,确实有所不同。

“小东西”与“大东西”的区别

拿一个“光子”和一条“狗”来说明人们在认识一个微观的东西和一个宏观的东西时,必须考虑到的根本区别。这里加引号的意思是现在必须像哲学家一样把它们都看成某种客观存在,是外在“事物”,或者“东西”。认识它们有两点根本的区别。

第一,描述的语言不同。

这个不同来源于我们对这两个事物认识层面的不同。我们可以尝试用速度、质量、动量、位置、颜色、尺寸等物理参数描写一条狗或者一个光子。但是会发现这些参数都不是好的描写。因为这些物理量完全不能帮助我们区别一条狗和一头猪,肯定需要别的更多的特征参数。尝试给出它们的定义。比如问什么是“狗”?回答这个问题必须找出“狗”的特征,比如:有毛的(鸡也长毛)、四条腿的(猫也有四条腿)、嗅觉很灵敏(猪的嗅觉也很灵敏)……找的特征越来越多,但是发现还是不足以描述清楚狗的特征,最后发现居然没有一条是狗特有的。实际上,就算找出一万个与狗有关的特征,恐怕还是忘了狗的右侧第三根胡须的直径是在多少范围。于是好像一下子对“狗”这个东西模糊起来,似乎觉得不可思议,难道我们对司空见惯的狗什么都不知道吗?

翻阅权威的工具书,比如《辞海》是这样定义“狗”的:“即犬。……狗犬通名。若对文,大者名犬,小者名狗。”再去找“犬”的定义:“犬:动物名。亦称狗。哺乳纲,犬科。为人类最早驯化的家畜……。”这种循环定义令人觉得很好笑,但是这就是我们所知的最权威的关于狗的定义了。

因此,我们“熟知”的“狗”实际上是一个模糊的概念。我们之所以谈论“狗”这个话题没有发生误解,是因为大家在脑中存储了数不清的关于狗的特征,以及都保持某种默契,没有去较真!我们知道并相信关于这条狗的全部特征的那些信息是客观存在的。因此可以给它一个抽象的符号:|Dog),这个符号用来表示包含了这条狗的全部特征,或者全部信息(注意“全部”二字)的客观存在的东西。这个概念引申到微观世界,就

是“状态”(state)。虽然没有严格证明,但是我们相信不可能有两条狗的全部信息都一样,就像没有两片完全相同的树叶一样。一条狗包含的信息和特征太多,|Dog>只是一个抽象的符号,无法写出|Dog>这个状态的具体形式。

上述描述对狗似乎是合理的。对一个光子呢?首先,表述一个光子的特征比一条狗要简单得多,因此有可能把一个光子的状态的具体形式写出来,就是获得它的全部信息;其次,两个光子的状态有可能完全相同。当两个东西完全相同时,会出现许多经典世界没有的现象,比如干涉。假如这个世界上真的存在两片完全相同的树叶,那它们碰到一起就会出现干涉,这绝对是一件奇妙的事,它们会出现量子叠加,纠缠在一起,翩翩起舞!

量子力学认为,微观世界是用量子态,也就是波函数来描写的,不是用位置、速度、动量等这些物理量来描写的。量子态的演化服从薛定谔方程。用量子态描写虽然有些抽象,但更合理。说它抽象,是因为量子态是一种数学上的波函数,包含了虚数这样“无意义”的东西;说它更合理,是因为量子态包含了一个客体,也就是事物的“全部信息”。环顾周围的世界:浩瀚的星空、起伏的山峦、身边的书桌、墙上的画、偶尔飘来的丁香花香……这些事物最本质的东西是什么呢?

有个虚构的故事,说的是有一天地球将遭遇到一场无法抗拒的天灾,在将来某个时候注定要全部毁灭。有艘上帝派来的超级宇宙飞船只能运载一个人,这个人只能携带一件不超过一公斤重的东西离开地球逃生。那么,这个聪明的救星该带走什么最珍贵的东西呢?他环顾地球,到处是现代人类文明的事物,从摩天大楼到飞机、从激光到电脑、从人类基因库到互联网、从唐诗宋词到物理学定律……他想把人类的全部文明和知识带走。最后他做到了,只带走了一根不超过一公斤的小小“金箍棒”。这根“金箍棒”中间只有一个记号(刻度),它包涵了全部人类文明的信息。是如何做到的呢?原来,科技发达的未来,人类所有文明和智慧,都是可以记录在文字、图片、声音等上面的数字信息。无论使用何种语言、文字和符号记录的信息,都可以对这种语言的字母分配一个符号,全世界用于记录知识的各种符号不会太多,5000个汉字,几十个英文字母和希腊字母……,各种符号应该不会超过9999个,因此,每一个符号指派一个四位数就够了。如果不够也可以用5位数或者更多。比如字母A用0001表示,汉字“我”用2015表示,等等。全部知识就是这些符号组成的符号串,比如《红楼梦》这本书就是一串汉字和标点符号组成的符号串。这些符号串构成的知识最终变成一串

非常长但有限的数字串,比如:4094634621354235……。这个上帝的使者采用高超的技术在这根“金箍棒”上刻了一个非常精准的刻度,使由这个刻度分开的棒的两部分的长度之比正好是0.4094634621354235……。这样,人类的全部知识就包含在这根棒上,只要有个智慧生物把这串长长的数字轻松解密就可以了。

没有质量,没有位置,没有颜色和味道的“信息”,是如此有意义!而包含了全部信息的那个抽象的东西,就是量子态!

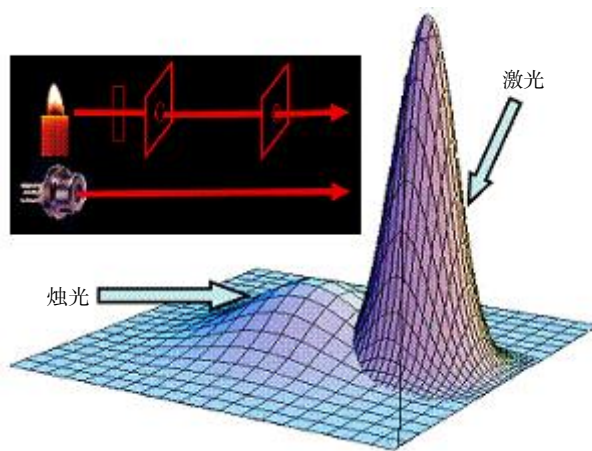
其实人类不需要等到遭遇灭顶之灾才能深刻体会信息是如此重要。一幅名画或者一座摩天大楼,要忠实地记录它们,不就是把构成这幅画和这个摩天大楼的全部原子的排列位置记录下来,然后变成一串数字吗?包含全部原子的信息的东西是什么?量子力学认为,只有波函数才包含客体的全部信息,而且波函数的演化服从薛定谔方程!

一条狗的波函数无法写出来,它过于复杂了。但是对一束单色热光(蜡烛的光经过单色滤波片过滤以后)或者一束理想的激光来说,量子物理学家可以声称能够把它们波函数的数学表达式完整地写出来。这个波函数包含了这束光的全部信息,就是说关于这束光的所有问题,都可以得到答案。比如它的能量等于多少,它的一百万零一阶相干度等于多少,等等。但是关于某条狗的问题,恐怕没有问到100个问题就没有人知道了!单色热光和理想激光的量子态分别是:

$$\rho_{\text{烛光}} = \sum_n \frac{(\bar{n})^n}{(1+\bar{n})^{n+1}} |n\rangle\langle n|,$$

$$\rho_{\text{激光}} = e^{(\alpha a^\dagger - \alpha^* a)} |0\rangle\langle 0| e^{(\alpha^* a - \alpha a^\dagger)},$$

其中 \bar{n} 表示平均光子数, α 表示一个复数, a, a^\dagger 是光子



烛光和激光的量子波函数描述不同 其中左边微突的山丘为烛光的波函数,而右侧高耸的山峰是激光的波函数。二者对应的颜色、能量、动量、方向性等都一样(如左上角图)。

的湮没和产生算符。它们可以通过某种数学变换用一个复函数表示。尽管两种光对应的颜色、能量、动量、方向性等都一样,但是它们的量子状态不同,这就意味着它们一定有一些信息不同,比如它们的二阶相干度不同。因此,只有量子态本身是描写这两种光子的本质的东西,其他任何东西都不是!

量子态成为描写微观世界的通用语言(它之所以没有成为现实生活的语言,是因为现实世界太过复杂,尚未到达精确表述宏观世界的那一步),就像描写一个宏观物体的质量、位置等一样。由微观世界的量子态可以确定经典可观测量的结果,这是通过量子力学的测量理论确定的。一个力学量 \hat{A} 的期待值是:

$$\langle \hat{A} \rangle = \text{Tr} \hat{\rho} \hat{A},$$

其中 $\hat{\rho}$ 是系统的状态, Tr 是求迹(trace)运算。因此,只要量子态知道了,在一定的测量环境下,任何确定的力学量(就是任何想知道的信息或者问题的答案)都有一个期待值 $\langle \hat{A} \rangle$ 。

第二,测量或者观察引起的后果不同。

对一个宏观物体的测量一般是不会干扰这个物体本身的,只要足够小心。比如,可以趁狗温顺或者睡觉的时候给它称体重、量身高或测体温。而做这种事情对于一个原子或者光子就有问题了。就是说,如何在没有任何干扰的情况下对一个原子或者光子进行测量呢?通常要完成对某个事物的某种测量,就必须跟这个事物接触,或者产生作用。作用的物理意思就是交换能量,而交换能量最少就是交换一个量子,也就是需要至少交换一个光子(超级侦探们幻想着不与被跟踪的目标作任何交流就能偷拍成功,确实是幻想!)。

通常测量光子的方法是:使光入射到一个光电探测器上,当光子激发探测器时,因为光电效应一个光子会激发硅或者某种材料以一定的概率产生一个光电子,经过放大产生一个电脉冲,记录到一个电脉冲就表明已经有一个光子到达。这个过程中光子本身不可避免地消失了,即这个过程是破坏性的测量。以光子被“消灭”为代价获得了一个光子到达的信息。这个过程就像想知道一个鞭炮的好坏,需要点燃它才能得到确

认一样。

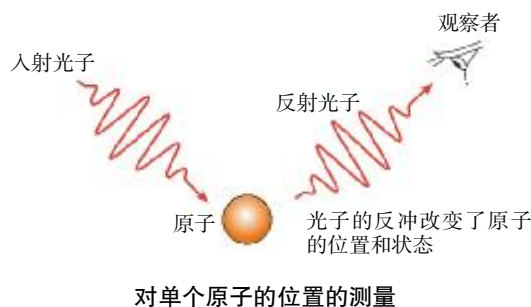
对原子的测量也一样。当人们希望“看见”(测量)单个原子时,一定有至少一个光子发射到人的眼睛里,这个光子足以给一个小小的原子“巨大”的反冲,使其离开原来的位置,因此当“看见”(测量到)从这个原子来的光子,从而确定原子的位置时,它实际上已经不在原地了。

之所以在这里谈论如何避免对单个量子系统的破坏,除了上面提到的单量子系统本身的微小,易被测量干扰外,还因为它极容易受到自身所在的外部环境的干扰。量子态非常脆弱,要使其长时间保持不变,需要尽量减小与外界的作用。但是世界上不存在一个完全孤立的、不受外界干扰、跟外界没有任何作用的理想系统。一无所有的真空是最大也是最后的敌人。由于真空的量子涨落和周遭的环境热库作用,一个单量子系统会发生衰变(decay)。这个过程叫退相干(decoherence)。做实验量子光学的人经常谈论一个原子的量子态的存活时间一般是在微秒或者毫秒的量级。无法想象,一个处于量子态的茶杯(如果可能的话),其存活时间有多么短暂,有人估算是大约 10^{-10} 年(可能一时难以想象这个数字有多么小。设想把一只猴子拉到一台电脑前面,让它胡乱敲打键盘,碰巧打出一部《红楼梦》的可能性吧)。一般情况下,越大的系统跟外部环境接触越多,退相干越严重。这就是在宏观层面看不到两片树叶出现量子干涉,或者一只处于死与活叠加态的薛定谔猫的原因。

量子力学建立以来很长时间,各种波函数、量子态,以及描写一个原子跟光子的作用等等,大多是停留在书本上,作为漂亮的数学解或者解释某些现象而存在的。哥本哈根学派也认为量子态是客观的、但不是真实的。因为量子态本身只是密度算符,很多人不愿意接受它作为真实的物理存在(比如后面提到的格劳伯)。不过,经过许多实验物理学家的努力,形形色色的量子态被制备出来,并且被成功地测量,应用到量子信息、量子计量、量子模拟等方面,它们的各种奇异性质与经典世界大相径庭,让人们见证了那些发生在看不见的微观世界的本来面貌。虽然非常怪异,远离牛顿描绘的经典世界,但是越来越真实,也完全符合量子力学的规律。

阿罗什和瓦恩兰的工作

阿罗什和瓦恩兰正是在原子和光子的量子操控和测量方面完成了一系列的开创性实验工作,帮助人们实实在在地感受和理解到了微观世界发生的现象。他们选择单个原子(包括离子)和光子这类物理对象,主



要是因为：原子和光子是天然的、自然造就的粒子，它们非常纯净，理论上对这些对象有很好的理解。实际上，自从物理学家建立各种各样的理论以来，由量子电动力学预言的电子固有磁矩和实验的偏差符合到有效数位 10 位 [理论：0.001159652133(29)，实验：0.001159652188(4)]，这是目前为止理论与实验符合最好的一个例子。物理学家费恩曼(R. P. Feynmann)因此把量子电动力学称为物理学皇冠上的明珠。阿罗什和瓦恩兰主要研究光的基本量子行为以及光与物质相互作用的量子现象。这里的物质主要是原子(离子)，而光可以是可见光、红外光或者微波场，它们只是波长(能量)不同而已。

自从 1960 年代格劳伯(R. J. Glauber)建立光的相干量子理论(该项工作获 2005 年诺贝尔物理学奖)起，量子光学提供的许多方法成为检验量子力学基本问题和许多疑惑的重要途径。实际上，正是量子光学的许多实验展示了量子力学的成功，解决了若干争议。这并不奇怪，光子作为一种独特的基本粒子与每个人的感官的亲密关系以及测量上的便捷(你感受过中微子吗？虽然据推测宇宙中的中微子跟光子一样多，每秒钟有 1000 万亿个中微子穿过你的身体！)，使它获得更多的关注。回顾历史，从普朗克、爱因斯坦开始，量子物理的建立过程正是从研究光的行为开始的，包括黑体辐射、光电效应等等。相干光源激光的诞生更是提供了一种强大的工具，可以帮助人们通过非线性光学以及与原子能级的精确作用实现许多传统光源无法完成的任务。与天然原子相比，光子更加纯净。只要我们仰望星空，看到那些飞行了上百亿年，穿越茫茫宇宙，携带着遥远星球、遥远过去的信息，没有任何改变到达人类地球的光子，就会肃然起敬。

因此，让单个的原子与单个的光子对话(相互作用)，在最基本的层面探究光子和原子的量子行为，就成为一个永恒的话题。1940 年代，人们已经知道了真空是实实在在的一个物理背景，会干扰一个理想的系统。包括兰姆移动、珀塞尔效应和卡西米尔效应等一系列真空效应被发现。要隔离真空，需要把原子放在一个封闭的箱子(腔)内。1963 年，杰恩斯(E. T. Jaynes)和卡明斯(F. Cummings)建立了一个模型，从量子物理的原理出发，获得了单个二能级原子和单模场相互作用的解析解，称为 J-C 模型(J-C model)。今天这一模型已经是量子光学教科书中的标准案例。还有各种量子态，比如光场量子化中的福克态，以及后来相继发现的压缩态、纠缠态等，被自觉和不自觉地提出来。人们预言一个原子如果跟一个光子作用的话，会出现周期性的正弦振荡，而如果跟相干态作用，会出现所谓坍塌

恢复现象(collapse-revivals)。当然，这些都只是一些漂亮的理论结果，谁也不知道怎么获得一个二能级原子，如何把一个原子或者一个光子从一块物质和一大群光子中揪出来，再想办法把真空隔离掉。同时还要避免上面提到的问题：观测它但是不要破坏它。

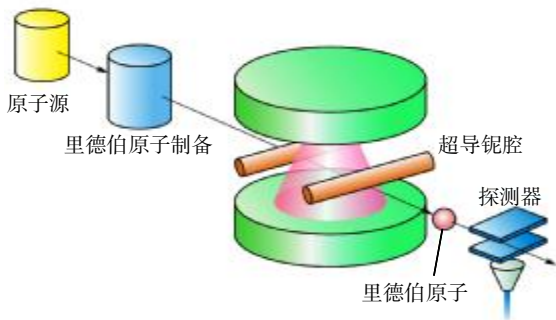
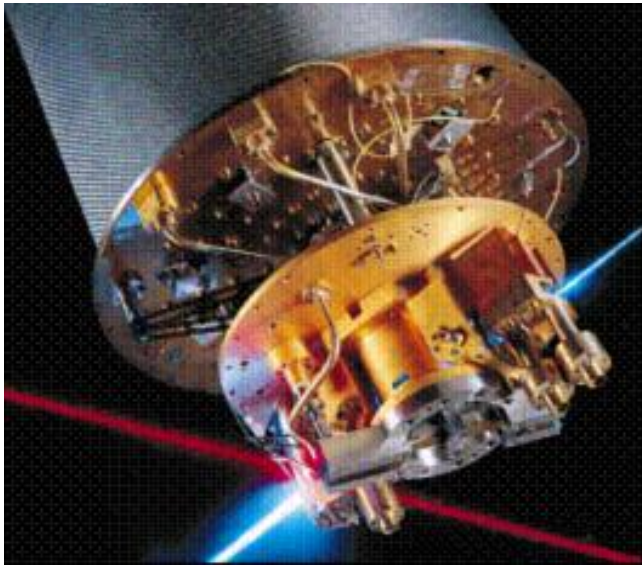
这确实是个难题：原子在常温下以每秒数百米的速度乱飞，跟喷气式飞机的速度差不多，尺度只有十分之一纳米的数量级。假如用光子跟这么小的东西作用，有点天方夜谭，因为一个光子波长的尺度内就可以容纳几万个原子，如何做到跟单个原子作用呢？就算有什么魔法把一个原子抓住，固定在空间中的某个位置，压根是看不见的，因为单个原子的散射面积太小了。而要抓住光子更难，光子在真空中的速度是 30 万千米/秒，如何把光子囚禁起来？前面提到量子态非常脆弱，对不干净的环境异常敏感。把办公室的灯开关一关，满屋子的光子会在瞬间消失，这个消失的时间大约在纳秒数量级。因为光子是一个量子态。办公室的墙、书桌以及人，对光子这样的纯量子态来说实在是太“脏”了。广袤的宇宙，非常干净，因此光子可以飞行 100 亿年到达地球。设想办公室的墙面是一面面完美的镜子，它们不吸收光子而是反射光子，这样，当把灯关掉后，那些光子还在屋子里来回反射，这样光子就算存放起来了。但是即使用很好的技术，镀一面足够好的镜子，组成 2 厘米的腔(太长了就成自由空间了)，把一个光子关在里面，其存活寿命只有纳秒数量级。这跟仰望星空看到的那些动辄存活百万年的光子简直是天壤之别。

阿罗什和瓦恩兰分别以中性原子和带电离子为研究对象，他们认为原子和光子代表了量子的本质。由于光子具有能量和动量，利用光子与物质粒子之间的相互作用可以实现粒子的操控。他们长期致力于解决单量子系统中面临的极具挑战性的问题，经过三十多年的努力，克服了一系列的技术障碍，把许多微观世界的量子的现象活生生地呈现在人们面前。

阿罗什的工作始于 35 年前，他花了很长的时间构建了一个微波腔，目的是把一个一个个的微波光子关起来。阿罗什小组在实验室建立的腔长度为 2.7 厘米，两边的腔壁反射率非常高，最终把一个微波光子囚禁在这个腔中长达 130 毫秒。这意味着一个光子在死掉之前，在腔内来回跑了 7 亿多趟，行程差不多相当于绕地球一圈。在常温下外部环境中存在黑体辐射，有大量的背景光子，为了克服这种背景噪声，他们不得不把这个腔冷却到约零下 272℃。然后把经过处理的铷原子(主要是选择合适的速度并制备到特定初始状态)放进这个腔中，与光子发生相互作用。当然，整个系统是放置在超高真空室的。原子受到光子的作用就会被激发到上能

级,再受到腔的作用辐射出光子。光子就像被海豚玩弄的乒乓球,吞进去又吐出来。来回几十万次。这件事情要是在自由空间,光子吐出来就飞走了,只能完成一次。

阿罗什的实验过程是:首先,原子从铷原子炉(原子源)中加热飞出,经过准直到达第二步——里德伯原子的制备。所谓里德伯原子是用激光脉冲把原子激发到主量子数很大的能级。这样做的好处是原子从高能态,比如 $n=51$ 到低能态,比如 $n=50$ 之间的跃迁正好与腔内的微波光子频率一致(通常为数十吉赫),会发生共振相互作用;其次,里德伯原子的偶极矩很大,与光子或者腔的作用加大;第三,原子的寿命很长,具有很好的相干性。原子随后进入微波腔。在与微波腔作用之前和之后,通常使用一个光脉冲把原子进一步制备到特殊的状态(如叠加态),或者利用光脉冲把经过腔



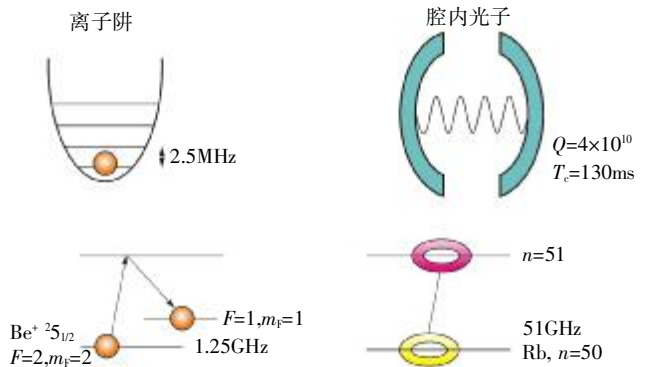
阿罗什的实验装置 上图显示的是实验的核心部分:超导铌腔以及围绕该腔的部分。下图显示的是实验过程,包括原子初态的制备(左侧),超导铌腔(中部),以及探测部分(右侧)。整个装置处于1开的液氮温度下。(上图来自:Haroche S, Raimond J-M. Cavity quantum electrodynamics. Sci Am, 1993,268:54;下图来自:Smart A. G.Physics Nobel honors pioneers in quantum optics, Physics Today, 2012,12:16.)

作用的原子的状态测量出来(与后面的探测器结合)。腔内的原子与场的耦合强度达到314千赫,这个耦合强度描述了原子与微波腔交换光子的快慢,平均每秒原子与腔交换30万次左右,远远大于光子和原子本身的衰减。

利用这套系统,阿罗什领导的小组完成了一系列重要实验,如原子辐射的腔增强效应、量子退相干、量子纠缠、福克态光场的产生、单个光子的量子非破坏测量以及单个光子从产生到消亡的整个过程的观测等等。这些利用原子操控光子的实验,使人们第一次“偷窥”到了世界上最脆弱的单个量子客体——光子的行为。这些工作开启了在单量子水平上操控微观世界的大门,展现了原子-光子相互作用系统丰富多彩的世界。

瓦恩兰的工作围绕带电离子展开。比起中性原子,单离子的操控表面上似乎容易一些,采用静电、静磁和射频场可以把带电离子俘获在超高真空中。比起光子作用到中性原子产生的势阱,静电场的作用显然要强得多,这也是历史上人们首先获得了单个离子的俘获的原因。德国科学家保罗(W. Paul)和美国科学家德梅尔特(H. G. Dehmelt)1989年因为离子俘获方面的研究获得诺贝尔物理学奖。但是困难是离子会在质心附近振动。更多的离子操控需要精确控制外部电场和磁场,同时控制离子的外态和内态。瓦恩兰领导的小组克服了一系列困难,成功地采用边带冷却技术把单个离子冷却到其质心运动的基态。与原子一样,可以利用激光对离子中的特定能级精确作用,从而完成一系列对离子内态的操控。他们利用该系统实现了薛定谔猫态、位置-动量空间负值维格纳函数量子态的产生、物质粒子间的量子隐形传送(quantum teleportation)等。他们还利用受控单个 Be^+ 和多离子系统演示了量子逻辑门和多离子纠缠等。

在此不能展开论述那些稀奇古怪的量子态的性



瓦恩兰(左)和阿罗什(右)的实验示意图 图中 F 为原子的超精细能级量子数, m_F 为磁量子数, Q 为微波腔的品质因子, T_c 为腔内光子的寿命, n 为原子主量子数。

质,比如薛定谔猫态、量子纠缠和量子隐形传送(有兴趣的读者可以参考作者的科普文章:量子态及其隐形传送//10000个科学难题.北京:科学出版社,2009:101-108)。这些现象虽然在经典世界中找不到对应的东西,但是它们在量子世界中合情合理。阿罗什和瓦恩兰的实验工作,正是帮助人们证实了那些远离普通大众的量子世界中各种量子行为的真实存在。

虽然很多科学家并不关心这些研究有什么用途,而更多地关注揭开世界的面纱。正如弗莱克斯纳(A. Flexner)所言:“纵观科学的历史,大多数真正伟大的、最终使人类收益的发现,驱使人们做出这些发现的不是有用的愿望,而只是满足他们的好奇心的愿望!”但是政府和出资人总希望落实到有什么用处。

单量子系统操控的意义

单量子系统的操控至少在两方面非常有用:(1)量子信息;(2)量子计量(quantum metrology)。

最近20年关于量子信息已经掀起了很高的热情,甚至公众对此也产生了浓厚的兴趣。量子信息可能带来的变革是空前的,但是很难预言什么时候办公桌上真的可以放上一台量子电脑。加州理工学院的金布尔(H. J. Kimble)教授的回答是:从0到1000年。理论物理学家和实验物理学家的态度也很不同,前者往往是乐观的,而后者往往有点悲观。2005年由措勒尔(P. Zoller)领衔的一批欧洲物理学家制订的《欧洲量子信息处理和通讯研究战略报告》(Quantum Information Processing and Communication, QIPC)中有一句话道出了真正的困难:“现有演示实验表明,在执行量子信息处理和量子通讯方案中的主要困难是巨大的复杂性:要求我们在单个粒子的水平上对原子和光子进行全控制!”“全控制”包含的内容很多,但是至少是能实现对原子和光子内外态的控制和测量。显然,阿罗什和瓦恩兰的工作为此迈出了创造性的、坚实的一步。

广义上说,量子计量是利用各种量子资源或者量子效应,实现对某些物理量超越经典的精密测量。一方面,阿罗什和瓦恩兰的实验发展了许多单粒子操控和测量的技术,这些技术直接会应用到精密光谱、灵敏检测和分析中。比如,对离子的控制在精密光谱,特别是光频率标准方面取得了巨大成功。霍尔(J. L. Hall)和亨施(T. W. Hänsch)(二人与格劳伯一起获2005年度诺贝尔物理学奖)在这方面做出了卓越的工作。瓦恩兰小组利用冷却的Al离子,得到了世界上最精确(不确定度为 8.6×10^{-18})的钟。另一方面,或许更重要的是,在他们的实验中产生了大量的量子资源,包括量子纠缠态、福克态等,这些量子资源被证明在突破经典极限的

测量中具有巨大的潜力。

阿罗什和瓦恩兰两个人都在各自的研究系统中奋斗了数十年。阿罗什用原子来研究光子,而瓦恩兰用光子来研究原子。二者都是在单量子系统上为人们展示了量子世界丰富多彩的一面。他们当然不是在孤立地开展工作的,有相当一批人与他们在同时工作。比如在腔量子电动力学方面,加州理工学院的金布尔小组、德国马普所的伦珀(G. Rempe)小组把微波与里德伯原子的耦合发展到光频区,在常温下实现了光子与微光学腔的强耦合,并完成了一系列精彩的实验。离子操控方面也有,包括因斯布鲁克大学的布拉特(R. Blatt)小组、哈佛大学的加布里埃尔斯(G. Gabrielse)小组等开展了卓有成效的研究。还有一些人把量子光学的系统和方法推广到其他类似的系统中,在不同能量和时空尺度下发展了量子光学的许多方法和实验技术。

与其说阿罗什和瓦恩兰能让原子和光子一起跳舞,或者说他们的工作为未来的量子计算机和厘米精度的全球定位系统(这需要精度极高的钟,目前的精度是米的量级)展现了曙光,笔者更敬佩和欣赏的是,他们怀着探索未知世界的巨大热情,真正把人们带进了量子世界,感受那里发生的事情和真实的存在。量子世界不再是量子力学教科书中那些抽象的算符和波函数。我们似乎真的可以“骑”在电子上在原子中遨游,把光子收进来或者发射出去……!有人说他们的方法帮助我们在量子世界与普通世界之间划出了一道界线(the boundary between quantum reality and normal life),笔者愿意说,他们的工作是在力图填补量子世界与普通世界之间的鸿沟!

关键词:单量子 量子操控 诺贝尔物理学奖

封面说明

单量子操控

阿罗什研究组构建的微波腔示意图。经过初态制备的铷原子进入该微波腔中,并与腔和光子发生相互作用。腔壁对微波的反射率极高,整个系统处于真空、超低温条件下,最终可以把单个微波光子囚禁在腔内长达130毫秒。这意味着在光子消失前,它的飞行距离足以绕地球一圈,使研究者得以操控并测量由原子和光子组成的单量子系统,开启了在单粒子水平上操控微观世界的大门。