

[11] J. Laforest et al., *I. E. E. E. Trans. Mag.*, 9 (1973), 217.
 [12] N. Niimura et al., *J. Phys. Soc. Japan*, 35-2 (1973), 628.
 [13] A. Yoshimori, *J. Phys. Soc. Japan*, 14-6(1959),

807.
 [14] 星笠禎男等, 日本物理学会誌, 18-3(1963), 122.
 [15] S. K. Burke et al., *J. Appl. Cryst.*, 11-5(1978), 644—657.

中 子 电 偶 极 矩

刘 圣 康 林 进 福

(南 京 大 学)

中子是一种基本粒子。从1932年发现中子以来,对中子的基本性质已进行了大量的研究。近来,由于高通量反应堆及其他强中子源的出现,冷中子技术的发展,使得对中子基本性质的研究进一步深入。例如,超冷中子贮存技术的成功,为实验测量中子电偶极矩提供了特别有利的条件。

从1956年李政道和杨振宁发现在弱相互作用下宇称不守恒以后,朗道等人又提出了宇称(P)、电荷(C)的联合守恒定理(即CP守恒),从而保证了宇称、电荷和时间(T)的联合守恒(CPT守恒)。可是1964年克利斯坦森等所作的精密实验表明:当寿命约为 10^{-8} sec的中性 K_L^0 介子衰变成为两个 π 介子时,

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$$

发现CP不守恒现象。到目前为止,还在 K_L^0 的另外两个衰变过程中

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu$$

发现CP不守恒现象(式中 e^+ , e^- 为正、负电子, ν 为中微子, $\bar{\nu}$ 为反中微子)。

虽然曾在一系列其他过程中寻找CP不守恒现象,但在目前实验所能达到的精度范围内,还没有发现其他CP不守恒的例子。

根据CPT定理,如果CP不守恒,T必然不守恒。如果能够利用中子实验来检验T是不守恒的,那是很有意义的。

如果中子有电偶极矩,那么电偶极矩 d 和中子自旋 s 的方向是相同的,并且有正比关系^[1]:

$$d = \alpha s, \quad (1)$$

式中 α 为常数。如果中子处在静电场 E 中,那么中子电偶极矩 d 与电场 E 的相互作用能为

$$d \cdot E = \alpha s \cdot E. \quad (2)$$

在时间反演变换下,

$$Td = d,$$

$$TE = E,$$

$$Ts = -s,$$

所以

$$Td \cdot E = d \cdot E,$$

$$Ts \cdot E = -s \cdot E.$$

因此,在时间反演变换下,要使(2)式成立,除非 $\alpha = 0$ 。也就是说,如果T守恒,必须是 $d = 0$ 。如果 $d \neq 0$,则证明T是不守恒的。所以,通过实验测量中子电偶极矩值可以检验时间反演守恒定理是否破坏。

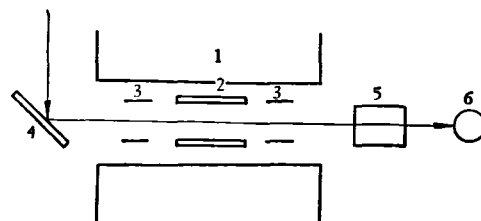


图1 测量中子电偶极矩的实验装置示意图

1——建立恒定磁场 H 的磁铁; 2——建立静电场 E 的电极; 3——建立高频 ν_1 磁场的高频线圈; 4——镜面极化镜; 5——分析器; 6——中子探测器

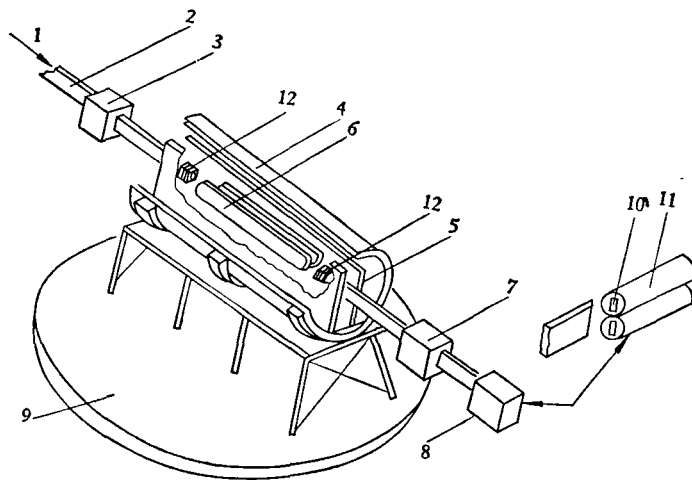


图2 中子电偶极矩的测量装置

1—中子束；2—导管；3—极化磁镜；4—双层磁防护层，各层厚2.5mm；5—产生恒定磁场的电极板；6—静电场的电极板；7—分析器；8—探测器；9—转盘；10—闪烁探测器窗口；11—光电倍增管；12—产生高频磁场的振荡线圈

通过实验测量中子电偶极矩值已有二十多年的历史。除了个别实验采用中子在 CdS 单晶上衍射的方法测量中子电偶极矩^[2]以外，都用核磁共振法测量中子电偶极矩值。

1956年史密斯等人^[3]利用热中子（速度约为2200m/sec）测量中子电偶极矩值，其方法是在测量中子磁矩方法的基础上发展的，即在恒定磁场 H 上加上一个方向相同或相反的静电场 E 。图1是实验装置示意图，其中高频磁场方向与恒定磁场方向相互垂直。

原来在测量中子磁矩 μ 时利用核磁共振条件：

$$h\nu_1 = 2\mu \cdot H,$$

其中 ν_1 是共振频率， h 是普朗克常数， H 是恒定磁场。现在加上了静电场 E 。如果中子存在电偶极矩 d ，则共振条件有所改变。当静电场 E 与恒定磁场 H 方向相反时，

$$h\nu_{\uparrow} = 2[\mu \cdot H + d \cdot E_{\uparrow}], \quad (3)$$

式中 ν_{\uparrow} 和 E_{\uparrow} 表示静电场与恒定磁场方向相反时的共振频率和静电场。当 E 与 H 方向相同时，

$$h\nu_{\uparrow} = 2[\mu \cdot H - d \cdot E_{\uparrow}], \quad (4)$$

式中 ν_{\uparrow} 和 E_{\uparrow} 表示静电场与恒定磁场方向同时的共振频率和静电场。

由(3)和(4)式可得

$$d = \frac{h\Delta\nu}{2(E_{\uparrow} + E_{\uparrow})},$$

其中 $\Delta\nu = \nu_{\uparrow} - \nu_{\uparrow}$ 。

因此，实验测量共振频率差 $\Delta\nu$ 就可以确定中子电偶极矩值 d 。由于实验精度差，当时确定的 d 值上限为 $5 \times 10^{-20} \text{ ecm}$ ， e 为电子电荷。

从根本上来讲，这类实验的精度受到两个方面的限制：其一，测不准原理 $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ 。为了提高能量分辨率（即减小 ΔE ）必须增大 Δt ，即必须增加中子在测量仪器中的停留时间。其二，所谓“ $v \times E$ ”效应^[4]。为了减小它的影响，必须减小中子的平均速度

v 。因此改用比热中子慢得多的冷中子来测量电偶极矩。

1967年密勒改用速度为90m/sec的冷中子测量中子电偶极矩^[5]。他的核磁共振装置中磁场为10G，静电场为120kV/cm。测量结果， $d < 3 \times 10^{-22} \text{ ecm}$ 。在1974年以前，用冷中子测量电偶极矩的结果以德雷斯等^[6]取得的结果为最好， $d < 10^{-23} \text{ ecm}$ 。这与李政道在1974年所发表的理论值^[7]相符。1976年德雷斯等在法国劳厄-朗芝万研究所的 ILL 高通量反应堆上采用冉赛（Ramsey）分裂线圈磁共振技术进行测量。他们所用中子的速度为100m/sec，通过2m距离的时间约为0.02sec。测量结果， $d = (0.4 \pm 1.1) \times 10^{-24} \text{ ecm}$ ^[8]。1977年，德雷斯和密勒采用图2所示的装置重新进行了测量^[9]，结果 $d = (0.4 \pm 1.5) \times 10^{-24} \text{ ecm}$ ，并且他们确定了 d 的上限为 $3 \times 10^{-24} \text{ ecm}$ 。

现在超冷中子已经可以贮存。用瓶装中子测量电偶极矩，不仅增大了测量时间，而且由于中子在瓶内多次反射的穿行速度 v 接近于零，可以基本消除“ $v \times E$ ”效应。因此，测量精度应该大为提高。

列宁格勒核物理研究所在 BBP-M 堆上测

量中子电偶极矩的装置如图3所示^[10]。超冷中子贮存瓶为一个圆柱体，直径为50cm，高度为6cm，中子在其中停留约为1.5sec。图4为他们初步测量的核磁共振曲线，共振宽度为0.25Hz。他们积累了一个月的计数，确定中子电偶极矩值为 $(0.8 \pm 2.6) \times 10^{-24} ecm$ ，并且认为电偶极矩值的上限为 $d < 10^{-24} ecm$ ^[8]。

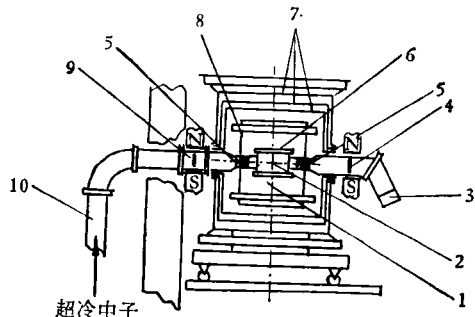


图3 在BBP-M堆上的测量装置

1.真空室；2.涂BeO的玻璃圆柱体；3.氦-3探测器；4.极化分析器；5.第二振荡线圈；6.高压电极；7.三层磁屏蔽；8.亥姆霍兹线圈；9.极化器；10.导管

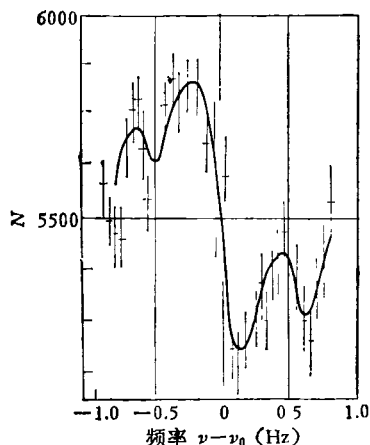


图4 超冷中子的核磁共振曲线 $\nu_0 = 312.5 \text{ Hz}$

从第一个寻找中子电偶极矩的实验算起，已经过去了二十多年了。虽然还没有给出一个公认的中子电偶极矩的确定值，但是它的上限值已经降低了差不多五个数量级。

在理论上，曾经提出了计算中子电偶极矩的几种模型，讨论了可能主宰时间不变性破坏的相互作用，并且估计了中子电偶极矩的数量级。表1为理论预期的中子电偶极矩值。

由表1可见，中子电偶极矩的大多数理论预期值为 $10^{-23} - 10^{-24} ecm$ ，而实验测量结果约为 $10^{-24} ecm$ 。但是由于测量值与误差是同一个

表1 各种理论模型预期的中子电偶极矩值

作者及年分	中子电偶极矩值 ecm	参考文献
G. Feinberg (1965)	10^{-19}	[11]
G. Salzman et al. (1965)	10^{-20}	[12]
N. T. Meister et al. (1964)	2×10^{-21}	[13]
P. Babu et al. (1967)	2.2×10^{-22}	[14]
J. Schwinger (1964)	$(0.36 - 1.4) \times 10^{-22}$	[5, 15]
D. G. Boulware (1965)	10^{-27}	[16]
李政道 (1973)	10^{-23}	[7]
R. N. Mohapatra (1973)	10^{-24}	[7]
A. Pais (1973)	10^{-23}	[7]
J. Frenkel et al. (1973)	10^{-19}	[7]

数量级，所以不能确切地说中子电偶极矩有多大。

在BBP-M堆上用超冷中子测量的电偶极矩，得到的精度不够理想。因为超冷中子在物质瓶中贮存时间比理论估计的时间短得多，它影响电偶极矩的测量结果。斯特列尔科夫等^[27]认为超冷中子的热化可能是物质瓶贮存时间异常短的主要原因。科斯维恩采夫等^[28]对金属瓶中超冷中子异常失漏过程又进行了深入的研究。估计不久可以克服异常失漏的困难。那时可以期望测得更为精确的中子电偶极矩值。

参 考 文 献

[1] И. И. Туревит, А. В. Тарасов, Физика Нейтронов Низких Энергий, Изд. Наука, (1965), 303.
 [2] C. G. Shull, R. Nathans, *Phys. Rev. Lett.*, **19** (1967), 384.
 [3] J. H. Smith, E. M. Purcell, N. F. Ramsey, *Phys. Rev.*, **108** (1957), 120.
 [4] R. Golub et al., *Contemp. Phys.*, **13** (1972), 519.
 [5] П. Миллер, *УФН.*, **95**(1968), 470.
 [6] W. B. Dress, P. D. Miller, *Phys. Rev. D*, **7** (1973), 3147.
 [7] L. Wolfenstein, *Nucl. Phys. B*, **77** (1974), 375.
 [8] A. Steyerl, Springer Tracts in Modern Physics, Springer-Verlag, **80** (1977), 119.
 [9] W. B. Dress, P. D. Miller, *Phys. Rev. D*, **15** (1977), 9.
 [10] А. И. Егоров, и др., *Ядерная Физика*, **21**(1975), 292.
 [11] G. Feinberg, *Phys. Rev.*, **140-5B** (1965), 1402.
 [12] G. Salzman et al., *Phys. Lett.*, **15** (1965), 91.
 [13] N. T. Meister et al., *Phys. Rev.*, **315-3B** (1964), 769.
 [14] P. Babu et al., *Phys. Rev.*, **162** (1967), 1359.
 [15] I. Schwinger, *Phys. Rev.*, **136-6B** (1964), 1821.
 [16] D. G. Boulware, *Nuovo Cimento*, **A40-4** (1965),

外逸电子效应及其应用

郜 齐 寰 朱 希 恺

(中国科学院上海原子核研究所)

外逸电子发射 (exoelectron emission) 是一种新的电子发射形式, 简记为 EEE. 它的发射机制不同于热电子发射、光电子发射、场致发射和二次电子发射等. 外逸电子是指固体表面由于受到某些外界作用 (如电离辐射、机械作用) 或本身的物理化学变化 (如凝固、吸附) 而发射出的低能电子. 早在本世纪二十年代人们就已经知道, 当无机物受到化学作用时表面会发出低能电子. 后来又发现, 盖革计数管在刚制成或电极重新加工后, 本底有异常现象. 甚至铜、铝等金属的新鲜加工表面都会出现电子脉冲. 但直到 1949 年, 这类现象才由西德克拉默尔 (Kramer) 加以系统研究. 故此种电子发射效应又称克拉默尔效应. 此后又有不少人进行过这方面的探讨, 但由于此现象机制较复杂, 影响因素又多, 因此进展不快. 近年来, 随着实验技术的改进, 以及表面物理研究的发展, 特别是该效应在实际应用方面取得初步的效果, 因此它又成为人们注意的一项课题. 目前一些国家已开展了这方面的研究工作, 如美、苏、日、西德等. 有关的国际交流会议先后召开过五次之多.

一、现象的介绍

当固体表面受外界作用或本身发生物理化学变化时, 会发射出外逸电子. 这个过程称为“激励”过程 (excitation). 激励过程有好几种形式. 例如, 某些无机离子晶体 (金属氧化物、卤化物等) 及半导体受到 X 光, α , β , γ 等射线和紫外线照射; 某些金属 (如铜、铝等) 在含氧气氛内受到机械作用 (切削、研磨、粉碎、塑性变形); 某些金属或合金发生凝固、吸附氧气、氧化或催化反应等物理化学变化. 实验表明, 对于上述情况, 当激励的因素消失以后, 固体表面外逸电子的发射仍可持续一段时间, 其发射强度随时间而衰减, 可近似表示如下:

$$I \approx I_0 e^{-t/\tau} \quad (n \approx 1),$$

式中 I_0 为初始发射强度. 此过程可经历几分钟到几天的时间.

物理

当上述衰减过程结束后, 如果对该样品加热或光照, 则发现又有低能电子发射出来. 应该注意, 这时加热的温度远低于热电子发射的温度, 而光辐照用的入射光波长也大于常规光电效应所对应的波长. 因此, 它不是一般的热电子发射或光电子发射. 我们称这种电子发射过程为外逸电子的“激发”过程 (stimulation). 由于对样品加热而引起外逸电子激发的过程, 称为热激发外逸电子发射 (简记为 TSEE), 而由于对样品光辐照而引起外逸电子激发的过程, 称为光激发外逸电子发射 (简记为 OSEE). 有的作者对激励过程和激发过程不作细致的区分, 而将两过程统称为外逸电子发射过程.

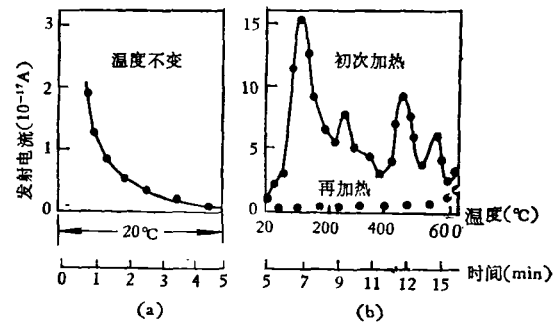


图 1 钨丝被电子轰击后的 TSEE 曲线

研究固体的 TSEE 曲线, 可以看出外逸电子的发射率与固体表面温度有密切关系. 发射率-温度曲线上存在峰值. 各种材料的峰值所对应的特征温度 (T_{max}) 不同. 图 1 为钨丝经电子轰击后, 按一定升温速率加热所得的电子发射率与温度的关系曲线. 第一次加热时出现几个特征峰值, 待再次加热时各峰均消失. 固体的 TSEE 曲线反映了固体的固有特性和外界因素的作用, 并随测试条件 (如升温方式) 而变化.

研究固体的 OSEE 曲线, 可以看出外逸电子的发射率与入射光波长 (光子能量) 有关. 对有些固体, OSEE 曲线存在峰值, 而对另一些固体, OSEE 曲线不存在明显的峰值. 前者称为选择性 OSEE, 后者称为非选择性 OSEE. 图 2 表示铝经过研磨后的 OSEE 曲线.