



**Q:** 非常遥远的星球，是如何确定元素组成的？

**A:** 通过分析元素特征光谱来实现的。量子力学告诉我们，原子的核外电子分布且只能分布在一些分立的轨道上，不同轨道能量不同，电子在不同轨道之间跃迁时，能量的差值表现为放出或吸收相应能量(频率)的光子。当原子放出光子时，其对应的光谱是一组离散的亮线(发射谱)，反过来，当原子从连续的光谱背景中吸收光子时，将在背底上留下一组离散的暗线(吸收谱)，频率位置和发射谱亮线一一对应，这样的吸收谱或发射谱就是元素的特征光谱。不同元素原子的特征光谱是唯一的，对于已知元素的光谱我们已知。在收集来自星体的光谱之后，分离出其中的特征光谱与已知光谱加以比对就可以了，这样的光谱分析方法精度极高，除了用于确定元素组成外，也是辨别新元素的重要手段。

**Q:** 仅仅在地球上发现的物理规律，怎么就能说明整个宇宙都遵循这个规律？

**A:** 这是一个好问题。毕竟人类目前生活的范围仅仅是地球(充其量太阳系)，这个范围相对于浩瀚的宇宙实在不值一提，凭什么说我们的物理规律就适用于整个宇宙呢？

在发现物理规律的过程中，物理学家遵循的是经典的“假说—演绎”范式，即猜想一个物理学原理，从中推导出一些可观测的现象，再通过实验验证是否成立。这里的实验不一定局限在地球上的实验室里，宇宙本身就是一个大实验室。通过观测太阳系中天体的运动，我们可以肯定牛顿万有引力定律在太阳系的范围内是(近似)有效的；通过提高观测的精度，甚至可以验证广义相对论在太阳系范围内成立(水星进动角的计算)。对于遥远的恒星，我们可以观测其光谱，从而说明量子力学规律在极大的范围内成立。通过这类光谱观测，还能确定宇宙中元素的丰度，从而验证一些



\* Q&A 选自中国科学院物理研究所微信公众号每周五发布的《问答》专栏。受篇幅所限，这些答案难以尽善尽美，欲深度了解其中缘由的读者请同时参阅相关专业书籍。

更为基础的理论(例如大爆炸)的正确性。

同时，对于宇宙的观测，确实能对物理学的发展起到重要的推动作用。粒子物理标准模型预言中微子具有零质量，但正是通过对太阳中微子的观测，人们发现了三代中微子振荡现象，确定了中微子具有非零质量。目前理论物理上空的“乌云”之一——暗物质猜想，也正是基于对远处螺旋星系旋转角速度的测定而提出的。

所以说，物理学家总是倾向于相信，在地球上的实验室里发现的物理规律，也适用于宇宙的其他角落，这是基于经验的一种朴素信仰，但其正确与否，还是要依靠宇宙学的观测来检验。

**Q:** 为什么火星上的山可以那么高？

**A:** 地球内部有一个巨大的有放射性元素的核心在不断衰变并放出热量。这股热量在地球诞生以来，一直不停息地通过推动板块的形成和移动来造山。因此，对于火星来说，有山说明至少在遥远的曾经，这颗星球上一定也有过板块构造、火山地震。

在板块不断碰撞造山的同时，地球上的风、水、冰等等，一直在剥削侵蚀着山体。地球上所有的山，都是在造山的增高效应和侵蚀的降低效应中动态且瞬间的产物。而火星的大气(至少近期)已经极其稀薄，虽然有一些水存在过的痕迹，但是早已不知所踪。在火星的内核还没有冷却下来的最后岁月，火星上的山只因为造山运动而升高，没有因为侵蚀而降低。

除此之外，重力也是限制山高度的一个因素。如果山太高了，自身的重力会超过山体底部岩石的承载极限。火星的重力加速度只有地球的0.38倍，这也意味着火星上的山体重力更小，更难以破坏山体底部的岩石，可以达到更高的高度。

两方面因素使火星上的山可以有几十千米那么高。

**Q:** 高空气象中的“蓝色喷流”形成机理是什么？能人为制造吗？能持续多久？

**A:** 蓝色喷流(blue jet)是一种中层大气电现象，其形态为一束蓝紫色的细长光束，从积雨云的顶端向上射入平流层中，其长度可达50 km，持续时间通常小于1 s。

尽管蓝色喷流总是与雷电相联系，但其并非由闪电直接接触发(与之相对，另一种高层大气电现象：



从国际空间站拍摄到的蓝色喷流现象

sprites, 即红色精灵, 被认为由正闪电直接接触发)。研究者认为, 蓝色喷流是一种电击穿效应。形成雷暴的积雨云, 其下部区域带负电, 上部区域带正电, 这种电荷的分离主要是大气对流时空气中冰晶(或水珠)之间的摩擦引起的。雷暴天气, 中层和底层大气间的对流格外强烈, 因此云顶的局部区域可能在短时间内积累大量正电荷, 产生足够强的电场撕裂空气分子, 产生大量离子, 从而引发电击穿: 大量正离子在电场的驱动下向上运动, 与沿途的空气分子碰撞, 产生更多的离子, 自下而上形成一条导电通路。沿途被激发的空气分子回到基态时, 以光子的形式释放出能量, 给予了喷流特征性的蓝色光芒(离子运动到喷流末端时已经失去大部分动能, 因此发出的光颜色偏红, 对应能量更低的激发态)。

在实验室中人为制造类似蓝色喷流的现象确实是可以的。早在2010年, MIT的Elm Williams教授就通过在稀薄空气两端加以高电压, 模拟了很多中高层大气电现象, 他的实验装置也因此被称为“sprites in a bottle”。但是, 实验室模拟闪电和大气中真实的蓝色喷流在能量、距离尺度上还相距甚远, 想要进一步研究这一神秘而独特的自然现象, 还是要依靠实地的观察与测量。

**Q:** 核磁共振既然是一种共振, 那为什么对人体无害?

**A:** 关于“共振会有害”的印象可能来源于受迫振动, 在外加力的频率接近物体振动的自然频率时, 物体振动的振幅和能量会陡然上升。与此相关有士兵过桥由于频率接近桥的自然频率而使桥坍塌的故事, 那么在做核磁共振时, 人体组织会像桥一样“坍塌”吗?

答案是不会, 因为此共振非彼共振。先说说拉比振荡: 二能级体系在外加电磁场的调控下, 位于上下能级的概率(对应于反转粒子数)会周期性振荡, 振荡频

率称为拉比频率。二能级体系的上下能级频率差可以视为“自然频率”, 在外加电磁场频率和“自然频率”相等时, 就是拉比振荡中的共振, 此时无耗散情形下以正余弦的形式振荡。

原子核具有自旋, 借助于拉比振荡可以说明自旋数是 $1/2$ 时的核磁共振。核自旋在外磁场中产生附加能量, 因而自旋的两个不同方向会使核产生能级劈裂, 对应于二能级体系, 而反转粒子会产生宏观磁矩。在施加垂直于外磁场的射频脉冲频率和“自然频率”匹配时产生共振, 出现宏观磁矩的振荡, 由于施加的是与外磁场垂直的脉冲, 因而在一定弛豫时间后会逐渐恢复到外磁场方向, 不同的弛豫时间可以区分不同的人体组织。

另外, 经常会被提到对人体有害的是电离辐射, 由于磁共振成像时所用的射频脉冲频率较低( $\sim 10$  MHz), 因而是“无辐射”的, 这可能是一般语境下磁共振成像对人体无害的原因。

**Q:** 量子涨落是违背能量守恒定律的无中生有吗?

**A:** 量子场论中, 粒子是量子场的激发, 可以产生和湮灭, 因此即使在初始粒子数为零的真空中, 经过一定的测量过程也能“无中生有”地产生粒子, 这种现象被称为量子涨落。为了更好地解释这一现象, 我们考察如下的思想实验:

面前摆着一个盛有“真空”的容器, 我们想知道的是: 这个容器是否真如看上去那样空空如也。因此, 需要将一个激发态的氢原子作为测量仪器放入容器, 经过一段时间 $t$ , 氢原子跃迁到基态, 同时发射出一个光子。光子是不可能事先蕴藏在氢原子内的, 因此只能来自包围氢原子的真空。我们由此得出结论: 真空并不是空空如也, 其内部隐藏着各种粒子, 这些“虚粒子”不同于我们通常所说的真实粒子, 它们并非场的激发, 而是描述一种激发的“潜能”, 只有通过引入仪器进行观察, 才能把这些“虚粒子”激发成为真实粒子。

假如多次重复这个思想实验, 并测量每次氢原子跃迁产生的光子频率, 我们会发现, 各次实验产生光子的频率并不完全相等, 这是由于氢原子的激发态具有一定寿命, 根据能量—时间不确定性原理, 光子的频率(正比于能量)会有一定的不确定度。换言之, 氢原子跃迁到基态发射出的光子的能量一般而言并不等

于将氢原子激发所消耗的能量，从这个意义上讲，微观过程的能量确实不守恒。

但是，如果进行足够多次实验，我们会发现，实验中产生光子的能量时高时低，平均而言就会等于氢原子激发态和基态间的能量差。因此，在统计平均的角度上讲，量子涨落并没有违背能量守恒。或者可以这样来表述：通过对微观过程的单次测量并不能很好地定义“能量”这个物理量，经典物理学的能量只有在多次测量下才有意义，而此时能量守恒确实是成立的。

**Q：在没有电阻的情况下，没有电压是否可以有电流？**

**A：**很容易想到的一个例子，一个超导环，在高于超导转变温度时垂直于环加磁场，降低温度至超导转变温度以下，此时环具有了超导性，撤去外加磁场，闭合回路中的总磁通要保持不变，超导环中会产生电流，以抵消撤去磁场带来的影响。这里电流是单位时间内经过导体某一截面的电量，在超导环中，因为具有零电阻的特性，电流可以持续存在而不发生衰减。电压为单位电荷在两点之间移动所做的功，超导环中电荷的移动并没有做功。因此超导环是没有电阻的情况下，没有电压可以存在电流。从欧姆定律的角度出发，在电阻为零的情况下，不管电流的数值，电压为零。

有人提出不同的看法，超导体可以在没有电压的情况下维持电流，但是最初超导环中电流的产生需要“勉励电压”（撤去磁场时磁场的变化会带来电压的出现）。

**Q：绝缘体能否有金属光泽？**

**A：**在尝试解答这个问题之前我们需要捋一下为什么金属会有所谓的金属光泽。首先，金属中的电子以自由电子气的方式存在，可见光的电磁波均无法在金属介质中传播，于是金属对可见光电磁波有较高的反射率。当电磁波的频率增高时，金属则变得透明起来，形象地理解就是电磁波的频率太高，以至于电子的振荡完全跟不上电磁波的振荡，在电磁波“看来”，电子仿佛静止一般，因而无法对电磁波产生有效阻拦，电磁波也因此可以“畅通无阻”地通过金属。一般而言，这个截止频率位于紫外波段，所以通常金属都可以反射可见光。其次，金属的表面经过抛光后可以变得非常平整，故而在表面处能够发生镜面反射，可以集中反射大量的光，从而产生“金属光泽”。一般而



言，含有大量自由电子的材料都可能具有金属光泽，虽然绝缘体属于非常缺乏自由电子的材料，但这并不意味着绝缘体就没有“金属光泽”。

另一方面，从能带的角度考虑，金属属于无带隙材料，其价带电子可以通过吸收各种频率的光子跃迁到导带并退激辐射出光子，形成反射光。对于带隙较大的绝缘体材料，其可能无法吸收可见光波段的光子，于是材料看起来就是透明的，自然也没有金属光泽。但是对于带隙较小的绝缘体(半导体)，它们也可以吸收可见光波段的光子并原封不动地释放出来，所以一些表面光滑平整的绝缘体(半导体)看起来也会有金属光泽。

**Q：如何在家里通过实验证明量子纠缠？**

**A：**量子纠缠是物理学最难做实验的现象之一。如果想要做实验“证明”它，目前基本都是通过破坏贝尔不等式。因为目前几乎所有关于贝尔不等式的验证都是有漏洞的，所以就算实验的结果和量子预言的理论完全对上(贝尔不等式不成立)，物理学家们也很难完全确信地“证明”它，但是无论如何，实验的结果都是量子纠缠存在的证据。

首先，我们需要在家中准备一个纠缠光源，每次可以发射出一对自旋相反、方向相反的纠缠光子。然后在家里整一个比较大的房间，让它们飞得足够遥远，以排除测量时刻的误差等干扰。同时还需要让光路处于真空环境，因为大气散射会让光子衰减消失或者退相干(2017年墨子号卫星就是在太空做的这个实验)。在它们飞的足够远之后，就可以测量这一对光子的自旋(让光子通过偏振片然后计数)，计数的结果就构成了贝尔不等式。

所以，这个实验是不可能在家完成的，量子纠缠的实验证据来自所有相关科学家、工程师的群策群力，是人类团结协作探索自然的伟大壮举。