

按(51)式计算出平均光子数 $\langle n \rangle = \frac{1}{B} \left(\frac{\delta}{\xi} - 1 \right)$, (51)式中的 Z 为规一化常数, 当 N 很大时, ρ_{nn} 趋近于 Poisson 分布, $\rho_{nn} \rightarrow \frac{N^n}{n!} e^{-N}$. 图 5 给出三种情形的光子统计分布^[1]: 1——低于阈值, $\delta < \xi$; 2——等于阈值, $\delta = \xi$; 3——超过阈值的 20%, $\delta/\xi = 1.2$. 取定 B , 使得当 $\delta/\xi = 1.2$ 时, $\langle n \rangle = 50$.

四、小 结

目前激光器的热噪音水平还比较高, 有些在激光振荡中可能存在的量子现象不易表现出来, 以致解经典的 Langevin 方程已与实验很好符合. 但激光振荡的全量子理论, 在描述激光振荡的物理过程、揭示光子的统计及相关性等方面比半经典理论深入, 有效得多了. 广泛开展光子计数及相关性测定等实验研究是很有意

义的.

参 考 文 献

- [1] J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes *Phys. Rev.*, **95**(1954), 282; **99**(1954), 1264
- [2] P. Grivet and A. Blaquiere, Proc. on the Symposium Opt. Masers (ed. Jerome Fox), New York, Polytechnic Press, (1963).
- [3] Proceedings of the International School of Physics, "Enrico Fermi" Course 42, "Quantum optics", (1969) 586.
- [4] H. Haken, *Hander der Physik Band, XXV/2c. Licht und Materie, Ie* (1970).
- [5] L. I. Schiff, *Quantum Mechanics*, 2nd ed, (1968)
- [6] H. Risken, Ch. Schmid and W. Weidlich, *Z. Physik*, **194**(1966), 337.
- [7] W. Smith and J. A. Armstrong, *Phys. Rev. Letters*, **16**(1966), 1169.
- [8] F. T. Arecchi, *Phys. Letters*, **25A**(1967), 59.
- [9] R. R. Schaefer and C. R. Willis, *Phys. Rev. A*, **13**(1976), 1874.
- [10] R. Roy and L. Mandel, *Opt. Communications*, **23**(1977), 306.
- [11] M. Scully and W. E. Lamb Jr., *Phys. Rev.*, **159**(1967), 208.

冷 中 子 技 术

刘 圣 康 周 宗 源
(南京大学物理系)

一般中子源产生的是快中子. 快中子在减速剂中碰撞减速. 当能量降到 0.025 电子伏左右时, 中子能量与减速剂分子热运动能量达成热平衡. 这时的中子叫做“热中子”. 在热中子谱中, 一部分中子的能量小于 0.005 电子伏(波长大于 4 埃), 叫做“冷中子”. 当中子能量小于 10^{-4} 电子伏(波长大于 30 埃)时, 叫做“甚冷中子”. 当能量小于 10^{-7} 电子伏(波长大于 1000 埃)时, 叫做“超冷中子”.

一、冷中子技术的物理基础^[1]

中子同其他微观粒子一样, 具有波粒二象

性. 冷中子的波动性较显著. 当它由真空入射到介质平面时, 就会产生折射和反射等现象. 设 n 为此介质的中子折射系数, 当中子入射角 $\theta > \sin^{-1} n$ 时, 就会发生全反射现象.

中子与物质作用时, 存在一个散射势:

$$U = \frac{2\pi\hbar}{m} Nb,$$

式中 m 为中子的质量, \hbar 为普朗克常数, N 为单位体积内的原子数, b 为原子核的平均散射长度. 对于铁磁材料, 还要添一项 $\pm \mu B$, μ 为中子磁矩, B 为磁感应强度. 当中子自旋与 B 反平行时取 + 号, 平行时取 - 号.

对大多数元素的原子核而言, $b > 0$, 即中

子受到排斥势的作用。可以证明,当中子能量 $E \leq U$ 时,不论入射角如何,都满足发生全反射的条件。因此,定义 $E \leq U$ 的中子为“超冷中子”。 U 值因物质而异,但都在 10^{-7} 电子伏左右。表 1 给出了一些物质的散射势 U 及发生全反射时的临界速度 V_{cr} 。对于铁磁材料,给出两个值(即 $U = U_{\pm} \pm \mu B$)。

由于超冷中子的能量在数值上与中子-磁场相互作用势(例如 $B = 1$ 特, $\mu B = 0.6 \times 10^{-7}$ 电子伏)相近,又与中子的重力势能(例如中子被提到 1 米高时,势能 $\approx 10^{-7}$ 电子伏)可比较。因此,超冷中子具有一系列特点:可以利用机械装置进行能谱变换、可以利用磁场或重力场来实现聚焦、加速或减速;可以贮存在容器或磁场中等等。

表 1 一些物质的散射势和临界速度

物 质	散射势 U (10^{-7} 电子伏)	临界速度 V_{cr} (米/秒)
Al	0.54	3.2
Cu	1.65	5.6
C (2 克/厘米 ³)	1.75	5.8
Be	2.5	6.9
D ₂ O (1.105 克/厘米 ³)	1.66	5.6
Fe	3.50; 0.90	8.2; 4.2
Ni	2.7; 2.0	7.2; 6.2
Mn	-0.68	—
H ₂ (液态 20 K)	-0.08	—
H ₂ O (1.0 克/厘米 ³)	-0.15	—

二、冷中子源

1. 强中子源

在常温减速剂的热中子谱中,冷中子只占 2%^[2]。想做冷中子工作,必须有强中子源。反应堆可作为强中子源。例如,法国 ILL 堆^[3]的热中子通量为 1.2×10^{15} 中子/厘米²·秒。中能质子加速器可作为强中子源,因为散裂反应的中子产额很高。利用高能加速器的预加速段的剩余束流来产生中子比较经济^[4]。例如,日本的 KENS 通量为 3×10^{14} 中子/厘米²·秒。电子直线加速器也可作为强中子源^[5]。例如,苏

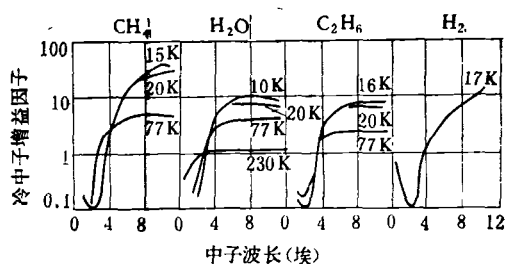


图 1 冷减速剂的冷中子增益因子

联 IBR-III (30 兆电子伏,加钷增殖装置)的通量为 5×10^{16} 中子/厘米²·秒。

2. 冷减速剂

采用冷减速剂可以增加冷中子的比例。冷减速剂应选择散射截面大而吸收截面小的。其好坏用冷中子增益因子来表示。图 1 为对 CH₄, H₂O, C₂H₆ 及 H₂ 四种冷减速剂的增益因子的测量结果^[5]。以 CH₄ 为最好。

3. 转换器

普通导管不能从堆中引出超冷中子,因为它会被管壁吸收及全反射。利用薄窗只能引出较快的冷中子。为了弥补低能损失,在导管内先放置一个冷减速剂做的转换器。冷却转换器可以提高超冷中子产额。

甲烷在强辐射下化学稳定性差,不能作为转换器。在低功率堆上可用聚乙烯,在高通量堆上只能用氢化锆(SM-2^[6])。对于垂直或倾斜的导管,由于中子受重力减速,可以不用转换器而只要一个薄窗就行了^[7]。

图 2 是 BBP-1 堆上的超冷中子气体转换器^[1]。将氢转换器从 300K 冷却到 80 K,冷中子增益 3.2 倍。

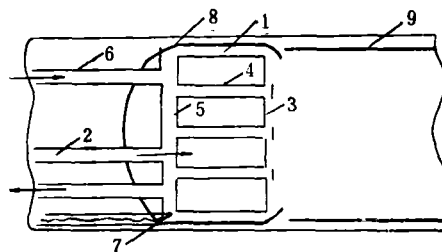


图 2 BBP-1 堆上的气体转换器

1. 铝盒; 2. 气体输入管; 3. 输出窗(铝箔); 4. 支架;
5. 铜箔; 6. 冷却管; 7. 热电偶; 8. 隔离弹簧; 9. 导管

4. 超冷中子的机械发生器

热中子或冷中子束在一个转动的反射镜系统上接连反射可以减速到超冷中子能区。该装置叫“中子涡轮机”。图3为轴向中子涡轮机原理图^[8]。中子在运动着的切刀上全反射而被减速，速度可由50米/秒减到5米/秒，效率约为50%。图4为径向中子涡轮机原理图^[9]。中子在运动着的桨上全反射，从桨落到中枢，受向

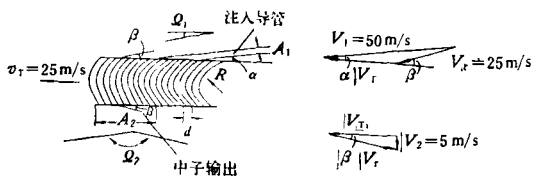


图3 轴向中子涡轮机原理图

V_1 为中子输入速度； V_2 为中子输出速度； V_r 为切刀前进速度； V 为相对于切刀的速度

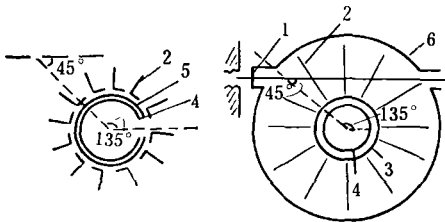


图4 径向中子涡轮机原理图

1.窗； 2.桨； 3.中枢； 4.中子道；
5.镉屏蔽； 6.钢外壳

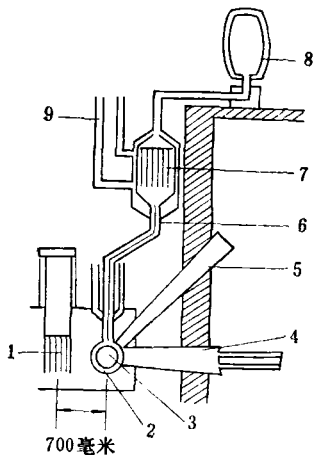


图5 11L堆的冷中子源

1.活性区； 2.冷减速剂容器； 3.冷减速剂； 4.水平导管； 5.倾斜导管； 6. D_1 热流； 7. D_2 冷凝器； 8. D_3 气发生器； 9.接氨贮存器

心力而减速。另外，还有利用多普勒原理减速的^[10]。

5. 反应堆冷中子源

现以劳厄-朗之万研究所的高通量反应堆为例，看一下冷中子源的概况。图5为其示意图^[11]。因冷减速剂容器是直径为38厘米的大圆筒，冷冻机功率需5千瓦。由于采用液体仲氢做减速剂，增益因子很大(大于100)。

三、冷中子探测

探测甚冷中子，特别是超冷中子，有下述特殊要求：

- (1) 入口窗必须很薄，其材料应该是散射势低且吸收截面小的。
- (2) 利用中子核反应探测中子时，作用材料的数量应比热中子探测器少。限制作用材料的厚度可以减少速度较快的中子所引起的本底。
- (3) 选择散射势低的化合物作为超冷中子探测器的作用物质。
- (4) 超冷中子探测器要求灵敏面积大。
- (5) 在强辐射场中具有特别高的稳定性及甄别本领。

已成功的冷中子探测器有充气(BF_3 及 3He)的正比计数管、闪烁探测器、裂变计数管、激活箔、径迹分析器和照相技术等。

正比计数管的优点是简单、可靠、效率高及本底低。 ^{10}B 浓度为11%铝窗厚度为0.1毫米的 BF_3 管探测速度小于5.6米/秒的超冷中子的效率约为50%^[12]。 3He 管也差不多。

固体闪烁探测器可以不用窗^[13]。它的激活物质是含 6Li 化合物的薄膜(例如，在 ZnS 上的 $LiOH \cdot H_2O$)。

上述探测器的作用都是瞬时的，可以测量动态过程。还有一些探测器只能测量静态，例如：锰箔激活法^[14]，高选择性及高效率的径迹探测器(用云母板来接受裂变产物)^[15]及甚冷中子的照相技术^[15]等。

还有一个方便的但效率低的探测超冷中子

的方法,就是经过非弹性散射使它热化,然后用热中子探测器来探测^[7].

四、冷中子谱仪

1. 冷中子的导引

1963年,利用中子与导管壁多次全反射原理把冷中子引到远处的试验成功了^[16].

甚冷中子导引时损失的主要原因是在粗糙壁面上漫射使它离开了能进一步作全反射的角度.光滑表面可减少损失.

超冷中子在任何入射角均能全反射,且吸收几率很小(例如,铜为 2.5×10^{-4}),按理说,它对导管的形状及表面性质没有特殊要求.但由于它有碰撞热化机制,实际上反射损失不小.例如,SM-2由于导管弯得厉害而损失很大.

所以不论甚冷中子或超冷中子都要求有光滑的导管壁和曲率半径大的弯曲.导管的弯曲是为了限制 γ 射线及较快中子的本底.

2. 垂直导管

图6是1967年建成的第一个甚冷中子谱仪^[12].它的飞行时间分辨率约为5—20%.利

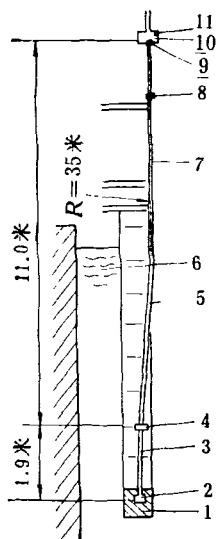


图6 在FRM堆上的垂直谱仪

1.活性区; 2.石墨转换器; 3.镍导管; 4.转子(平行的薄玻璃板); 5.铜导管; 6.水; 7.抽空到 3×10^3 帕; 8.铝窗; 9.样品; 10.带铝窗的BF₃探测器; 11.晶体

用S形弯曲克服本底所引起的困难.例如,中子速度为5米/秒时,虽然测得通量只有1.4中子/厘米²·秒,但它已超过本底100倍.后来用电抛光铜管代替镀镍的铝管,用铝窗代替石墨转换器^[7].

目前在ILL堆上的装置^[14]是水转换器、不锈钢和镀镍玻璃的倾斜导管.

3. 水平导管

1968年建成第一个超冷中子水平导管.图7是最近在SM-2高通量堆上的超冷中子谱仪^[17].在转换器处的热中子通量为 $(2-4) \times 10^{14}$ 中子/厘米²·秒,谱仪对速度为5.6米/秒的超冷中子通量为11中子/厘米²·秒.

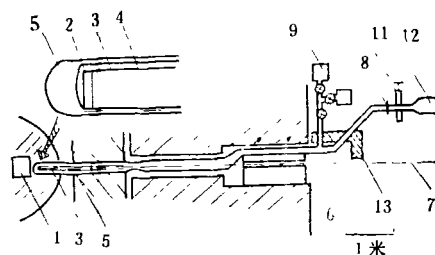


图7 在SM-2堆上超冷中子水平管道

1.活性区; 2.转换器(氢化锆); 3.导管(电抛光不锈钢); 4.冷却; 5.真空包壳(锆); 6.阀; 7.束; 8.铝窗; 9.真空泵; 10.导管(电抛光铜); 11.真空阀; 12.氦-3探测器; 13.屏蔽

五、中子的贮存

1. 物质瓶

利用超冷中子全反射的特点,可将它引入并约束在适当介质做成的“物质瓶”中^[17].这种瓶由石墨、无硼玻璃或冷却到液氮温度的铍做成,体积不大于1米³,超冷中子在它的 β 衰变平均寿命(约 10^3 秒)期间,将与瓶反射碰撞 10^3-10^5 次.图8为FRM堆上研究的石墨瓶^[7].

在探测器前面放一片箔是为了确定贮存中子谱的低能阈值.实验发现中子随时间按近似指数衰减的.实际贮存寿命只有几十秒,比理论估算小得多.兰福德^[18]认为介质表面氢的沾污可能是主要问题.斯特列柯夫^[19]认为:超冷

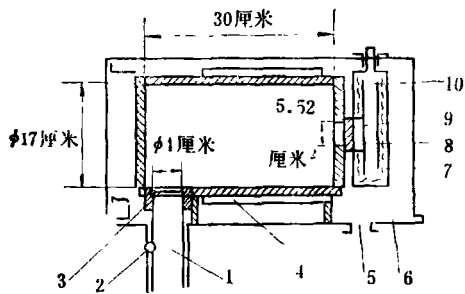


图8 在FRM堆上研究的石墨瓶

1. 导管; 2. 监视器; 3. 入口阀门(铜圆锥); 4. 液氮容器; 5. 离子泵; 6. 抽空到 10^{-6} 帕; 7. 铜盒内的B,C; 8. 箔; 9. 出口阀门; 10. BF₃

中子与瓶壁碰撞而发生非弹性散射, 导致超冷中子的热化. 一部分热中子被吸收, 一部分热中子透过瓶壁. 所以, 超冷中子的热化可能是瓶内中子漏失的主要原因.

为了延长瓶中中子的贮存寿命, 最好做成超高真空的贮存瓶, 用冷却材料做成对含氢物质的屏蔽层. 柯斯维采夫报道^[20]: 超冷中子在铍瓶中贮存时间达650秒. 瓶内保持超高真空(例 10^{-5} 帕), 可使贮存时间不变.

为了避免瓶壁的影响, 也可利用磁场来贮存超冷中子.

2. 磁瓶

磁瓶也叫“中子贮存环”. 中子具有磁矩 μ . 因此, 它在非均匀磁场中运动时受到力 $\pm \mu \nabla B(r)$ 的作用. 中子自旋取向对磁场反平行时取+号, 平行时取-号.

早在1951年就有人提出利用六极磁铁作

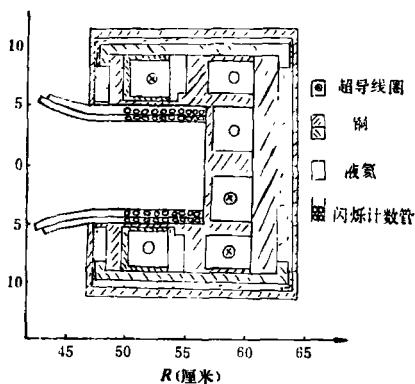


图9 波恩大学的磁贮存环

为中子磁透镜的建议, 1977年波恩大学第一次建成了中子贮存环^[21], 图9为其线圈布置图.

环的直径为1.2米, 采用了超导磁铁, 最大六极矩磁场为3.5特, 最大梯度为1.2特/厘米. 可使方位速度为10—20米/秒, 侧速度 ≤ 4 米/秒的中子约束在环中. 磁场还附加非线性十极矩分量以限制横向中子的电子加速器振荡振幅, 从而减小共振效应而达到稳定中子轨道的目的. 由于只有自旋平行于磁场的中子能够约束在环中, 因此必须采取措施防止中子自旋翻转, 使贮存中子数保持不变.

这个环已在ILL堆上工作, 开始进行中子衰变寿命测量.

六、结束语

冷中子技术的发展, 为核物理和固体物理等基础学科的研究提供了非常有利的条件. 特别是超冷中子贮存技术的成功, 可以深入研究中子的基本性质. 例如, 精确测量中子电偶极矩^[22]是一项很有意义的工作. 还有精确测量中子的寿命及电荷, 研究中子与中子作用等, 也是很有意义的工作.

研究冷中子与物质的相互作用并利用其散射特性研究固体亚微观结构及低能激发都是新的研究领域.

参 考 文 献

- [1] A. Steyerl, *Springer Tracts in Modern Physics*, **80**(1977), 57.
- [2] 井上和彦, 渡边昇, 日本原子力学会誌, **18-3**(1976), 129.
- [3] P. L. Mössbauer, *Proceeding of the International Conference on the Interactions of Neutrons With Nuclei*, Lowell, (1976), 65.
- [4] 石川義和, 日本物理学会誌, **33-2**(1978), 106.
- [5] K. J. Inoue et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **13-7**(1976), 389.
- [6] Yu. Yu. Kosvintsev et al., *Nucl. Instr. and Methods*, **143**(1977), 133.
- [7] A. Steyerl et al., *Z. Phys.*, **267**(1974), 379.
- [8] A. Steyerl, *Nucl. Instr. and Methods*, **125**(1975), 461.
- [9] N. T. Kashukov et al., *Nucl. Instr. and Methods*, **126**(1975), 43.

- [10] D. Bally et al., *Nucl. Instr. and Methods*, **127** (1975), 547.
- [11] P. Ageron et al., *Irradiation Facilities for Reserch Reactor*, IAEA, (1973), 247.
- [12] A. Steyerl, *Nucl. Instr. and Methods*, **101**(1972), 295.
- [13] A. Steyerl, *Phys. Letters*, **29B**(1969), 33.
- [14] J. M. Robson et al., *Phys. Letters*, **40B**(1972), 537.
- [15] J. C. Bates, S. Roy, *Nucl. Instr. and Methods*, **120**(1974), 369
- [16] H. Maier-Leibnitz, T. Springer, *J. Nucl. Energy A/B*, **17**(1963), 217.
- [17] V. I. Luschnikov, *Proceedings of the International Conference on the Interactions of Neutrons with Nucli*, Lowell, (1976), 117.
- [18] W. T. Lanford et al., *Phys. Lett.* **39**(1977), 1509
- [19] A. B. Стрелков, М. Хетцельг, *ЖЭТФ*, **74** (1978), 23.
- [20] Ю. Ю. Косвинцев и др., *Письма в ЖЭТФ*, **28** (1978), 164.
- [21] W. Paul and U. Trinks, *Fundamental Physics with Reactor Neutrons and Neutrinos*, The Institute of Physics (Bristol and London), (1978), 18—27
- [22] 刘圣康, 林进福, *物理*, **9-5**(1980), 444.

气球载望远镜进行天体红外观测

邹惠成

(中国科学院上海天文台)

几个世纪以来,天文学一直是通过地球大气层一扇很窄的可见光“窗口”去观测和认识宇宙,所观测到的天体(指太阳系外)温度范围大约从 2000 K 到 50000 K。二十世纪三十年代以后,人类发现了大气层的另一扇“窗口”,即无线电波窗口,它比光学窗口宽得多。可见光波长从 0.4 微米到 0.8 微米左右,而无线电波波长从几毫米到几米、几十米。一门迅速发展起来的射电天文学,与光学天文学互相补充,推动天文学的更快发展。但是,从可见光到无线电波之间,还留下一个窗口,那就是波长从 1 微米到 1000 微米的红外波段。

1800 年英国天文学家赫歇尔(W. Herschel),在观测太阳时,偶然发现了“红外线”。但红外天文的发展速度,远比射电天文来得慢。地球大气层的吸收和散射,以及大于 5 微米波长的大气发射,大大地限制了地面红外天文观测。就整个红外波段来说,大气的吸收是主要的,其中以水蒸气、二氧化碳和臭氧吸收最严重,其次是甲烷和氧化氮。水蒸气随高度增加而迅速减

少,在 12 公里以上可以忽略不计。二氧化碳吸收带直到 22 公里以上还是明显的。臭氧含量随高度增加而增加,到 22 公里处有一个极大值,以后再随高度增加而减少。其他气体如一氧化碳、氨气、硫化氢等也吸收红外线,但因含量少,只有在工业集中的大城市上空才能探测到它们的存在,并且在近地面时,都被二氧化碳和水蒸气的强吸收带所淹没。

实测表明,在 28 公里的高度,对 25 微米以下的红外光谱,大气吸收可以忽略不计;对 25 微米以上的远红外,大气中各种成份的吸收带,变为很窄的吸收线,吸收也减弱。在 40 公里以上的高度,则 25 微米以上的远红外吸收也可以忽略不计。由此可见,大气层外的高空观测是非常重要的。

一、高空气球及球载红外望远镜

1783 年,在巴黎上空升起了世界上第一个气球,至今已有二百年的历史了。1874 年,气