

# 支点

PHYSICAL PIVOT

Vol.5  
No.25  
Dec, 2013



传奇量子史话  
上帝是否掷骰子？

千年的奔月梦想  
——嫦娥三号

跟电线说再见  
——无线输电

南京大学物理学院 Physics School, NJU

支点学社 社  
Link up with Physics

# 征稿启示

## 《支点》征稿启示

《支点》杂志开始征稿了！  
你想要抒发对物理学的热爱之情吗？  
你想要探讨物理学的前沿问题吗？  
你想要发表自己的科学成果吗？

她·《支点》·这个物理学院旗下的杂志将给予你机会！

自本日起·本刊将面向全校师生征集物理学方面的稿件。

### 1. 刊登文章范围

1.1 本刊重点关注物理学及其相关的交叉学科领域内的原创性作品。

要求：

研究性论文须有创新性；

研究快讯含有首创性成果；

前沿领域综述应由该领域专家之成果结合个人研究成果完成·具有前瞻性；

欢迎实验与理论结合·实验结果可信·实验可重复；

亦欢迎文学性强的文章·如个人随想、读书笔记、学习经验·须具有原创性、趣味性和指导性；

1.2 除学术水平外·本刊亦考虑文章的可读性·故写作质量太差之作不在本刊接受范围之内。

### 2. 版权、学术规范和来稿要求

2.1 作者投稿须同时转让作品版权；

2.2 署名者务必对文章做出实质贡献；

2.3 本刊不接受稿纸·请务必将稿件投送至邮箱：[1075231316@qq.com](mailto:1075231316@qq.com)

2.4 文章须标明创新点·简明扼要说明创新之处；摘要应包括研究背景、方法和目的·主要结果以及相关讨论；引言应包括研究领域综述、现有成果的描述和阐述作者本项研究的目的·最后须给出文章结构；

2.5 交代清楚研究方法·结合图与表格讨论实验结果·给予恰当的分析得出结论·同时指出本工作的不足与未来的展望；

2.6 公式、插图、照片、表格给予编号·引用文献须出自正式出版刊物。

### 3. 其他

3.1 本刊从投稿到录用须经过编辑部初审·编委会复审环节·一般历时1~2月；

3.2 文章正式录用后·将参与本刊优秀文章评选·评为优秀者本刊将向其作者提供稿酬（每期杂志选出2篇优秀文章·每篇文章提供50元稿酬）；

3.3 投稿两个月后未获答复者·可自行处理文稿。

# 卷首语

喧闹的2012业已逝去，玛雅人的预言渐渐被时间的沙土掩埋，淡去。世界依然，我们依旧，狄拉克海涟漪荡漾。物理的巨舰乘风破浪，支点的舵手扬帆远航。

追寻的脚步未有片刻停留，求索的精神从未被时空所限。

从第一块打火石的降临到牛顿头上的苹果的自由落体，科学的第一步迈得如此漫长而谨慎，横亘了上万年的时间。物理的面纱被揭开了些许，却像套娃一样，依旧捉摸不透。前仆后继的寻路者穷尽心血，牛顿、惠更斯、奥斯特、麦克斯韦……叩开了力学、光学、电磁学的一扇扇门扉，宇宙的奥秘仍然暗夜未央。

普朗克，小心地用手中的量子点亮了整片天空。

亚里士多德与牛顿的连续世界在普朗克面前崩毁殆尽，宇宙却因此而变得简洁美丽。薛定谔的猫，海森堡的测不准原理，德布罗意的物质波，一个个跃动的音符奏出了新世纪的物理乐章。几张白纸，一杆铅笔，就可以用有限的二维方程勾勒出时间维度上的三维世界，这该是多么美妙！

2012年，塞尔日·阿罗什和大卫·维因兰德设计了全新的实验方法，从而控制测量单个量子系统，这一突破性的成果让所有的物理人为之振奋。拉普拉斯曾骄傲的对着全盛时期的拿破仑说：“我们的理论里，没有上帝！”因为，我们就是要靠自己的力量找到所有的答案。

物理人没有上帝。

量子风暴的乐章已然奏起。

物理人用双手与头脑，超越上帝。

郭泰然 徐支炜

2013年8月

刊名题字：中国民主同盟中央委员会主席 蒋树声  
原南京大学校长

顾问：南京大学物理学院院长 李建新  
南京大学匡亚明学院院长 王 炜  
南京大学物理学院副院长 吴小山

指导老师：南京大学物理学院党委副书记 鞠 艳  
南京大学物理学院团委书记 施国卿  
南京大学物理学院《物理学进展》编辑 王 竞

社 长：王辰东 倪正阳 张楚珩 郭泰然  
主 编：郭泰然

编辑部：司 进 许 玥 徐支炜  
陈俊钦 陈远东 成昊鹏 丁劲秋 郭晋光 栾小维 阮宇贻  
宋迦南 万家诚 王 涛 翁经错 徐辅芹 许家宁 闫蕴豪  
俞嘉玮 袁知怡 张丰泽 张光耀 张凯翔 张 帅 张宇培  
周文杰

策划部：张 胜 高书香 赵 辉  
曹 静 陈道正 高亚男 李晓曦 王 轩 王泽林 杨彰昭  
赵文定

记者部：杨 帆 黎 颖  
李昊阳 凌 奇 鲁庚熹 王 术 殷政浩

技术部：  
洪毓良 胡焜玥 王 洋 王逸然 吴逸超 向 腾 徐志远  
张文慧 周 旋

外联部：段晓雨 耿鑫沛  
程恩泽 丁 歆 丁 旭 何润秋 郑奕帆 骆耀东 孟祥梅  
王留锁 咸海昕 张光耀 张佩瑜 张兆奇 赵 越

宣传部：王民琪  
郭晋光 侯文滔 金凯文 彭若喻 张家明 张修齐

致谢：

国家物理学基础人才培养基金  
南京大学物理学院团委、学生会



Physical Pivot Press, NJU

立足科学精神  
传承理性思维

# CONTENTS 目录

## 专题文章——量子

7……揭开单个量子的神秘面纱  
9……有趣的量子纠缠  
11……天才头脑的碰撞  
16……爱因斯坦与玻尔的论战  
20……希格斯粒子发现之艰

## 探究世界本质

我思故世界在……22  
大爆炸理论……24  
M理论……28  
光速真的是速度的极限吗……34  
黑洞的热辐射……38  
等效性的追问……41

## 应用

47……幽灵传输——量子传输  
50……量子计算机——从梦想到现实  
54……跟电线说再见——无线输电  
内插……嫦娥三号

## 访谈

科研的日子其实很美好——闻海虎教授专访……58  
抓住薛定谔的猫——于扬教授访谈……63  
走进南大声学所——邱小军教授采访……68

# 揭开单个量子粒子的神秘面纱

——解读 2012 诺贝尔物理学奖

张钟秀

举世瞩目的 2012 年诺贝尔物理学奖终于于北京时间 10 月 9 日下午 5 点 45 分揭晓，法国科学家塞尔日·阿罗什 (Serge Haroche) 与美国科学家大卫·维因兰德 (David Wineland) 因“发现测量和操控单个量子系统的突破性实验方法”而获此殊荣。两位获奖者的研究成果是量子力学领域的重大突破，也为量子物理学实验新纪元开辟了一扇大门。那么，他们究竟做了些什么？他们的成果又会有怎样神奇的应用？这还要从薛定谔那只著名的猫说起。

## 量子力学中的悖论

量子力学是描述原子、电子等微观粒子的理论，描绘了一个肉眼无法观测的微观世界，它所揭示的微观规律与日常生活中看到的宏观规律很不一样。例如，在宏观世界中，一块大理石的形态是固定的，它不可能既是“这样”又是“那样”。但是在微观世界中，粒子可以处于叠加态，即可以有多种形态。处于所谓“叠加态”的微观粒子之状态是不确定的，例如：电子可以几乎同时位于几个不同的地点，直到被观察测量时，才在某处出现。

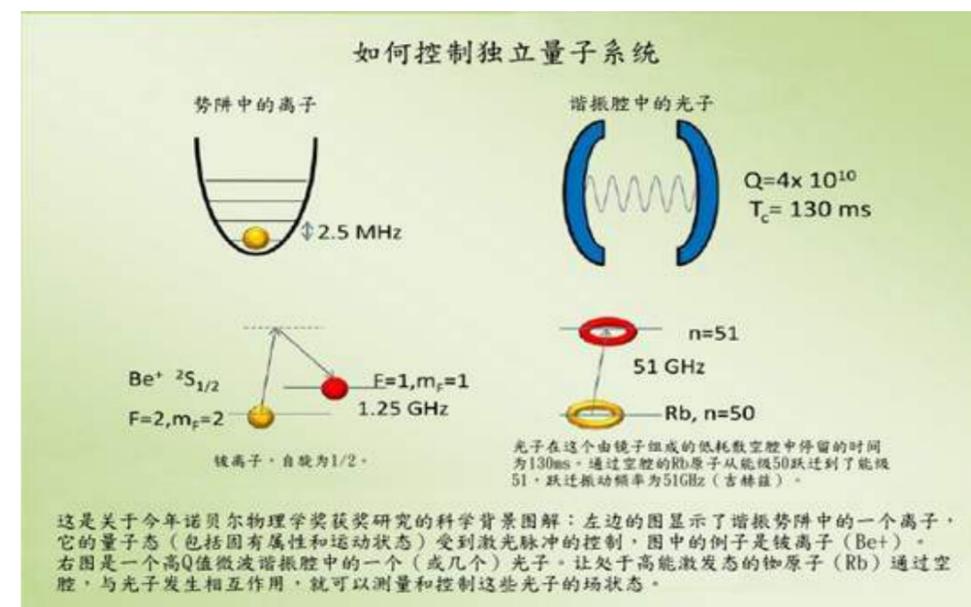
这种奇特的情形让很多人感觉荒谬，物理学家薛定谔也是如此。于是他便于 1935 年编出了“薛定谔之猫”这一悖论，使量子力学的微观不确定性变为宏观不确定性：把箱子中铀原子的“衰变—未衰变叠加态”与猫的“死—活叠加态”联系在一起，于是，箱子中的猫便处于一种既死又活的状态，只有我们打开箱子的一刹那，才能确定猫究竟是死是活——这显然严重违背了我们的日常经验！不科学啊！这个著名的悖论让无数物理学大师孜孜以求却又头疼不已，找不出合理的解释，成为了量子力学中噩梦般的存在。

其实“薛定谔之猫”问题的关键在于，我们无法在不破坏单个量子粒子的前提下实现对其直接观测，因为从环境中分离出单个粒子并非易事，而且一旦粒子融入外在世界，其神秘的量子性质便会消失。

那么，就没有办法让这只可怜的猫停止在阴阳两界的徘徊了么？感谢阿罗什和维因兰德，他们的研究为抓住这只生死不明的猫提供了可能。

## 量子世界里的粒子控制

塞尔日·阿罗什和大卫·维因兰德独立地发明并



第一部分

主题  
文章  
量子

拓展出能够在保持个体粒子的量子力学属性的情况下对其进行测量和操控的方法——而这在之前被认为是不能实现的！

通过巧妙的实验方法，阿罗什和维因兰德与研究小组一起成功地实现对量子碎片的测量和控制，颠覆了之前人们认为的其无法被直接观测到的看法。这套新方法允许他们检验、控制并计算粒子。

他们的方法有很多共通之处。大卫·维因兰德使用光子来控制 and 测量那些被捕捉的带电原子或离子。它们被置于电场内的势阱中。该实验在真空和低温条件下进行，使粒子远离热和辐射干扰。他成功的关键在于巧妙地使用激光束和激光脉冲。他用激光压制离子在势阱中的热运动，使离子停留在最低能量状态，从而观测势阱中离子的量子现象。一个细致调节好的激光束可以使离子进入叠加态，该形态使一个离子同时存在于两种不同状态。例如，一个离子可以同时处于两种能量值。它开始处于较低能量的状态，激光的作用仅仅是向高能量状态轻轻推它，能够使它停留在两种状态的叠加中，进入任何一种状态有相等的可能性。这样可以研究离子的量子叠加状态。

塞尔日·阿罗什采取了相反的方法：通过发射原子穿过阱，他控制并测量了捕获的光子或光粒子。在实验室中，微波光子在相距 3 厘米的镜片之间反弹。镜片用超导材料制作，被冷却到刚刚高于绝对零度。这是世界最闪耀的超导镜片，单个的光子在它们之间的空腔反弹超过十分之一秒的时间，直到它丢失或被吸收。这意味着光子能够穿越 40000 千米的长度，相当于环绕地球一周。

量子操纵可以通过势阱中的光子演示。阿罗什运用特殊调制的原子，叫做 Rydberg 原子（纪念瑞典物理学家 Johannes Rydberg），完成控制和测量空腔内微波光子的任务。一个 Rydberg 原子大致有典型原子 1000 倍的半径，在一个合理选择的速度下送入空腔，它和光子的相互作用在一个理想的控制下发生。

Rydberg 原子穿越空腔并离开，留下光子，但之间的相互作用使原子的量子相位发生改变，就像一阵波。当 Rydberg 原子离开空腔时，相位改变能测量得到，从而暗示空腔中光子的存在或逃逸。

身处大西洋两岸的这两位科学家，虽然他们针对的是不同的对象、使用的是不同的方法，但他们实现的是同一个梦想。最终，他们实现了对单个粒子的操纵和测量！

#### 量子领域的新应用

戴维·维因兰德和他的团队运用势阱中的离子制作了一个时钟，比铯原子钟精确 100 倍，它运用可见

光制作，故称之为光钟。我们知道，在光钟出现之前，原子钟是世界上最准确的计时工具。它是利用原子吸收或释放能量时发出的电磁波来计时的：当原子从一个“能量态”跃迁至低的“能量态”时，它便会释放电磁波；这种电磁波特征频率是不连续的，这也就是人们所说的共振频率，而同一种原子的共振频率是一定的，因此可将某种原子作为一种节拍器来保持高度精确的时间。当前原子钟的原子跃迁频率是在微波波段，而光学频率比微波频率高 5 个数量级，因此通过对光学频率的精密控制和光学频率与微波频率的高精度转换，可以提供超高精度的时间和频率标准，实现更精确地计时。因此，光钟的精确度高于 10 的 17 次方，这说明如果从大约 140 亿年前的大爆炸开始计时，光钟到现今的偏差仅为 5 秒。一个光钟仅包含一两个势阱中的离子。如果包含两个，一个用来做钟，另一个用来在不破坏它状态的情况下进行读取，或者错过一个刻度。

利用如此精确的时钟，可以观察到一些极其微妙美丽的自然现象，例如时间流逝，重力的微小变化，时空的交织。根据爱因斯坦相对论，时间可以被运动和重力影响。速度越高，重力越强，时间流逝越慢。通常我们不能察觉到这种现象。运用 GPS 导航时，我们依赖卫星上由于几百公里外的上空重力变弱的影响而需要定期校准的时间信号。运用光钟，我们可以测量速度变化小于 10 米每秒，或者高度差为 30 厘米处重力改变所引起的时间流逝变化。

和实现精密的测量、制造更精确的原子钟相比，诺贝尔奖看好这两位科学家的原因是他们开启了量子计算机时代的大门。维因兰德的团队在世界上首次演示了一个量子代替两个量子位。如果几个量子位的实验能够完成，更多量子位的组合也能够成功。如果这样，也许就在这个世纪里，量子计算机就将彻底改变我们的日常生活，如同经典计算机在上个世纪改变了我们的生活那样。

这样突破性的成就究竟在物理界还能掀起什么样的波澜？还会有怎样的神奇应用？让我们拭目以待！

#### 参考资料：

1. 《2012 诺贝尔 图文 解读物理学诺奖》 科学松鼠会
2. 《2012 诺贝尔奖 物理学奖解读》 果壳网
3. 《2012 年诺贝尔物理学奖：操纵单个量子粒子》 张倩羽

# 有趣的量子纠缠

齐佳安

## 简介

量子纠缠 (quantum entanglement) 现象是量子力学的一个重要推论，从诞生开始就备受争论，近年来实验室现象证实，使人们对量子力学的本质不断地产生新的认识。它神秘的本质也是目前物理学正在努力攻克的堡垒。

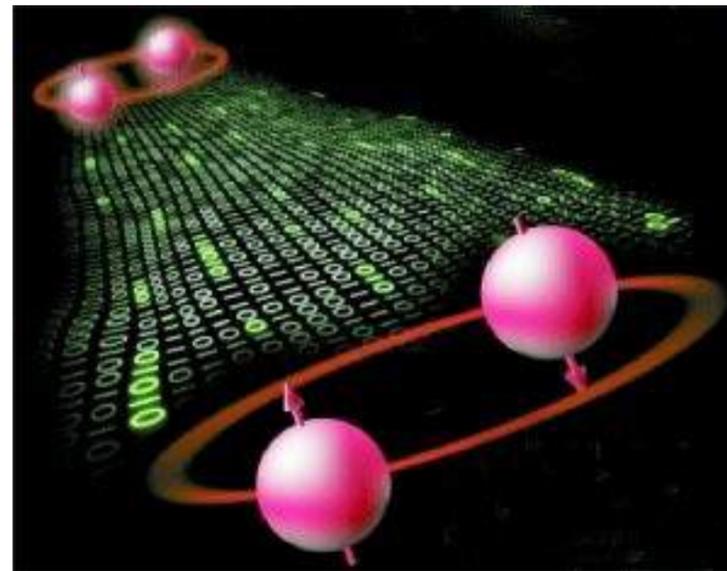
## 神秘的性质

具有量子纠缠的粒子保持有特别的关联性，各粒子共同处于量子叠加态 (quantum superposition) 并共享同一个量子态 (quantum state)，由同一个方程描述。因此，不可能撇开这个粒子去描述另一个粒子。更进一步，如果确定了这个粒子的状态，那么另一个随之确定。这样的“纠缠”状态与两个粒子之间的距离无关，这种相互作用是“非定域性”的，亦即无论相隔多远，似乎这些粒子总是在保持着鬼魅般的相互作用 (spooky action-at-a-distance)。

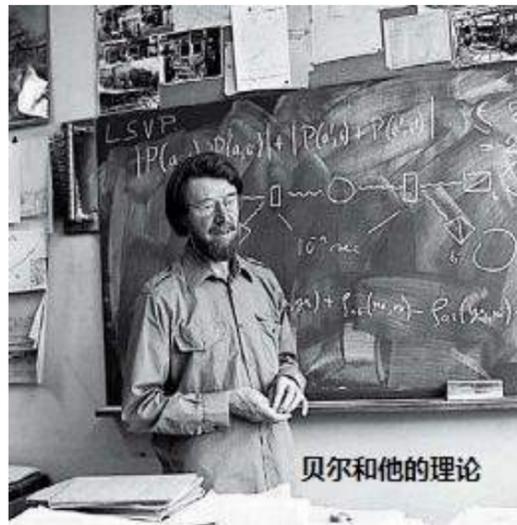
设想一个不稳定粒子衰变成两个小粒子，衰变后各自向相反的两个方向飞开去。系统可以用一个共同的量子态来描述。我们假设这种粒子有两种可能的自旋，分别记为“↑”和“↓”。假设小明和小红两个观测者分别

对不同粒子行观测。在观测前，每个粒子的状态是不确定的，只有波函数可以描绘它们。只要不去探测，每个粒子的自旋便都处在一种左 / 右可能性叠加的混合状态，我们假定两种概率各 50%。在小明观测的一瞬间，波函数发生了坍缩 (wave function collapse)，如果其中发现粒子 A 的自旋为“↑”，那么小红不用测量就知道粒子 B 的自旋便一定是“↓”，以保证守恒定律。

一个通俗的比喻可以是小明和小红各领到一根箭的一半装入包裹，然后互相走开，如果小明发现他拿到的是箭头，那



么他可以判断小红拿到了箭尾。当然上面的例子并不代表实际的情况。问题在于描述状态的物理量不可能仅仅取“↑”和“↓”这种明确的值，它们是无法取确定值的，不相容的“共轭物理量” (conjugate quantities) 满足不确定性原理。共轭物理量，比如位置和动量，不同轴上的自旋分量等等，不能同时取确定值。经典理论不确定性原理经典的解释是建立在观测扰动上 (disturbance caused by measurement) 的。为什么会测不准呢？比如位置和动量，经典的解释是，观测时必须引入的一个光子会扰动被观测的粒子。位置测量的越准，所需的波长就越短，能量就越大，对粒子的速度扰动就越大，也就对速度测量的越不准确，反之亦然。然而，量子纠缠现象导致的不同粒子共轭物理量之间神奇的相互影响用经典方式难以解释：对 A 粒子物理量  $\alpha$  的测量将导致 B 粒子  $\alpha$  的共轭物理量  $\beta$  难以确定，尽管它们之间没有发生任何联系！而且，因为是同一个波函数，这意味着相互影响具有瞬时性，AB 两粒子之间的作用是超光速的，而这违反了相对论的原理——除非非定域性是世界的根本属性。



贝尔和他的理论

### 世界是非定域性的？

定域因果原则 (local causality)，或简称为定域性原则，是经典物理学最基本的原则之一。事实上，直到20世纪80年代，大多数物理学家仍然信守这个原则。定域性原则规定：所有物体都只和与它在时空中相邻的物体发生相互作用，一个系统的状态只由它所在的某个小邻域直接影响。定域性原则否认长距相互作用的存在，认为力是靠“力场”这种特殊的物质承载的，物体之间相互作用的本质是物质的交换。比如电磁力作用是光子的交换，强相互作用是胶子的交换。根据定域性原则，不仅不可能有任何即时的跨距离作用，任何物理效应也都不可能以大于光速的速度传递。

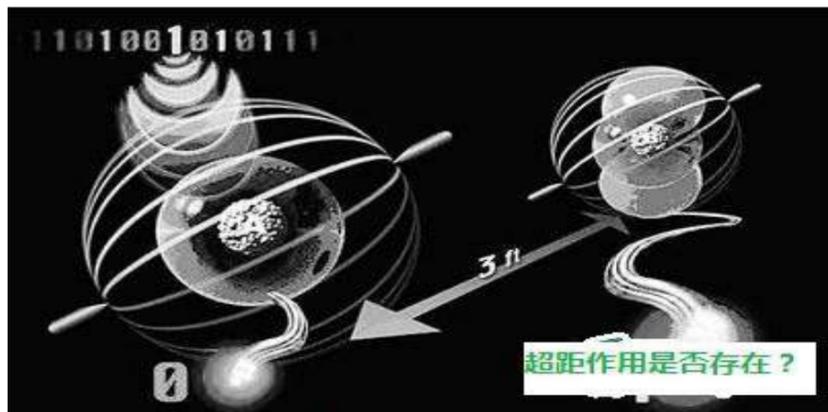
爱因斯坦不承认现实是非定域的或不确定的。1935年，Einstein 与 Podolsky 及 Rosen 联合发表了著名的论文 The EPR paradox，试图利用一个思想实验来表明，因为量子力学不能描述现实的定域性及确定性，所以是

不完备的。从此，许多物理学家花费了大量努力试图设计出完备的理论——这些理论一方面允许如位置和速度等物理量在任何时候都是确定但未知的（隐变量理论），同时，其计算结果也与量子理论相符。然而，因为其牵强、复杂及难于应用，而且，就连其中最著名的理论（玻姆 1952 年提出的隐变量理论）的结果也是非定域性的，所以这些理论都没有获得广泛接受。

1965 年，北爱尔兰物理学家贝尔提出了强大的贝尔不等式 (Bell's theorem) 来声援爱因斯坦对“量子力学是不完备的”的证明。该理论仅仅建立在定域性和实在性的基础上（实在性是指无论被观察与否，同样存在一个“事实”，它不随你的观察与否发生改变。它的正确性是物理学生存的根本）。在这两个基础上，贝尔定律是铁律。贝尔定律意味着：无论隐变量是否存在（也就是说，即使现实是不确定的），如果贝尔不等式不成立，则意味着它的前提不正确，即定域性不正确，超距作用确实存在。于是，随后出现大量实验对贝尔不等式进行测试，而结果表明贝尔不等式不总是成立的。由此证明：如果现实世界确实存在（实在性正确），那么这个现实不可能是定域性的。此外，这些实验的结果也与量子理论的预测相符。这些实验中最成功的一个由法国物理学家 Alain Aspect 领导的小组于 1981 至 1982 年间完成。量子力学取得了辉煌的胜利。各种反贝尔定律的现象在量子力学中得到了很好的解释。

### 量子纠缠的应用

量子力学所预言的纠缠甚至被运用在信息学——量子通信，量子计算等新兴学科。实际上小到光子电子，大到巴基球  $C_{60}$  甚至是微小的钻石，都有可能发生量子纠缠。多量子的纠缠态的制备也一直在推进。物理规律更倾向于非定域性和非实在性量子力学所指向的非定域性作用似乎在向我们昭示着时空本身的不连续性。量子力学也引导人们反思真实性的意义，真实是否因观测而赋予了其意义，是否可以说没有观测者的事件是没有意义的？而这已经上升到了哲学的范畴。



超距作用是否存在？

# 天才头脑的碰撞

## 谈量子力学的两大思维转换

80 多年前，量子力学领域进行着一场空前的战争，这场战争的硝烟至今仍然无法散去，对战的双方是 20 世纪两位伟大的物理学家——玻尔和爱因斯坦：

爱因斯坦：玻尔，亲爱的上帝不掷骰子！

玻尔：爱因斯坦，别去指挥上帝该怎么做！

王辰东

## 硝烟渐起

这场战争要从海森堡讲起。1927年，海森堡刚刚建立了矩阵力学，但他正为其而烦恼。大多数人似乎更加喜欢计算起来更容易的波动方程，这让海森堡耿耿于怀。矩阵具有奇特的运算规则，即  $p \times q \neq q \times p$ 。用来描述物理学原理的数学一定拥有其物理含义，那么这种乘法规则究竟意味着什么呢？

这种奇妙的运算规则带来了量子力学思维模式的巨变，孕育出量子力学三大基石之一——不确定性原理。让我们抖擞精神，准备接受一次思维的升华吧！

$p$  代表动量， $q$  代表位置， $p \times q \neq q \times p$  就意味着先观测动量  $p$ ，再观测位置  $q$ ，与先观测  $q$ ，再观测  $p$

得到的结果是不一样的。对此唯一可能的解释是，测量其中一个的时候，另外一个量因为测量的动作而改变。这种运算规则的存在，就说明同时测量  $p$  和  $q$  是不可能做到的！

假设一个小球以一定的速度在运动，如果按照经典的思维，它一定会同时拥有确定的动量和位置。但是，矩阵力学的一个基本哲学基础是，凡是不能够观察到物理过程都没有意义。所以我们要通过观察来确定小球的动量和速度。怎样观察呢？我们要通过光子去碰撞它。宏观世界里的小球受到光子碰撞的影响太小了，可以忽略，但是如果放到微观世界里，光子对粒子运动的影响则不可以忽略。我们得到的位置越准确，需要的光波长越短，能量越高，对动量的影响越大。因此我们会得到一个结论：我们无法同时准确的知道一个电子的位置和动量。经过推导，得到  $\Delta p \times \Delta q > h/4\pi$ 。这就是大家都很熟悉的不确定性原理。（ $h$  是普朗克常量）

不确定性原理还有一个公式，那就是

$\Delta E \times \Delta t > h$ 。也就是说能量  $E$  和时间  $t$  也遵循不确定性原理，不可能同时精确的得到。即使在绝对的真空里，把所有的物质和场都排除在外，能量也在沸腾着！在非常短的一刹那，即  $t$  非常确定的一瞬间， $\Delta t$  极小，因此  $\Delta E$  极大，在真空中会出现巨大的能量起伏。这种能量是靠着不确定性原理凭空出现的，甚至违反了能量守恒定律！但是时间越长，这种能量起伏越不明显，在通常情况下，能量起伏被抹平，能量守恒定律成立。在这种意义上，能量守恒根本就不是自然界的基本定律，它只是不确定性原理在通常情况下的近似而已。暴涨理论认为，宇宙就是因为这种量子涨落而从虚无中产生出来的。

即使我们把能量降到绝对零度，也不能使粒子的速度降为零，使其动量和位置同时被确定。因为即使在绝对零度的时候，任何振子都会有一个极其微小的能量被保留下来，被称作零点能 ( $E = h\nu/2$ )。

波恩是量子力学中的另一个重要人物，他的思维更加具有开创性。当薛定谔信心满满

地讲述自己的波函数  $\psi$  时，坐在台下的波恩正在试图推翻经典物理逻辑的基础。薛定谔认为，波函数是一个空间分布函数，它与电子的电荷相乘，就代表了电荷在空间中的实际分布。但是波恩提出了一个开创性的观点——概率波。他认为  $\psi$  的平方代表电子出现在那一点的概率。我们并不能确定电子出现在哪一点，我们只能根据波函数计算出电子出现在空间中某一点的概率。只有当大量电子存在时，我们才能得到一个电子的统计分布。

又是不确定！物理学几千年的发展，一直秉承着一个理念：当我们找到物理规律后，可以根据初始情况来预言未来的发展或是推算过去的情况。宇宙是按照物理规律有条不紊的发展着。可是，在量子力学中，物理过程的确定性不见了，一切都是不确定的，只有概率，绝对的决定论和因果论被推翻了！



## 战火蔓延

科学的发展，

总是充满戏剧性。波粒之争，

由光学开始，最终在量子力学中达到高潮。

可是波粒之争实际上只是一场更大的争论中的一个侧面。波动代表连续，粒子代表不连续，连续性之争才是这场战争的本质。

人类似乎总是倾向于相信自然的完美，而连续恰是完美的一部分。最初人类认为有理数填满了数轴，便为此感到满足；但当人们发现只有有理数的数轴是不连续的时候，毫不犹豫的用无理数去填满空缺。

量子的提出打破了自然的连续，在量子理论中，分立才是自然界的

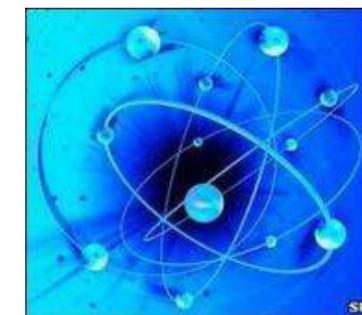
根本。在双缝衍射实验中，如果我们将光强控制的足够弱，使其一次只发射一个光子，那么在接收屏上，我们只能看到一个小点。用电子做实验也是一样。电子一次只能通过一个细缝（左缝或右缝），然后在屏上打出一个点。这说明电子是一个分立的粒子，不是连续的波。那么薛定谔那个可以精确描述电子运动的波函数  $\psi$  是怎么回事？那只是概率分布。量子世界里的电子并不走确定的轨迹，或者说，它根本就没有轨迹！它只是像一个幽灵一样在空间中随机出现。不过它出现在空间中不同点的概率是不同的，这种概率恰恰由波函数  $\psi$  决定。因此，在双缝干涉射实验中，或是在其它的实验中，实验条件（比如缝的宽



度）完全按照影响波动的方式影响电子在空间中的分布概率。尽管一个电子只能在屏上打出一个点，但是大量电子却严格按照概率进行统计分布，最终在屏上打出干涉条纹！电子的轨迹不存在，甚至连它的运动都是不连续的！德布罗意的物质波确实存在，但只是数学上的存在，电子仍然只是个粒子，只

是这个粒子按照波函数所决定的概率分布而已。矩阵力学就是建立在不连续这个基础之上的。对于原子来说，单独的能级不可观测，我们为什么要认为它存在呢？我们仅仅观察到能级差而已（根据辐射谱线的频率）。我们为什么要假设有一个能级的渐变过程呢？实际上只有能级差！按照这种只在乎分立的观察结果，而不假设有变化轨迹的思维进行计算，就得到了矩阵力学。

这样，波和粒子谁也没有占上风，它们都是对的，关键看你如何解释或者如何观察。波和粒子在同一时刻是互斥的，但他们却在一个更高的层次上统一在一起，作为电子的两个方面被纳入一个整体概念中。这就是玻尔的互补原理。



现在，好戏马上就要开场了。量子力学的三大核心原理——概率解释、不确定性原理和互补原理，合力摧毁了经典世界的严格因果性和绝对客观性。世界不再是连续的，也不再是客观的了。这如此逆天的理论，势必要引起激烈的论战了。参加论战的双方都具有天才的头脑。双方的代表人物分别是爱因斯坦和玻尔。爱因斯坦的战友是薛定谔和德布罗意，玻尔的战友则是哥本哈根学派的海森堡、波恩、还有泡利。现在，思维大战正式开始：

第一场：战场是双缝衍射实验。按照波恩的概率解释，电子是一个粒子。我们假设一个粒子来到两条狭缝之前，它要选择其中一条缝穿过去，然后按照某种概率随机出现在接收屏上。这种概率与两条缝的距离有关，那么这个粒子是如何在只穿过一条缝的情况下感知到另一条缝的距离的？如果有人能在粒子穿过狭缝的瞬间关闭另一条狭缝，那么接收屏上的图案就会转变成单缝

的情况，粒子又是如何在一瞬间感知到另一条缝的变化的？这其中暗示了一种超距作用，突破了信号传播的光速上限，违反了狭义相对论。如果电子是一种实际的波，完全确定而实际地分布着，在空间扩散开去，同时穿过两条狭缝，打在接收屏上，那么超距作用就可以得到解释。但是如果单个粒子是一种实际存在的波，那么只要一个电子就可以在接收屏上形成干涉条纹。（尽管它很弱）可是实际上一个电子只能在屏上打出一个点，只有同时存在多个电子的时候，才会出现干涉条纹。这又怎么解释？我们只能这样解释：电子在击中感应屏的一瞬间，又由波动坍缩成了一个点。但是这种坍缩的原因是什么？没有完美的解答。

第一场，双方打成平手。

第二场：爱因斯坦瞄准了量子力学的根基——不确定性原理。想象有一个箱子，上面有一个小孔，并且有一个可以控制其

开关的快门。假如这个快门可以控制的足够好，每次只允许一个光子飞出外面。这样箱子少了一个光子的质量， $\Delta m$  确定，根据  $E=mc^2$ ， $\Delta E$  确定，我们又可以控制时间  $\Delta t$ ，因此  $\Delta E$  和  $\Delta t$  都确定， $\Delta E \times \Delta t > h$  不再成立！绝妙的反击！

但是不幸的是，玻尔经过一夜的苦想，

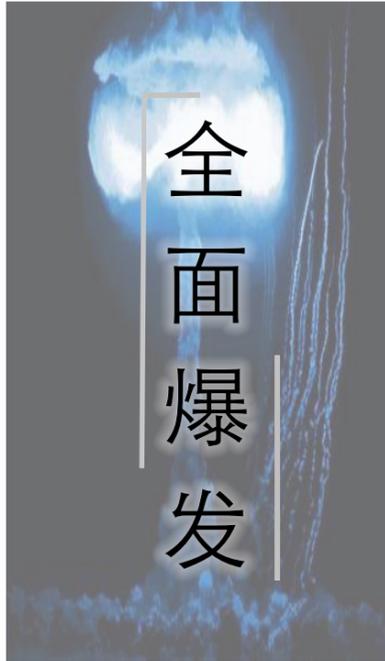
完美地化解了爱因斯坦的反击。既然光子跑掉了，那么我们要测量这个  $\Delta m$ ，用一个弹簧秤，取一个零点，通过测量位移来测量质量。设位移为  $\Delta q$ ，这样箱子就在引力场中移动了  $\Delta q$  的距离，但根据广义相对论的红移效应，时间也要随之改变  $\Delta T$ 。可以算出  $\Delta T > h / \Delta mc^2$ 。再带以  $\Delta E = \Delta mc^2$ ，得到的正是  $\Delta E \times \Delta t > h$ ！

第二场，量子论胜了！

第三场：我们假想一个自旋为 0 粒子，衰变成两个互相远离的粒子，那么其自旋必定为一上一下，以维持总体守恒。量子论认为，如果我们不去观察，波函数就不会坍缩，每个粒子的自旋

都处于一种上 / 下的叠加态。现在我们观察一个粒子 A，它的波函数便在瞬间坍缩，随机选择了一种状态，比如是上旋。这时另外一个粒子 B 必然为下旋，可是 B 是如何在瞬间得到消息，从而选择自己的状态的呢？这又违反了相对论。因此唯一的可能性就是，在分裂的时候，小粒子 A 和 B 的状态就已经确定了，而不是所谓的叠加态！那么玻尔是怎样应战的呢？玻尔的回答是，根本无需应战。因为爱因斯坦从一开始就是按照经典的观念来思考的，他只是证明了，在“经典实在观”的逻辑看来，量子论是不完备的。在量子逻辑里，如果我们不去观察，根本谈不上什么粒子的分裂、粒子的自旋，无论它们相隔多远，始终是一个相互关联的整体，它们之间无需信号的传递。当我们观察时，波函数坍缩，自旋才有了意义，我们才看到了粒子。

第三场：量子论又赢了！



## 全面爆发

## 硝烟散去

这场强强对决，实际上是两种思维方式的对决。爱因斯坦的战败，绝不是他能力的问题，而实在是因为他选择了与发展潮流相反的阵营。经过几十年的发展，量子力学被无数次检验过，如今它已经异常辉煌。可是，辉煌的量子力学又给我们带来什么呢？它让科学的前途更加迷惘

了。薛定谔那只“既死又活”的怪猫还在像幽灵一般的缠绕着我们，这大概是他对哥本哈根解释的最后反击了吧？但是就是这只猫困扰了量子论许多年，由其引申出来的许多理想实验（如把猫换成一个人）更是给量子论的正统——哥本哈根学派以沉重的打击。我们沿着这条路甚至会回到唯心主义的结论上去！

哥本哈根学派把波函数坍缩的原因解释成观察，可是如何定义观察？有意识参与的过程？可什么又是意识？意识的活动导致了波函数坍缩这种外界过程？惠勒甚至在 1979 年假想了一个理想实验，这个实验可以证明我们可以通过现在的活动来决定过去的发展！5 年后，这个实验真的由卡洛尔证实了！这是增强版的人择原理！

## 新的战场

为了摆脱这些魔咒，量子论不得不开辟新的战场。

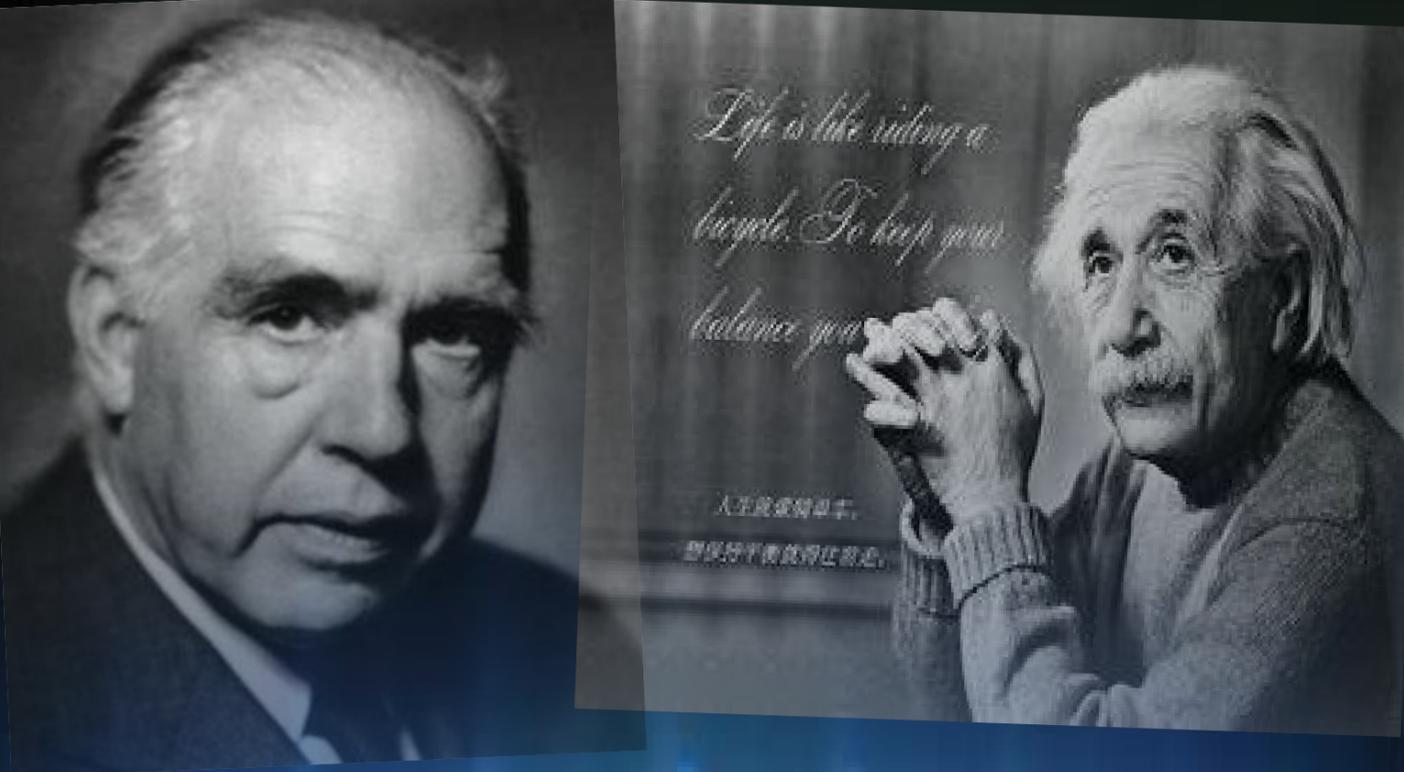
多世界解释、隐变量理论、系综理论、退相干历史……

新战场的战争打得轰轰烈烈，摆脱了旧的魔咒的同时，又被新的魔咒套住，量子力学仍然是一个硝烟弥漫的战场。它已经为我们带来了两大思维转换，席卷了旧的物理世界。

谁又知道，它不会在将来给我们带来新的思维风暴？

让我们拭目以待吧！





# 爱因斯坦与玻尔的论战

许玥

## 一、爱因斯坦与玻尔

阿尔伯特·爱因斯坦与尼尔斯·玻尔是两位世界级的物理大师。1920年，爱因斯坦与玻尔首次会面，从此以后，直到爱因斯坦去世，量子力学将他们二人紧密的缠绕在一起。他们争论了一生，爱因斯坦最终没有完全接受量子力学，而玻尔则一直把爱因斯坦当作精神对手，即使在爱因斯坦去世后依旧如此。玻尔去世前一天，他在工作室里的黑板上画的最后一张图，是爱因斯坦的光子箱草图。虽然他们二人之间一直持续着激烈的争论，但是他们二人的亲密关系并没有受到任何影响。他们一直相互尊敬和爱戴，并给予对方高度的评价。玻尔在为庆祝爱因斯坦70岁生日而作的一篇文章结尾说：“在量子理论的发展中，爱因斯坦是曾经起过很大的作用的。无论如何，我相信我已经不无成功地说明了这样一个问题：在和爱因斯坦地每一次接触中，我们大家都会得到启示；能够从这种启示中获得裨益对我是如此地重要啊！”他们的关系也许就证明了这句话：最了解自己人不是“知己”就的势均力敌的“对手”。

爱因斯坦与玻尔对物理世界的看法截然不同，爱因斯坦主张“实在论”（realism），而玻尔所代表的哥本哈根学派则坚持“实证论”（positivism）。他们争论的焦点之一在于海森堡原理（量子力学中的不确定性关系）。为了证明量子力学中的不确定性关系是错误的，爱因斯坦经过三年的深思熟虑，在1930年的索尔费会议上，提出来著名的“光子箱”思想实验。

## 二、海森堡原理

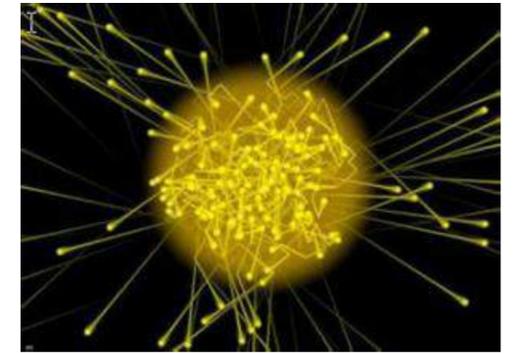
在量子力学里，不确定性原理表明，粒子的位置和动量不可同时被确定，位置的不确定性与动量的不确定性，遵守不等式

$$\Delta x \Delta p \geq h/2$$

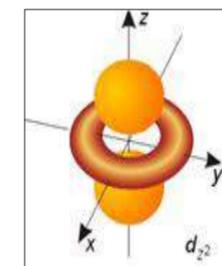
其中， $h$  是约化普朗克常数。

为了预言一个粒子未来的位置和速度，

人们必须能够准确地测量它现在的位置和速度。显而易见的办法是将光照到这粒子上，一部分光波被粒子散射开来，由此指明它的位置。然而，人们不可能将粒子的位置确定到比光的两个波峰之间距离更小的程度，所以必须用短波长的光来测量粒子的位置。现在，由普朗克的量子假设，人们不能用任意



少的光的量，至少要用一个光量子。这量子会扰动这粒子，并以一种不能预见的方式改变粒子的速度。而且位置的测量越准确，所需的波长就越短，单独量子的能量就越大，这样粒子的速度就被扰动得越厉害。换言之，你对粒子得位置测量得越准确，你对速度的测量就越不准确，反之亦然。海森堡指出，粒子位置的不确定性乘以粒子质量再乘以速度的不确定性不能小于一个确定量——普朗克常数。并且这个极限既不依赖于测量粒子位置和速度的方法，也不依赖于粒子的种类。



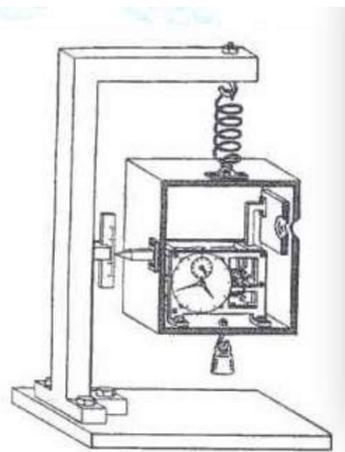
海森堡的不确定性原理意味着，粒子在某些方面的行为像波一样：它们没有确定的位置，而是被“抹平”成一定的几率分布。量子力学的理论是基于一个全新的数学基础之上，不再按照粒子和波动来描述实际的世界；而只不过利用这些术语，来描述的世界的观测而已。

### 三、爱因斯坦的挑战——“光子箱”思想实验

量子力学为科学引进了不可避免的非预见性或偶然性。爱因斯坦在发展这些观念时起了很大作用，但他非常强烈地反对这些。虽然他因为对量子理论的贡献而获得诺贝尔奖，但是，他也从不接受宇宙受机缘控制的观点；他的意见可以用他说的一句话来表达：“上帝不玩弄骰子。”因此，他提出了“光子箱”理想实验，这使他与玻尔的论战掀起了一个新的高潮。

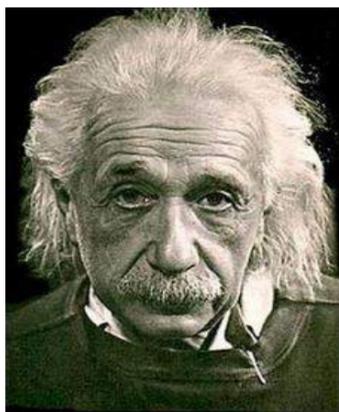
这个思想实验装置如图所示。

他设想了一个具有理想反射壁的箱子，里面充满了辐射。箱子上有一快门，可以用箱内的时钟控制它的开闭。快门开闭的时间可以任意的，每次开启只释放出一个光子。只要准确测出光子释放前后整个箱子质量的变化，就可以根据相对论质能关系式  $E=mc^2$ ，精确地测定光子的能量变化  $E$ 。因为质量地



测量是在开窗之前与开窗之后，与  $t$  无关，这样测定光子的能量就可以超出  $\Delta t \Delta E \geq h$  给出的测量精度，就总有可能使  $\Delta t \Delta E < h$  于是就证明了测不准关系不成立。

这个“光子箱”的具体装置是这样的：设有一个用弹簧秤挂在固定底座上的不透明的箱子，箱子的一个壁上开着一个小孔，小



孔上装这一个用及时装置来控制其开闭的快门。通过挂在箱子下面的砝码和装在箱子侧面的指针，就可以测定整个箱子的总重量。爱因斯坦社箱，快门从时刻  $t_1$  打开到时刻  $t_2$  关闭，中间经历的时间  $t=t_1-t_2$  很短，以致只有单独一个光子从箱子中放出。在  $t_1$  之前和  $t_2$  之后，都可以要多准确就多准确地测定箱子地重量，并从而根据质量和能量的关系式  $E=mc^2$  来计算箱子在发射光子以前和以后的能量之差，它也就是这一光子的能量。另一方面，按照计时装置的读数也可以要多准确就多准确地确定光子的发射时刻。这样，按照爱因斯坦的想法，就可以得出准确的时间释放出准确的能量的结论，关于能量和时间的不确定性关系也就不成立了。



### 四、玻尔的应战

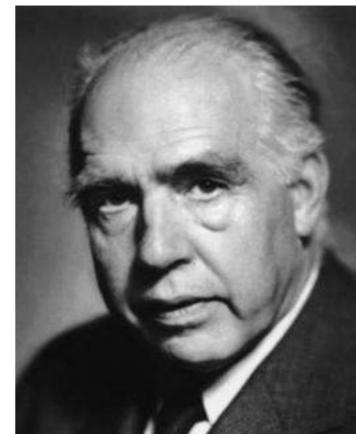
玻尔刚开始听到这个问题时，他大吃一惊，完全不知道如何解决。然而，经过一个不眠之夜，他的紧张思考终于找到了解决问题的方法。他论证说：爱因斯坦在这里竟完全没有注意到，在他的广义相对论中有一个很重要的推论，那就是“红移效应”，解决爱因斯坦“光子箱”疑难的关键就是引力红移效应。

所谓“引力红移”就是：当单色光通过一个不均匀的引力场时，因为各处的引力场强度不同，可以发现在不同地点处光的频率时不同的。

当从引力场强的下放传播引力场弱的上方时，由于光子向上运动要克服引力势能，本身能量减小 ( $\epsilon = h\gamma$ )。

光谱线将向低频率的红色方向移动，这种现象就叫做光谱线的引力红移。由于周期与频率成反比，所以位于不均匀引力场中的中，在各处的快慢就不一样，引力场越强的地方，时间就变的越慢。

玻尔指出，这正是解除爱因斯坦“武装”的关键所在。他极度兴奋，甚至有些幸灾乐祸，因为广义相对论的创立者竟然“忘记”了自己亲手创建的新理论。于是玻尔在会上对爱因斯坦的论证进行了有力的反驳。根据爱因斯坦的广义相对论，在钟沿重力方向发生位移的过程中，它的快慢是会变化的。因此，由钟所读出的时间就会由于光子的逸出和箱子的位移而有一个不准量，它与光子



能量不准量的乘积正好就满足测不准关系。

玻尔用爱因斯坦自己的理论扳倒了爱因斯坦的论述。

爱因斯坦也不得不承认玻尔对量子力学的解释不存在逻辑上的缺陷。这一场战争似乎是玻尔胜利了。然而不管是谁胜利，物理的星空里永远留下了他们不可磨灭的痕迹。

参考资料：

1. 《霍金的“赌注”——物理巨匠的“争吵”》 竹内薰
2. 《实在的张力：EPR 论争中的爱因斯坦、波尔和泡利》 白彤东
3. 《时间简史》 史蒂芬·霍金
4. 《爱因斯坦的“光子箱”悖论和塔尔斯基型解悖》 韩锋

# 希格斯粒子 发现之艰

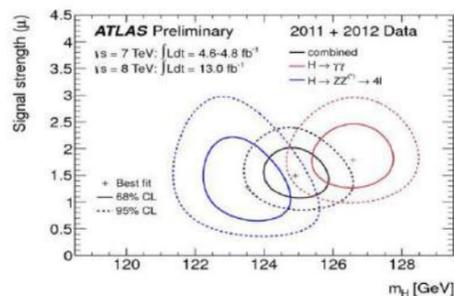
苏浩然

自 从7月4日“上帝粒子”——希格斯粒子宣布证实以来，科学家一直都在重新审视 ATLAS (超环面仪器) 实验的数据，试图找出可能存在的异常现象，而在北京时间12月19日，来自 ATLAS (超环面仪器) 项目组的最新结果发现，新粒子在质量以及衰变为双光子的速率等属性上与粒子物理学标准模型的预测有一定偏差 (ATLAS 项目组在分析衰变而成的两个光子时发现，新粒子的质量比以其衰变为 Z 玻色子来计算要多大约 3GeV，而且希格斯玻色子衰变为双光子的速率比粒子物理学标准模型预言的要快)，这使得新粒子为“上帝粒子”的身份依旧存疑。

这次科学家探测到了两种新的极像希格斯玻色子的粒子“信号”。下面是来自欧洲核子研究组织 (CERN) 的数据图，蓝色线显示的是 123.5GeV 的新玻色子信号，红色线则显示 126.5GeV 的新玻色子信号。这里的“信号”指的是在特定的质量水平上观测到的峰值。

第一种粒子 (蓝色) 衰变为一对 Z 玻色子，而第二种粒子 (红色) 则衰变为两个光子——但都与预言不符。

尽管在标准模型的预言中，并没有排除一对希格斯玻色子出现的可能性，但 Falkowski 指出，两种粒子的观测结果在质量



上十分相似，难以做出合理的解释。

CMS 项目组还没有公布他们的关于新粒子衰变成双光子的数据，理由是他们需要更多的时间去做分析。如果希格斯粒子衰变为光子的速率过快，或将为新物理的研究方向提供一些线索，解释长久以来困扰人们的一些谜团，比如暗物质、引力和宇宙中反物质

的缺失等。

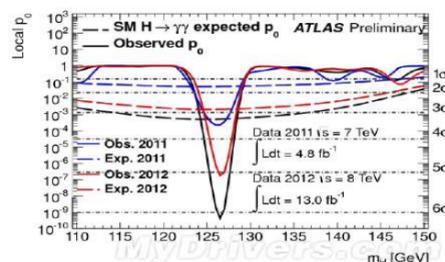
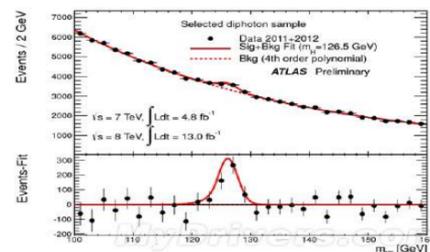
CMS 项目组主要成员阿尔伯特·勒克认为这个不一致的结果令人费解。他说，之所以出现不一致，几乎可以肯定是在测量方面出了问题。

美国罗格斯大学的马特·斯特拉斯勒说：“有可能是由于大的统计涨落，才导致数据异常。”他表示，这个问题可能会影响到其他的分析结果。在他看来，新粒子的质量大于标准模型预测的问题可能传递了一个信号，他们不应该相信测量到的高得不同寻常的衰变速率。“随着处理的数据越来越多，我对于通过光子信号测算出多余的质量越来越信心不足。”

后期，大型强子对撞机将再次提升能级，然后准备在 2013 年年初关闭，进行设备升级。

也许关于希格斯粒子的结果需要明年 3 月公布的下一批数据才能揭晓。

下面是这次观测到的“希格斯粒子”。



的数据的坐标图。

(由于本文写于 2012 年 11 月，具有一定的时效性，文末提到的数据已经于 2013 年 3 月公布，且数据看来，暂时认为希格斯粒子存在)

## 第二部分

# 探究

# 世界

# 本质

# The Anthropic Principle

## 我思故世界在

### ——人择原理浅谈

戴天誉

生活在这个茫茫漠漠的宇宙中，我们总是会不禁追问，星辰、海洋、大漠、荒原这些奇诡瑰丽的景象从何而来。是什么创造了形形色色的大千世界，又是什么创造了我们人类自己，使得我们能在天地间发出喟叹。

随着人类对自身所处环境越来越深入的探索，我们逐渐意识到生活在一个如此光滑而均匀，并且能够孕育出高等生命的宇宙中是一个多么惊人的巧合，就好比一只猴子在打字机上胡乱地捶打却敲出莎士比亚的十四行诗。

自然界中存在着很多特殊的数，如重力与磁力的比例，电子电荷的大小，光传播的速度，电子与质子的质量比……按照宇宙大爆炸的理论，如果在大爆炸后的1秒钟那一时刻宇宙的膨胀率比实际值小十亿亿分之一，

那么它在达到今天这么大的尺度之前早已坍缩。或者如果电子的质量取现在的三倍或四倍，氢原子将不再稳定，其寿命分别为一月或者一天，也就是说中性氢原子的寿命将随电子质量的增加而迅速缩短，而中性氢的存在是星系形成的必不可少的条件，因此宇宙也将大为改观。

一切都像是被一只无形的上帝之手精心的操控过，使得生命得以生生不息。

被精巧设计过的宇宙孕育出了人类，那么反过来说，如果没有人类，宇宙还会是这



个样子吗？1973年，在纪念哥白尼诞辰500周年的“宇宙理论观测数据”会议上，天文学家布兰登·卡特的论文中明确阐述了人择原理。简单来说，人择原理可以解释为：我们看到的宇宙之所以如此，乃是因为我们的存在。即，我思故世界在。

人择原理具体分为三个版本。

弱人择原理 (Weak Anthropic Principle) 告诉我们，作为观察者的我们之所以存在于这个时空位置，是因为这个位置提供了我们存在的可能。也就是说，在一个大的或具有无限空间或时间的宇宙里，只有在某些时空有限的区域里，才存在智慧生命发展的必要条件。“井蛙不可语于海，夏虫不可以语于冰。”人只能存在于具有特定参数值的宇宙之中，因而人就只能看到具有特定参数的宇宙。

强人择原理 (Strong Anthropic Principle) 认为，宇宙必须具备允许生命在某一历史发展阶段得以在中发展的那些性质，即我们的宇宙必须允许观察者在某一段出现。

最终人择原理 (Final Anthropic Principle) 是说，包含智慧的信息处理过程一定会在宇宙中出现，而且它一旦出现就不会灭亡。

人择原理的思维方式是用人类的存在，来说明宇宙初始条件以及基本物理参数之间的关系。如果我们要用人择原理来解释为何宇宙大爆炸发生于大约140亿年前，则可以说，智慧生物大约需要那么长的时间演化。

我们现代的宇宙观念是通过哥白尼提出阿里斯塔克斯提倡以及伽利略论证的日心宇宙论发展而来的。我们知道，地球只是一颗中等大小的行星，围绕着一个寻常星系中的普通恒星旋转，这个星系本身只是可观察到的宇宙中大约一千亿个星系之一。但是人择

原理却将我们的存在提到了一个特殊的位置。就如卡特的论文《大数重合与宇宙论中的人择原理》中说到：“虽然我们所处的位置不一定是中心，但不可避免的，在某种程度上处于特殊的地位。”

我们一般认为，人类进化是为了适应当前的宇宙、宇宙常数以及所有的一切，而不是宇宙适应人类。人择原理似乎是一个颠倒因果的理论，它产生的原因说成了结果。这意味着，宇宙为了使我们存在来思考它，就必须

要使自己变得让我们生存。强人择原理的批评者认为它既不是不可实验的，也是不可证伪的。还有的科学家还讽刺道，石头的形成也需要同样的定律和常数，我们也可以推导出相似的“石择原理”：宇宙是为了有一天出现石头而设计的。

但同时，我们不能否认人择原理的意义。弦理论预示着有很多可能的宇宙。如果宇宙确实是空间无限的，或者存在无限多的宇宙，在混沌边界的条件下宇宙初始态的选择纯粹是随机的。它与量子理论是一致的，量子理论认为，粒子永远处于各种各样不同的状态中，在对一个粒子进行观测之前，你永远不知道它的确切状态，它是所有可能状态的总和。我们所感知到的这个宇宙也许只是庞大的宇宙集合中的一个，这些宇宙中的大多数是混沌且无序的，并没有孕育出妄图探寻宇宙根源的人类，只在有少数像我们这样的宇宙中，才有智慧生命追问无垠的天地：宇宙何以存在？

参考资料

1. 《时间简史》 史蒂芬·霍金
2. 《宇宙迷宫系列之四——宇宙是为我们做的》 金锐
3. 《人择原理及其哲学意义》 高达声
4. 《宇宙学的人择原理》 钱振华

“千山鸟飞绝，万径人踪灭。孤舟蓑笠翁，独钓寒江雪。”放眼望去，举目苍茫，那一叶扁舟，是何等的渺小和卑微。自满的人们并不知道，我们引以为豪的人类文明，在宇宙的浩瀚面前，是多么的不值一提。宇宙学家们知道自己的渺小，即使他们研究的那宇宙一百多亿年的历史足以让史学家们汗颜，他们仍然保持着足够的谦卑，尝试找到宇宙的奥秘。让我们向他们致敬。

现如今，最为成熟的宇宙起源理论就是广泛流传的宇宙大爆炸理论（The big bang theory）。我们将追随着其逐渐完善的过程，来探求宇宙和物理的奥秘。

### 密不透风的宇宙

牛顿的万有引力理论似乎是那个时代最为宏大的物理学，但它一旦应用于宇宙的图景，就存在着无法调和的矛盾。1692年，一个叫本特利的牧师意识到，如果宇宙是有限的，物体间的万有引力将会把所有物质拉到一起，最终宇宙的所有物质会在相互碰撞中毁灭。如果宇宙是无限的，作用在星星上向左和向右的力也是无限的，星星会被撕裂开来。总之这样的宇宙是不可能永恒的。这就是本特利悖论。牛顿设想了一个无限静止宇宙模型来解决这个悖论。这个模型将宇宙描述为无限且均匀的物质形态。这样，在宇宙中任意一点的两侧均存在无限多相同密度的物质，其引力互相平衡，因此任意一点均保持静止。还可以这样理解，这个模型中宇宙中任何一点是完全相同的，因此就不会存在一个所有物质碰撞的中心。且因为空间中的物质完全均匀，就像烟雾一样，因此不存在星星撕裂的问题。总之在这种情况下，宇宙可以在万有引力的情况下保持静止和永恒。

这明显是不能解决问题的，因为我们观测到的宇宙显然不是完全均匀的。放开均匀性不谈，在万有引力的情况下无限宇宙不会坍缩的思想总是让人感到不可思议，但上一段的论证又似乎无从反驳。其实这是一个涉及到无穷大的谬论，我们完全可以

## 从大爆炸理论谈宇宙的起源与发展

王辰东

# 宇宙的浩瀚史诗

不去理会它。学数学的人都会知道，一旦涉及到无穷大，总会出现一些不可思议的结果，无穷大是数学上极难处理的情况。为了理解无穷大的荒谬，有这样一个小故事。一个拥有无穷多间房间的旅店老板，如何在旅店已经住满的情况下，为一位旅客让出空房间？答案很简单：让所有旅客依次搬到下一个房间去，这样第一间房间就会空出来，而又没有任何一位旅客失去房间。

人们逐渐认识到无限均匀宇宙并不能解决引力坍缩问题，我们可以采用反向思维来论证它。先考虑一个有限均匀宇宙，这时宇宙会坍缩到一个点。然后再在其周围均匀的加上一圈物质，其仍然会坍缩成一个点。就这样无限加下去，就可以创造出无限均匀宇宙，此时其仍然会坍缩。

有人试图修改引力理论，让其在远距离下变为斥力，借此来用远距离物质的斥力抵消近距离物体的引力，从而创造一个静态的宇宙，但这种尝试始终未得到广泛承认。

即使在爱因斯坦用广义相对论取代牛顿引力定律之后，爱因斯坦方程的解仍然显示物质会坍缩成一个点。为此爱因斯坦还引进了宇宙常数来产生斥力从而使宇宙静止。

1929年哈勃通过观测一举解决了这些问题。他首先找到了计算天体间距离的方法，然后又发现



了其他星系的多普勒红移。这意味着其他星系在远离我们而去。最初人们预料我们会发现与红移相同数量的蓝移现象，这样便可显示其他星系是以一种完全随机的方式相对银河系运动，有些远离而有些靠近。但哈勃不仅发现几乎所有星系都在远离我们而去，还发现其远离速度与距离我们的距离成正比。这意味着宇宙在膨胀。在此之前，没有理论学家认真考虑过宇宙正在膨胀的可能性。其实如果宇宙正在膨胀，那么就有可能像达到逃逸速度的火箭一样，永远不会坍缩。

### 上帝的创世时刻

既然宇宙正在膨胀，那么沿时间回溯过去，宇宙就会有一个起点。许多宇宙学家开始注意到了这个问题，宇宙大爆炸学说就此渐渐诞生。

乔治·伽莫夫大概是第一个推出大爆炸理论的人，他提出宇宙从一次大爆炸中诞生。他认为大爆炸的时刻温度非常高，足以进行一系列的核合成，从而创造出宇宙中的所有元素。该理论可以很好地解释宇宙中氢和氦含量的观测值，但不能解释其他一些重元素的含量。（后来重元素被证明是在恒星内部产生）伽莫夫还预测了宇宙微波背景辐射的存在，该辐射后来被彭齐亚斯和威尔逊发现，从而成为宇宙大爆炸理论最有力的证据。

伽莫夫的理论现在看来是非常原始的。首先宇宙最初并不是由核子组成（在他的时代人类对亚原子粒子了解的还很少），而是一个无限密度和温度的奇点，爆炸发生3分钟之后，温度才降低到核子可以形成的程度；38万年之后，原子才可以合成。其次他也没有考虑四种作用力的统一问题，没考虑奇点处的量子效应，没考虑时空和物质的本质问题。

俄国物理学家弗里德曼只用广义相对论来解释静态宇宙必然坍缩的问题。他对宇宙做了一个非常简单的假定，即我们无论往哪个方向看，也无论在什么地方观察，宇宙看起来都是一样的。这个假定是非常粗糙的，我们只有在大尺度上，比星系间的尺度更大的距离上，忽略小尺度的差别，该假定才能近似成立。根据该假定可以找到宇宙的三个模型。依赖于宇宙中物质的总量和膨胀速度，宇宙有以下三种可能：1、在引力的作用下宇宙减速膨胀，最终停止膨胀并开始收缩；2、引力虽然能使宇宙膨胀速度减慢，但不能使其停止，最终宇宙以恒定的速度相互离开；3、宇宙永远膨胀，但膨胀速度永远减小。对于第一个模型来说，宇宙是有限无界的。引力将时空弯曲到刚好闭合，时空有限但没有边界，就像地球表面一样，只不过是四维的。

宇宙的膨胀方式也是让人惊奇的。因为我们无论向任何方向看去，其他星系都是以相同的速率离开我们，且离开的速率与距离我们的距离成正比。在通常所理解的爆炸情况下，只有观察者处于宇宙的中心，这种情况才会发生。可是实在没有理由认为我们的位置如此特殊。唯一的解释是，在宇宙中的任何位置，观察到的现象与我们在地球上观察到的都是一样的。非常恰当的一个比喻是，宇宙就像一个吹胀气球的表面，每一点都互相离去，并且不存在一个中心，每一点都是完全相同的，都处在这



个“气球”的表面。只不过在这里，我们讨论的这个“气球的表面”是一个四维的时空膜。

在宇宙大爆炸的奇点处，宇宙体积为零，这意味着其密度和曲率都是无限大，这导致包括广义相对论在内的所有科学理论崩溃。人们无法用科学理论解释大爆炸处的宇宙行为，这成为大爆炸理论的一个致命缺陷。为此许多人努力避免奇点的出现。1963年，两位苏联科学家提出，也许物质并不会准确的坍缩到为奇点，而是像两辆迎面行驶的火车一样，在靠的非常近后又相互错开，而不会撞到一起。现在宇宙的膨胀也许来自之前宇宙的收缩。在第一类弗里德曼模型的情况下，宇宙可以是一种膨胀—收缩—再膨胀—再收缩的震动状态。这种理论看上去可行，但不幸的是，霍金和彭罗斯最终从数学上证明了，如果广义相对论正确，那么大爆炸奇点一定存在。

那也许就是上帝的创世时刻吧，在那里，上帝拥有着随意创造宇宙的自由。

### 暴涨宇宙

大爆炸理论虽然诞生了，但还有没有解决的问题。那就是，宇宙为何是我们看到的这样。宇宙大尺度上拥有一致性（这种情况必须在早期宇宙是非常均匀的情况下才可以发生），以极其接近临界的速率膨胀。（如果宇宙的膨胀率哪怕只偏离那么十亿亿分之一，由于蝴蝶效应，一百亿年后宇宙要么早已坍缩，要么已经膨胀的空无一物。）

暴涨模型解决了这个问题。它假设早期宇宙经历过一个非常快速膨胀的时期，即暴涨。该时期内宇宙在一种反引力效应的影响下以增加的速率膨胀，这种迅速的膨胀效应远远大于引力的减慢效应，从而抹平了宇宙的不规则性。这样，从许多不同的非均匀初始状态可以演化出宇宙现在光滑均匀的状态。迅速的膨胀效应也将宇宙空间拉伸的非常接近平坦，使其膨胀率非常接近第三类弗里德曼模型，即刚好以临界的速率膨胀。

暴涨理论还可以解释为何宇宙中存在如此之多的物质。没有暴涨的情况下，很难解释宇宙中的物质是如何从无到有产生的，除非推翻能量守恒定律。在暴涨理论中，宇宙的总能量精确的等于零。暴涨

造成了空间膨胀，在空间中的引力场具有负能量，这负能量刚好和物质所具有的正能量抵消，使宇宙的总能量精确为零。当宇宙的尺度由于暴涨加倍时，由于引力产生的负能量和物质均加倍。

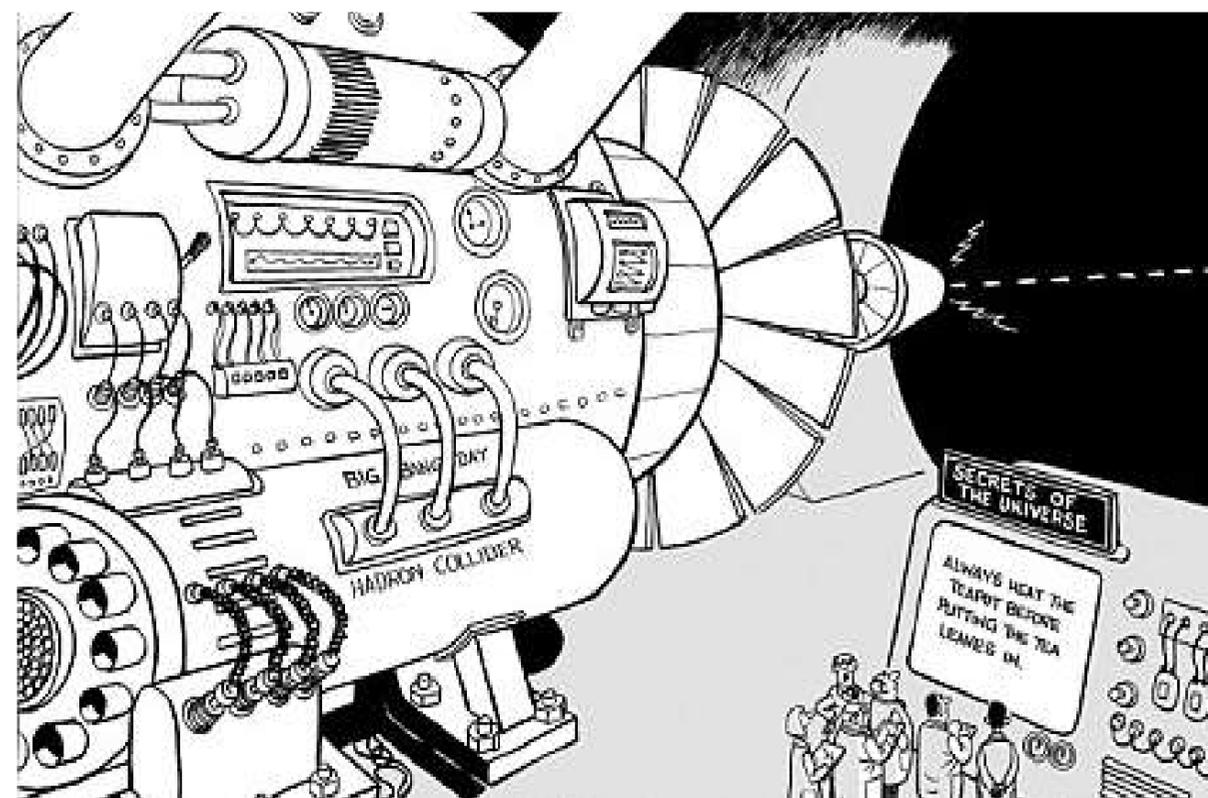
但是暴涨理论必须解释暴涨阶段是如何产生又是如何结束的。由大统一理论可知，在宇宙诞生初期的极高温下，强相互作用力、弱相互作用力、电磁力都被统一成同一种力。随着宇宙膨胀，温度降低，宇宙发生了相变，力之间的对称性被破坏，这种对称性的破缺导致了这三种力被一一分离出来，变得不再相同了——最初强相互作用力分离出来，然后弱相互作用力和电磁力也变得不同——这三种力被分离出来也标志着暴涨的结束。暴涨理论中，宇宙的温度可以降到相变的临界温度下而不发生对称性破缺，即所谓的“过冷”状态，此时宇宙处于一种不稳定状态，其能量比对称破缺时更大。这特殊的额外能量便呈现出一种反引力效应，该效应使宇宙加速膨胀。因为该状态不稳定，在经历一段时间的暴涨后，宇宙最终还是要发生相变，力之间的对称性破缺，暴涨结束。

但是在最初的暴涨理论中，对称性破缺是突然发生的，且不是在整个宇宙中同时发生。（并没有理论可以证明宇宙的不同区域必须同时发生相变，因为相变是带有随机性的，而宇宙的不同区域之间不存在超距作用。）相变在宇宙中的一些点发生，并且扩大到邻近区域，最终所有相变区域连接到一起，整个宇宙全部发生相变，暴涨结束。

霍金随后发现，因为暴涨的速度是如此之快，即使相变区域的扩大速度是光速，不同相变区域仍然不能融合，宇宙中至今仍然存在非相变区域，这与观测不符。为了解决这个问题，宇宙学家设想现在的宇宙是由仅仅一个相变区域产生，而不是多个相变区域融合形成。这需要对称性破缺缓慢发生，而这可能发生。

### 宇宙的虚时间

无论宇宙是怎样发展的，它的开端是一个奇点的观点总是令人不爽。因为我们所有的物理定律在奇点处失效，我们不能确定宇宙在奇点处的行为及



状态，无法解释为什么宇宙的初始状态是这样而不是那样，除非我们可以证明任何不同的起始状态均会发展成现在我们观察到的宇宙。而这是不可能的，因为我们可以设想一个完全不同的宇宙，然后按照物理定律在时间上反演回去，总会发现一个起始状态。也就是说，总是存在着无法发展成我们所观察到宇宙的初始状态。

解决这问题的唯一办法就是让宇宙中没有特殊的点，即不存在物理定律失效的时空边界，因此宇宙必须满足无边界条件。也就是说，宇宙时空必须弯曲后与自身连接起来，形成闭合的时空，这样时空就形成类似地球表面一样的有限无界形态，向一个方向行走最终会回到原地。这在通常所理解的时间里是不可能实现的，因为在宇宙开端存在一个奇点。但是如果在虚时间里，这一切就可以满足。虚时间是一个数学概念，在解方程的过程中，有些时候必须采用虚数才能得到最终的结果，而这些虚数代表的物理意义就是虚时间。

实时间，即我们感受到的时间，是只有一个方向的，我们不能回到过去。而这也把时间这个维度和三个空间维度区分开来。（空间上我们既可以朝西走也可以朝东走）但虚时间与三个空间方向是没有本质差别的，如果采用虚时间，我们便可以得到一个如地球般有限无界的宇宙模型。

最简单的宇宙虚时间模型是一个标准的球型，它对应的实时间是一个永远暴涨的宇宙，这显然与事实不符。实际上宇宙在虚时间中与事实相符的是一个不完全对称，且存在一些褶皱和起伏的形态。（褶皱是由不确定性原理产生的微小起伏，正是这种起伏导致宇宙现在并不是完全均匀的，从而导致恒星和生命的产生。并且这种微小起伏已经被最近的宇宙微波背景辐射的观测所证实。）

在这种模型中，宇宙的状态完全由物理定律决定，不存在物理定律失效的边界，即我们不需要初始条件，因为它已经包含在物理定律之中。这样便解决了奇点问题。

从现在的角度来看，大爆炸理论实际上已经是一个相当过时和陈旧的理论。越来越多的观测数据不能由其解释。新兴的弦理论等更加接近物理学最终的统一。但它是我们探索宇宙本质的过程中一个辉煌的成就，我们应为其自豪。

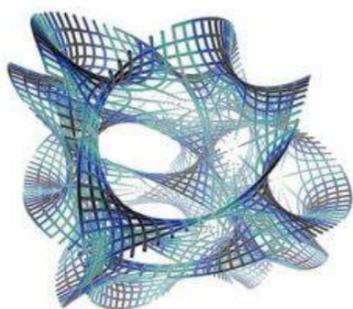
我们不能忘记自己的渺小，也许如今距离宇宙的真理还有无限的距离，但人类永远不会停下探索的脚步。对未知世界的好奇，是我们最为美好的品质。

【简单概念】

所谓 M 理论，它是为“物理的终极理论”而提出的理论，希望能借由一个理论来解释所有物质与能源的本质与交互关系。它结合了所有的超弦理论（共五种）和十一维的超引力理论。

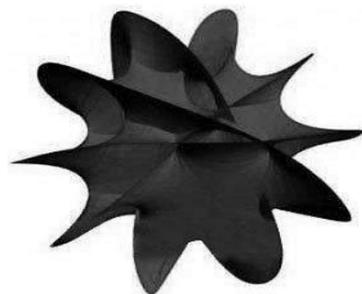
【对比解析】

在围棋游戏中，只有围与不围这样很少的几条规则，加上黑白两色棋子，却可以弈出千变万化的对局。与此相似，现代科学认为，自然界由很少的几条规则支配，而存在着无限多种这些支配规律容许的状态和结构。任何尚未发现的力，必将是极微弱的，或其效应将受到强烈的限制。这些效应，要么被限制在极短的距离内，要么只对极其特殊的客体起作用。



科学家非常自信地认为，他们发现了所有的力，并没有什么遗漏。但是，在描述这些力的规律

时，他们却缺乏同样的自信。20 世纪科学的两大支柱——量子力学和广义相对论——居然是不相容的。广义相对论在微观尺度上违背了量子力学的规则；而黑洞则在另一端尺度上向量子力学自身的基础挑战。面对这一困境，与其说物理学不再辉煌，还不如说这预示



着一场新的革命。

萨拉姆 (A.Salam) 和温伯格 (S.Weinberg) 的弱电统一理论，把分别描述电磁力和弱力的两条规律，简化为一条规律。而 M 理论的最终目标，是要用一条规律来描述已知的所有力（电磁力、弱力、强力、引力）。

当前，有利于 M 理论的证据与日俱增，已取得令人振奋的进展。M 理论成功的标志，在于让量子力学与广义相对论在新的理论框架中相容起来。

【超对称性】

同弦论一样，M 理论的关键概念是超对称性。

所谓超对称性，是指玻色子和费米子之间的对称性。玻色子具有整数自旋，而费米子具有半整数自旋。相对论性量子理论预言，粒子自旋与其统计性质之间存在某种联系，这一预言已在自然界中得到令人惊叹的证实。

在超对称物理中，所有粒子都有自己的超对称伙伴。它们有与原来粒子完全相同的量子数（色、电荷、重子数、轻子数等）。玻色子的超伙伴必定是费米子，费米子的超伙伴必定是玻色子。尽管尚未找到超对称伙伴存在的确切证据，但理论家仍坚信它的存在。他们认为，由于超对称是自发破缺的，超伙伴粒子的质量必定比原来粒子的大很多，所以才无法在现有的加速器中探测到它的存在。

局部超对称性，还提供将引力也纳入物理统一理论的新途径。爱因斯坦广义相对论，是根据广义时空坐标变换下的某些要求导出来的。在超对称时空坐标变换下，局部超对称性则预言存在“超引力”。在超引力理论中，引力相互作用由一种自旋为 2 的玻色子（引力子）来传递；而引力子的超伙伴，是自旋为 3/2 的费米子（引力微子），它传递一种短程的相互作用。

◇时间的定义

在 M 理论体系中，时间分为两种，一种是我们在世俗意义上的时间（即现行宇宙对人类意义上的时

间）。还有一种被定义为“虚时间”，虚时间没有所谓的开端和终结，而是一直存在的时间，是用于描述超弦的一条无矢坐标轴。

◇引力与其他力的统一

M 理论认为能量在自身维度下不守恒，而弦分为开弦和闭弦，引力子弦与另三种弦不同，是一个自旋为 2 的玻色子，理论中被定义为自由的闭弦，可以被传播到宇宙膜外的高维空间以及其它宇宙膜，故能量场在自身维度（现行宇宙空间）下逃逸了更多。

◇宇宙的定义

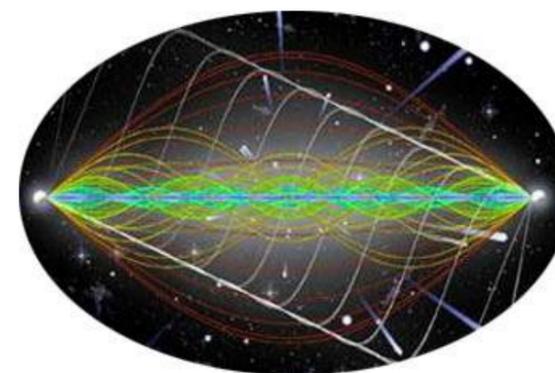
在 M 理论中存在无数平行的是膜，膜相互作用碰撞导致产生四种基本粒子，产生电磁波和物种（宇宙大爆炸的原因）。

【发展历史】

◇证明理论

广义相对论没有对时空维数规定上限，在任何维黎曼流形上都能建立引力理论。超引力理论却对时空维数规定了一个上限——11 维。更吸引人的是，已经证明，11 维不仅是超引力容许的最大维数，也是纳入等距群  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  的最小维数。描述强力的标准模型，即量子色动力学，是基于定域对称群  $SU(3)$  的规范理论，它的量子叫做胶子，作用于一个叫“色”的内禀量子数上。描述弱力和电磁力的温伯格-萨拉姆模型，是基于  $SU(2) \times U(1)$  的规范理论。由于这些理由，许多物理学家开始探讨 11 维的超引力理论，期望这就是他们寻求的统一理论。

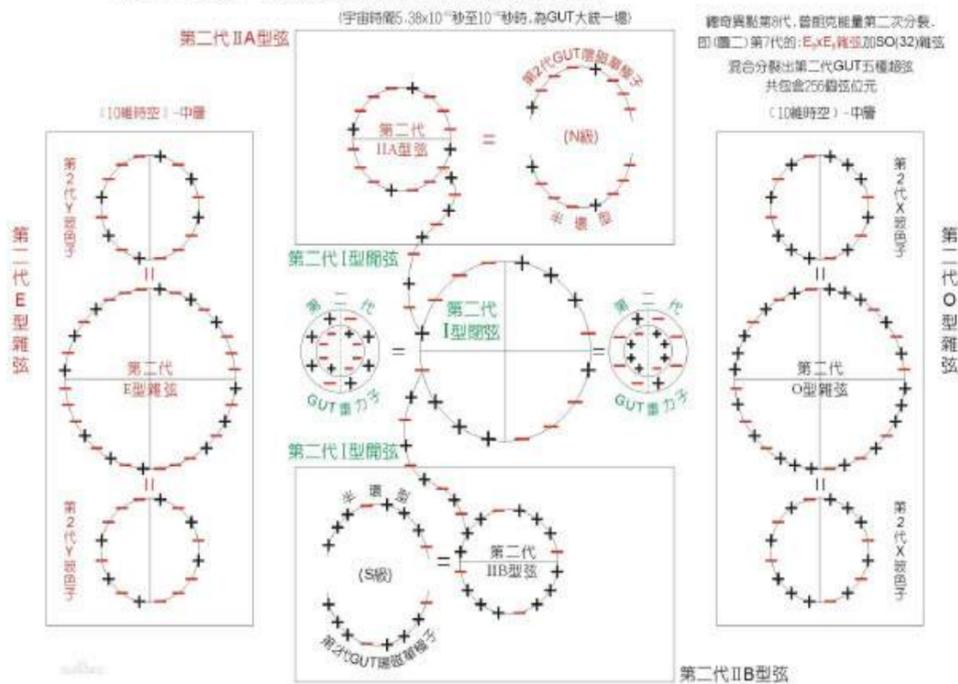
然而，在手征性面前，引力理论的一根支柱突然倒塌了。手征性是自然界的一个重要特征，许多自然对象都有类似于人的左手与右手那样的对称性。像中微子的



# M理论：姚澍 所有超弦理论之母



10維GUT大統一場的五種超弦及粒子起源結構圖(圖三)



自旋，就始终是左手的。

20 世纪 20 年代，波兰人卡卢扎 (T.Kaluza) 和瑞典人克莱因 (O.Klein)，发现从高维空间约化到可观测的 4 维时空的机制。若 11 维超引力中的 7 维空间是紧致的，且其尺度为  $10^{-33}$  厘米)，就会导出粒子物理标准模型所需的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  对称群。但是，在时空从 11 维紧致化到 4 维时，却无法导出手征性来。到了 1984 年，超引力丧失领头理论地位，超弦理论取而代之。

◇历史变化

从 1984 年起，人们认定 10 维时空是最佳选择，10 维时空的弦论替代了 11 维时空的超引力理论。曾流行过五种弦论，其不同在于未破缺的超对称性荷的数目，以及所带有的规范群。重要的是，它们都是反

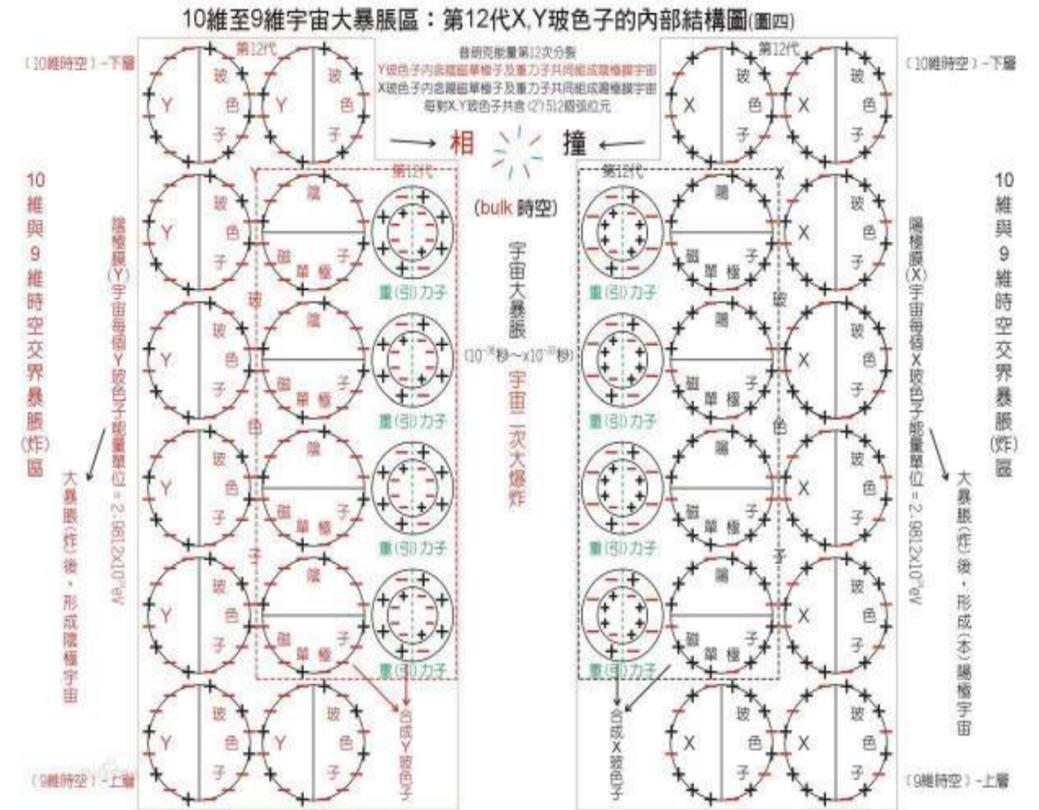
常自由的，即弦论提供了一种与量子力学相容的引力理论。

然而，弦论绝非美轮美奂，至少可从四方面对它诘难。首先，人们本将弦论当作物理统一理论来追寻，它的五种不同理论却又给出了五种不同的宇宙，若人类生活在其中的一种宇宙之中，那么其余四种理论描述的宇宙，又是何等样的生物居住其中呢？其次，若将粒子看作弦，那为什么不将它们看作膜，抑或看作 p 维客体——胚 (brane) 呢？再者，关于弦论的实验验证，传统的粒子加速器方法，显然受到技术和经费两方面限制，然而新的方法又在何处？最后，超对称性容许时空的最大维数是 11 维，为什么弦论只到 10 维就戛然而止了呢？余下的那一维是逃逸了，还是隐藏起来了呢？



1994 年开始了弦论的第二次革命。此后，五种不同的弦论在本质上被证明是等价的，它们可以从 11 维时空的 M 理论导出。经历了十年艰苦卓绝的辛

和荷拉伐 (Peter Horava) 发现，从 11 维的 M 理论可以找到手征性的起源。他们将 M 理论中的一个空间维数收缩成一条线段，得到两个用该线段联系起来的



劳，人们居然又回到了原来的时空维数，否定之否定实在是条奥妙的哲理。

10 维时空。粒子和弦仅存在于线段两端的两个平行的时空中，它们通过引力彼此联系。物理学家猜测，宇宙中所有的可见物质位于其中的一个，而困扰着物理学家的暗物质则在另一个平行的时空中，物质与暗物质之间仅通过引力相联系。这样，便可巧妙地解释宇宙中为什么存在看不到的质量。

【宇宙学风暴】

当年，许多物理学家之所以舍弃 11 维超引力，是因为威滕等人认为，在将 11 维紧致化到 4 维时，无法导出手征性。十年后，威滕又否定了自己。威滕

这一图象具有极其重要的物理意义，可用来检验 M 理论。70 年代，物理学家已认识到，所有相互作用



用的耦合强度随能量变化，即耦合常数不再是常数，而是能量的函数，并给它取了个形象的名称——跑步耦合常数。90年代，物理学家又发现，在超对称大统一理论中，电磁力、弱力与强力的耦合强度，会聚

E上。这就是说，引力的量子效应，将在比普朗克能量标度低得多的标度上起作用，这无疑将对宇宙学产生全面的影响。

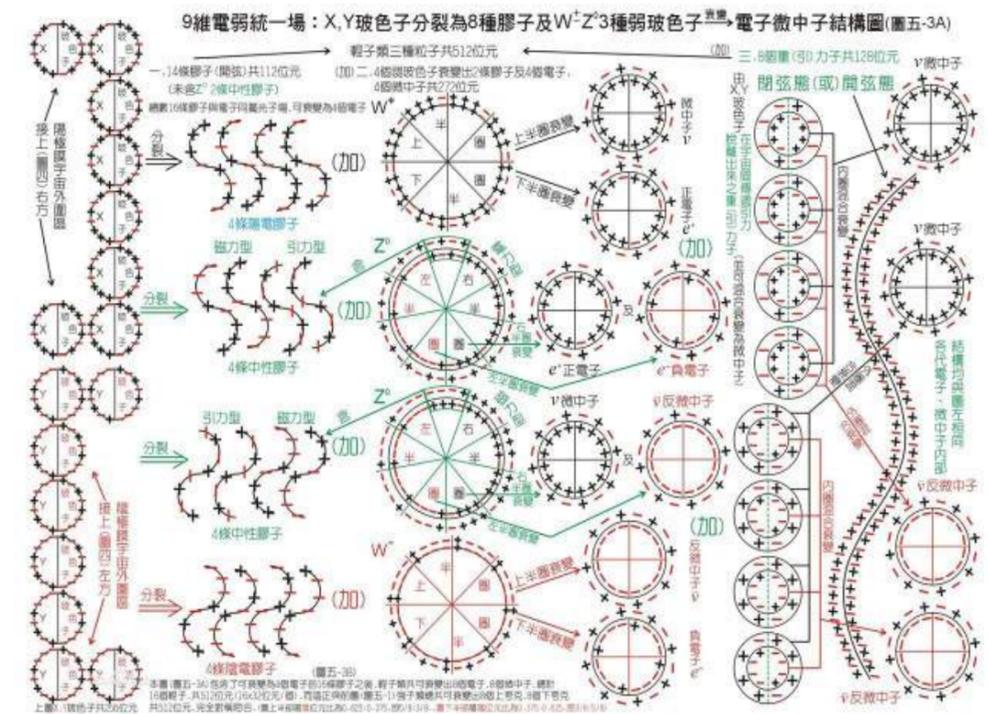
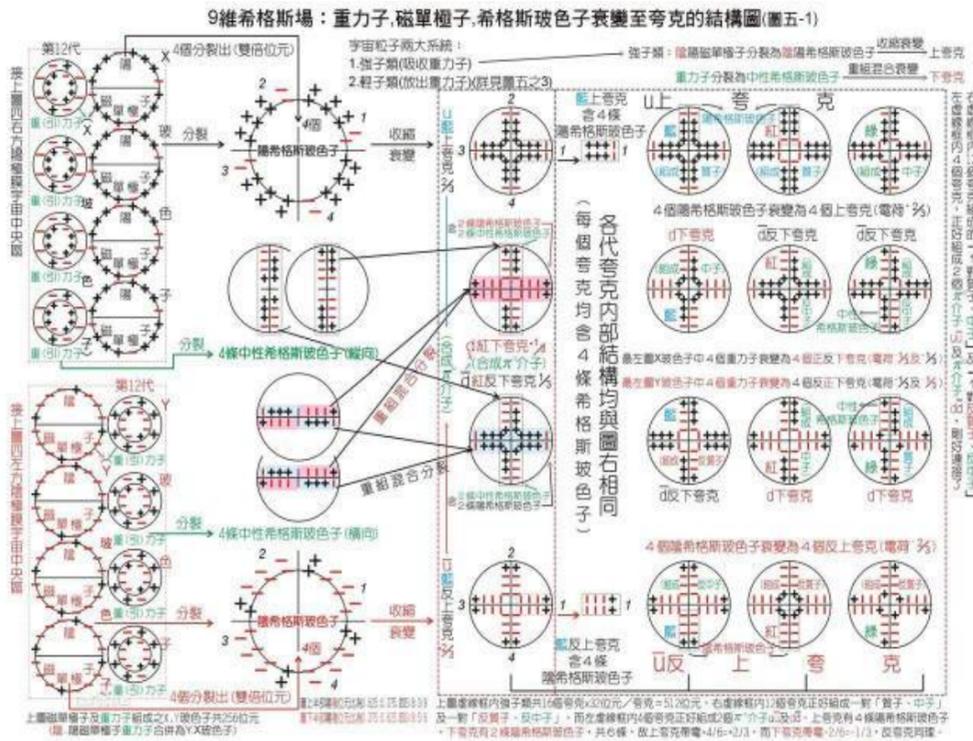
10 维弦论紧致化到 4 维的方式有成千上万种，

来。这样，对弦紧致问题的诘难，就容易解决了。M 理论最终将依照某种极值原理，选择一个稳定的时空，弦就在这个时空中生存下来。接下来便是，振动着的弦将产生人类已知的粒子和力，也就是产生出人类所处的现实世界。

个未决问题。尽管 M 理论的成功，使弦论学家摆脱了昔日的困境，但他们仍需要继续勉励自己，希望在今后几年中发现 M 理论的真面目。

美国学者苏什金 (Leonard Susskind) 等人，进行了一次新尝试，他们称 M 理论为矩阵理论 (英语中矩阵一词，也是以 M 开头的)。试图给 M 理论下一个严格的定义。在矩阵理论中，时空本身成了一个模糊的概念，这一方法使物理学家大为振奋。

【未决问题】



在能量标度 E 约为  $10^{16}$  吉电子伏的那一点上。物理学家们为这一成功喝彩不已，一些带有浪漫情结的评论家甚至认为，超对称已取得最终的胜利，不必再等待在 LHC 对撞机上的检验实验。

不同方式产生出 4 维世界中不同的运行机制。于是，不信弦的人认为，这根本就无法预测。然而，在 M 理论中，黑胚有望解决这一难题。现已证明，当黑胚包裹着一个洞收缩时，黑胚的质量将会消失。这一性质将对时空本身产生绝妙的影响，它将改变经典拓扑学的法则，使得时空拓扑发生变化。一个带有若干洞的时空，在黑胚作用下，变成了另一带有不同数目洞的时空。利用这一方法，可以把所有不同的时空联系起来。

然而，这里只统一了宇宙四大基本相互作用中的三个，还有一个引力。对这个人类最先认识的引力，又将如何处置呢？在威滕-荷拉伐方案中，可选择线段的尺寸，使已知的四种力一起会聚在同一能量标度

尽管 M 理论已取得累累硕果，然而种种迹象表明，已经窥见的不过是些“雪泥鸿爪”而已，最深处的奥秘尚待揭示，什么是 M 理论的真面貌，仍然是一

超弦论与 M 理论远远超出了人类的想象。然而，广义相对论与量子力学的统一还十分遥远，仍需要人们为此付出更多的努力探索。



# 光速真的是速度的极限吗

## ——论超光速的可行性

司进

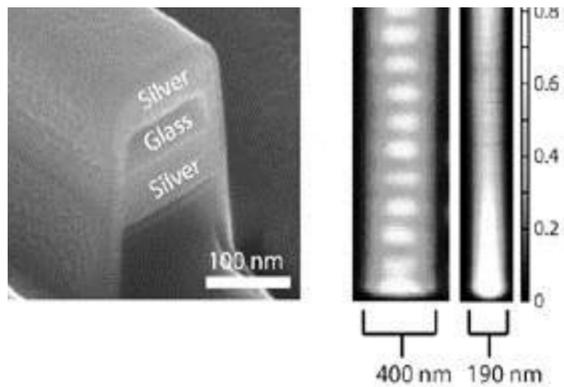
### 速度无限大的事实？

#### ——群速与相速的对决

在真空中，光速总是为  $c$  ( $3 \times 10^8$  m/s)，而在诸如玻璃的材料中，光的传播速度则变慢。光在真空和介质的速率比定义为材料的“折射率”，明显它比 1 大。然而，科学家开始以另外的方法操作光和材料的相互作用来调整折射率，比如得到负的折射率，这能导致光的反常弯曲。

阿尔伯特·波尔曼 (Albert Polman) (来自阿姆斯特丹原子和分子物理研究所的物理学家) 和纳德·恩亥塔 (Nader Engheta) (宾夕法尼亚大学电气工程师) 以及同事已经取得了一定成就。他们发明了一种折射率为零的小设备，这样的话特定波长的光波能无限快地传播。

这种设备包括一个 85 纳米厚，2 000 纳米长的矩形绝缘体二氧化硅，其周围涂有不能透光的导电银。这就是被称为“波导”的传输光的小室。光在这种“波导”中传播行为会反常，因为电磁场会在设备的不同边



上遵循设定的“边界条件”。短波光会在波导的两端来回震荡。光波的波峰和波谷重叠产生出明暗带的花样，这种花样类似环形管风琴产生的压力图样。在此波长以上光波，则一点也不会传播。恰好在此临界波长时，情况开始变得有趣。不是产生带状花样，而是整个波导点亮。这意味着光波不是同等间隔的波峰或相位波前 (phase fronts)，而好像是波峰同时所有地方无限快地传播。

因为光沿着波导的长度同步振荡。

那么如何能让光波同时所有地方而不违背相对论？恩亥塔解释道，光有两个速度。“相速”是单一频率的正弦电磁波的等相面 (例如波峰面或波谷面) 在介质中传播的速度  $v=c/n$ ， $c$  为自由空间中的光速， $n$  为介质对该频率电磁波的折射指数，它描述了一个特定波长的波的移动速度，“群速”是许多不同频率的正弦电磁波的合成信号在介质中传播的速度。不同频率正弦波的振幅和相位不同，在色散介质中，相速不同，故在不同的空间位置上的合成信号形状会发生变化，它描述了光传播能量和信息的速度。相对论指出的速度极限是传递信息的速度，所以只有群速必须维持在低于真空光速下。

### 看似超光速

#### ——相对论的不可撼动

近些年也有人提出了以下几种看似超光速，实质上不是超光速的事例：

##### 一，切伦科夫效应

媒质中的光速比真空中的光速小，而粒子在媒质中的传播速度可能超过媒质中的光速。在这种情况下光会发生辐射，称为切伦科夫效应。但这不是真正意义上的超光速，真正意义上的超光速是指超过真空中的光速。

##### 二，影子和光斑

在灯下晃动你的手，你会发现影子的速度比手的速度要快。影子与手晃动的速度之比等于它们到灯的距离之比。如果你朝月球晃动手电筒，你很容易就能让落在月球上的光斑的移动速度超过光速。遗憾的是，不能以这种方式超光速地传递信息，这种超光速也是没有意义的。

##### 三，EPR 悖论

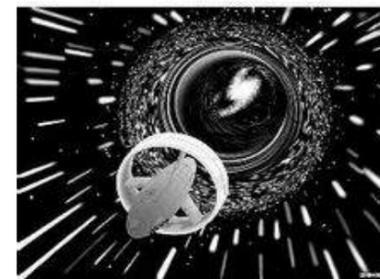
1935 年 Einstein, Podolski 和 Rosen 发表了一个思想实验试图表明量子力学的不完全性。他们认为在测量两个分离的处于纠缠态的粒子时有明显的超距作用。Eberhard 证明了不可能利用这种效应传递任何信息，因此超光速通信不存在。但是关于 EPR 悖论仍有争议。

##### 四，虚粒子

在量子场论中力是通过虚粒子来传递的。由于海森堡不确定性这些虚粒子可以以超光速传播，但是虚粒子只是数学符号，超光速旅行或通信仍不存在。

##### 五，量子隧道

量子隧道是粒子逃出高于其自身能量的势垒的效应，在经典物理中这种情况不可能发生。计算一下粒子穿过隧道的的时间，会发现粒子的速度超过光速。一群物理学家做了利用量子隧道效应进行超光速通信的实验：他们声称以  $4.7c$  的速度穿过 11.4cm 宽的势垒传输了莫扎特的第 40 交响曲。当然，这引起了很大的争议。大多数物理学家认为，由于海森堡不确定性，不可能利用这种量子效应超光速地传递信息。如果



这种效应是真的，就有可能在一个高速运动的坐标系中利用类似装置把信息传递到过去。

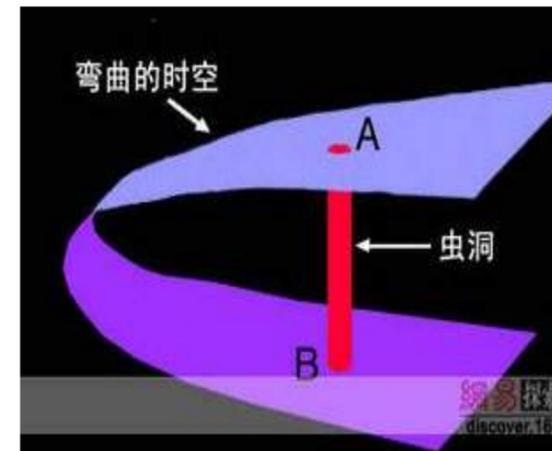
### 真正的超光速——理想理论的挑战

读到这，读者也许在困惑，明明已经超光速了，又不算超光速，到底什么是真正意义上的超光速呢？

在相对论中，“世界线”是一个重要概念，我们可以借助“世界线”来给“超光速”下一个明确定义。什么是“世界线”？我们知道，一切物体都是由粒子构成的，如果我们能够描述粒子在任何时刻的位置，我们就描述了物体的全部“历史”。想象一个由空间的三维加上时间的一维共同构成的四维空间。由于一个粒子在任何时刻只能处于一个特定的位置，它的全部“历史”在这个四维空间中是一条连续的曲线，这就是“世界线”。一个物体的世界线是构成它的所有粒子的世界线的集合。

四维时空中的一个点表示的是一个“事件”，即三个空间坐标加上一个时间坐标。任何两个“事件”之间可以定义时空距离，它是两个事件之间的空间距离的平方减去其时间间隔与光速的乘积的平方再开根号。狭义相对论证明了这种时空距离与坐标系无关，因此是有物理意义的。

时空距离可分三类：类时距离：空间间隔小于时间间隔与光速的乘积；类光距离：空



间间隔等于时间间隔与光速的乘积；类空距离：空间间隔大于时间间隔与光速的乘积。下面我们需要引入“局部”的概念。一条光滑曲线，“局部”地看，非常类似一条直线。类似的，四维时空在局部是平直的，世界线在局部是类似直线的，也就是说，可以用匀速运动来描述，这个速度就是粒子的瞬时速度。光子的世界线上，局部地看，相邻事件之间的距离都是类光的。在这个意义上，我们可以把光子的世界线说成是类光的。

任何以低于光速的速度运动的粒子的世界线，局部地看，相邻事件之间的距离都是类时的。在这个意义上，我们可以把这种世界线说成是类时的。而以超光速运动的粒子或人为定义的“点”，它的世界线是类空的。这里说世界线是类空的，是指局部地看，相邻事件的时空距离是类空的。因为有可能存在弯曲的时空，有可能存在这样的世界线：局部地看，相邻事件的距离都是类时的，粒子并没有超光速运动；但是存在相距很远的两个事件，其时空距离是类空的。这种情况算不算超光速呢？

这个问题的意义在于说明既可以定义局部的“超光速”，也可以定义全局的“超光速”。即使局部的超光速不可能，也不排除全局超光速的可能性。全局超光速也是值得讨论的。总而言之，“超光速”可以通过类空的世界线来定义，这种定义的好处是排除了两个物体之间相对于第三观察者以“超光速”运动的情况。

下面来考虑一下什么是我们想超光速传送的“东西”，主要目的是排除“影子”和“光斑”之类没用的东西。粒子、能量、电荷、自旋、信息是我们想传送的。

有一个问题是：我们怎么知道传送的东西还是原来的东西？这个问题比较好办，对

于一个粒子，我们观察它的世界线，如果世界线是连续的，而且没有其他粒子从这个粒子分离出来，我们就大体可以认为这个粒



子还是原来那个粒子。显然，传送整个物体从技术上来讲要比传送信息困难得多。现在我们已经可以毫无困难地以光速传递信息。从本质上讲，我们只是做到了把信息放到光子的时间序列上去和从光子的时间序列中重新得到人可读的信息，而光子的速度自然就是光速。类似地，假如快子 (tachyons, 理论上预言的超光速粒子) 真的存在的话，我们只需要发现一种能够控制其产生和发射方向的技术，就可以实现超光速通信。那么，我们为此要付出什么代价？

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

上述公式是静止质量为  $m$  的粒子以速度  $v$  运动时所具有的能量。很显然，速度越高能量越大。因此要使粒子加速必须要对它做功，做的功等于粒子能量的增加。注意当  $v$  趋近于  $c$  时，能量趋于无穷大，因此以通常加速的方式使粒子达到光速是不可能的，更不用说超光速了。

但是这并没有排除以其他方式使粒子超光速的可能性。粒子可以衰变成其他粒子，包括以光速运动的光子 (光子的静止质量为零，因此虽以光速运动，其能量也可以是有限值，上述公式对光子无效)。衰变过程的细节无法用经典物理学来描述，因此我们无法否定通过衰变产生超光速粒子的可能性。

另一种可能性是速度始终高于光速的粒子。既然有始终以光速运动的光子，有始终以低于光速的速度运动的粒子，为什么不会有始终以高于光速的速度运动的粒子呢？

问题是，如果在上述公式中  $v > c$ ，要么能量是虚数，要么质量是虚数。假如存在这样的粒子，虚数的能量与质量有没有物理意

义呢？应该如何解释它们的意义？能否推出可观测的预言？只要找到这种粒子存在的证据，找到检测这种粒子的方法，找到使这种粒子的运动发生偏转的方法，就能实现超光速通信。

到目前为止，相对论量子场论是除引力外的所有物理现象都符合粒子物理的标准模型，它可以描述包括电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用在内的三种基本相互作用以及所有已观测到的粒子。根据这个理论，任何对应于两个在有类空距离的事件处所作物理观测的算子是对易的。原则上讲，这意味着任何作用不可能以超过光速的速度传播。

但是，没有人能证明标准模型是自洽的。很有可能它实际上确实不是自洽的。无论如何，它不能保证将来不会发现它无法描述的粒子或相互作用。也没有人把它推广到包括广义相对论和引力。很多研究量子引力的人怀疑关于因果性和局域性的如此简单的表述能否作这样的推广。总而言之，在将来更完善的理论中，无法保证光速仍然是速度的上



限。

因此存在未定论的超光速的可能性，现有理论分为快子理论，虫洞理论和曲相推进。快子是理论上预言的粒子。它具有超过光速的局部速度 (瞬时速度)。它的质量是虚数，但能量和动量是实数。有人认为这种粒子无法检测，但实际未必如此。影子和光斑的例



子就说明超过光速的东西也是可以观测到的。目前尚无快子存在的实验证据，绝大多数人怀疑它们的存在。有人声称在测 Tritium 贝塔衰变放出的中微子质量的实验中有证据表明这些中微子是快子。这很让人怀疑，但不能完全排除这种可能。快子理论的问题，一是违反因果性，二是快子的存在使真空不稳定。后者可以在理论上避免，但那样就无法实现我们想要得超光速贝塔衰变放出的中微子质量的实验中有证据表明这些中微子是快子。这很让人怀疑，但不能完全排除这种可能。快子理论的问题，一是违反因果性，二是快子的存在使真空不稳定。后者可以在理论上避免，但那样就无法实现我们想要得超光速通信了。实际上，大多数物理学家认为快子是场论的病态行为的表现。

关于全局超光速旅行的一个著名建议是利用虫洞。虫洞是弯曲时空中连接两个地点的捷径，从 A 地穿过虫洞到达 B 地所需要的时间比光线从 A 地沿正常路径传播到 B 地所需要的时间还要短。虫洞是经典广义相对论的推论，但创造一个虫洞需要改变时空的拓扑结构。这在量子引力论中是可能的。开一个虫洞需要负能量区域，Misner 和 Thorn 建议在大尺度上利用 Casimir 效应产生负能量区域。Visser 建议使用宇宙弦。这些建议都近乎不切实际的幻想，具有负能量的怪异物质可能根本就无法以他们所要求的形式存在。Thorn 发现如果能创造出虫洞，就能利

用它在时空中构造闭合的类时世界线，从而实现时间旅行。有人认为对量子力学的多重性解释可以用来消除因果性悖论，即，如果你回到过去，历史就会以与原来不同的方式发生。Hawking 认为虫洞是不稳定的，因而是无用的。但虫洞对于思想实验仍是一个富有成果的区域，可以用来澄清在已知的的物

理定律之下，什么是可能的，什么是不可能的。

曲相推进是指以特定的方式让时空弯曲，从而使物体超光速运动。Miguel Alcubierre 因为提出了一种能实现曲相推进的时空几何结构而知名。时空的弯曲使得物体能以超光速旅行而同时保持在一条类时世界线上。跟虫洞一样，曲相推进也需要具有负能量密度的怪异物质。即使这种物质存在，也不清楚具体应如何布置这些物质来实现曲相推进。因此，这些问题目前都没有定论，擅长物理，乐于探究的物理学子们不妨大胆假设，小心求证，也许下一个开创新纪元的理论就在你们手中诞生。

## 参考资料

1. 《Electrically Controlled Nonlinear Generation of Light with Plasmonics》 Wenshan Cai, Alok P. Vasudev, Mark L. Brongersma
2. 《爱因斯坦奇迹年——改变物理学面貌的五篇论文》 约翰·施塔赫尔。
3. 《比光速还快——爱因斯坦错了？》 乔奥·马古悠
4. 《光可以在纳米装置中无限快传播？》 黄晓强 环球科学
5. 《科学前沿与未来》 第十集 香山科学会议主编

你知道黑洞吗？你知道相对论吗？提到这两个名词，人们总会联想到时空旅行，真的可以吗？要知道是否可以实现时空旅行，我们当然要先了解黑洞的某些性质。那黑洞又是如何形成的呢？恒星演化到晚期经过物质抛射后，将塌缩成白矮星、中子星或黑洞。如果核能耗尽的恒星质量大于三倍太阳质量则简并中子压力也将抵不住引力塌缩，平衡态将被破坏，此星体最终将塌缩成黑洞。自从1974年霍金发现并证明了黑洞存在量子辐射之后，对黑洞性质的研究吸引了很多物理学家和天文学家的注意。在此我对黑洞的热辐射和非热辐射做出简要的介绍。



图 1. 黑洞的合并

这幅图片所用的数据来自于钱德拉 X 射线望远镜的观测以及哈勃太空望远镜拍摄的一系列照片。宇航局认为图片中的两个黑洞相互旋向对方，这种状况已经存在了 30 年。它们将最终合并成一个更大的黑洞。

# 黑洞的热辐射

许翔

关键词：黑洞 热辐射 霍金辐射 熵 温度

## 1. 黑洞的分类

目前的理论认为，黑洞只有三个物理量可以测量到：质量、电荷、角动量。

根据黑洞的本身物理特性可将其分成四种黑洞：

不旋转不带电荷的黑洞。它的时空结构域 1916 年由施瓦西 (Karl Schwarzschild) 求出，称施瓦西黑洞。

不旋转带电黑洞，称 R-N 黑洞。时空结构域 1916-1918 年由 Reissner 和 Nordstrom 求出。

旋转不带电黑洞，称克尔黑洞。时空结构由克尔 (Kerr) 于 1963 年求出。

一般黑洞，称克尔-纽曼黑洞。时空结构于 1965 年由纽曼 (Newman) 求出。

## 2. 黑洞的熵和温度

热力学第二定律可以表述为：宇宙中熵的总和是永远不会减少的。

贝肯斯坦 (Jacob David Bekenstein) 在 1972 年提出的黑洞的熵与其面积成正比的观点，开始建立了黑洞热力学。

下面我们就施瓦西黑洞 [1] 的情况来说明一下黑洞的熵和温度。

贝肯斯坦提出熵  $S$  与面积  $A$  成正比： $S \propto A$ ，施瓦西黑洞的面积和质量的平方成正比： $A \propto M^2$ ，所以  $S \propto M^2$ 。

根据微分法则  $\delta S \propto M \delta M$ ，热力学第二定律，熵和温度的关系式  $\delta E \propto T \delta S$ ，在相对

论中  $E \propto M$ ，所以： $\delta M = T \delta S \propto T M \delta M$

得到： $T \propto 1/M$

可以证明在一般的单位制中  $T = hc^3 / 8kGM$

这里  $h$  是普朗克 (Planck) 常量， $k$  是波尔兹曼常数 (Boltzmann Constant)， $G$  是万有引力常数， $c$  是光速。

由此，我们得到两条重要的结论：

(1) 黑洞的熵 ( $S_B$ ) 与面积  $A$  成正比 (与质量  $M$  的平方成正比)。

(2) 黑洞的温度 ( $T_B$ ) 与质量  $M$  成反比。

与经典黑洞理论的矛盾：由 (2) 一个结论：根据热力学第二定律，能量必须由温度较高的物体流向温度较低的物体。如果黑洞的温度  $T_B$  高于其外界的温度，则能量必须由黑洞流向外界。而经典黑洞理论说，任何信息，包括能量，都不可能从黑洞中传向外部。这样，经典黑洞理论就和热力学第二定律发生了矛盾。经典力学和量子力学中反应自然规律的一些方程也许将来会被能够更好地翻译自然规律的新物理方程所替代。到目前为止，热力学定律还是准确的，所以问题也许就出在经典黑洞理论上了，只要黑洞温度的概念是正确的，能量就有可能从黑洞中传向外部。

## 3. 霍金辐射

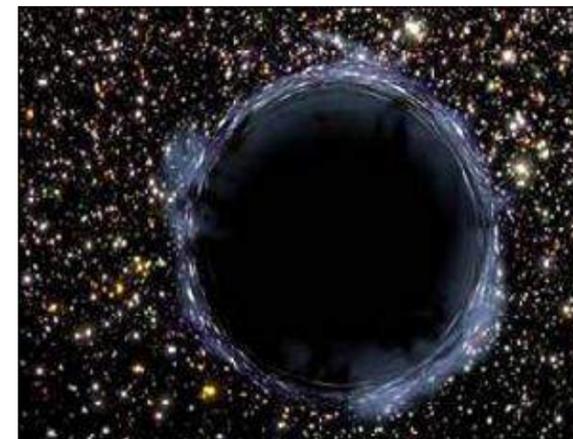


图 2. 霍金辐射理论模型

1974 年，霍金 (Hawking) 从完全不同的角度发现黑洞具有发射粒子的量子效应。黑洞具有量子性质的“热辐射”（辐射谱称为热谱）。这种辐射称为霍金辐射。可以从不同的角度来解释霍金辐射的机制，一种理解是：量子力学中的狄拉克 (Dirac) 理论认为，真空中充满着“虚”的粒子和反粒子对。它们不断地“物化”为一对实粒子，分离开，再合并而湮灭。在黑洞的视界附近充满着“虚”的正负粒子对。它们产生，分离开，再合并而湮灭。当存在黑洞时，其中一颗粒子可能会落入黑洞，剩下的一颗就失去了与之互相湮灭的对象，它也可能落入黑洞，也可能逃逸到远处去，从外部世界看来就好像是从黑洞发射出的粒子。

这个过程也可以这样来理解：黑洞的引力场可以看做一个势垒 [2]，阻止粒子逃出，因此从经典的角度看，粒子无法从黑洞中出来，但是在量子力学中粒子有一定几率可以穿透势垒，而这穿透的几率是随着势垒的厚度而非常迅速的减小。大黑洞的势垒后，穿透的几率很小，实际上就是为零；小黑洞的势垒要薄，因此穿透几率可能达到相当可观的程度，结果有大量的粒子穿透引力势垒逃逸到黑洞的外面。

霍金提出黑洞具有量子性质的温度辐射，能量可以通过霍金辐射从黑洞中传出之后，黑洞不是那么“黑”了，它可以辐射，发光，甚至应该是明亮的。黑洞虽然有了温度，但它却不可能与外界处于稳定的热平衡。黑洞的温度  $T_B$  与质量  $M$  成反比。根据爱因斯坦质能关系，

$T_B$ 也就与所含的能量 $M$ 成反比,因此黑洞的热容量是负值(升高一度所需的能量 $dE/dT < 0$ )而热容量为负值的物体是不可能与外界处于稳定热平衡的。

假定黑洞本来与外界处于热平衡,  $T_B=T$  由于起伏, 黑洞从外界吸收了一点能量  $\Delta E$ , 于是(质量)增大了, 温度反而下降了, 即  $T_B < T$  因此必须要从外界吸收能量, 而这就导致  $T_B$  继续降低……, 这样下去就破坏了原有的热平衡。反之, 如果起伏引起了黑洞向外界放出一能量  $\Delta E$ 。这时黑洞质量减小, 温度  $T_B$  升高, 结果  $T_B > T$  这将进一步通过热辐射放出能量使  $T_B$  再进一步升高, 越升高温度就越辐射, 越辐射温度就越升高, 这样热平衡就完全被破坏了。

如何理解黑洞无法热平衡呢?

熵对静态黑洞的热辐射度总是正比于黑洞视界温度四次方。

对动态黑洞, 将动态黑洞视为一个开放的非平衡态热力学系统, 它与外界不停地进行物质和能量的交换, 即有熵流产生。对于一个偏离热力学平衡不是那么厉害的黑洞, 如缓慢进行蒸发的大黑洞, 可采用局域平衡的假定, 认为尽管整个系统的状态是非平衡的, 但是对局域来说可近似认为仍处于平衡中, 局域内热力学基本等式和不等式 [3] 仍然成立。

恒星质量的寻常黑洞的温度只有  $10^7K$ , 非常接近绝对零度, 辐射是极其微弱的。但是小黑洞的温度有的接近  $10^{11}K$ , 即高达几千亿度, 这不但不是“黑”的洞, 而且是明亮的光源, 实际成为一个白洞 [4] 了。



图3. 太空黑洞喷发粒子流

德国纽伦堡埃兰根大学的科学家们用电波望远镜捕捉到了罕见壮观太空黑洞喷发粒子流, 此次巨大黑洞喷发粒子流发生在半人马座 $\alpha$ 星系附近4.2光年远的地点该距离小于太阳与比邻星。

## 注释:

[1] 施瓦西黑洞是1916年由施瓦西(Schwarzschild)提出来的, 施瓦西黑洞的设定是不带电不自旋转的黑洞, 黑洞中心为奇点, 黑洞的外圈为事件穹又称施瓦西半径(施瓦西半径是任何具重力的质量之临界半径)。

[2] 势垒: 势能比附近的势能都高的空间区域, 基本上就是极值点附近的一小片区域。

[3] 对于简单可压缩封闭系统,

$$(1)dU \leq TdS - pdV$$

$$(2)dH \leq TdS + Vdp$$

$$(3)dH \leq TdS + Vdp$$

$$(4)dF < -SdT + Vdp$$

其中等式适用于可逆过程, 不等式适用于不可逆过程。

[4] 白洞, 是时间呈现反转的黑洞, 进入黑洞的物质, 最后应会从白洞出来, 出现在另外一个宇宙, 白洞是广义相对论所预言的一种特殊星体, 是与黑洞相反的天体, 是大引力球对称天体的施瓦西解的一部分, 白洞仅仅是理论预言的天体, 到现在还没有任何证据表明白洞的存在。

[5] 宏观量子隧道效应, 是基本的量子现象之一, 即当微观粒子的总能量小于势垒高度时, 该粒子仍能穿过这一势垒。

## 参考资料:

《皇帝新脑》彭·罗杰斯

《Reissner-Nordstrom de Sitter黑洞的量子非热辐射》齐德江, 刘涛, 郭静华

《黑洞的热辐射》孙庆强, 刘门全, 范开敏

# 等效性的追问

## ——关于惯性质量与引力质量的实验

齐佳安

质量是什么? 当我向你提出这个问题的时候, 你或许会把一个砝码放在一台分析天平上, 读出精确到1mg的示数, 然后告诉我这就是它的质量; 你也许会诉诸牛顿第二定律, 找一个标准质量设为1的物体, 然后用相同的力分别施加于该物体和待测物体上, 然后比较二者的加速度 $a_s$ 与 $a_x$ , 确定出待测物体的质量 $m_x = a_s/a_x$ 。这确实是两种不同的思路, 但当问及两种方法得到的结果是否相同的时候, 答案就不是那么明显了。对这两者等同性的断言称之为等效性原理, 它是广义相对论的理论基础, 是现代引力理论的重要命题。历史上对这两个“质量”的理论思辨与比较试验从公元6世纪开始就一直持续到现在。

我们来考察以牛顿第二定律定义的质量。从这个角度看, 质量是惯性的度量, 称作惯性质量。第二定律是在第一定律所定义的“惯性系”中才成立的, 如果能够找到这样一个惯性系, 我们可以用牛顿第二定律定义物体的质量。

我们可以发现, 牛顿定律蕴含着这样一个假设: 在一个系统中(想象一个充满小球的盒子, 小球的运动任意分布), 我们在不同的物体身上设定了不同的参考系, 然而我们总可以找到一族参考系 $U = \{k_1, k_2, k_3, \dots\}$ , 任意 $U$ 中元素满足牛顿第一定律。这里说明一下,  $U$ 是一个等价类, 在等价性用伽利略变换 $a_x \equiv C$ 来联系时, 它们之间可以满足:

对称性  $a \sim b$  蕴含  $b \sim a$

自反性  $a \sim a$

传递性 a~b, b~c 蕴含 a~c

对于任意的  $k \in U$ ,  $(m_x)_k = C$ 。对于任意的  $j \notin U$ , 在  $j$  下的质量定义为  $(m_x)_j = (m_x)_k$ ,  $k \in U$ 。即与惯性系中的质量相同。下面的问题就在于如何找到这样的惯性等价类。

可是随着认识的不断深入, 人们逐步认识到永远找不到这样一个等价类。其主要原因有两个。第一, 所有物体之间存在引力作用, 找不到一个绝对不受力的物体; 第二, 没有任何理由偏向于某一个特殊的物体使得它成为一个惯性系。这样似乎永远都无法真正地找到一个惯性质量, 牛顿的理论在这里遇到了危机。针对这一点物理学家提出了局部惯性系的概念。还有一种激进的想法即所谓的马赫原理。马赫原理把物体的惯性归为宇宙中其他物质对这个物体的万有引力。在这种假设下, 假如宇宙中只有一个物体, 那么它也久没有的所谓惯性。其中一个最经典的例子是马赫关于旋转身体时手臂自然分开的论述:

You are standing in a field looking at the stars. Your arms are resting freely at your side, and you see that the distant stars are not moving. Now start spinning. The stars are whirling around you and your arms are pulled away from your body. Why should your arms be pulled away when the stars are whirling? Why should they be dangling freely when the stars don't move?

一个形象的表述是:

“mass out there influences inertia here.”

马赫原理启发了爱因斯坦广义相对论中关于引力的论述。但是它也遭到了许多批评, 有很多人对远方星系时是否能瞬时的影响此地的惯性表示怀疑。把质量归为某一个物质背景时, 蕴含了可能的空间惯性与各向异性, 但由于宇宙大尺度上均匀, 这一点难以检验。而在规范理论中, 质量被认为是由希格斯 (Higgs) 机制产生的。

不过这是后话, 我们现在先不讨论, 下面先来介绍一下引力质量。引力质量是在牛顿的万有引力公式中得到定义的。选定某一标准引力质量为 1 之后, 由其他物体和它之间产生的引力来定义引力质量。

$$m_g \propto F \cdot r^2$$

牛顿万有引力是一种瞬时的长程力, 它似乎是物质本身的一种固有属性。在广义相对论中, 引力被描述成因时空中的物质与能量而弯曲的时空, 改变了人们对引力是一种“作用”的看法。在理论物理中不允许长程力的出现, 假定引力是靠不同物质之间交换“引力子”来传播, 引力场因此以有限速度传播。

对惯性质量与引力质量的等效性的讨论是本文的核心问题。

首先明确两点。

第一, 验证  $m_g = m_i$  和验证  $m_g \propto m_i$  是等效的。因为任意比例系数都会被引力表达式中的  $G$  所吸收。假设  $m_g = km_i$ , 根据  $F = GM_g m_g / r^2 = Gk^2 M_i m_i / r^2$ , 只需定义新的引力常量  $G' = Gk^2$  即可。所以验证  $m_g = m_i$  也是验证这两者之间的线性关系。我们设定比例系数  $k = m_g / m_i$ , 要求  $k$  与能想象的各种变量都要独立, 比如  $\partial k / \partial m_i = 0$ ,  $\partial k / \partial v = 0$ ,  $\partial k / \partial T = 0 \dots$  是一个恒定的宇宙常量。第二, 引力质量可分为主动引力质量和被动引力质量, 但是区分这两者并无意义。按牛顿的万有引力定律  $F_{12} = (G/r^2) m_1^{\text{act}} m_2^{\text{pass}}$  和  $F_{21} = (G/r^2) m_2^{\text{act}} m_1^{\text{pass}}$ 。如果承认弱牛顿第三定律, 可得到所有物体主动引力质量与被动引力质量的比值是一个恒常数, 因此比例系数可以被引力常量  $G$  吸收。(但牛顿第三定律并不显然, 在理论物理中, 是由更为根本的诺特定理推导出的, 由空间平移不变性保证。)

历史上物理学家们设计了各种各样验证  $m_g \propto m_i$  的实验, 下面选取几个著名而经典的实验进行简单的介绍。

### 1. Galileo 的坠物实验 (1590)

伽利略同学做过许多验证广义相对论的基石——等效性原理的实验, 尽管他对广义相对论一无所知……比如他对教堂钟摆的观察, 不同质量小球在斜坡上运动方式基本一致, 以及最最著名的比萨斜塔实验。根据等效性原理, 在均匀的重力场中, 由于惯性质量和引力质量相互抵消, 不同质量的物体的运动轨迹相同。我们把所有的坠物实验归为一类。实际上早在公元 5 世纪, 古希腊哲学家 Philoponus 就提出重物 and 轻物下降一样快的观点。现代的坠物实验有一个著名的“实验楼”: 在不莱梅大学应用空间技术和微重力中心的真空塔 Fallturm Bremen。塔高 146 米, 由混凝土保护, 塔内气压不足 1Pa。(见附图, 绝对是一个旅游的好去处。)



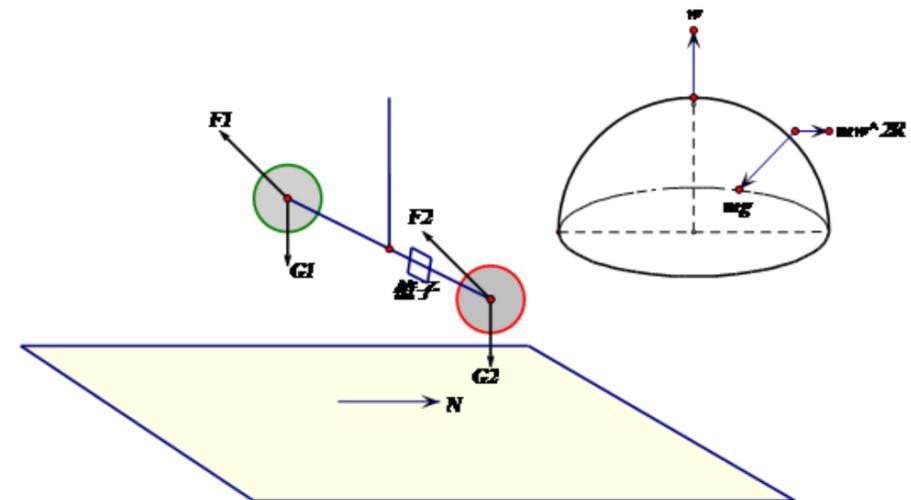
### 2. Issac Newton 的单摆实验 (1680)

把不同材质不同引力质量的物体放在相同的单摆末端, 比较它们的振动频率, 就可以验证比例系数是否为一个常数。牛顿做了许多实验并未发现不同物体的频率有显著不同。这个实验的思想比较简单, 但缺点是精度太低(一方面因为测量手段落后, 另一方面单摆本身就是小角近似)。有的资料显示牛顿实验能达到的精度约为  $10^{-3}$  量级。

### 3. Eotvos 实验 (1885 ~ 1889, 1906 ~ 1909)

厄缶 (Loránd Eotvos) 是著名的匈牙利物理学家, 他设计了著名的实验验证了惯性质量和引力质量的等同性。下面简单的介绍一下他所设计的实验以及其原理。

把两个不同的重物固定在一根金属棒的两端, 再用一根细线把棒子从中间吊起来, 使之保持平衡, 形成一个扭秤。把这套装置东西向放置, 如果惯性质量和引力质量的比值不是一个常数, 那么会观察到扭秤的旋转。因为惯性质量和引力质量的比值显示在地球上的物体所受到的惯性离心力和重力的比值中。实验装置的简图如下。



由地球自转产生的惯性离心力在北半球来看总是指向南方的天空，与竖直方向的倾角是当地的纬度值  $\lambda$ 。重力的方向为观察到的竖直方向。扭秤扭矩大小  $M = \sum \vec{r}_i \times (\vec{F}_i + \vec{G}_i)$ ，注意到  $r_1 G_1 = r_2 G_2$ ，合力矩可写为

$$M = \sin \lambda (r_1 F_1 - r_2 F_2) = \sin \lambda \cdot r_2 G_2 (k_1 - k_2)$$

$$M \propto k_1 - k_2$$

这样，假如两个重物惯性质量和引力质量的比值不同，就会产生让扭秤旋转的合力矩。为了增大灵敏度，厄缶选取了细长的悬丝，这样可以降低扭转常量 ( $D = \pi GR^4/2l$ )。为了放大实验现象，他还将一面镜子附着在棒子上，镜子将光线反射进一个小望远镜内，用望远镜来观察某一个定标点。这样一来非常小的旋转也可以观察到（光杠杆）。

用这一套实验装置，厄缶观测到惯性质量和引力质量在两千万分之一的精度内没有差别，并在 1890 年发表了结果 (R. v. Eotvos, *Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn*, 8, 65, 1890)。这个实验将原先的精度六万分之一大大的向前推进了。

被厄缶实验的精确性所吸引，哥廷根皇家科学会在 1906 年设立奖项寻求关于惯性质量和引力质量尽可能精确的证明：

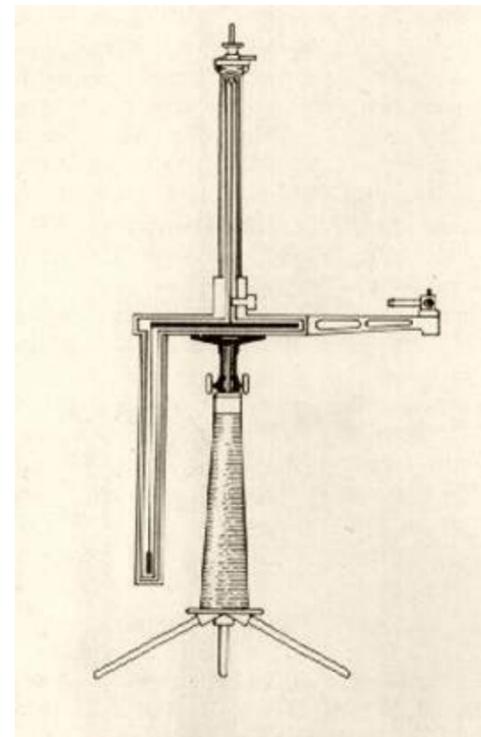
"A very sensitive method was given by Eotvos to make a comparison between the inertia and gravity of matter. Considering this and the new development of electrodynamics as well as the discovery of radioactive substances, Newton's law concerning the proportionality of inertia and gravitation is to be proved as extensively as possible."

1906~1909 年间厄缶有对实验装置进行了改变。左图即为当时实验装置的示意图。（这种实验装置也叫做厄缶扭秤，后来人们经常用它来判断某地区的矿藏资源，原理就是当地的质量集聚效应。）他将重物直接悬挂在悬线上。假定平衡的时候垂线和地球径向方向存在一个夹角  $\alpha$ ，平衡的时候重力和惯性离心力的比值决定了悬线与指向地球径向方向的夹角：

$$\tan \alpha = \frac{1}{k} \left( \frac{\omega^2 R \cos \lambda \sin \lambda}{g - \omega^2 R \cos^2 \lambda} \right)$$

他和他的合作者进行了累计长达 4000 多小时的观测实验，将八种材料和铂进行比较。在 1909 年伦敦第 16 届国际测地线大会上报告获得了一亿分之一的精度。实验中考虑了各种可能的影响因素，观察的时间，地点，甚至包括了当地的地质因素，空气流动的因素。如此高的精度本身就足有一种震撼力，甚至这样的实验本身已经成为一种优美的艺术。正如厄缶团队的座右铭所说：

"Ars longa, vita brevis"(the art lasts long, life lasts short)

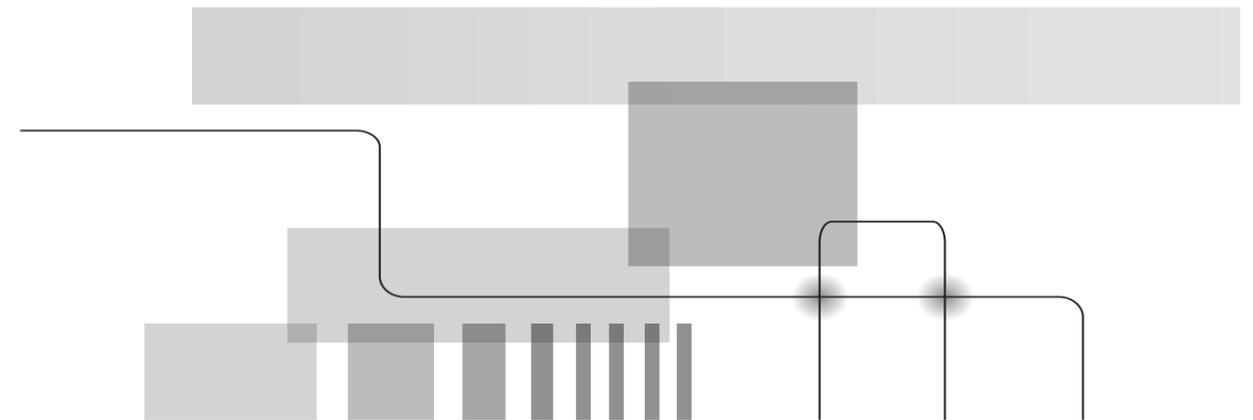


#### 4. 后厄缶实验与第五种基本作用力 (1964 ~ now)

狄克 (R. H. Dicke) 与他的小组在厄缶实验装置的基础上继续进行推进，他们改善并重复了厄缶的实验，提出了许多对他们实验的质疑。在他的实验里，他将铝和金制作的重物悬挂在南北方向的棒上。考虑了他们的惯性离心力相对于太阳的周期性变化。将实验精度提升到了  $10^{-11}$  量级。在这样的精度下观察的结论是等效性原理也许并不是绝对精确的。惯性质量和引力质量的比值随不同的测量物质而有轻微的变化。

后继的实验者又做了相对于银河系中心的暗物质的检验。最新的实验计划 STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) 在卫星上展开，希望在  $10^{-16}$  的精度上检验这一现代物理学的基石。

继续检验等效性原理似乎没有必要，但是到目前还没有任何量子引力理论出现能在理论的层面上说明这两者是否一致，大部分理论（包括 String theory, supergravity, quintessence...）甚至允许等效性原理在一定程度上被违反。而且更精细的实验还产生了关于自然界第五种基本作用力的猜疑。在此更多的检验和一个更普适的理论是需要的。



# “幽灵”通讯——量子传输

周晨

这位白发苍苍的老人，凝视着纸上的内容。那是几个晦涩难懂的式子，没错，常人无法看懂的。“这现象，是遥远的幽灵！”他发出声声叹息，就是这仿佛只有他一个人才懂得的新发现，令他百思不得其解。他清楚意识到，如果这是真的，那就将是科学的一场梦魇……

你或许早已猜到了，这位老人的身份就是，没错，20世纪最伟大的科学家：爱因斯坦。我们关于量子传输的话题，就得从他开始说起。



## 历史

时光倒转到1935年。理论家薛定谔发表了一篇著名的论文，内容是有关“猫态”（即那只著名的“薛定谔的猫”），其中首次提出了量子纠缠态的概念。

由于量子纠缠的奇异特性，大物理学家爱因斯坦敏锐地觉察到，如果这样的性质是真实存在的，那么将完全违背相对论中的定域性原理。于是乎，同年，爱因斯坦与其他两位物理学家共同发表了一篇论文来驳斥这近乎荒谬的理论，提出了著名的EPR佯谬。量子力学受到了强有力的质疑。

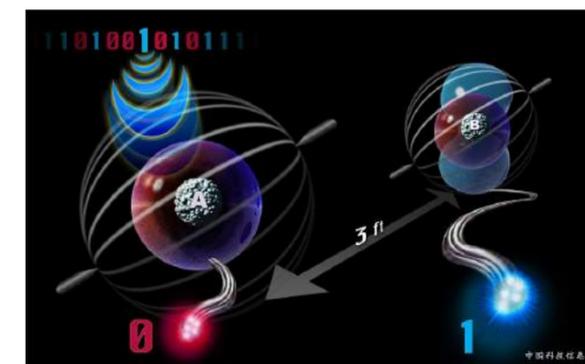
随着量子力学的逐渐发展壮大，许许多多的实验现象得到很好的解释，因而越来越为物理学界接受，但是量子力学的许多基本问题却迟迟不能得到合理的理论推导与解释，比如我们谈到的量子纠缠以及EPR佯谬。

时间来到1965年。一位来自北爱尔兰的理论学家贝尔提出了一个著名的不等式：贝尔不等式。实验证明，贝尔不等式是不成立的，即两个纠缠量子所组成的系统在量子力学上的关联性远远强于定域性理论所能解释。这也就明确表明了，爱因斯坦所主张的局域实体论，其预测不符合量子力学理论。这似乎是相对论与量子力学的决裂。

## 量子纠缠

这里简单说明一下量子纠缠现象，在此拿两颗以相反方向、同样速率等速运动之电子为例，即使一颗行至太阳边，一颗行至冥王星，如此遥远的距离下，它们仍保有特别的关联性；亦即当其中一颗被操作（例如量子测量）而状态发生变化，另一颗也会即刻发生相应的状态变化。只要你布置得当，激发出纠缠的孪生粒子，即可在瞬间内，使其中的一个粒子影响另一个的物理性质，即使后者远在天边。

如此现象导致了“鬼魅似的远距离作用”之猜疑，仿佛两颗电子拥有超光速的秘密通信一般，似与狭义相对论中所谓的定域性相违背。欧文·薛定谔把纠缠现象称之为量子论的主要特征；爱因斯坦则说，“这是远距离上的鬼魅行为。”这也是当初阿尔伯特·爱因斯坦与玻理斯·波多斯基、纳森·罗森于1935年提出以其姓氏字首为名的爱波罗悖论（EPR paradox）来质疑量子力学完备性之缘由。



## 量子传输

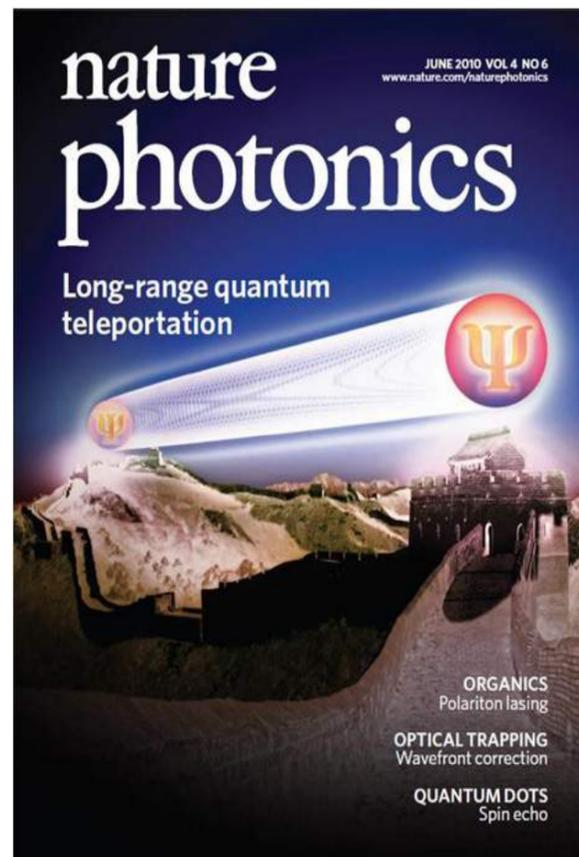
尽管学界一直在为量子纠缠、非定域性等根本

## 第三部分

# 量子物理的应用

问题争论不休，但是近年来的实验都验证了量子纠缠的原理是可行的。

言归正传，现在我们总算可以开始探讨量子传输的问题了，这是因为，量子传输技术的理论基础正是量子纠缠，量子传输就是量子纠缠理论的实际应用。量子传输是一种全新通信方式，它传输的不再是经典信息而是量子态携带的量子信息，是未来量子通信网络的核心要素。利用量子纠缠技术，需要传输的量子态如同科幻小说中描绘的“超时空穿越”，在一个地方神秘消失，不需要任何载体的携带，又在另一个地方瞬间神秘出现。（想象一下，一个中国人在南京手挥一拳，就把一个远在纽约的美国人打得头破血流，此番“隔山打牛”是不是很不可思议？这正是非定域性与量子纠缠的奇妙所在，虽说看上去有些荒谬，但是目前实验证明这是可行的！）



在经典信息论中，信息量的基本单位是比特，一个比特代表经典二值系统（0，1）的一个取值的信息量。量子信息学中，基本单位是量子比特或称为量子位，量子比特是一个双态量子系统，这里的双态指的是两个线性独立态。在量子信息中，用作量子位实现的双态系统就是光子。说的浅显一点，量子比特就是具有与经典意义上的比特所不同的概念，它除了0

与1（分别对应基态与激发态）以外，还具有0和1的叠加态这种独立态。这便是量子力学范畴才能具有的特有性质。

我们所说的量子传输与通讯，主要是指隐形传输的通信技术。

量子隐形传态技术就是正在新兴的通讯领域，利用量子纠缠现象，可以实现不发送任何量子位而把量子位的未知态（即这个态包含的信息）发送出去。我们要做的，就是把两个同源的量子分开，对其中一个施以“信息”，那么，远在许多公里之外的另一个量子也会有同样的“反应”，通过读取它的反应，就可以实现远超目前水平的通信技术。

#### 量子通讯的进展

下面按时间轴列举一下量子通讯领域近年来的发展：

1993年，C.H.Bennett提出了量子通讯的概念；

1993年，6位来自不同国家的科学家，提出了利用经典与量子相结合的方法实现量子隐形传送的方案：将某个粒子的未知量子态传送到另一个地方，把另一个粒子制备到该量子态上，而原来的粒子仍留在原处。于是我们可以用量子态作为信息载体，通过量子态的传送完成大容量信息的传输，实现原则上不可破译的量子保密通信。

1997年，奥地利蔡林格小组（其中有来自中国的年轻学者潘建伟）在室内首次完成了量子态隐形传输的原理性实验验证；2004年，该小组利用多瑙河底的光纤信道，成功地将量子态隐形传输距离提高到600米。

2004年开始，来到中科大的潘建伟、彭承志等研究人员开始探索在自由空间信道中实现更远距离的量子通信。该小组于2005年在合肥创造了13公里的双向量子纠缠分发世界纪录，同时验证了在外层空间与地球之间分发纠缠光子对的可行性。

2007年开始，中国科大-清华大学联合研究小组（组长便是潘建伟）开始在北京八达岭与河北怀来之间架设长达16公里的自由空间量子信道，并取得了一系列关键技术突破。2009年，小组成功证实了量子隐形传态过程穿越大气层的可行性，为未来基于卫星量子中继的全球化量子通信网奠定了可靠基础。

2008年，一支意大利和奥地利科学家小组宣布，

他们首次识别出从地球上空1500公里处的人造卫星上反弹回地球的单光子，实现了太空绝密传输量子信息的重大突破。这一突破标明在太空和地球之间可以构建安全的量子通道来传输信息，用于全球通信。此研究成果发表在《新物理学杂志》（New Journal of Physics）上。



#### 小结

鉴于目前科学界对于量子纠缠的根本原理仍旧处于莫衷一是的状态，尽管大多数学者已经接受这一诡异理论的真实性的真实性，但是不时仍有反对的声音，尤其

是在对量子纠缠的解读上，存在着许多误解，甚至产生许多哲学上唯心的论调。量子纠缠究竟为何物，我想这也不是本文能够一一说明清楚的，但是我们有必要来以我们的视角观察这个问题，得到我们的认知。

再说说本文的重点部分——量子传输（或者直接叫量子通讯技术）。随着研究的一步步深入，这个领域将变得越来越热门。在21世纪，这个新通讯技术势必将成为各大通信公司、政府机关、军方等等方面的“抢手货”。

同时，我们兴奋地注意到，中国在这个领域可是一直处在世界领先的地位。前面一直点到的潘建伟，是中科大的教授，曾留学奥地利，当时就为该领域作出了开创性的贡献。现在他所带领的小组，正在创造着一个个全新的世界第一。日前，他也成为了中国科学院最年轻的院士。看看近年来国际各大科学期刊杂志对于这个领域的报导，就会明白我们在这个拥有广阔前景的领域扮演着杰出的角色。

所以，希望在我们这帮物理人中间能够涌现出一批能够在量子力学领域叱咤风云的人物，挑起中国物理学新世纪的大梁！

# 量子计算机——从梦想到现实

戴天誉

“在量子计算机面前，电子计算机就是一把不折不扣的算盘。”  
“一旦掌握了这种强大的运算工具，人类文明将发展到崭新的时代。”

## 摩尔定律的尽头

1965年，Intel的创始人Gordon Moore提出了著名的Moore定律：当价格不变时，集成电路上可容纳的晶体管数目，每隔约18个月便会增加一倍，性能也会提升一倍。五十年过去了，计算机从神秘遥远的庞然大物变成日常生活中不可或缺的工具，信息技术由实验室进入普通家庭，因特网将全世界联系起来，多媒体视听设备丰富着每个人的生活。

计算机产业的发展日新月异，但始终存在着两个不可逾越的极限。

一是传统硅芯片的集成度不断提高，随着单位面积芯片内部晶体管的数目与日俱增，如依照Moore定律估算，二十年后芯片的制造工艺将达到原子级，这时材料的物理、化学性能将发生质的变化，芯片内部结构的粒子性越来越弱，而波动性越来越显著，宏观世界的物理定律不再适用。传统电子计算机将达到它的物理极限。

二是集成度提高所导致的耗能与散热问题制约了芯片集成度的发展。芯片的耗能产生于计算中的不可逆过程。如处理器对输入的两串数据进行异或操作最终却只输出一列数据。这过程是不可逆的，根据能量守恒定律，消失的数据信号必然产生热量。由计算带来的热量无法疏散问题最终将导致硅芯片发展的停滞不前。

五十年中，芯片产业一直遵循着Moore定律轰轰烈烈地发展，但随着晶体管电路逐渐接近性能极限，Moore定律也终将走向尽头。

## 梦想的开始

1969年，史蒂芬·威斯纳提出“基于量子力学的计算设备”；1973年，亚历山大·豪夫勒发表关于“基于量子力学的信息处理”的文章；1982年，理查德·费曼在一次演讲中提出利用量子体系实现通用计算的方法；1985年，大卫·杜斯提出了量子图灵机的模型。1994年，彼得·秀尔提出量子质因子分解算法。此后，量子计算机变成了热门话题，世界各国的专家学者致力于利用各种量子系统实现量子计算机。

当使用计算机模拟量子现象时，数据量会因为庞大的希尔伯特空间而变得巨大，一个完好的模拟所需要的运算时间往往是不切实际的天文数字，而如果用量子系统来模拟量子现象则所需的运算时间可大幅减少。

量子计算机的运算能力到底有多强大？中科院院士、中科院量子信息重点实验室主任郭光灿介绍说，1994年，人们耗时8个月采用1600台工作站实施经典运算，将数长为129位的大数分解成两个素数相乘。若采用一台量子计算机则一秒钟便可破解。随着数的长度的增大，电子计算机所需的时间将呈指数上升，例如数长为1000位，分解它所需的时间比宇宙的年龄还长，而量子计算机所花时间是多项式增长，仍能很快破解。

目前最好的多核处理器能够解密150位的密码，如果想要解密一个1000位的密码，需要调用目前全球所有的计算资源。但是从理论上来说，一台量子计算机在几小时内就能解决这一问题。

量子计算机的计算能力可见一斑。

随着量子计算机的发展，传统的密码学也将受到冲击。目前广泛应用于银行、金融系统的RSA加密系统是基于因式难以分解而开发出来的。然而理论上包括RSA在内的任何加密算法都不是天衣无缝的，利用穷举法可一一破解。因此，精通高速并行运算的量子计算机一旦问世，互联网上将不再有信息安全可言。当然，不用担心，一套更为安全成熟的量子加密体系也正应运而生。

## 实现梦想的理论基础

Alan Turing在1936年提出了一种抽象的计算模型——图灵机。

该机器包含一条无限长的纸带（TAPE），纸带被划分为无数小格，每小格上储存一个符号（1或0）或为空白。读写头（HEAD）可在纸带上移动，它能读出并改变当前所指格子上的符号。控制规则（TABLE）根据当前及其所处状态及当前读写头所指格子上的符号确定读写头下一步的动作，并改变状态寄存器的值，令机器进入一个新的状态。状态寄存器用来保存图灵机当前所处的状态。

Turing认为，这样一台机器能够模拟人类所有的计算过程。

传统电子计算机用比特（bit）作为信息存储单位，只能有0或1一种状态。运算过程是经由对存储器所存数据进行操作而实施的。电子计算机无论其存储器有多少位只能存储一个数据，因此，对其进行一次操作只能变换一个数据，为运算某个函数必须连续实施多次操作，这便是串行运算模式。

而对于量子图灵机，纸带和读写头都是以量子形式存在，它的基本数据单位为量子比特（qubit），则两个状态是0和1的相应量子态叠加，量子存储器有0和1两种可能的状态。这意味着一位量子存储器可同时存储0和1两个数据。

两位量子存储器可同时存储00、01、10、11四个数据。由此推之，N位量子存储器可同时存储 $2^N$ 个数据，而传统存储器依然只能存储其中一个数据。由此可知，量子存储器存储数据的能力是传统存储器的 $2^N$ 倍。

当存储器位数N=250时，该台小型量子计算机可以存储的数据比目前所知的宇宙中原子的数目还多。

量子计算机因量子叠加态原理而具有巨大的存储数据的能力，对其操作一次可同时将其存储的 $2^N$ 个数据变成新的 $2^N$ 个数据。量子计算对传统计算作了极大的扩充，量子计算机对每一个叠加的分量实施的变换相当于一种经典计算，所有的这些传统计算同时完成，并按一定的概率振幅叠加起来，给出量子计算机的输出结果，这便是效率大幅提高的量子并行计算模式。

在量子物理中，若对亚原子水平的粒子进行观察会破坏粒子的状态，使粒子塌缩回0或1的状态，从而失去其叠加态的优势。因此，量子计算机还利用了量子力学的另一个机制，即纠缠。对两个原子施加外力作用可导致它们互相纠缠，使第二个原子具有第一个原子的性质。因此当不受外界干扰时，原子的自旋方向是不定的，而一旦受到扰动，原子就会选择一个确定的方向或值，同时第二个处于纠缠的原子会选择相反的方向或值。这个原理使科学家们能够不进行实际的观察（即不破坏量子的叠加态）而得到量子比特的值。

## 梦想与现实的距离

理论与现实往往存在着不小的差距。尽管今年诺贝尔物理学奖的获得者们提出了突破性的实验方法，使测量和操控单个量子体系成为可能，但到达高效量子计算时代我们还有一段很长的艰难曲折的路要走。

量子的相干性是量子计算高效快速的基础，然而量子的相干性很容易受外界的环境影响而丢

失并由此导致运算错误。虽然采用量子纠错码技术可避免出错，但也只是发现和纠正错误，不能从根本上杜绝量子相干性的丢失。而量子计算机在庞杂的纠错过程中需要很多个物理比特才能获得一个可容错的逻辑比特。经估算运行 Shor 算法（量子质因数分解算法）大约需要 1000 个逻辑比特，那么物理比特至少要高一个甚至两个量级。因此理论上 300 个量子比特就能赋予量子计算机难以想象的运算能力，而实际大约需要一万个量子比特才能超越经典计算机的运算能力。

综上所述，要真正研制出量子计算机存在两大障碍。

其一是物理可扩展性问题。即如何实现成千上万个量子比特，并能有效进行相干操作。

其二是容错计算问题。即量子计算的出错率如何能减少到低于阈值，确保计算结果的可靠性。

正是由于重重障碍的阻拦，目前量子计算机的研究还停留在理论阶段。但近年来量子计算领域取得的一次次重大突破告诉我们这些障碍并非不可逾越。

纠缠的原子会选择相反的方向或值。这个原理使科学家们能够不进行实际的观察（即不破坏量子的叠加态）而得到量子比特的值。

## 梦想与现实的距离

理论与现实往往存在着不小的差距。尽管今年诺贝尔物理学奖的获得者们提出了突破性的实验方法，使测量和操控单个量子体系成为可能，但到达高效量子计算时代我们还有一段很长的艰难曲折的路要走。

量子的相干性是量子计算高效快速的基础，然而量子的相干性很容易受外界的环境影响而丢失并由此导致运算错误。虽然采用量子纠错码技术可避免出错，但也只是发现和纠正错误，不能从根本上杜绝量子相干性的丢失。而量子计算机在庞杂的纠错过程中需要很多个物理比特才能获

得一个可容错的逻辑比特。经估算运行 Shor 算法（量子质因数分解算法）大约需要 1000 个逻辑比特，那么物理比特至少要高一个甚至两个量级。因此理论上 300 个量子比特就能赋予量子计算机难以想象的运算能力，而实际大约需要一万个量子比特才能超越经典计算机的运算能力。

综上所述，要真正研制出量子计算机存在两大障碍。

其一是物理可扩展性问题。即如何实现成千上万个量子比特，并能有效进行相干操作。

其二是容错计算问题。即量子计算的出错率如何能减少到低于阈值，确保计算结果的可靠性。

正是由于重重障碍的阻拦，目前量子计算机的研究还停留在理论阶段。但近年来量子计算领域取得的一次次重大突破告诉我们这些障碍并非不可逾越。

## 越来越近的的梦想

2000 年 3 月，美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家们宣布研制了一台包含 7 个量子比特，存在于一滴液体中的量子计算机。该量子计算机使用核磁共振操纵反式丁烯酸分子原子核中的粒子。核磁共振可用来产生促使粒子排列起来的电磁脉冲。处于与磁场方向相同或相反的位置的粒子使得该量子计算机可以模仿数字计算机来按比特对信息进行编码。

2000 年 8 月，IBM-Almaden 研究中心的研究人员宣布制成了一台据称是当时最先进的量子计算机。这台量子计算机的 5 个量子比特由 5 个相互作用的氟原子核构成，使用无线电频率脉冲编程。

2001 年 IBM 成功实现利用 7 个量子比特完成量子计算中的质因数分解。

2007 年，加拿大的 D-Wave 公司发布了号称全球第一台商用电子计算机——采用 16 位量子比特处理器的 Orion。不过业内人士称 Orion 并不是真正意义上的量子计算机，只是具备了一些

量子计算的特性。

2011 年，D-Wave 发布了全新的产品——D-Wave one，处理器达到了 128 量子比特。

2012 年，IBM 宣布在量子计算领域研究出的新技术使得科学家可以在初步计算中减少数据错误率，同时在量子比特中保持量子机械属性的完整性。

量子计算机由于其强大的功能和特殊的战略意义引起了各个国家的关注。

2006 年美国前总统布什国情咨文中宣布了“美国竞争力计划”，在这项富有进取心的长期举措中，第四条为“突破技术障碍，实现量子信息处理技术的实际应用”。

2009 年，由美国总统科技顾问牵头的美国科学技术委员会发布了关于量子信息科学的联邦报告，并仿照当年曼哈顿工程制造原子弹的成功先例，投巨资启动“mini-Manhattan project”（微型曼哈顿计划），集中了包括 Intel、IBM 公司等半导体界巨头以及哈佛大学、普林斯顿大学、Sandia 国家实验室等著名研究机构，在国家层面上组织各部门跨学科统筹攻关，以期占领未来量子计算技术的战略制高点。

日本和欧共体在美国微型曼哈顿计划的刺激下也紧跟其后启动类似计划，引发了新一轮关于量子计算技术的国际竞争。

从薛定谔的猫的生死不可预知到今年诺贝尔物理学奖的不开箱就能观测猫的生死，量子计算机时代正向我们快步走来。随着 IBM 等商业机构的发力，量子计算机已逐渐从梦想变成现实。

## 参考资料

1. 《量子计算机的发展现状与趋势》 郭光灿
2. 《中国量子计算机——决战 21 世纪的利器》 王中华
3. 《量子计算机——从空想到现实》
4. 《量子计算机工作原理》 Kevin Bonsor, Jonathan Strickland

# 跟电线说再见

## ——无线输电技术

陈浩然 靳伯骞

### 电线带来的困扰

你是否曾因宿舍书桌上纵横交错的充电线而纠结，你是否曾因图书馆里的座位离插电孔太远而苦恼，你是否曾因在实验室里不小心绊到电线中断他人实验而愧疚……也许，这不只是你一个人的困扰。

生活中，电线的身影无处不在，大到路旁的输电线，小到家中各种电器的线路。它充斥了我们的生活，但在带给我们电能的同时，也带给了我们诸多困扰，甚至是一些安全隐患。

你一定会想，如果有一天，电力的传播不再需要线路，那该多好。电话可以无线，网络可以无线，电力就不可以了吗？不得不说，这确实是一个伟大的想法。

### 无线输电的构想由来已久

其实早在 1890 年，物理学家兼电气工程师尼古拉·特斯拉 (Nikola Tesla) 就已经做了无线输电试验。特斯拉构想的无线输电方法，是把地球作为内导体、地球电离层作为外导体，通过放大发射机以径向电磁波振荡模式，在地球与电离层之间建立起大约 8Hz 的低频共振，再利用环绕地球的表面电磁波来传输能量。但因财力不足，特斯拉的大胆构想并没有得到实现。后人虽然从理论上完全证实了这种方案的可行性，但世界还没有实现大同，想要在世界范围内进行能量广播和免费获取也是不可能的。结果，一个伟大的科学设想就这样胎死腹中。

不过，科学家们一直没有放弃这方面的研究。1968 年，美国工程师彼得·格拉泽 (Peter Glaser)

提出了空间太阳能发电 (Space Solar Power, SSP) 的概念，其构想是在地球外层空间建立太阳能发电基地，通过微波将电能传输回地球，并通过整流天线把微波转换成电能。1979 年，美国航空航天局 NASA 和美国能源部联合提出太阳能计划一建立“SPS 太阳能卫星基准系统”。欧盟则在非洲的留尼汪岛建造了一座 10 万千瓦的实验型微波输电装置，已于 2003 年向当地村庄送电。野心勃勃的日本拟于 2020 年建造试验型太空太阳能发电站 SPS2000，2050 年进入规模运行。



SPS 太阳能卫星基准系统

### 无线输电并非遥不可及

也许上述这些利用电磁波 (微波) 实现远距离、超远距离无线输电的想法与蓝图离我们的生活还很远，但是，无线输电在身边的实际应用其实已有先例。

最早诞生的是充电座，是利用电磁感应原理制造而成。例如无线充电牙刷，无线充电手机等等，只要将用电器安放在充电座上便可实现充电，用起来很是方便。不久后，平板式的无线充电平

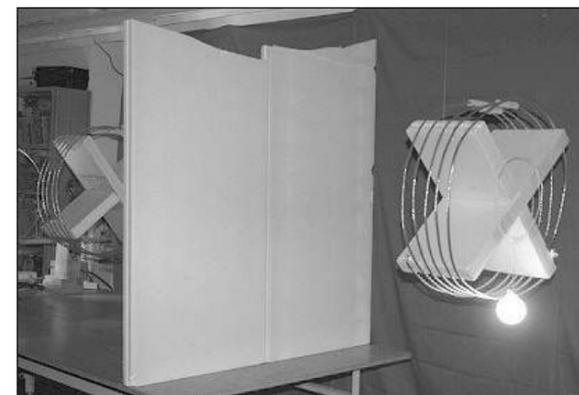
台也诞生了，原理相同，只要将用电器放在充电的平板或者说“垫子”上即可，充电时间与有线充电相差无几，与充电座的方式相比，它对用电器的摆放要求更低，并且可以实现多个用电器同时充电。我们将这两种形式的充电器称为接触式充电器，它们有着共同的缺点——充电距离过短。

充电距离与传输效率，是制约无线充电技术发展的两大难题。距离远了，效率就变低，或者几乎无法充电，可是距离太短，实际应用的意义也就不大了。所以电磁感应的方法，由于受距离问题的限制，已经在无线输电的实际应用中被逐步淘汰。当然原理简单，生产成本低的优势还是决定了它在今后一段时间内仍会占据一定的市场份额，不过其研究前景已是一片黯淡。

促使电磁感应淘汰的另一个原因，则是电磁耦合共振的应用导致的射频充电器的诞生。

MIT 的助理教授马林·索尔贾希克 (Marin Soljacic) 和他的研究小组在长达 4 年的改善无线传输距离的实验研究中终于获得重大突破。他们在实验中使用了两个直径为 50cm 的铜线圈，通过调整发射频率使两个线圈在 10MHz 产生共振，从而成功点亮了距离电力发射端 2m 以外的一盏 60W 灯泡。而且，即使在电源与灯泡中间摆上木头、金属或其它电器，都不会影响灯泡发光。

同时，MIT 的科学家们还对无线电力传输理



电磁耦合共振下的射频传输

论进行了研究。通常情况下，电磁辐射具有发散性，相隔较远的接收器只能接收到发射能量的极

小一部分。而当接收天线的固有频率与发射端的电磁场频率一致时，就会产生共振，此时磁场耦合强度明显增强，无线电力的传输效率大幅度提高。MIT 的实验表明，当收发双方相隔 2m 时，传输 60W 功率的辐射损失仅为 5W。

一家名为 Powercast 的公司最早推出了一种适合中短距离使用的射频充电器。与前面提到的接触式充电器不同，Powercast 公司的射频充电器不需要充电垫子，电子设备搁置在距离发送器约 1m 范围内的任何地方都可以充电。于是新的充电平台构想诞生了，只要在房间里安置一个射频发射源，房间中的用电器 (拥有对应的接收器) 都能正常充电和工作了。这样无线输电的应用价值被再次提高。

### 无线输电的原理及巨大前景

说到这里，我们可以适当总结一下，短距离的无线输电可以通过简单的电磁感应实现，并且已经得到实际应用；中短距离的无线输电可以依靠电磁耦合共振的帮助，已经实际应用且拥有很大的发展前景；远距离的电磁波输电虽然还未有大范围的实际应用，但我们相信它一定能在不久的将来造福全人类。

无线输电技术正在蓬勃发展，无线输电将如无线上网一样家喻户晓，一个没有电线的世界已不再是梦。

### 第一个尝试无线输电的人

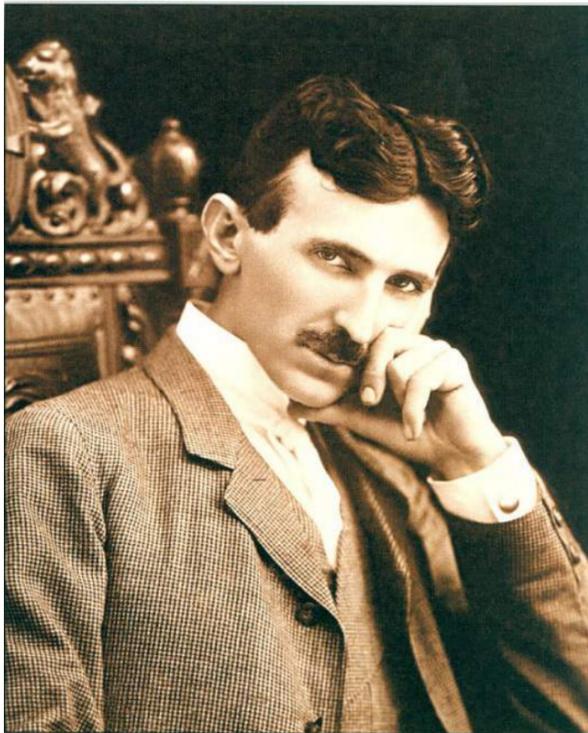
诚然无线输电技术前途无量，现今的科学家们也已经在无线输电方面有所成就，但是他们的工作都是建立在特斯拉的尝试之上的。特斯拉是第一个用电磁波的共振原理实现无线传输能量的人，可以说是无线输电的宗师。下面就让我们一起来看一看特斯拉的工作是怎样的吧。

下面引自特斯拉的发明声明：

高压充放电会产生电磁波，凭借它我们可以

无线传输能量。在尝试的过程中，会发现：用电容接收时，会有不少能量散失到周围空气中，而且在电磁波波长很小时这个现象更加明显。

特斯拉也曾经试图用变压器的原理来进行无线输电（事实上发生装置与接收装置本就是一对电耦），但是能量收集一直是困扰科学家们的难题。现在的短程无线输电距离在波长的  $1/6$  左右，超过了这个范围，能量收集效率将大打折扣。



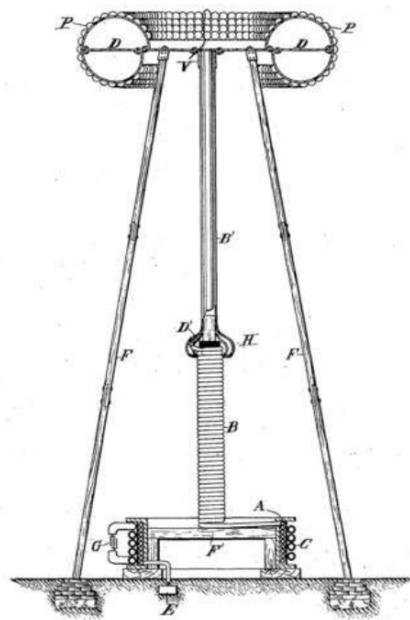
回到特斯拉的发明。如图所示，这就是特斯拉在美国专利局申请专利时用的示意图，是 Wardencllyffe Tower 的原型（塔最初的目的不是无线输电，而是无线电通讯）。最顶端的 D 是特定形状的金属天线，上面附有半球型圆盘，为了安全，F 为一个包围着的绝缘体外壳。这个塔的里面是棒型金属 B' 以及金属线圈 B。为了防止火花或者漏电，特斯拉在链接处加装了一个天线 H。考虑到观察实验以及安全问题，整个塔是建在一个绝缘基座上的。线圈 B 连到线圈 A，然后 A 接地（E）；A 与 C 相互发生电磁共振，而 C 上装有电容 G。这样一来，一个熟悉的 L-C 振荡电路

产生了。而且特斯拉巧妙的将电路与天线链接，尽可能大的将电能发射出去。

另外，他还提醒，当电路中的能量达到几万马力时，装置可能会在 D-B' 链接处产生球状火焰，这是相当危险的。而且，当频率超过固有频率时，也会发生意外，但具体是什么特斯拉没有明确指出。在安全性方面，特斯拉最后还提出减小天线的曲率半径，使它更容易发生放电。这样一来，就如同有了一个安全阀，当功率过大时，塔会向空气中放电，不必再担心事故了。其实，这个东西是一种放大发射机，现在多用于无线输电实验中，学名为：大功率高频传输线共振变压器。

特斯拉的无线输电理论上解决了电能发散的问题，把地表当作内导体，把地球的电离层当作外导体，通过他的放大发射机，使用这种放大发射机特有的径向电磁波振荡模式，在地球与电离层之间建立起大约 8 赫兹的低频共振，利用环绕地球的表面电磁波来传输能量。

十分遗憾，特斯拉的 Wardencllyffe Tower 难以避免被拆的结局，智慧的先驱也未能在有生之年看到十分成功的试验结果，落魄地死去了。而无线输电技术这个领域继续发展着，等待着我们这些后来者去开拓。



## 第四部分

# 教授

# 访谈实录

## 科研的日子其实很美好

——闻海虎教授访谈录

采访 / 撰稿 许光耀 杨帆 王晶菁



支点学社：闻教授，其实我们学生一直很好奇教授们的生活，不知您能不能为我们揭开这层神秘面纱呢？

闻教授：我的一天除了一日三餐，其他时间几乎都在工作方面。比如读文献，指导学生科研，分析数据，写文章，跟学术杂志编辑部 argue，也会参加一些学术方面的会议。

支点学社：那您的学术造诣一定非常了得。超导范围很广，教授您主要是研究什么方面的？

闻教授：我个人主要是做超导的实验方面，即物理性质研究和材料制备。我们希望寻找新的超导材料，这是极具挑战性的课题，毕竟新的超导材料会出现在哪里谁也不能预言，我们的一个主要工作方向就是探索并发现新的超导材料，同时研究非常规超导机理，目标是实现创新性工作。

支点学社：那么您又是如何看待您的科研方向的？

闻教授：我认为，首先，超导现象很令人着迷。一般金属都有电阻，为什么超导体没有

电阻，这可能是大多数人最想知道的，这里面蕴涵重要物理原理，而且是量子层次的物理原理。其次，它有很多重要应用。比如我读研究生的中科院等离子体研究所，就有利用超导技术来实现核聚变；还有，超导能够产生强大的磁场，用来约束高密度的等离子体。其实，超导技术也影响着我们生活的方方面面。比如低温超导材料“铌钛”“铌三锡”现在经常应用于医院里的核磁成像，所以说超导并不神秘。而且超导的发展前景也是非常好的，超导材料是新能源材料的一种，能够高密度储能，无损耗的输电，特别是能够大功率地输电，相比普通材料有很大的优越性；军工方面也有很多应用。可以说，超导是一门既具有很高的科学研究价值又具有很多潜在应用价值的学科。

支点学社：听起来确实很令人振奋。那么教授您能给我们具体说说超导的实验物理研究吗？

闻教授：一个是关于电子如何配对产生超导的机理。一般来说，两个电子库仑排斥力很强，那电子为什么能克服这个排斥力成功配对呢，我们研究其形成的原因。我们首先提出新的假设然后再进行验证。这其实是重大

科学问题。自从上个世纪 BCS 理论获得诺贝尔奖以后，尽管有很多的理论模型，还没有被学术界广泛接受的理论模型。那么就要有很多重要的实验来验证各种理论模型，或者期望。物理学是实验科学，一切都逃离不了实验的验证，验证不了的东西是没人敢百分百确认的。我们的工作就是从实验的角度做有关超导机理的研究。另外，超导现象是一个宏观量子态，表现出很多很有意思的宏观量子现象，我们其中一个方向就是做磁通物理，即超导体宏观量子相干有关的磁通物理。



比如这个(指着墙上一图片)，就是用扫描磁力显微镜拍的宏观量子磁通线。它很小，一个也就 10 纳米左右。

给 II 类超导体加磁场之后自然就产生这些线，我们期望这些线最好不动，否则就会有能量耗散；接下来就要研究它的物理动力学，它一般在洛伦兹力作用下都会动，于是我们一般就做一些“杂质中心”把它们钉扎住。闻教授指着墙上的一张照片说“这是日本独卖新闻采访我们的照片”。

支点学社：可是您是如何选择自己的课题的呢？

闻教授：不同的教授有不同的方法。就我来说，首先要保证课题的先进性，最好是别人没做过的。所以知识背景你要了解，这个领域发展到哪个状态，哪个工作人家做过，哪个工作人家没做过，你都要知道。第二要保证它的可行性，研究的课题要符合实验室的实际条件。另外在知识使用上，也要做到比较独到，泛泛而谈在科研当中是没太大作用的。黄昆先生，也就是刚刚去世的国内的著名固体物理学家，他有个名言，大概意思是：“一个好的科学家，真正重要的是驾驭知识的能力，而不是知识的多少。”当然所储备的知识也很重要，知识固然是越多越好，但是在科研中要表现出驾驭知识的能力。比如钱学森先生，不仅知识渊博，而且他在驾驭知识的方面更为突出。没有驾驭知识的能力是不可能制造出平稳飞行的导弹的。驾驭知识的能力有的时候比你掌握多少知识更重要。

支点学社：我们听说在现在的科研工作中学科交叉现象很多，超导是不是也是这样？

闻教授：学科交叉很重要，也很有意思。我们是做物理的，但是跟材料学科交叉非常多。我们都会“烧材料，定结构，测物性”。做样品、分析结构，这都是化学的本事，现在我们也逐渐学会了。我本人和化学家、理论物理学家都有密切的合作交流。学科交叉是非常有利于科学研究的。

支点学社：那在学科交叉中，其他学科的知识您是如何学习到的？

闻教授：学科交叉的知识是慢慢积累形成的。比如说材料学方面的知识，我在大学里并没有学过材料制备的相关知识，大四的时候虽然有选修课诸如固体物理之类的，但也仅仅停留在书本知识的层面。后来到研究生期间做一些材料制备，渐渐觉得化学方面的背景知识也要掌握一些。所以就开始储备知识比如跟晶体学家去学习怎么分析它的结构等等。另外在超导这个领域内部，由于它研究的方面有很多，我们不可能把所有的方面都研究得很全，我们小组也只是在我们比较有特色的几个方面做得很好，在国际上有领先地位。别人在其他领域也在国际上做到了领先地位，然后我们就互相合作——也算某种意义上交叉——共同来揭示物理的规律。

支点学社：听说您在您上学期间就开始自制实验仪器，可以和我们讲一讲吗？

闻教授：因为实验的要求，有时会根据实际需要制备实验仪器。这个确实不容易，需要有自己的想法。在我们的实验室里，就有我设计的一种用于惰性气体和显微镜下操作材料的仪器。由于这种材料很容易在有空气和水的环境中反应，我就设计了一个有机玻璃的手套箱，这样作电极处理的时候，学生就能直接在显微镜下看见并操作样品。这种样品通常都很小，仅一个毫米，要在上面做六个电极，有一个手套箱，操作就简便得多。其实



在实际做实验的过程中，根据复杂的物理性质，如果自己设计一些探头、设备之类的，常常可以得到更好的实验结果，常规买来的设备一般是不能做到很符合实际需求的。

支点学社：教授您可不可以跟我们讲讲您在您这么多年的科研经历中一些印象很深刻的事呀。

闻教授：有一段时间铁基超导体的研究在世界范围内有很多研究小组进行角逐，我们小组便是其中一员。结果要非常快地记录并分析出来，然后在第二天早上四点之前贴到国际网站上，这样才可以声明自己是第一个发现的或做出来的。这个角逐非常激烈，所以我经常带着学生们工作到早上四点才回家，有的时候就不回家，直接在办公室里休息一会儿。当然那个时候很兴奋，学生也很兴奋。如果有了重要发现，你要及时地把你的成果写成文章。我们组在国际上有非常高的关注度，有一次报道铁基超导体的角逐，作者上来就用了我们的一个例子。这些都是让我们印象深刻的事情，也是值得高兴的事，到现在都记忆犹新。

支点学社：在您在研究中肯定会遇到瓶颈的吧？

闻教授：当然，这就需要毅力了，尤其对于我们年轻的学生。我现在就有一些学生，在组里做了一年了，做出来了一些东西，但是没有形成一个完整的“故事”，还没有最终的结论。这个时候就要继续努力地干活，努力地研究，开动脑筋。现在很多学生，吃苦还是可以的，让他干点体力活，比如做样品，给他指导一个思路之后，他就着手去做了。有的时候做得也是蛮苦的，我们组的学生还是比较刻苦的。晚上要测实验数据，他基本上也来测，但是动脑子方面就还不够，这是个问题。遇上瓶颈很正常，有些我们甚至永远都突破不了，实在突破不了那就只能暂时放一放。

支点学社：您说现在学生在动脑子方面下功夫不足，那么教授您觉得我们现在应该如何培养创新思维呢？

闻教授：你要经常提出问题，牛顿力学甚至都有问题，一切科研都是从问题开始的，提出问题往往比解决问题还重要。提出一个重

要的科学问题，继而需要一些可行的方法去解决，所以解决更多体现在“体力”上，而提出问题则体现的是“脑力”，即创新性的思维。做物理科学要有物理思想，在学习过程中要提问题。当然不能一个人闷头提问题，这样进程会比较慢。所以我们现在做科研，更多的是到国际上和别人交流、讨论。每次开会都是一个交流的过程，像美国物理学会每年举办的三月会议(APS March Meeting)，我从三十岁开始每年参加，这个会议就是大家的研究交流会，参加会议的科学家们，从早晨讨论到晚上。通过谈论，把一些问题逐渐搞清楚。你们学习也要这样，尤其是碰到一些困难的地方，有些知识点老师讲是讲了，但是你们不能完全理解，这时需要大家讨论一下。组织一个兴趣班，半个小时也许就够了，对某个问题集中进行讨论，比如为什么物体的速度不能超过光速，为什么低温有极限而高温似乎没有极限……物理学是很有意思的。像你学光学的时候就可以多问几个生活中的问题嘛，比如为什么游泳池的水是蓝颜色的，为什么天空是蓝色的，为什么早上的太阳看起来比中午的要大等等。一定要带着兴趣去学习。



支点学社：说到学习，在大学里，有相当一部分学生选择不上课，自己看书，他们觉得这样比上课听讲要效果好。教授您认为呢？

闻教授：我个人觉得，除非老师水平很差，一般来说学生还是要跟着老师上课的，简单一点的知识或许还行，但稍微深入一点单靠自学可能就接受不了。要知道我们在有些方面不一定有老师的理解深刻。学习不只是能推导公式，还要听取老师的知识背景。比如你不跟老师上课，老师讲个典故你就不知道了。

支点学社：很多学生都抱怨课太多了，没多少时间消化，只能一味接受。您对此怎么看？

闻教授：课堂的启发性很重要，不能只是灌输。就我个人而言，我也很惋惜当时学四大力学的时候，讨论比较少，没能体会量子力

学、热力学、统计力学的美，只是把那些习题做完了。这是很遗憾的，因为知识没有得到升华。大学知识的确很多，但是你不知道将来哪些知识你会用上，也不知道自己会从事什么工作，所以基础知识一定要学好。学习是一个由少积累到多的过程，到达一定量的时候，又应该由多总结到少。比方说电磁学，总结起来就是四个麦克斯韦方程，你灵活应用就行；力学大部分也就是牛顿力学，再加一点转动惯量方面的知识。我想那都是一些基本的概念。量子力学嘛，主要是波函数、几率。按道理也要会解一些具体的例子，比如用量子力学的基本观点来求解氢原子的轨道、能级等。我想如果你们课后多一些讨论的话，会对学习有很大的促进的。不要只是乏味地在那里接受知识，而要问“这个知识为什么这样”。可以进行各种讨论，甚至可以是幼稚的讨论，这都没关系，你们都还很年轻嘛，无所谓的。还有就是要在老师指导下对知识进行深入的理解，这绝对会对你们的学习有好处。

支点学社：教授您刚才提到了“物理学中的美”，能详细说一说么？

闻教授：大学的基本知识的确很多，但是事实是，你确实需要一步一步踏踏实实地去积累，知识不学到脑子里，是很难体会到物理学之美的。为什么会觉得美呢，因为我掌握了这本书里精髓的东西，通过积累将知识由点扩展成面。另外要保持浓厚的兴趣，不断地追求新的知识体悟，渐渐地就会产生物理是美的感觉了。

支点学社：教授您能跟我们说到现在为止给您留下比较深刻印象的学生吗，我们也想学习一下他们在科研方面的长处。

闻教授：比如我在中科院物理所有一个学生。他首先是脑子很清楚，在做实验的过程中知道自己该怎么去做。第二个是实验室的公务的事情，他把实验室当成自己的家，比如我们实验室大冬天要从仓库绕一圈推一罐液氮，一推就要一个小时。其实液氮也不只是他在用，但是他把集体的事情都当成自己的事情，公共的事情责无旁贷地承担。我在组里一直贯彻着这个思想，所以我们组一直有战斗力，就像带兵打仗一样，一支有战斗力的队伍首先是有集体精神的队伍。

支点学社：我们在大学阶段多多少少都会产生一些迷茫，所以我们很好奇教授您是在进入大学之后就对自己的未来有规划了吗？

闻教授：都是命运使然吧，大学期间我也是懵懵懂懂的，甚至在大一大二大三的时候都没想过以后，那时候的想法是走一步是一步，只是把知识学好。到大三的时候我参加了一个CUSPEA计划，是由李政道发起的，每年在中国招收100个物理系的研究生到美国去培养，我们学校搞了一个小班，我有幸被选了进去。但是我的英文基础比较差，虽然专业成绩达标了但是英文没过，所以没有被录取，但是在这个过程中我的英文提高非常快。我自己还是比较喜欢英语的，所以我作报告和讲课都用英文，在组里讨论我也提倡用英文开组会，也有利于学生提高英语水平。

支点学社：您是在什么时候决定要从事科研的呢？

闻教授：研究生之后就决定要从事科研了，我一路走来也算是比较顺利的。博士毕业之后到荷兰做的博士后，然后就回国在中科院物理所超导国家重点实验室工作，96年我就被评为物理所的正高职（相当于大学正教授）了，当时我大概也就三十二岁，算是比较幸运的。这期间我到德国做了一次“洪堡基金学者”研究计划，之后回国在组里做出了一些成绩，然后很快就担任了超导国家重点实验室的主任。在2011年初，在南京大学领导和老师，像陈校长、闵乃本先生、邢定钰先生的感召下，我就调到南大来了，很快建立起一个小组，现在已经建立得差不多了。我个人的发展过程几乎没有断档，衔接的比较好。总结起来，我觉得把每件事做好是非常重要的。不要觉得很苦，大学也就那么多知识，但是像高中那时候死记硬背的方法是要抛弃的，要真正地学到知识，利用这些知识去解决问题，而不是一味地做题。



支点学社：现在很多学生不愿意做研究，从您的亲身经历来看您觉得做研究会不会很清苦呢？

闻教授：当然是要看选择什么样的人生了。现在大学毕业找工作也不容易，一般学物理本科毕业就会选择读研究生，研究生毕业后有两个选择：进公司或进研究机构（或大学）。进公司呢，大部分人觉得在公司里很乏味，除非在公司的科研方面能够体现你的创新思路或者你的本事来。当你们到了三十岁或者博士毕业的时候，你就觉得你应该做点有意义的事情，而不只是局限于上班和拿一个比较高的薪水。我的一些学生吧，到了公司里就觉得很郁闷，老板派他到机场接人，陪人吃饭，这是在公司里经常做的事情。但是既然到了那个岗位，你就要去接受这个现状。如果你选择教书育人呢，你现在就要把知识学好。做研究说清苦呢也不是太苦，年轻的时候吃点苦也是好事。研究阶段更多的是在大学或研究机构进行，这个时候就要体现创新精神，现在国家对于这方面工作人员的待遇也是不错的。如果你能到这样一个位置，生活上就已经基本满足了。事实上，每行每业都有苦水可诉。所以说呢，人生要吃苦，直到有一天你能做到苦中有乐。有些人可能觉得我很苦，但是我并不觉得自己苦。

支点学社：因为我们很多人都有读研的打算，您能简单地和我们介绍一下导师是怎么带学生的？在研究过程中是主要提出研究思路吗？

闻教授：导师一般是要具体到思路的。我每天都要到实验室去，有时我还亲自跟学生们比试比试实验手艺。我喜欢在实验室干活，但是很遗憾，到我这个职位之后我不可能天天待在实验室，有很多文章要改，要跟评审人 argue，要去参加学术会议，等等。

支点学社：您觉得学生在国内和国外读研有差别吗？

闻教授：我感觉不仅没差别，而且在国内条件可能还更好，出的成果更多。我的很多学生在我们的组里，都是有好多篇文章在美国物理学会杂志上发表，到了美国反而出东西慢了。国外条件跟我们几乎一样，我们抓得又紧，学生们干活也卖力。所以说实在的，至少在超导这个方向上我们和国外是平起平坐的，国际上对我们的研究也是非常认可的。

支点学社：您说您个人对研究 push 得比较

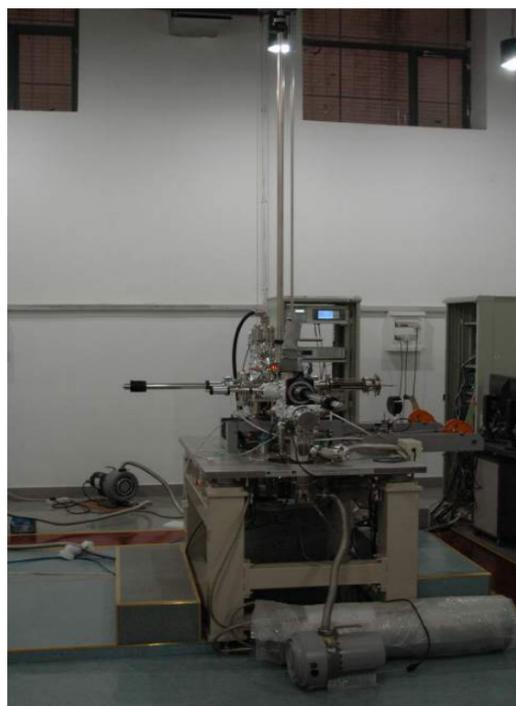
厉害，那您平常对学生严厉吗？

闻教授：对无所事事、不专注在研究上面的学生，我会批评的。但是我都是善意的批评，到毕业的时候他们都非常感激我。因为学生一方面没有经验，另一方面也会有点偷懒。我很关心学生的发展，对他们每个人的研究进展我都很清楚。

支点学社：在最后，您能对我们这些学习物理的本科生提一些建议吗？

闻教授：说实话，我挺羡慕你们。你们能够进这么好的学校，有很多优秀的老师，他们在很多领域都做到了国际前沿，因此你们的视野也会开阔许多。但是呢，要把知识真的学到脑子里，要重视物理概念，努力学习，创造一个美好的未来。希望等到你们四十岁再回头看的时候不会后悔。人到了四十就会反思过去，想着“自己年轻时候应该再努力一点就好了”，这些后悔的东西要尽量避免。现在要勇往直前把知识学好。我想你们每个人的未来都会是很美好的。

支点学社：感谢您抽出宝贵的时间接受我们的采访！



## ——于扬教授访谈

采访／撰稿 郭泰然 顾书轩 杨东昕 杨嫣烨

# DEAD OR ALIVE





于扬教授（中）简介

教授，博士生导师。2002年毕业于美国堪萨斯大学，获博士学位。2002—2005年，美国麻省理工学院博士后。2005年获教育部长江学者特聘教授。从事超导量子器件研究，包括宏观量子相干，超导量子计算，约瑟夫森结的非线性效应。

## 前言

诺贝尔奖的宣传效应无与伦比。

也许你我两个月前尚不知 Serge Haroche 这位法国人以及 David Wineland 这位大胡子，但现在，作为获得诺奖的物理学家，他们在咱们物理学界内也算得上盛名远扬了。诺贝尔奖的官方评价是“他们突破性的实验方法，令操控和测量单个量子体系成为可能”，其中提及的“单个量子体系”，就是 Haroche 用光学微腔囚禁的单个原子，以及 Wineland 用 Paul 阱囚禁的单个或少量离子。

他们两人的工作属于物理学三个最大的领域（粒子物理，原子分子和光物理，凝聚态物理）中的“原子分子和光物理”部分，简称 AMO。其中有关分子物理学的主要课题习惯上都被归属到化学领域，于是留给物理学家的主要是原子物理和光学，最热的方向是激光与原子的相互作用。不同于粒子物理学那样魅力无限地研究物质世界最基本构成，也不同于凝聚态物理学那样一直展示着令人激动的应用前景，原子分子和光物理处于一个尴尬的“夹心”地位，无法像另外两个大方向那样吸引众多的目光。

不过 Haroche 和 Wineland，连同 1997 年朱棣文等和 2001 年 Ketterle 等人的得奖，

标志着原子分子和光物理（AMO）的最大特色——量子操控，得到科学界的肯定。虽然它没有像粒子物理那样剖析物质世界最基本构成，也没有凝聚态物理那样尝试超导技术和纳米技术等改变世界，但是它通过利用人类已经充分了解的原子和光子来制造理想干净的量子系统，不但成为了量子信息和量子模拟的最佳选择，同时也提供了精密测量各种物理量的最佳环境。

事实上，我们中国人也在从事这项研究，于扬教授就是其中的翘楚。

于教授在国家实验室的所在地接待了我们一行四人。于教授那并不宽敞的办公室被研究生办公室三面环绕着，天井内的阳光斜射在书柜的玻璃上。室内四壁上挂着黑板，上面的希腊字母，数学公式，大约记载着这个研究团队负责人源源不断的思绪。在那张只用电脑与书籍装饰的桌旁，我们开始了谈话。

## 一．量子力学 我们的所知，我们的未知

支点学社：教授您好。我们都很关注此次的诺奖，据说此次获奖的成果对量子计算机的研究有重要意义。请问在量子计算机背后隐

藏着怎样高深莫测的原理？

于教授：简单地说，量子力学基于几个假设。有的假设人类只能说，是的，它应当有，但至于为什么，我们自己也尚未明白，这或许也就是量子力学至今仍吸引众多世界上最优秀的科学家的原因。而你们现在所学的经典力学，虽然对于宏观物体相当有效，但在数百年来被研究地已相当充分，所以受关注度就不会那样大了。

量子力学的态矢量假设可以这样说：伴随任一孤立的量子系统有一个复矢量空间，数学上叫它希尔伯特空间，系统的运动完全由这个空间中的单位矢量——态矢量描述，组合量子系统的态矢量由它们的张量积得到，因此随着系统数目增加，态矢量空间维度按指数形势迅速增加。希尔伯特空间可以有无穷多维。计算需要资源，传统计算机是三维的，而三维世界的资源是在单位体积内是有限度的。那么我们说无穷多维的量子系统用来做计算可用的资源当然也称得上取之不尽，用之不竭了，速度也会快得多。现今的计算机，最小的携带信息单位是一个位，置 1 或清 0。而量子计算机里，最小单位是一个量子位，它除了处于“0”态或“1”态外，还可处于叠加态（superposition state）。叠加态是“0”态和“1”态的任意线性叠加，0 和 1 态前面的 2 个系数可以用来存储信息。一个简单的比较，传统计算机中的 2 位寄存器有 2 个存储信息的单位，在某一时间仅能存储 4 个二进制数（00、01、10、11）中的一个，而量子计算机中的 2 量子位（qubit）寄存器可以是 4 个基态的任意叠加，4 个态的系数用来存储信息，就可以同时存储四个数。同理，3 量子比特有 8 个系数，如果有更多量子比特的话，存储能力就呈指数级提高。另外量子计算机对态进行处理，就是同时对所有的系数进行操控，系数是 2 的 n 次方个，n 是量子比特的位数。量子计算机如果有 500 个量子比特，就相当于在每一步作  $2^{500}$  次运算。这是一个可怕的数， $2^{500}$  比地球上已知的原子数还要多，这是真正的并行处理，当今的经典计算机，所谓的并行处理器靠增加处理器的个数，但三维空间资源有限，难以和量子并行匹敌。

支点学社：看来量子计算机前景无限光明啊。可是为什么从理论到实际产品的道路这么艰难，其中的瓶颈在何处？

于教授：这要考虑到两个基本假设，一个是

前面说过的态矢量假设，还有一个测量假设是这样的，你测量一个状态得到的结果是态在任意基上的塌缩，也就是种投影，比如说测量三维的空间的态矢量，测到的是 xyz 轴上的投影，不过测量后它也就固定在这个轴上了，变成本征态，这是我们熟知的经典状态，比如你常见的石头，没人说石头是多个状态叠加吧。简而言之，测量即改变。

但我们做一个机器，让它计算，我们必须控制它，如果我们用外加信号控制它，就干扰了它。对于经典计算机，它本身就是处于本征态，给它干扰也没什么。不过量子计算靠的就是与外界隔绝的量子态叠加性，你干扰它，它就无法保持叠加态，无法进行计算。一种可能的解决方案是，可以需要的时候对它进行很弱的接触，不需要的时候不接触，很理想不是么？但很难做。设想有一个量子开关就好了，但这样的开关系统本身也需要控制信号。

因为有诱人的应用前景，再困难我们也会去探索。人们研究一般都会从之前成功的事物出发。由于传统计算机发展到很高程度，我们对于量子计算机大约也是想搞成那种模样，有个输入端，有个处理器，有个显示端，但具体怎么弄，没人完全清楚。现在比较靠谱的、能动手去实验的也就五六种，其他的方案目前依旧只是说说而已。正在实验的方案之一就有今年拿诺奖的物理学家提出的，他们用的是离子阱，可以排列少数的离子，但离子太小了，排不好就跑了，想要束缚成百上千的离子让它们耦合，让它们计算，谈何容易？

由于传统计算机是集成的固体器件，人们自然也希望能量子计算机集成化、固态化。比如，想把前面提到的离子束缚到芯片上，毕竟以半导体为代表的固体的研究是有巨大成果的，大家想用硅片做些超导电极，然后加磁场，让电流把离子束缚住。而我们小组的研究改变更加彻底，把离子也换成人工的“离子”——一些 LC 量子电路，可以等效成固化的离子，很容易控制，尺寸在  $10^6$ ，比较大，显微镜看得见，工艺上用半导体的现成工艺。这算是一种热门方案。

不过话说回来，大家的方案各有长短。诺奖的做法保持相当好的量子叠加性，但缺点是控制不易，搞成大规模的量子芯片还有一定难度。我们的做法可以有很好的控制性，相对来说更容易把量子排起来，缺点就是量子叠加性不好，因为尺寸太大。现阶段量子计算机研究处于初期阶段，大约有十几年时

间,从1个到2个固态比特,我们2010年的实验实现三个固体比特相干的控制,是较大的突破。现在在做另外一个突破性实验,已有一些进展。

## 二. 关于物理学 我们的现状, 我们的未来

支点学社: 刚才和教授聊了这么多有关量子的专业话题,我们真是受益匪浅。我相信,作为一位成功的科学家,教授的生活经历也一定能给我们许多的启迪。我们注意到教授您曾经有过一段在MIT的学习经历,请问您在MIT学习期间感触最深的是什么呢?

于教授: 这一段经历,让我感触最深的不仅仅是MIT这个学校,更是麻省理工的那些学生。先谈谈学校吧。MIT有着很强的学科交叉意识,系的概念很模糊,比如我的老板是做物理的,但是我在电子系,我们组还有来自物理系的,电子系的,机械工程系等等的各位组员。大家都对一个课题感兴趣,就组成小组,在同一个办公室做研究。这样的分组保证了一定的学科交叉性,让不同领域的人才通过不同的视角审视一个课题。相比较而言,我们的学科管理、设置条块分明,交叉更多流于形式。

再者就是麻省理工的学生有着更好的科学素养训练。比如在做实验记笔记的时候,我们的学生往往记录不够认真,而MIT的学生就能将实验步骤、数据记录得精准完备。做科学一定要有仔细记录的精神,因为也许在当时自己并未能研究出成果,但是记载下来的数据对于后人来说也是重要的文献资料。这一点在第谷和开普勒身上就得到了完全的体现。特别需要强调的是,在实验中即使是失败了的数据也是值得记录的,而且有可能比成功的结果更重要。我们的学生常常因为得到的数据与预期不符便放弃数据记录,这是我们国家培养的弱点,也是近代科学没有诞生在中国的重要原因之一。国外对数据处理就很严谨,学生们在做科研时也是一步一个脚印、踏踏实实地走。在每周的Group Meeting上,学生都会把自己的最新进展展示给大家,分享自己或是成功或是失败的经验。严谨的科学精神和开放的交流精神,我想这就是MIT给我的最深的感触了。对于我国目前状况,我想说的是重要的不是科研成果而是科学态度和氛围,态度和氛围好了,成果便是水到渠成。否则天天追逐诺

奖,诺奖却越来越远。

支点学社: 您刚刚有提到我国学生和MIT学生在学术方面的对比。那么您认为是国外教育和国内教育在哪些方面的不同导致了学生之间的差异呢?

于教授: 首先,国外的教育相较于国内更加自由,特别是本科。每个学期,学生们可以自己选课,自己安排学习。学校有一个由教授组成的建议团,可以为学生提供学业安排上的指导和建议,但最终的课程还是由学生自己决定的。本科按照学分制收费,学生可以留下名额但不修课,只要交个住宿费即可。他们甚至可以用一个“间隔年”周游世界或是做自己想做的事情。而我们的课程安排相较于国外就明显不够灵活,缺乏学生主观意志的体现。比如有些学物理的学生高中选专业的时候自己并不知道兴趣在哪里,在进入大学之后才发现自己其实对物理并不感兴趣。对于这样的学生,国内的体制就会在一定程度上限制他的发展。第二点就是国外有着非常活跃的课堂气氛。同学们可以随时打断教授讲课并且提出问题。这样的气氛给了他们挑战权威的勇气,而这恰恰是我们缺少的。我记得耶鲁大学有一位名教授曾经说过“No stupid questions, only stupid answers”。我们学生的创造力从小就被压制,导致了没有人敢质疑。在科学研究中,我们需要质疑的能力,因为没有错误就没有创造,创造就是在犯错误中不断改正,不断前进。

支点学社: 的确,学生创造力被压制和扼杀的现象在国内非常普遍。也受到了广泛的关注。我相信在不久的将来,随着教育体制的改革,这样的状况会得到一定的改善。那么放眼当下,您认为我们国内科研和国外的差距还有多大?主要的障碍又在哪些方面呢?

于教授: 我们国内科研与国外还是存在一些差距的,但是我们正在逐渐赶上,有一些领域甚至可以走在世界的前列。像潘教授的量子信息通讯,基本已经是世界领先水平。在超导方面,由于国外对超导研究支持的下降和我国坚持不懈的投资,我国在超导研究方面已经跻身世界前列,并且举办了一系列最高规格的超导国际会议。众所周知,物理是个实验为基础的学科,我们是实证主义的,现代物理实验美国人已经做了100年,日本人已经做了60年,而我国开始真正投入物理

实验仅仅只有十年。我相信随着时间的推移,我们会弥补上历史造成的差距。谈到主要的障碍,那就是人才了。现阶段我们的科研需要你们年轻一辈的孩子,你们应该出去看看,然后带着知识和新鲜的思维应用于研究。同时,我们还需要更加宽广可靠的研究基础。比如现在的研究已经到达纳米级别,很多材料都需要微加工,这个时候我们就发现在国内购买这些实验器材比较困难。还有管理方面也需要进一步规范。当然这也是可以理解的。科学研究需要长期的积累,我相信在未来的几十年,中国的科研水平会有一个长足的进步。

支点学社: 说了这么多对物理科研的剖析与希望,于教授能不能也为我们物理系中很多不走物理科研道路的同学提一些建议呢?

于教授: 其实大学阶段最重要的是培养能力。我们物理系培养出来的学生,在本科毕业之后应该具有很强的学习能力和抗压能力。真正可以学得好的话,以后对什么有兴趣的话就去学吧。每个人都有自己的人生道路,但是学物理一定会给你的人生带来很多收获。

支点学社: 是的,在南京大学物理学院的学习一定会在我们生命中留下深深的印记。感谢于教授对我们的激励,我们将带着您的祝福,在人生道路上坚定而又执着地前行。

### 附一. 量子力学基于几个假设:

- 1、描写微观态的数学量是希尔伯特空间中的矢量,相差一个复数因子的两个矢量描写同一个状态。
- 2、
  - 1) 描写微观系统物理量的是希尔伯特空间中的厄米算符;
  - 2) 物理量对应算符的本征值;
  - 3) 物理量的概率和系数的复平方成正比。
- 3、位置算符和动量算符对易关系为  $[x, p] = i\hbar/2\pi$ 。
- 4、微观系统的状态随时间变化满足薛定谔方程。
- 5、描写全同粒子系统的态矢量对于任意一对粒子调换之后要么对称(玻色子)要么反对称(费米子)。

### 附二. 关于薛定谔的猫

量子力学描绘了一个肉眼无法观测的微观世界,很多与我们的期望和在经典物理中

的经验相反。量子世界本身具有不确定性。例如叠加态,一个量子可以有多重形态。我们通常不会认为一块大理石同时是“这样”也是“那样”,除非是一块量子大理石。叠加态的大理石只能确切地告诉我们大理石是每一种形态的概率。

我们在日常生活中为什么观察不到叠加态,随机性的这些方面?奥地利物理学家及诺贝尔奖获得者(1933年)欧文·薛定谔争辩道。正如其他量子理论先驱,他试图理解和阐释这些现象。1952年,他写下:“我们从来没有用一个电子、原子或者其他分子做过实验。在思想实验中,我们的假设,这总是导致可笑的后果……”

为了说明将我们的宏观世界间思想实验移动到微观量子世界可能产生的荒谬的结果,薛定谔描述了一个关于猫的思想实验:薛定谔的猫被放在一个与周围环境完全隔离的箱子内。这个箱子内有一瓶致命的氰化物,还有一些处于发射状态的放射性原子衰变。放射性衰变遵循量子力学定律,因而它处于发射和未发射的叠加状态。因此,猫处于活着和死了的叠加状态。现在,如果你窥视箱子内部,你等于杀死了猫,因为量子叠加态对环境作用非常敏感,观察猫的瞬间,猫的“世界线”会“塌缩”到出现死或者活两种结果中的一种。在薛定谔看来,这个思想实验导致了一个荒谬的结论。它在说明他应当向出现的量子道歉。

2012年的两位物理学奖获得者能够映射到当外界环境参与时量子猫的状态。他们设计了创新实验,详细说明观测这一行为实际上如何导致量子状态的崩溃并失去其叠加特性的。阿罗什和维因兰德并没有用猫,而是将势阱中的离子放入薛定谔假设的叠加态中。这些量子物体尽管宏观上没有猫那样的形状,但相对于量子尺度仍然足够大。

在阿罗什的空腔中,不同相位的微波光子被同时放置在像猫一样的叠加态中,像同时有很多顺时针或逆时针旋转的秒表。空腔用Rydberg原子探测。结果出现了另一个难以理解的称为纠缠态的量子效应。纠缠也被薛定谔描述过,可以发生在两个或多个量子之间,他们彼此没有直接接触,却可以读取或影响对方的属性。微波场中量子的纠缠态和Rydberg原子的运动让阿罗什映射生活和死亡的猫一样的状态,进而一步一步,经历了从量子叠加态到被完全定义的经典物理态的过渡。

## 走进南大声学所

——邱小军教授采访

采访 / 撰稿 程心坤 黎颖 倪正阳

南京大学声学研究所简介：

南京大学声学研究所的前身是1954年由魏荣爵教授创建的国内首个声学教研室——南京大学声学教研室。1978年经国家教委（现教育部）批准，扩建为声学研究所，是我国高校中主要的声学教学和科研基地，拥有国内唯一的声学本科专业和国家重点学科。首任所长为中国科学院院士魏荣爵教授，继任所长为中国科学院院士张淑仪教授，“国家杰出青年科学基金”获得者程建春教授，现任所长为邱小军教授。目前全所拥有教师36人，其中正副教授26名，“国家杰出青年科学基金”获得者2名，“长江学者奖励计划”特聘教授1名。

近年来，南京大学声学所先后承担了国家“攀登计划”项目子项目1项、国家“973工程”项目子项目2项、国家自然科学基金重点项目3项和面上基金项目30余项、国家杰出青年科学基金项目2项、教育部跨世纪人才项目4项、教育部博士点基金10项、江苏省自然科学基金、科技攻关项目和其他部委项目数十项。

南京大学声学所自成立以来，得到教育部、科技部和江苏省政府的大力资助，尤其在南京大学“211工程”和“985工程”等国家重大项目的支持下，声学研究所整体科研教学环境得到大大改善，科研水平显著提高，已经成为学术气氛浓厚、科研设备先进、国内一流、国际著名的声学研究基地，在国际上享有很高的学术声誉。

邱小军教授简介：

南大声学研究所现任所长，物理学院声科学与工程系教授（博士生导师）。

1989年和1992年分别于北京大学无线电电子学系获得本科和硕士学位，1995年于南京大学信息物理系暨声学研究所获得博士学位，1996年底赴澳大利亚Adelaide大学机械工程学院工作，聘为研究员（Research Fellow）。其主要研究方向为DSP开发应用、声信号处理和音频声学（电声、噪声、建筑声学、心理声学）。主要学术任职包括：江苏省声学学会理事，江苏省环境科学学会理事暨噪声与振动专业委员会主任，中国声学标准化委员会委员，中国建筑学会建筑物理专业委员会理事，中国环境科学学会环境物理专业委员会理事，国际音频工程学会（AES）会员，国际声与振动学会（IIAV）会员，第6和第7届国际有源控制研讨会科学委员会委员和《声学学报》编委。

我们支点学社一行人很荣幸地邀请到了南大声学所的邱小军教授接受我们的采访。

支点学社：老师，声学在普通人看来似乎就只是研究声音的学科，我们查阅了资料后才发现它是一门综合性很强的学科。作为一个声学研究者，请您给我们简单地介绍一下声学。

邱教授：好的。这么讲，先说说声学的历史。声学本来是物理的一个分支，后来由于它发展的比较成熟，就从物理学里单独分出来作为一门独立的应用科学发展。这就好像一个孩子，长大了之后就要自立门户了。不单单是声学，像电子，光学，计算机，信息工程等等，都是这样的。至于南京大学的声学，一直都是全国最强的。也是因为发展得很好，而且它的一些发展方向和物理学院的方向很不一

样，所以南大在84年的时候，以声学为主，成立了信息物理系。后来信息物理系又发展成电子工程学院。那么为什么后来又回去了呢？那是学校的布局。我们南大的物理一直是全国第一。微电子更偏向于电子，就把微电子调出去了，这就需要有一个非常强大的力量来补充，于是又把声学请了回来。但是声学作为一个相当成熟的学科，它的重点还是在于应用。

支点学社：声学的应用都有哪些呢？

邱教授：声学里发声、传播、接收，全都搞清楚了，那接下来就是应用。人类出现以来有几大重要的发明大家都知道，电话、手机、

这都是能听见的声音；另外还有听不见的声音，例如：B超、声呐，甚至还可以利用声音来探测芯片好坏。所以它的应用是很广泛的。我前一阵子参加一个声学论坛，其中生产声学产品的一个上市公司的董事长就说：声学不是朝阳产业，但永远不会消灭，除非没有人类。另外，声学和别的学科交叉也是很广的。比如人是怎么感知声音的？微软和IBM投了很多经费去做人工智能，人工智能的关键在于人与机器的自由对话。但是，人是怎么理解声音的，这还不是很清楚。

支点学社：我们南大声学研究所的研究方向主要在哪里？

邱教授：研究所主要有5个方向。第一块就是经典的，我们叫物理声学，以研究物理规律为主，这里头有一位长江学者王新龙教授，他主要在研究像量子、混沌之类一些本质的物理现象。然后第二块叫光声学，光声学以张淑仪院士为代表，这下面又有两个做超声的，一个是做医学超声，一个是做超声电子器件方面的。然后是音频声学，音频声学有建筑声学，噪声学。接着是语音信号处理，那么这就涉及到刚才提到的人机对话。还有个心理声学。

支点学社：心理声学是什么？

邱教授：心理声学就是人怎么去感受声音。人听声音时有很多奇怪的现象。为什么男性的声音比女性的声音低？为什么有的声音你听不到？为什么Mp3格式的音频文件能够存储那么多信息？以前一张光盘只能存几首歌，后来发现人听声音的时候有很多信息会被忽略掉，我们压缩音频的时候就可以把它做得更小，这些都是心理声学的应用。我们在大一开了一门新生研讨课，课上就让学生来做实验，看人在特别安静的环境下会有什么反应。

支点学社：在国际上南大声学所都和哪些机构有交流？

邱教授：国际上声学做得好的基本上都和我们有联系，我们的很多学生在他们那里当教授。比如说澳大利亚做得比较好的有潘杰教授，在美国的也有。南大去年主办了一个“国际声学研讨会”，国际上做声学的很多著名研究者都来了。中国研究声学做的比较好的

就南大了，还有北京的中科院声学所。美国研究声学的机构大概就三四家，我们互相都认识，大家关系也很好，交流很紧密。

支点学社：南大声学本科生的情况又是怎样的呢？

邱教授：做为学科来讲，声学是一个小的领域。每年我们学声学的学生大概就四五十个。而且外面的单位也很想要，比如说本科生毕业了，很多单位甚至招不到。他们有时间问我们为什么不多招点学生，我们也没办法，因为教育部就给那么几个名额。国内主要声学单位大部分都是我们南大的人，比如说前中科院声学所的所长，现在同济大学声学所的所长。

支点学社：老师，很多同学比较关心我们将来是走就业还是科研这条路，那您能给我们本科生一些建议吗？

邱教授：其实本科生找工作时你会发现企业看中的并不一定是你的专业，而是看学校。所以我们南大的学生一般不愁找工作。像对我们声学系的学生，相对来说一些专门搞声学的企业要的人会比较多，但我们的学生还不怎么去那些企业，他们一般会去比如电子信息类的公司，如中兴、华为，因为他们给的待遇比较高。当然也可以去外企，比如三星。

支点学社：那我们去了一般能做什么呢？

邱教授：等你学到大四你就知道了，我们的学生去了能做很多事，因为你会发现大学教你的的是能力，知识的话掌握好就行，等你们到了公司里他们会进行培训的。

支点学社：那声学系学生如果出国的话，一般会去哪些国家呢？

邱教授：我们系的很多学生都不愿意出国。虽然我们跟国外很多大学有这样那样的合作关系，但他们都不愿意去，他们比较喜欢就业。可能因为找到的工作比较好。所以出国方面声学系不很积极，硕士以上学历的基本上都是外校生了，南大的基本都跑光了，都跑去就业了。

支点学社：那老师，也就是说我们声学系的

研究生、硕士生有很多条路走，而我们辅导员给我们讲，学物理的搞研究的比就业的要多，这跟声学系的情况差距很大啊。

邱教授：是啊，也是因为声学这门学科太成熟了，应用性非常的强。所以你想搞研究的话，可以去学凝聚态什么的，而如果你想搞什么发明创造的话，声学是一个很好的舞台。声学是很偏重应用的。它的基础理论 19 世纪就基本成熟了，都要编成一本大书了。它的理论很简单，但当涉及到应用的时候，就要视具体情况而定了。

支点学社：那声学系的学生有一部分也要考博士，他们做的是什么呢？

邱教授：我们的博士生也是偏应用的，甚至我们的博士学位是分两类的，一类叫声学，一类叫做信号处理。

支点学社：感觉跟电子系差不多呢。

邱教授：以前南大电子系中，声学占主要力量。而像我带的博士生以及我的专业都是信号方面的。中国信号处理最强的单位有两个，一类是做声学的，以声呐为主，一类是做雷达的。所以说声学的范围非常广，一类是做物理研究的，去解决少部分遗留的问题；一类就是做应用的。而应用这一块领域的范围比物理基础研究相对广一些。

支点学社：那做声学的要不要学别的学科，比方说凝聚态什么的？

邱教授：我就完全不懂什么凝聚态，我们声学的学生大部分都是去做创造发明的。声学已经很成熟了，学了声学你也可以去做别的。比如我们物理学院有几位教授是做声子晶体的，那些就是往物理方面靠了。你有了基本的声学背景，找工作就不愁了，而如果你要想再搞科研，那你只能自己去补一补相关知识。

支点学社：那学理论物理的就好像是揣测上帝的思想，而做声学的就更像是学着上帝一样去创造，是吗？

邱教授：首先理解上帝是怎样创造的，然后自己去创造。但上帝是怎么创造的，我们是学不了的。我们想办法理解自然界的那些现

象，然后我们掌握了规律进而用于创造。

支点学社：那老师你研究声学这么多年了，能不能给我们谈一下您的经历以及在研究道路上的一些心得体会呢？

邱教授：我做声学从本科博士一直到现在，也已经 20 多年了。做了这么多年的声学，我依然感觉很有乐趣。因为你总在帮人解决问题。我们做了大量的项目都是来自于公司，比方说，我昨天刚从韩国三星回来，他们就碰到了一个声学上的问题，他们和我们合作，一起去攻克这个问题。这些问题做多了，你会发现每天都会接受许多挑战，这些挑战不是来自于你的内心，而是来自于生活，来源于科技前沿。但比较可惜的是我们没有什么很重大的科学发现，这是比较遗憾的。我们做声学的老师中一些偏物理方面的也会有一些重大科学发现，但做应用的会相对少。

支点学社：老师，相关的企业如果有问题的话就会来咨询我们这边的老师吗？

邱教授：有时是，他们过来我们就直接给他们答案，而有时候是跟他们合作，一起去解决一些问题的。

支点学社：邱老师，您能对现在大一大二的学生提出一些关于选专业以及学习方面的建议吗？

邱教授：大一大二的学生关键是要把基础打牢，把成绩搞好，把学分绩搞好，至于其它什么，都不重要。关键是把目前能做的事做好。如果想学声学，也不要过分纠结于现在学习的东西是否和声学有关，一定要先把学习搞好。一个人无论做什么事都要把它做好，要努力做到出类拔萃，让优秀成为习惯。将来你选什么，那要看你的兴趣。但仅仅有兴趣是不够的，你还得有能力的，所以大一大二的学生一定要把功课学好。你们并不用太早想专业的事。当然，在保证成绩很好的基础上，你们也可以提前跟某些老师联系。并且，选择声学或其他专业并不代表你以后就要从事相关行业的工作，像今年声学毕业的学生，有些就进了银行，做公务员，甚至自己开店。所以就像刚才说的，努力奋斗，让自己无愧，让优秀成为一种习惯。

## 热烈庆祝 2013年度国家最高科学技术奖 由我校著名校友获得



**张存浩**院士于1947年毕业于南京中央大学（南京大学前身）。他是中国著名物理化学家，中国高能化学激光奠基人、分子反应动力学奠基人之一，长期从事催化、火箭推进剂、化学激光、分子反应动力学等领域的研究，取得多项国际先进成果。

**程开甲**院士于1952年被调到南京大学物理系任副教授，投入金属物理教研室筹建和金属物理专业建设的工作中来，编写金属物理和固体物理等教材，亲自上课讲授。1959年，出版了我国第一本《固体物理学》专著。1958年，与施士元一起创建南京大学核物理教研室，又接受任务创建江苏省原子能研究所。1960年，接受任务进行原子弹研究。



---

上帝的骰子掷向何方，  
小谔的猫咪何去何从？

量子的图像莫非骗局，  
物理学的未来远在天边？

阅读支点，  
给您不一样的体验！

---

■ since 1999

