

# 问答

**Q:** 为什么铁是灰色而铁粉却呈现黑色?

**A:** 首先,金属中自由电子形成了一片“海洋”——等离子体,使得金属对低于其等离子体频率的光子具有较高的反射率(大于等离子体频率的光子会被吸收)。而大部分金属的等离子体频率都在紫外光区,因此表现出光泽。当然,这一过程和具体的固体能带也是相关的。同时,光滑平整的界面又保障了其镜面反射的特点,使人眼观测到金属光泽。而粉末则由于反射面随机取向,镜面反射被抑制,导致反射光随机取向,因此相比金属光泽会黯淡不少。至于铁为什么是灰色的,查一下它的可见光反射率就知道了,铁在400—700 nm可见光波段的反射率大约都是60%,因此是灰色的。类似的,我们常见的银可以反射90%以上的所有可见光,所以是银白色。

**Q:** 为什么自然界中的光波和人工产生信号的基本形式都是正弦波?为什么不是其他的函数呢?

**A:** 假想我们有一个“电磁场计”。这个电磁场计可以精确地测量出瞬间的、远小于电磁波波长空间里的电磁场平均强度。如果把它放在各种各样的电磁场中,会看到什么呢?我们看到的几乎不可能是正弦波(除非在特定的谐振腔内)。

因为自然界中的光波(交变电磁场)本来就不一定是正弦波,人工产生的光波(人工产生的交变电磁场)也不一定是正弦波。它们纷繁复杂,只是数学定理保证了任何电磁场都可以用傅里叶变换分解成若干正弦波的叠加而已。当然,它其实也可以被分解为其他各种各样东西的叠加。在经典电磁场的尺度上,没有什么形状的波是特殊的。

但是从量子力学这样的微观尺度上说,所有的光子都来源于基本粒子在微观尺度上的相互作用,比如荧光物质发出的光,来源于原子中的电子在能级间跃迁发出的光子。这样单个的光量子,实际上是局域的



\* 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。

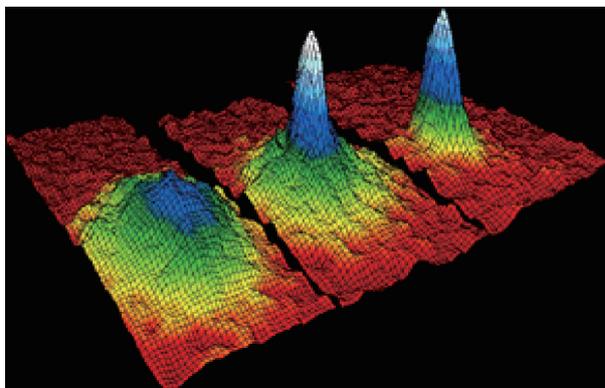
波包而不是延展开的正弦波。世界上所有的“光”,实际上都是一个个这样的小波包(光量子)叠加形成的。正弦波在数学世界中的地位毫无疑问是基本且重要的,可对于现实世界的光波来说,小波包才是最基本的单元。

**Q:** 绝对零度的数值是怎么测算出来的?

**A:** 绝对零度可以用理想气体理论推导出来。根据盖吕萨克定律,压强恒定时,降低温度,气体的体积会压缩,并且这种变化是线性的。测量一短温度范围内体积随温度变化的规律,并延长到体积为零的位置,此时的温度值就是最早对绝对零度的定义。更先进的定义要用到关于热机循环的知识,这里就不细说了。物理学中常用单位K(开尔文)计量温度,绝对零度为0 K,0 °C为273.15 K。

目前尚没有方法可以实验上准确测出绝对零度的值。绝对零度是一个理论上的极限值,在接近绝对零度时,很多性质都会发生变化。比如,根据盖吕萨克定律,保持恒定压强,降温至绝对零度,气体的体积会降为零。实际上这是不现实的,绝对零度附近,盖吕萨克定律不再准确。再比如,开尔文认为绝对零度下粒子的能量为零(这其实也是如今很多人的认识),但后来这也被推翻。在接近绝对零度时,玻色子会全部占据最低能级形成“玻色—爱因斯坦凝聚”,而费米子会占据“费米能级”以下所有量子态,总之它们的能量都不为零。极低温下还有超导、超流等很多新奇的物态,这些都不能用经典物理的知识理解。

有很多种降温的方法可以接近绝对零度。凝聚态物理中,使用“稀释制冷机”等手段可以降温到



玻色—爱因斯坦凝聚发生时的粒子速度分布图:左图为发生前;中图为发生后;右图为继续降温后

mK (0.001 K) 的水平。专门研究极低温物理的冷原子物理中，使用激光、磁场等辅助，可以实现 nK (0.00000001 K) 量级的温度。上页图是一张冷原子领域的经典图片，是 170 nK 温度下铷原子的玻色—爱因斯坦凝聚，该发现获得了 2001 年的诺贝尔物理学奖。想要深入了解这一问题，欢迎学习热力学和统计物理的相关知识。

**Q:** 物理上，维度和自由度有什么联系和区别？

**A:** 维度比较好理解，就是空间基矢的个数，或者说线性空间中线性无关向量的个数，比如三维空间用  $(x, y, z)$  刻画物体的位置，四维时空坐标则用  $(x, y, z, t)$  表示等。

自由度则与具体的研究问题有关，但总的来说，自由度表示的是独立变量的个数。具体而言就是，如果一个问题中涉及到的总变量有  $N$  个，约束条件有  $M$  个，则自由度  $D=N-M$ 。

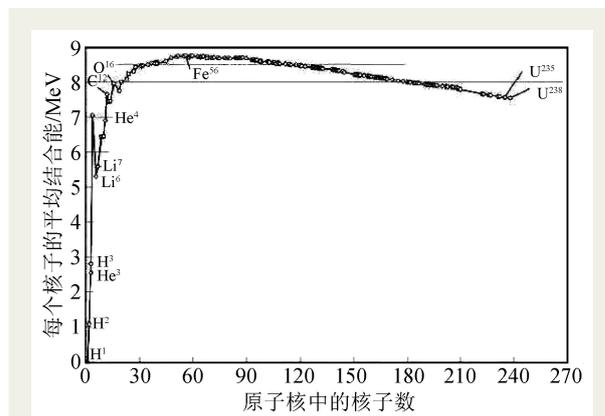
维度和自由度可以有联系，也就是空间基中的几个变量  $(x, y, z, \dots)$  本身就可以作为具体问题涉及到的变量而存在，比如考虑运动物体的演化过程；当然两者也可以没有关系，比如相图中的自由度(独立组分数)。

**Q:** 光的频率有上限吗？

**A:** 电磁波中频率最大的是伽马射线，其波长小于 1 pm，对应的频率在  $10^{19}$  Hz 以上，相应光子的能量大约为  $5 \times 10^4$  eV。作为对比，常温下热噪声为 0.026 eV，可见光光子能量大约为 2—3 eV，所以伽马射线光子能量是可见光光子的数万倍以上，会引发电离辐射，对人体细胞造成损伤。那么电磁波频率会无限大吗？理论上对伽马射线的频率并没有限制，但是要考虑到一些实际因素，比如怎样用设备探测到如此高的频率。而由于伽马射线在太空中会不可避免地与其他粒子发生作用，被探测到的频率也会小于其实际频率，探测到的频率通过消除这些作用的反推后可能已达到  $10^{30}$  Hz 量级，这个量级下已不清楚其产生的原理，很可能导致新的物理发现。

**Q:** 为什么铁在宇宙中是很多元素聚变或裂变的产物？它为什么很稳定？

**A:** 要解释这个问题，可以利用原子核的比结合能曲线。



原子核的比结合能曲线

结合能指的是自由质子和中子结合形成原子核时放出的能量，而比结合能指的是原子核中每个核子的平均结合能，比结合能越大，原子核越稳定。比结合能小的轻核倾向于通过聚变产生比结合能更大的重核，比结合能小的重核倾向于通过裂变产生比结合能更大的轻核。铁-56是比结合能最大的核素，因而也往往是裂变和聚变反应的终点。

那么，为什么比结合能曲线呈现这种先增后降的趋势呢？半经典地看，结合能由三部分构成，一是核子之间的汤川势(核力相互作用能)，二是带正电质子间的库仑能，三是核子由于不确定性原理具有的动能。核力是短程吸引力，因此汤川势对比结合能的贡献正比于每个核子的平均近邻数，在质量数较小时，这一项随质量数的增大而迅速增加，但当质量数较大时，这项趋于保持不变。

库仑力是长程排斥力，对比结合能的贡献为负。具体而言，库仑排斥能正比于原子核电荷数的平方，反比于原子核的半径。与此同时，由于泡利不相容原理，对一定质量数的原子核，质子数和中子数接近，才能使总动能较小，原子核才不至于分崩离析。这两个效应共同决定了库仑能对比结合能的贡献近似正比于质量数的  $2/3$  次方。因此，尽管两个核子之间的核力比库仑力强 100 多倍，在质量数足够大的时候，库仑力的影响还是占了上风，使得比结合能逐渐降低。

正是这种核力和库仑力的较量，使得比结合能曲线呈现先迅速增加，再缓慢下降的趋势，而铁-56恰好位于曲线的最高点，从而获得了独特的稳定性。