散射的原子捕获 *d* 波

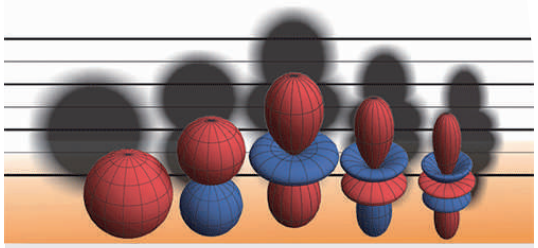
(北京大学　王树峰　编译自 Niels Kjærgaard. *Physics*, November 13, 2017)

与非常规超导机制类似的 *d* 波相互作用在冷原子气体中得到了实现。

超冷原子气体提供了一个精妙的实验平台，可以用于探索凝聚态物理中的多种模型。研究人员可以精细地控制这些原子，使它们成为固体与液体中的电子或其他自由度的替身，从而利用这一系统来模拟磁性、量子相变以及其他常规凝聚态现象。但是，模拟高温超导可是块难啃的骨头。这是由于这种状态的电子处于一种特殊的空间各向异性的配对相互作用中。这种被称为 *d* 波的相互作用很难用处于低温的原子来模拟。利用超冷的铷原子，清华大学尤力组通过改变磁场来诱导原子间的共振散射，成功地在低温下实现了所需的 *d* 波相互作用。这项新工作提供了一种基本方法来开始模拟高温超导，以及探索其他含有 *d* 波相互作用的多体相。

共振对量子力学所描述的原子碰撞可以产生显著影响。在共振点，粒子的碰撞能量接近于一个像分子一样的准束缚态的能量。此时，原子的散射性质会被明显改变，原子间的等效相互作用可以被显著增强，或完全消失，或者从各向同性变为各向异性等。

一种非常简单的情形是两个自由粒子的相对转动。此时，自由粒子态与分子态之间形成一个离心势垒。这个势垒的作用等同于经典世界中阻止绕轨道运行的行星落入它的太阳，不同的是在量子力学中，粒子可以从势垒中隧穿。与离心势垒相关的共振被称为形状共振，这些共振被标记为 *p*、*d* 等。原子中 *p* 对应于 1 个单位的量子化的轨道角动量，*d* 是两个单位，以此类推。散射粒子的角度分布与轨道空间形状类似，因而被描述为 *p* 波，*d* 波等。形状共振实验已经在钾-40 和铷-87 中分别观察到 *p* 波和 *d* 波为主的散射图案。在这些情形中，原子展现出了人们所期待的可用于模拟凝聚态系统的各向异性相互作用。但原子气体的形状共振通常发生在几百 μK 的低温，而要恰当地模拟固态物质，却需要 nK 的温度。这种低温可以确保原子的波长与原子间距的尺度是相当的，就像固体中的电子一样。



这些形状表征了原子的共振散射特性的可能结果。它们从左至右表示原子在空间方向上散射几率的幅值，分别为 *s* 波、*p* 波、*d* 波、*f* 波和 *g* 波。*s* 波的散射各向同性(幅值为常数)，*p*、*d* 等波则为各向异性(幅值随角度变化)

尤力和同事们利用 Feshbach 共振将 *d* 波为主的原子间相互作用向低温推进。与形状共振类似，Feshbach 共振也依赖于自由粒子与分子态之间的耦合。不同的是，分子态中的原子与入射的原子处于不同的自旋态，从而可以利用外加磁场来改变它们之间的相对能量。

利用两种铷原子同位素(铷-85 和铷-87)的混合气，尤力与同事们利用磁场产生了 *d* 波 Feshbach 共振。特别是他们通过调节外场，让分子态的能量与自由粒子的接近于零的碰撞能量对齐，这就使得共振在低温下发生。这种利用场来调节的 Feshbach 共振已经被广泛地用于增强原子的各项同性的(*s* 波)散射。与此类似，研究人员也已经展示过自由粒子是 *s* 波，而分子是 *d* 波的 Feshbach 共振(或者相反)。但是要完全得到固体中的 *d* 波相互作用，他们需要将 *d* 波自由粒子与 *d* 波分子直接耦合。

在实验中，他们制备了温度为 25 μK 的混合物，并将其载入由双激光束交叉构成的势阱中。随后，通过减弱光强让能量最高的原子逃逸来降低温度。研究人员利用扫描磁场的方法来识别 Feshbach 共振附近所期待的非弹性碰撞原子损耗的增强。在 400 nK 时，磁场强度 423 G 附近发现了 3 个原子损耗峰，这个标志性的数目正是 *d* 波 Feshbach 共振的迹象。研究组同时确认了这是个“宽”共振，即不依赖于原子自身的细节特征。这正是我们模拟凝聚态系统时所需的干净地调控原子相互作用的手段。