



核子和核子的相互作用(上)

张庆营
(湖南大学)

1910年以后,人们通过 α 粒子对原子的散射实验(卢瑟福实验),认识到原子是由原子核和围绕着原子核运动的一群电子构成的.但是,原子核又是什么东西构成的,当时还弄不清楚.到1932年发现了中子以后,才认识到原子核是由质子和中子组成的.质子和中子总称为核子,这不仅仅因为它们都是构成原子核的粒子,而且它们之间有很多相似的性质,例如它们的质量几乎相等(只相差万分之十四),自旋都是 $1/2$,因此海森堡把质子和中子看作是同一种粒子(核子)的不同带电态.从此开始了核子之间的相互作用力的研究,迄今已有五十年的历史.五十年来核力的研究取得了相当大的进展,从早期只能说明一些性质到能够进行相当精确的计算;从简单形式的核力发展到深入研究各种复杂的细节.

一、自然界中的四种相互作用力

现在已经知道自然界中存在着四种不同的基本的相互作用力.为便于了解核力和这些相互作用力的关系,我们把这四种相互作用力的最主要的性质列在表1作比较.

表1 四种基本相互作用力

类型	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	万有引力
强度	1	10^{-2}	10^{-7}	10^{-39}
作用范围(cm)	10^{-13}	∞	10^{-16}	∞
传递作用的粒子	介子(胶子)	光子	中间玻色子	引力子

表中的相互作用强度是由耦合常数来衡量的,例如电磁相互作用的强度由电子电荷 e 决定(实际上是 $e^2/\hbar c$);万有引力的强度由引力常数决定;弱相互作用和强相互作用也有相应的耦合常数.从表1可以看到,强相互作用的强度比其它三种作用力的强度都大得多,它存在于介子、核子和超子(总称为强子)之间,原子核就是靠核子之间的强相互作用维系在一起.当两个强子之间的距离约为 10^{-13} cm时,才会出现强相互作用力,超过这个范围,作用力很快下降为零,这是一种短程作用力.早期认为核力由介子传递,六十年代以后开始认识到核子和介子也是由更基本的粒子——夸克(即层子)构成的,在层子之间传递强作用力的粒子是胶子.根据这个观点,由介子传递的作用力不是原始的作用力,而是次级的作用力,实际上归根结底还是由胶子传递的.胶子在实验上还没有直接观测到,只是在1979年丁肇中等用实验间接证实了胶子的存在.现在,强相互作用在理论上还有很多问题等待解决.

电磁相互作用的强度占第二位.这是一种长程力,作用范围无限大.因为库仑力和距离的平方成反比,距离再远也存在着微弱的作用力,不会等于零的.传递电磁相互作用的粒子是光子,这在实验上早就观察到了.电磁相互作用是四种基本相互作用力中了解得最清楚的,它由麦克斯韦方程组统一描写.在微观现象中把麦克斯韦方程量子化而形成量子电动力学,这是目前最成熟的理论.理论计算结果和实验观测数据的符合程度很惊人,例如电子磁矩的理论值为 1.0011596553 (单位为玻尔磁

子), 实验值为 1.0011596577 , 准确到 10^{-9} , 最高的准确度已达到 10^{-10} . 把电子看作一个点电荷去计算电子之间的相互作用时, 在小到 10^{-16}cm 的距离上仍然是正确的, 这证明电子的大小不大于 10^{-16}cm .

弱相互作用的强度占第三位, 力程(即作用不明显为零的范围)更短. 作用强度不固定, 它随能量增加而变大. 在低能时, 强度约为 10^{-7} , 在高能时约为 10^{-5} . 当能量极高时, 甚至可以和电磁相互作用的强度相比, 甚至还超过, 但现在还不可能达到这样高的能量. β 衰变就是由弱相互作用引起的. 传递弱相互作用的粒子是中间玻色子, 这种玻色子有中性的 Z^0 和带电的 W^+ 和 W^- 三种, 但在实验上它们都还没有被观测到.

像上世纪麦克斯韦成功地将电场和磁场用统一的方程组描写一样, 现在也成功地找到了统一的理论来描写弱相互作用和电磁相互作用, 这就是温伯格-萨拉姆理论, 又叫弱电统一理论. 计算结果和实验很符合. 这也说明爱因斯坦的统一场论思想是很有远见的.

引力相互作用由引力子传递, 但现在也还没有观测到引力子. 引力的强度比以上三种相互作用力小几十个数量级, 可说是极其微弱了.

弱电统一理论的成功极大地鼓舞了物理学家努力寻找将弱电作用和强作用也统一起来的“大统一理论”, 现在已取得了一定的成绩, 前景是乐观的, 很可能“大统一理论”成功之日也就是人们弄清楚强相互作用之时, 就像弱相互作用那样. 但是, 要达到这个目标, 还必须做很多艰苦的探索工作. 现在有人企图建立一个把全部四种基本相互作用力统一起来的更大范围的“大统一理论”. 但是建立量子引力理论的问题还没有很好解决. 这个工作是极其困难的.

万有引力的强度极其微弱, 它在原子、分子、原子核和基本粒子中没有可观的影响, 完全用不着考虑它, 只有在粒子数极多而又密集的天体中, 万有引力才很强, 可以影响到物质的性质(例如中子星). 弱相互作用对原子和原子核的

构造也没有什么影响, 只是引起原子核的 β 衰变. 电磁相互作用比较接近强相互作用, 又是长程的. 对于质子数较多的重核, 库仑斥力有相当可观的影响, 即使对于轻核, 在作较精密的计算时也必须考虑.

二、核力的一般性质

1935年, 汤川秀树提出了核力的介子理论, 认为核子之间的相互作用力是由介子传递的, 并预言应该存在质量比电子大 200 多倍的介子. 果然, 在 1947 年发现了 π 介子, 这是汤川理论的重大成就.

早期汤川理论推导出的核力过于简单, 只能定性地说明核力的一些性质. 定量的计算和实验结果有很大的偏差, 即使在现在, 单纯靠理论推导仍然无法完全解决问题.

为了准确地找到核力, 通常采取以下两种方法进行研究: 一种是唯象的方法, 从分析两个核子之间的碰撞(即散射)实验数据以及一些原子核的性质入手, 先采用某种形式的核力, 用它来计算散射数据和分析原子核的性质, 如果和实验相符, 就证明这种核力是适用的和合理的. 如果在某些方面还有偏差, 就要再进一步进行调整和改进. 通过这种方法, 可以找到越来越精确的核力; 另一种方法是从基本原理出发, 从理论上推导出核力的具体形式, 再和实验数据或较好的唯象核力进行比较. 如果有不符合的地方, 再设法从理论上进行修正, 这样一步一步地推向前进. 反之, 唯象的核力也往往利用了理论上推导的结果. 这两种研究方法是相辅相成的.

根据实验和理论分析, 了解到了核力具有以下性质:

1. 短程力

用质子轰击原子核, 当距离在 10^{-12}cm 时, 还没有明显的核力的作用, 只有纯粹的库仑斥力. 当距离小于 10^{-12}cm 时, 作用逐渐明显, 当距离更小时, 出现很强的吸引力. 这说明核力

是一种短程力。

2. 强作用

原子核的半径约为 $3-7 \times 10^{-13}\text{cm}$, 核子束缚在原子核内时, 由测不准关系式

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar,$$

估计核子的动能可达

$$\Delta E = (\Delta p)^2 / 2M_n \approx 20\text{MeV}.$$

而对于原子(半径约为 10^{-8}cm)中的电子, 根据测不准关系, 可估计出它的动能约等于 3eV . 可见核子在核内的动能比原子中的电子的动能约大一百万倍, 何况核内质子之间还有库仑斥力. 只有比库仑力大得多的吸引力才能使核子紧密地结合成原子核。

3. 饱和性

原子核的体积大致和核子数 A 成正比, 即核密度大致是常数. 这表明核子之间不是单纯的吸引力, 还应该有排斥力, 否则核子就会紧密吸引在一起, 体积就要小得多. 同时, 原子核的总结合能也大致和 A 成正比. 如果每一个核子和原子核内所有其它核子都有作用, 则共有

$$A(A-1)/2 \approx A^2/2$$

对相互作用着的核子, 总结合能应大致和 A^2 成正比, 这一点和实际情况不符. 这表明, 一个核子和相邻的核子发生作用时, 和其它核子就没有什么作用了. 这些就是核力的饱和性。

4. 交换性

核子互相作用时, 可以互相交换位置, 也就是交换两个核子的坐标, 这种力叫做空间交换力或称马约兰纳力. 另一种是交换两个核子的自旋, 叫做巴特列特力. 还有一种力使坐标和自旋都交换, 叫做海森堡力. 不发生交换的寻常作用力叫做维格纳力. 交换力和核子的状态有关, 在某一状态下是吸引力, 而在另一状态下可以转化为排斥力. 把四种交换力(包括维格纳力)以适当的比例混合起来, 可以解释上述的饱和性. 核力的交换性质已由核子散射实验直接证实了. 例如, 用一个中子轰击一个静止的质子时, 反弹回来的可能是质子, 而原来静止的质子却变成了中子, 这个现象用单纯的吸引力(即维格纳力)是无法解释的。

5. 核力有排斥心

满足上述饱和要求的交换力可以解释能量较低的散射现象. 当能量较高(约大于两百万电子伏)时, 就出现偏差了. 这是由于当核子互相达到更近的距离(约 10^{-14}cm)时, 它们之间的作用力不是吸引力, 而是更强的排斥力, 叫做排斥心. 但排斥心力程太短, 单纯用它而不用交换力时, 不能解释前述饱和性。

6. 存在非中心力成份性

核力中除了中心力的部分(即只与两个核子的距离有关, 而与核子的方位无关)外, 还包含有非中心力的成份(即不但与核子距离有关, 而且还与核子的方位有关). 最明显的例子是氘核, 它是中子和质子的束缚态. 氘核的电荷不是球对称分布的, 而是有一个很小的电四极矩, 即电荷分布是非球形的. 这只有用非中心力才能解释. 在核子散射实验中也证实了非中心力的存在. 非中心力又有张量力和两体自旋轨道耦合力两种, 后一种成份还与核子的动量有关。

7. 核力的电荷对称性和电荷无关性

实验证明, 中子和中子之间、质子和质子之间的核力是相同的, 叫做电荷对称性. 同时, 也证实了中子和质子之间核力和前两种情形的核力相同, 这叫做核力与电荷无关性. 不管核子带不带电荷, 它们之间的强作用力都相同. 这就有力地说明了把中子和质子看作是同一种粒子(即核子)的不同带电态, 有其深刻的物理上的原因. 一个很好的例子是 ${}^3\text{H}_2$ 和 ${}^3\text{He}_1$ 两种原子核的结合能. 这两种原子核都是三个核子的系统, 看来结合能应该相同. 实验测出 ${}^3\text{H}$ 的结合能为 8.5MeV , 而 ${}^3\text{He}$ 的结合能为 7.7MeV , 两者相差 0.8MeV , 此数虽然很小, 但不等于零. 是不是核力与电荷有关呢? 不是, 因为 ${}^3\text{He}_1$ 有两个质子, 所以还要考虑它们之间的库仑斥力. 假定在 ${}^3\text{He}$ 核内的电荷是均匀分布的, 库仑能的计算值为 $(6/5) \cdot (e^2/R) = 0.8\text{MeV}$ (R 是氦核半径, 约为 $2 \times 10^{-13}\text{cm}$), 和上述结合能之差正好一样, 这证明了核力的电荷对称性. 同时也说明了电磁相互作用在核子的相互作用中仅

占次要地位,但在精确计算时是必须考虑的。

核子散射实验又证明了质子和中子间的核力同质子和质子间的核力一样,所以核力与电荷无关。这里很自然会提出疑问:为什么在自然界中只有质子和中子结合在一起的氘核,却没有两个质子或两个中子结合在一起的东 西呢?是不是“核力与电荷无关”这句话不正确了呢?不是的,因为根据全同费米子的泡利原理,两个质子和两个中子是不可能结合在一起的。在量子力学中也可以证明,在相同的核力的情况下,只有质子和中子组成的系统有束缚态,两个质子或两个中子组成的系统没有束缚态。

核力还有其他一些性质,在此不再详述。

三、核力的形式

我们知道,微观现象要用量子力学来讨论。严格地讲,在量子力学中没有“力”的概念,只有能量、动量和角动量等概念。我们讲核力,实际上是指核子之间的作用位能(算符)。如果只考虑能量不太高的情形,就可以用非相对论近似。根据唯象的分析方法,由核子散射实验及氘核等的性质可知核子之间的相互作用力(即相互作用位能算符)主要包含下式中的三项:

$V_{12} = V_c(r) + V_T(r)S_{12} + V_{LS}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$, (1)
上式第一项是中心力,第二项是张量力,第三项是两体自旋轨道耦合力,这里没有写出交换力的算符。 $V_T(r)$ 和 $V_{LS}(r)$ 分别是后两种力的径向部分,而

$$\left. \begin{aligned} S_{12} &= (3/r^2)(\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{r}) - \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2; \\ \mathbf{L} &= (1/2)(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1); \\ S &= \mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2, \end{aligned} \right\} (2)$$

\mathbf{r} 是两个核子的相对矢径, \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 分别是两个核子的矢径,如图1所示。 \mathbf{s}_1 和 \mathbf{s}_2 分别是两个

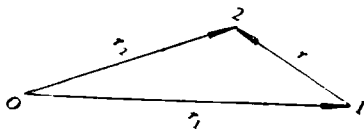


图 1
O为原点; $\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$

核子的自旋, \mathbf{p}_1 和 \mathbf{p}_2 是两个核子的动量。 \mathbf{L} 是两个核子的相对运动角动量(认为核子的质量近似相等), \mathbf{S} 是两个核子的总自旋。在量子力学中,这些力学量都是算符。

上述 $V_c(r)$, $V_T(r)$ 和 $V_{LS}(r)$ (称径向函数)具有不同形式,它们大致的形式是

$$V(r) = \begin{cases} -V_0(e^{-r/r_0}/r/r_0) & r > r_0; \\ \infty & r \leq r_0. \end{cases} (3)$$

第一个表达式常称汤川型位势,其中 V_0 是常数, $r_0 \approx 10^{-13}\text{cm}$,即核力的力程。由图2可见,

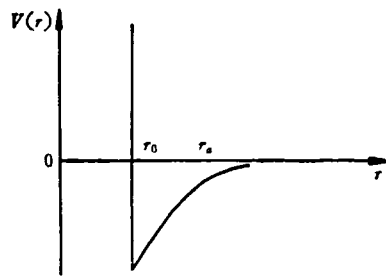


图 2

$V(r)$ 随 r 的增大迅速减小。当 $r = r_0$ 时, $V(r)$ 已很小了。当 $r = r_0 \approx 4 \times 10^{-14}\text{cm}$ 时, $V(r)$ 为无限大,即为无限大的排斥心。但是,当 r 在 r_0 和 r_0 之间时,表现为很强的吸引力。

物理学家已经提出了各种各样的唯象核力,它们都能较好地解释能量较低(约300MeV以下)的核子和核子的散射实验数据。对不同的唯象核力来说, $V_c(r)$, $V_T(r)$ 和 V_{LS} 的形式不同,而且比(3)式复杂。有如图2的硬排斥心的;也有软排斥心的,即 $V(r)$ 在 $r = r_0$ 附近不立即变为无限大,而是逐渐趋于无限大;或者在 $r = r_0$ 处达到一有限的正值。各种唯象核力都有(1)式的三项,有的还要加上其它修正项。迄今已有几种唯象核力都能非常符合两核子散射数据(核子能量从0到300MeV)。通常把这样的唯象核力叫做“真实”核力,意思是好像真正的核力一样符合实际情况(难免多少还有一些小的误差),这是相对于后面将要讲的“有效”核力而言的。

唯象真实核力的形式都很复杂,在此不能一一列出。为了对核力的形式有具体的认识,

举一个唯象核力的例子：滨田-约翰斯顿位势。这是在 1962 年被提出来的，它有下列形式：

$$V_{12} = \begin{cases} V_c(r) + V_T(r)S_{12} + V_{LS}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + V_{LL}(r)L_{12} & r > r_0; \\ +\infty & r \leq r_0, \end{cases} \quad (4)$$

$r_0 = 0.485 \times 10^{-13}\text{cm}$ 。上式和(1)式不同之处是多出修正项 $V_{LL}(r)L_{12}$ ，其中

$$L_{12} = [\delta_{L1} + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)]L^2 - (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})^2, \quad (5)$$

即 L_{12} 中包含了 L^2 项和二次自旋轨道耦合项 $(\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})^2$ 。 $\boldsymbol{\sigma}$ 是泡利自旋算符， $\boldsymbol{\sigma} = 2\mathbf{s}$ ， \mathbf{s} 即为通常的自旋算符。在(4)式中

$$\left. \begin{aligned} V_c &= (\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)V_c(r) \\ &= (\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)(f/3)m_\pi c^2 Y(x) \\ &\quad \times [1 + a_c Y(x) + b_c Y^2(x)]; \\ V_T &= (\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)V_T(r) \\ &= (\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)(f/3)m_\pi c^2 Z(x) \\ &\quad \times [1 + a_T Y(x) + b_T Y^2(x)]; \\ V_{LS}(r) &= m_\pi c^2 G_{LS} Y^2(x) [1 + b_{LS} Y(x)]; \\ V_{LL}(r) &= m_\pi c^2 G_{LL} x^{-2} Z(x) \\ &\quad \times [1 + a_{LL} Y(x) + b_{LL} Y^2(x)], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} f &= 0.08; \quad (f/3)m_\pi c^2 = 3.65\text{MeV}; \\ x &= r/r_a, \quad \text{而 } r_a = 1.43 \times 10^{-13}\text{cm}; \\ Y(x) &= e^{-x}/x; \\ Z(x) &= (1 + 3/x + 3/x^2)Y(x). \end{aligned}$$

上列各式中的 $a_c, b_c, b_T, G_{LS}, b_{LS}, G_{LL}, a_{LL}, b_{LL}$ 都是参量，由两核子散射实验数据确定它们的数值。

在(6)式中，

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mathbf{t},$$

\mathbf{t} 是同位旋算符，同位旋是用来表示核子的带电态的，它的定义和自旋相似，同位旋向上态

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

代表质子，同位旋向下态

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

代表中子。 $\boldsymbol{\tau}$ 的矩阵形式和泡利自旋矩阵相同，

例如

$$\boldsymbol{\tau}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_x \boldsymbol{\alpha} &= \boldsymbol{\beta}; \\ \boldsymbol{\tau}_x \boldsymbol{\beta} &= \boldsymbol{\alpha}. \end{aligned}$$

可见 $\boldsymbol{\tau}_x$ 把质子变成中子，把中子变成质子。所以 $\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2$ 实际上是交换核子的某种算符； $\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2$ 是交换自旋的某种算符。它们和前面所讲的三种交换力的算符有如下的关系（可参阅原子核方面的书）：

$$\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2 = -(1 + 2P_H); \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2 = 2P_B - 1; \quad (8)$$

$$P_M = P_H P_B. \quad (9)$$

因此

$$(\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2) = 1 + 2P_H - 2P_B - 4P_M, \quad (10)$$

这里 P_H 是交换核子的交换算符，叫做海森堡算符； P_B 是交换核子自旋的算符，叫做巴特列特算符； P_M 是交换核子空间坐标的算符，叫做马约兰纳算符。这三种算符就表示了海森堡力、巴特列特力和马约兰纳力。由(10)式可见，将算符 $(\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)$ 代入(6)式的位势上后，就包含了上述三种交换力和维格纳力。它们之间以一定的比例混合在一起。

由(6)式可见，当 r 足够大时 ($r > 3 \times 10^{-13}\text{cm}$ 时)，方括号中的数值非常接近于 1， $V_c(r)$ 和 $V_T(r)$ 就变为汤川型位势，这是核力的长程部分或尾巴部分。当 r 较小时，例如 $r \approx r_a = 1.43 \times 10^{-13}\text{cm}$ (即核力的力程) 附近，方括号中的值迅速增大，表现为比汤川型位势还要强的吸引力，这是核力的中程部分。短程部分 ($r \leq r_0$ 时) 就是排斥心了。

滨田-约翰斯顿位势很好地符合 0—315 MeV 的两核子散射数据，而且它的形式比其他唯象真实核力要简单些，比较便于计算，在核结构的计算中常常要用到它。

我们看到，即使是较简单的唯象真实核力，计算也还相当复杂。为了计算方便，往往作一些近似，引进简化的核力，叫做唯象有效核力。有效核力只反映了真实核力的某些特性，仅适

用于某种特定的情况或一部分原子核，甚至只适用于某些原子核的少数几个态（一般是低激发态）。有效核力中出现的参数是可调的，可根据一些实验数据来确定它们的数值。有效核力选择得好，往往可以说明很多问题，预言一些新现象。有效核力的种类繁多，其中最简单的是方位阱，曾用于计算氦核及其他原子核的一些性质。

四、核力和电磁相互作用力的比较

静电库仑力是模仿牛顿的万有引力定律而建立起来的。静电现象和引力现象有本质上的不同，可是两种作用力的形式却非常相似。核子相互作用力和电磁相互作用力本质上也是不同的，可是它们之间也有很多共同的东西。在发展核子相互作用的理论时，往往借鉴于电磁相互作用的理论，从中得到很多有益的启示。若将核力的形式和电磁相互作用力形式作一简单的比较，就会看到非中心力也不是核力所特有的，在电磁力中早就有了。

电子的磁偶极矩 \mathbf{m} 和自旋 \mathbf{S} 有如下的关系：

$$\mathbf{m} = -(2\mu_0/\hbar) \cdot \mathbf{S}, \quad (11)$$

其中 μ_0 是玻尔磁子，

$$\mu_0 = e\hbar/2m_0c,$$

磁偶极矩在它的周围会产生磁场。由电磁学知识可知，放置在 O 点的第一个电子的磁矩 \mathbf{m}_1 (见图 3) 在 P 点产生的磁场强度是

$$\left. \begin{aligned} H_r &= 2m_1 \cos\theta/r^3, \\ H_\theta &= m_1 \sin\theta/r^3. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

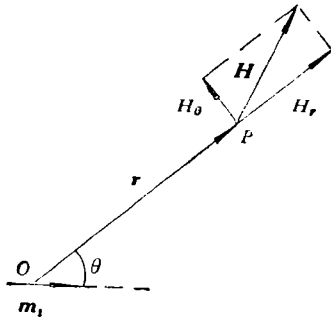


图 3

将上式写成矢量形式，即为

$$\mathbf{H} = (1/r^3)[3(\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}/r^2 - \mathbf{m}_1]. \quad (13)$$

设在 P 点放置了第二个电子，这个电子的磁矩 \mathbf{m}_2 和磁场 \mathbf{H}_1 相互作用产生的磁能为

$$V_T = -\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{H}_1. \quad (14)$$

将(11)式和(13)式代入得

$$V_T = (V_{T_0}/r^3)S_{12}, \quad (15)$$

其中 $V_{T_0} = -4\mu_0^2/\hbar^2$ 是常数； S_{12} 和(2)式的 S_{12} 相同。可见(15)式和核力的张量力的形式一样，只是径向部分不同。式中是 $1/r^3$ ，是一个很简单的函数。由此可见，在电磁相互作用中，张量力就是两个磁偶极矩通过磁场的相互作用力。

电子在空间沿轨道运动时也会产生磁场，其强度为

$$\mathbf{H}_1 = \frac{e}{c} \frac{\mathbf{v}_1 \times \mathbf{r}}{r^3} = -\frac{e}{m_0c} \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{p}_1}{r^3}. \quad (16)$$

这个磁场在第二个电子的位置上也会和这个电子的磁矩 \mathbf{m}_2 相互作用而产生磁能：

$$\begin{aligned} V_{LS_1} &= -\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{H}_1 \\ &= -\frac{2e\mu_0}{m_0\hbar c} \frac{1}{r^3} (\mathbf{r} \times \mathbf{p}_1) \cdot \mathbf{S}_1. \end{aligned} \quad (17)$$

同样，第二个电子沿轨道运动也会产生磁场。这个磁场和第一个电子的磁矩也会相互作用而产生磁能：

$$\begin{aligned} V_{LS_2} &= -\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{H}_2 \\ &= -\frac{2e\mu_0}{m_0\hbar c} \frac{1}{r^3} (\mathbf{r}' \times \mathbf{p}_2) \cdot \mathbf{S}_1. \end{aligned} \quad (18)$$

两式中 $\mathbf{r}' = -\mathbf{r}$ ；同时，在质心系 $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = 0$ ，故 $\mathbf{p}_1 = -\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}$ 。将(17)式和(18)式相加得

$$V_{LS} = V_{LS_1} + V_{LS_2} = (V_{LS_0}/r^3)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}, \quad (19)$$

式中

$$V_{LS_0} = -2e\mu_0/m_0\hbar c$$

是常数。上式就是两体自旋轨道耦合力，即是由于电子在空间轨道中运动所产生的磁场对另一个电子的磁矩的作用力。

以上是根据经典电磁理论推导出来的。根据相对论量子力学的两个电子的运动方程作非相对论近似时，同样也会得到张量力和两体自

(下转第 631 页)

应产生了类偶极子,极大地增强了分子的极化率。他说,虽然这是个经典的——多少带有启蒙性的——模型,但是对指导实验是很有用的。Horia Metiu 和 Shlomo Efrima 独立地提出了一个更精巧的这类模型。

另一类模型是基于共振 Raman 效应。例如, Metiu 和 Efrima 认为衬底和分子间的相互作用引起分子能级的移动和加宽,从而导致电子有可能以激发频率跃迁。

Burstein 和他的合作者提出,增强 Raman 效应是由于在金属中激发分子和激发的电子-空穴对之间的耦合;而表面的粗糙起了天线的作用,加强了和辐射场之间的相互作用。

现在许多研究小组正在忙于建立这样的模型,认为表面粗糙性使光和表面等离子体激元耦合。

大多数研究者明显地赞成 Van Duyne 的观点,他认为,没有一个机理可以预期产生全部的增强,而且在所有的系统中,同样的因素也不能产生同样的强度。

应用

表面化学家显然很乐于有这样的分析技术,用它可以在不影响其它的过程的同时,在复杂的系统中和在杂乱的(真实世界)条件下,在高温下测量表面的特性,并且能够给出动态的、高速的、可分辨时间的信息。这对研究催化、表面腐蚀、电池以及其它系统都是非常有用的。

增强 Raman 效应一旦被了解以后,就可以成为一种有希望工具。在这个领域中的大多数研究者的兴趣是一般性的频谱问题和表面科

学。Heritage 认为,这种增强最大的用处可能是帮助我们改进实验技术,从而可以在没有增强散射的催化剂或其它表面上观察到 Raman 谱。

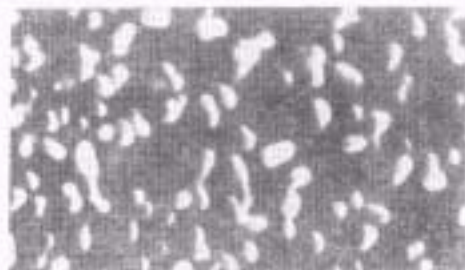


图1 增强 Raman 散射的表面

图1中是一个经过电化学处理的银表面。它大约有 5×10^4 的增强。那些小团的线度是 $0.1 \mu\text{m}$; 整个面积大约为 $2.7 \times 1.6 \mu\text{m}^2$ (Bell 实验室提供的扫描电子显微镜相照片)。

参 考 文 献

- [1] M. Fleischmann, P. J. Hendra, A. J. McQuillan, *Chem. Phys. Lett.*, **26**(1974), 123.
- [2] D. L. Jeanmaire, R. P. Van Duyne, *J. Electroanal. Chem.*, **84**(1977), 1.
- [3] M. G. Albrocht, J. A. Creighton, *J. Am. Chem. Soc.*, **99**(1977), 5215.
- [4] R. P. Van Duyne, in *Chemical and Biological Applications of Lasers 4*, C. B. Moore, ed., Academic New York, (1979).
- [5] E. Burstein, C. Y. Chen, S. Lundquist, in *Light Scattering in Solids*, J. L. Birman, H. Z. Cummins, K. K. Rebane, eds., Plenum, New York, (1979).
- [6] T. E. Furtak, J. Reyes-Corona, *Surf. Sci.*, (in press).

(作者 TVF, 徐丽雯 郭树权译自 "Physics Today", 1980年4月号, 18—20页, 赵忠贤校)

(上接第 628 页)

旋轨道耦合力,而且还会出现新的修正项。

在两个电子的相互作用中,库仑力的强度比非中心力的强度大得多,后者一般可以忽略不计。但是,在两核子的相互作用中,中心力和

非中心力的强度差不多,计算时都必须考虑进去。本来核力的径向部分已经够复杂了,还要加上非中心力的成份,这就使核力计算比电磁力的计算麻烦得多、复杂得多了。(待续)