

# 量子世界的钟摆



图/视觉中国

经知晓的有关微观物体(还包括一些宏观物体)的一切行为。

量子力学重新解释了“变化”和“运动”，其基本规律并不难，只是其法则不为大多数人熟悉而已。一旦你熟悉了它，就能比较自然地理解并运用它。

在牛顿定律中，我们已经习惯了“非黑即白”的物体存在状态。但在量子世界里，你必须适应一种新习惯——物体，无论是诸如原子这样的微观物体，还是宏观物体，通常并不具有确定的细致状态，它的存在状态是一种概率。

借助数学来描述，我们可以这样理解：在某种给定测量方法的前提下，必须考虑一个物体可能被观测到的所有状态，例如一个粒子所有可能存在的位置，它们在逻辑上甚至是相互排斥的。然后，我们再给每个可能的状态赋予一个二维的矢量(存在于某个抽象的二维平面里)，这个矢量的长度的平方，表示物体处于这个状态的概率，所以这个矢量叫做“概率幅”。所有这些可能状态的概率总和，通常设为1，也就意味着物体总是会出现这些可能状态中。

如果一个物体至少有两个概率幅不为零，那我们就认为物体处于不同状态的叠加态。例如，金属盒子里的空间可以处于有光子和无光子的叠加态(光子是光的基本颗粒，具有能量、动量、

重量等各种物理性质)。“薛定谔的猫”诠释的就是这个道理。

量子力学重新解释了“变化”和“运动”，其基本规律并不难，只是其法则不为大多数人熟悉而已。一旦你熟悉了它，就能比较自然地理解并运用它。

## 芭蕾舞演员演绎的舞蹈 定态叠加得到复杂运动

量子力学指定了物体如何随时间演化。如果上一篇文章中提到的所有矢量都在各自的平面里以同样的频率向同一个方向转动(例如都顺时针转动)，长度不变，物体被认为具有确定的能量。

能量确定的状态也叫定态。处于定态的物体没有任何可以觉察的时间演化——各种可能性的概率都不随时间变化。能量最低的定态叫做“基态”，能量更高的各种状态都叫做“激发态”。

量子力学认为，现实世界的一切变化都是不同能量“干涉”的结果。例如，如果物体处于两个能量有差异的定态的叠加，那就要把相应的两个矢量按照平行四边形法则分别叠加起来，从而得知每种微观状态的总概率幅是如何随时间变化的。

由于两组矢量的转动角速度不同，你会发现，每个可能的微观状态的概率是随时间而发生周期性变化的。为了保证总的概率不随时间变

化，必须保证不同能量的定态的概率幅之间满足一定的关系。例如，芭蕾舞演员演绎的复杂舞蹈动作，可以被认为具有许多可能能量——通过更多定态的叠加，你可以得到任何复杂的运动。

## 用原子振动来做钟摆 “量子之钟”刷新计时认知

人们之所以要研制原子钟，就是因为与宏观世界的钟摆相比，用原子的振动来做钟摆，可以将计时精度提升到非常高的境界。为什么原子会具有这种神奇的本领呢？让我们进入量子世界去解开这个谜团。

如果原子核周围的电子处于两个不同能量状态的叠加态，电子在原子核周围分布的概率密度(即“电子云”)就可能随时间往复振荡，好像单摆那样。实际上，量子力学认为，在宏观世界里，单摆往复振荡也是单摆不同能量状态叠加的结果，在这点上与微观世界的电子没有本质区别。

原子内部不同部分相对彼此往复振荡时，原子就会发射电磁波，频率等于原子的两个能级的差除以普朗克常数。这种电磁波的频率极其稳定，原子钟就用它的振荡次数来计时——这就是原子钟的基本原理。

实际使用的原子钟，分为主动型和被动型。主动型原子钟靠原子振荡发射特定频率的电磁波。而被动型原子钟则有一个宏观尺寸的“超稳腔”来制备频率极其稳定的激光，叫做“钟激光”(区别于原子钟里的其它一些激光)。若钟激光的频率与原子固有频率一致，那么原子就会共振吸收激光能量，进入激发态(这类似于单摆在合适频率的驱动下会发生共振)。利用这种特性，原子钟不断将钟激光频率和原子的振荡频率进行比较，不断校正钟激光的频率，确保其稳定在原子振荡频率上，然后用这种激光频率来计时。

## 研制光晶格冷原子钟 挑战计时精度世界之最

原子相对于我们飞行时，我们接收到原子所辐射出的电磁波频率会和原子的固有频率发生偏差，这叫做多普勒效应。原子朝着观察者飞行时，观察到的电磁波频率比原子的固有频率高；原子远离观察者飞行时，观察到的频率比固有频率低。

为了减少多普勒效应带来的频率偏差所导致的时间测量误差，人们将原子冷却到极低的温度，以减缓原子的热运动。中国是世界上第一个将冷原子钟放到太空的国家，天宫二号上的空间冷原子钟在太空服役期间运行稳定，将人类在空间轨道上的时间计量精度提高了一个数量级，达到了三千万年误差小于一秒的水平。

怎样冷冻原子来获得更高时间精度呢？其中一个重要思想是用光晶格(特定频率的激光形成的驻波)来冻结许多原子的空间运动，从而彻底消除多普勒效应，并且长时间(达到秒的量级)观测这些原子，以得到空前的频率稳定度。为了尽量避免光晶格激光对原子振荡频率的影响，光晶格激光的频率要选取特定的值，叫做“魔术频率”。冻结的原子数越多，冻结的时间越久，频率稳定度越高。

然而，当两个冷原子靠近时，每个原子都会改变另一个原子的振荡频率，由此损害时间测量精度。为了更好地消除这种“碰撞频移”，光晶格冷原子钟往往要利用“费米”原子(质子、中子、电子的总数为奇数的原子)，例如铷-87、铯-133、镱-171、汞-199。

这是因为费米原子满足泡利不相容原理：如果把它们制备在同一个内部状态，它们在空间运动上的概率幅作为两个原子的距离的函数就会按照距离的一次方趋于零(近似如此)。这样，两个原子碰到一起的概率就变得很小，大大减小了碰撞频移，也就大大提高了时间测量精度。

除了某些非离子钟外，光晶格冷原子钟已经成为世界上最精密的一类钟，其精度可以达到 $10^{-18}$ 或更高，比微波原子钟的精度提高了上百倍。

中国的光晶格冷原子钟比国外起步稍晚，但中国科学院国家授时中心、中国科学院国家授时中心、中国科学院武汉物理与数学研究所的冷原子钟已经达到了 $10^{-16}$ 的量级，相当于每几亿年才差一秒。中国科学院上海光学精密机械研究所的冷原子钟的研制也取得了新突破。

(作者系北京大学物理学院量子材料科学中心教授)

我们所熟悉的钟摆，三百多年来兢兢业业地提醒着人们时间的流逝。当科技发展进入量子时代，难以满足计时精度需求的传统钟摆，正在被量子世界中的钟摆——原子振荡所替代。在未来某个时刻，当时间的流逝可以用来测量高度、甚至探测引力波，人类的发展也将迎来一个新纪元。

### ■ 檀时钟

时间是人类自古就有的朴素概念，它衡量着事物的变化。例如，当我们看到面前镜子中的自己，会在同一时刻借助大脑中的记忆或照片等实物，回忆那个“曾经更年轻的自己”，并将这种“现实”与“记忆”的差异解释为时间的流逝。

很显然，如此感知的时间是极为模糊的。为了更加精确地测量时间，人类也不断研制更加精准的时钟。宏观物体千差万别，有太多因素会影响时间测量的精度。当人们对时间精度的要求越来越高，科学家逐步将目光投向了微观物体。

与宏观物体相比，微观物体具有近乎完美的一致性。此时此地的一个氢原子，跟恐龙时代的氢原子本质上没有任何已知差别。这就提示人们，用微观物体状态的变化来做时间基准，可以更准确地测量时间。当量子力学被引入时间测量，原子钟也就应运而生。

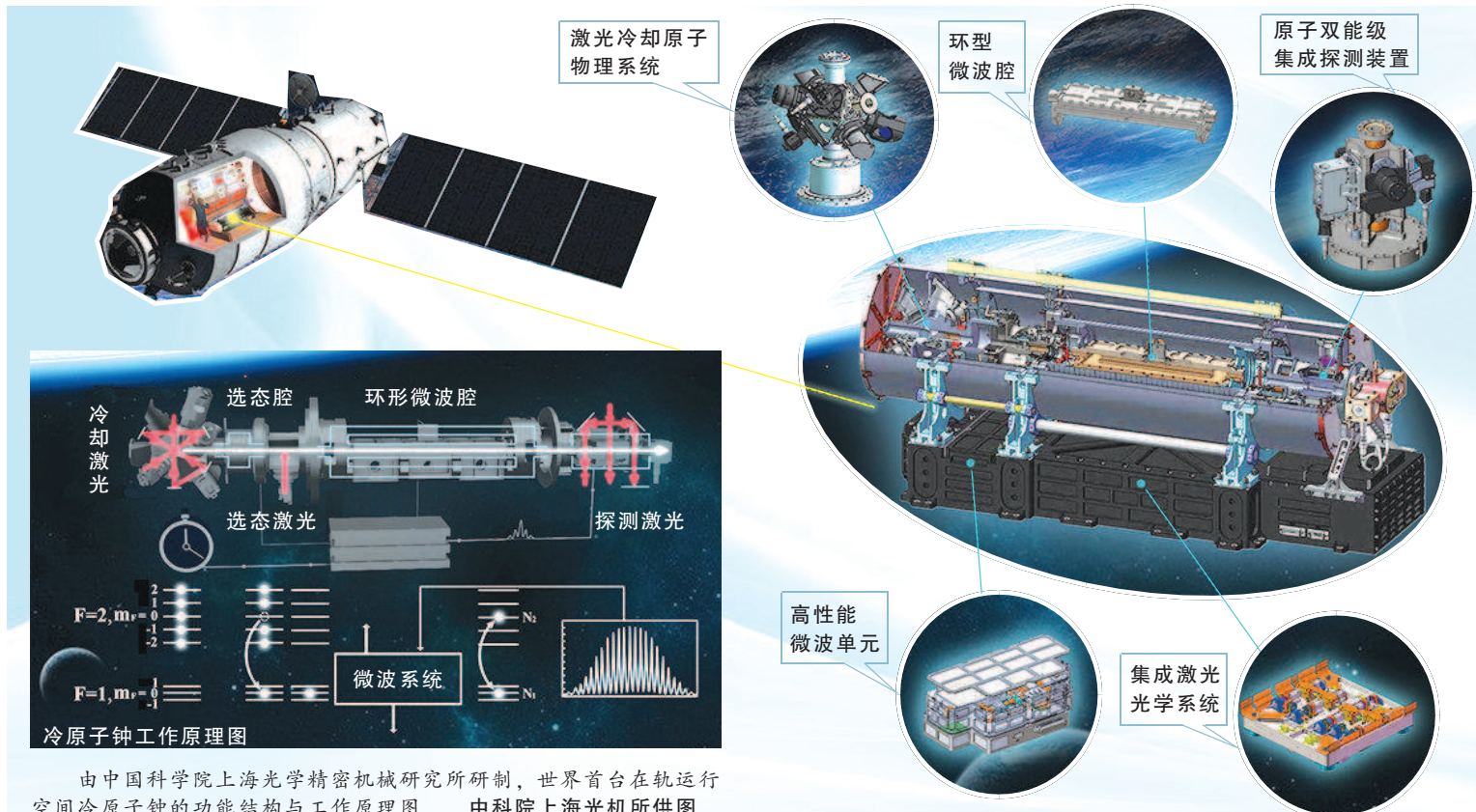
## 用量子观念看世界 你需要适应的新习惯

人类文明早期，计时还有赖于滴水、焚香乃至日影的移动，三百多年前才出现了钟摆。根据牛顿力学计算，地球上一定长度的单摆以一定的位置小幅摇摆，其摇摆周期几乎是恒定的。因此，人们可以通过计数单摆的摇摆来测量时间流逝的长度。

在一定范围内，牛顿力学预言，摇摆的周期与摆长的平方根成正比，这一公式是适用的。可是，如果摆长接近地球的尺寸呢？如果钟摆在摇摆过程中受到外力干扰呢？

实际上，在宏观世界中，有很多因素会对钟摆摆动产生影响，甚至一颗极小的灰尘落到单摆的线上，摇摆周期就会改变。显然，当人们对时间精度的需求到达一定程度时，宏观世界的钟摆，哪怕借助机械的力量，也难以满足这些计时需求了。

人们发现牛顿力学不再能解释微观世界的行为，而量子力学却可以极为完美地解释科学家已



由中国科学院上海光学精密机械研究所研制，世界首台在轨运行空间冷原子钟的功能结构与工作原理图。中科院上海光机所供图

## 万物相通的“未来之钟”

在物理学的视野里，世间万事万物的规律都是相通的。这是我们努力学习和研究它的一个主要动机。

量子力学作为统一自然界万事万物的一套法则，有着举一反三的实用效果。比如，为了理解原子钟的碰撞频移，需要对两个原子的低能碰撞进行精密的量子力学求解。此类研究产生了诸如“S-波散射长度”“P-波散射体积”等一系列重要概念。

作为决定粒子低能碰撞概率幅的基本参数，这些概念不仅深刻影响了冷原子物理，还适用于核物理领域(中子与原子核散射等各种过程、粒子物理领域pi介子散射等)。而中子与原子核的散射，又是国家大科学装置散裂中子源用于各种样品检测的主要机制。

从时间的精密测量与相对论的密切关系，我们可以感受到万物相通的奥妙。

根据广义相对论，地面(或任何星球)上两点之间，如果高度不同，时间流逝速度就会有所不同，高处略快。地面上每米的高度差，时间流逝差异大约为 $10^{-16}$ 。这意味着，仅仅用原子钟精确测量两点的时间流逝速度的差异，就能推测两点的高度差。这意味着，原子钟在测地学、水文学里都会有巨大的应用。

广义相对论预言的引力波已经被大型探测器探测到。引力波是时间空间自身尺度的扰动。只要时钟足够灵敏，人类迟早可以用时钟探测到引力波。而引力波可以直接穿透地球，在遥远的未来可用于发展不受阻碍的通信。也许到那时，基于量子力学的钟也可能成为通信工具。

微波原子钟	
迄今大多数原子钟都是基于原子的微波频率振荡，振荡频率一般在千兆赫兹量级。	
铯原子钟	国际单位制的时间单位秒就是根据铯-133原子的微波频率振荡周期的某个整数倍来定义的。
铷原子钟	被动型原子钟，利用的是铷原子基态超精细能级之间的跃迁所辐射出的电磁波，具有体积小、精度高的特点。
氢原子钟	利用氢原子能级跃迁时辐射出来的电磁波去控制校准石英钟，稳定程度相当高，每天变化只有十亿分之一秒。
光频原子钟	
为了进一步提高时间测量精度，近十几年来，人们大量研究了比微波钟频率高上万倍、十万倍的光频原子钟，其振荡频率与可见光的频率一样，甚至更高。	
光晶格冷原子钟	用光晶格激光来冻住原子，从而获得超高的频率稳定度。其精度可以达到 $10^{-18}$ 或更高。
镱原子钟	光晶格冷原子钟的一种。原子频率越高，给定时间内的振荡次数越多，越能精确地测量时间，但前提是原子处于能量激发态时的寿命不能太短，否则原子就会像有强摩擦的单摆那样振幅快速减小，不能够精确地定义一个振荡频率。镱-87原子恰好有一个长寿的激发态，平均寿命高达150秒，它与基态叠加时的振荡频率高达约429太赫兹，因而成为一个重要的时间基准。

## 啾呀之语是婴儿在向父母“发号施令”

思羽/编译

科学家已经解读出了婴儿的啾呀之语：原来那是婴儿在对父母发号施令。牙牙学语时，婴儿是在表达自己想要什么，所以父母即使不知道，也要认真聆听。

很早以前，科学家已经发现，这种啾呀之语能帮助婴儿学说话，所以我们过去一直认为婴儿是“学生”。但从最新研究来看，其实他们才是真正的老师——通过啾呀呀的声音，他们可能在向父母发号施令，影响并改变父母与他们的互动方式，从而以他们认为最佳的方式，使得自身的学习潜能最大化。

这项研究的主导者之一、美国康奈尔大学心理学研究生史蒂文·埃尔姆林格在声明中提出，婴儿啾呀呀时，也许是在告诉他们的父母，到底要如何与他们交谈。婴儿实际上在以某些方式塑造他们自身的学习环境，从而让学习变得更加容易。

## 父母跟着婴儿说“宝宝语”

有详细文献记载表明，当父母使用婴儿导向语言时(也被称为“宝宝语”)，会让婴儿的学习过程变得更加容易。同时，生活中的事实也证明，更短的句子、更简单的词汇、更高的音高、更慢的语速，都有助于让婴儿意识到“集中精神的时候了”，并学习基本语言打下基础。

有趣的是，对婴儿啾呀之语的研究表明，当婴儿发出非语言的声音时，他们通常更加专心，更能够接受刺激，似乎在告诉父母：“我现在注意力非常集中，快教我说话吧！”

研究表明，随着到达不同的发育阶段，婴儿的儿语方式就会随之改变，父母们说“宝宝语”的方式也会跟着改变。这可能意味着，不仅仅是父母在影响孩子，孩子也在调整父母的行为。

其他研究指出，当婴儿对着某些物体啾呀呀时，父母更有可能谈论那件物体。比如说，要是一个婴儿开始对着奶牛玩具啾呀呀，父母很可能说出“奶牛”一词或模仿奶牛叫声，甚至两件事情一起做。不管怎么样，婴儿似乎都学到了与他们所关注的某个事物相关的内容。

## 简单词句让婴儿学得更快

“我们知道，父母的言语会影响婴儿的学习情况，而婴儿内在自发的动机也会改变他们学习的方式，这些都是合乎情理的。”埃尔姆林格说，“但婴儿如何改变父母，甚至改变整体的学习环境，这尚未被人研究过，那也是我们正在尝试做的事情。”

为了更好地弄清宝宝儿语的意图，埃尔姆林格和他的研究团队在亲子中心的活动空间里，对30对母亲和婴儿，进行了连续两日、每次30分钟的观察。参与实验的婴儿在9月龄到10月龄之间，他们可以在房间里自由活动，比如玩玩具、翻看动物画报。在这个过程中，隐藏在婴儿工装裤上的无线麦克风会记录下宝宝的语音。与此同时，他们的母亲们也佩戴了麦克风，并有视频记录下整个活动过程。

研究人员会测量父母的语法和词汇，以及宝宝儿语从第一天到第二天的变化。他们发现，宝宝儿语时，妈妈往往会用更复杂的词汇、更简单的独词句和更短的单词来应答。父母们越是这么做，婴儿在第二天的玩耍期间学会新语音的速度也就越快。

同时，数据还显示，单个词汇的发音可能对婴儿的语言学习能力的提升影响最大，那也许正是婴儿用啾呀之语所索要的东西。埃尔姆林格推测，婴儿很可能是这样来吩咐爸爸妈妈做某件事。

## 儿语的含义超出父母想象

对于婴儿的啾呀之语如何调整父母的行为，相关研究仍然相对处于起步阶段。需要注意的是，目前这些研究结果还局限于较小的样本量，研究时间也不够长。此外，研究没有审视父亲如何回应儿语。越来越多的证据表明，父亲与婴儿的互动同样重要。总体而言，为了获得更加坚实的结论，科学家还需要不断增加实验对象的人数，并重复类似实验，还要在更长的期限内观察婴儿与父母的言语和行为。

在获得进一步的实验结果之前，研究者并不想给父母增添更多焦虑，其实父母们不用在意他们的宝宝是不是在儿语，也不用太在意这些儿语意味着什么。

不过，埃尔姆林格说：“对于宝宝来说，啾呀呀是一种从周围成年人处获得信息的社交催化剂，它并非毫无意义。”他提醒年轻的父母们，“假如你的孩子总是啾呀呀说个不停，那么他们所想表达的意思，可能比你能够猜到的要多得多。”