

慢中子相关的新物理

(北京航空航天大学 孙保华 编译自 W. Michael Snow, *Physics Today*, 2013,(3):50,
原文详见 <http://ptonline.org>)

基于慢中子的高灵敏度物理实验有助于解答宇宙学、引力以及粒子物理基本模型中的诸多未解之谜。

在2013年3月出版的*Physics Today*杂志上刊登了美国印第安纳大学Michael Snow教授撰写的题为《慢中子奇异物理学》的文章，介绍了最近在世界范围内利用慢中子开展的高灵敏度实验。现介绍如下：

很少有科学家直接关注中子。中子不带电，在原子核中受强相互作用的束缚。除裂变等少数核过程之外，中子基本上没有影响。虽然，作为一种灵敏的无损探针，中子常用于测量凝聚态物理等领域中物质的微观结构和磁化性质。然而，在这些研究中，人们感兴趣的只是样本的动力学性质，而非中子本身。

事实上，中子可以用来探测原子核和粒子物理、天体物理和宇宙学以及引力学中的许多重要问题。读者也许会对此感到惊讶，那些使中子被“遗忘”的特性——不带电、具有极小的磁矩和电极化率，反而成为了它们的优势。

能量低于25meV的中子称为慢中子。

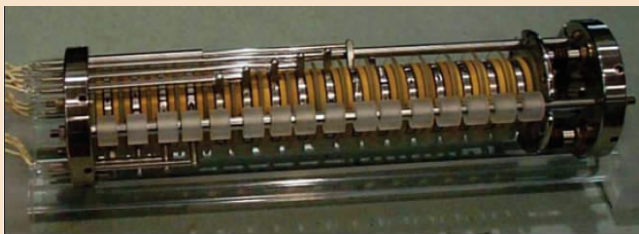


图1 由这个装置产生的静电场和磁场相结合，组成潘宁阱。NIST的研究者用该装置来捕获从准直中子束衰变而来的质子，并得到计数率。通过同时监控阱内的中子流量，就可以计算中子寿命，精确度达到0.1%

子。这些中子的德布罗意波长与高分子物质的原子间距相近，因此具有结构灵敏性。类似于中性原子束流和捕获的原子，慢中子在精密实验装置内也可储存足够长的时间。

在很多情况下，中子越慢，测量精度就越高。当能量低于100neV的时候，中子完全冷却，在固体表面、磁力势或引力势下会以任何人射角度发生全发射。这种能量范围下的中子称为超冷中子。

中子和核合成

在大爆炸核合成理论模型中，原初⁴He丰度的计算误差主要来源于中子寿命的不确定性。然而，中子寿命的实验结果并不一致。

实验上测量中子寿命的一种方法是利用慢中子束流，通过同时测量平均中子数以及衰变生成的质子数，推算出中子的寿命 τ_n 。质子的计数可以利用潘宁阱测量。在过去的几十年

里，实验测得的 τ_n 在886s和889s之间，不确定度约为0.3%。图1展示了一个潘宁阱的静电场部分。美国国家标准与技术研究院(NIST)将

使用这种潘宁阱测量中子寿命，预计精确度为0.1%。

第二种方法则是把超冷中子储存在中子瓶内，在没有其他损失的情况下，超冷中子数将按指数衰变规律减少。通过测定瓶内中子数随时间的减少规律则可直接确定中子衰变的半衰期。但是，最新实验的结果却不一致，差别甚至高达5个标准偏差。为了提高测量精度，也可利用磁场梯度或磁场梯度与引力相结合的方式来捕获中子，相关实验探索正在进行中。

宇称守恒的破坏

在中子衰变实验中，除测定中子寿命外，还可以通过测量中子衰变产物的能谱以及角关联，来研究粒子物理中的对称性破缺。或许此类型实验中最有名的一个，就是1957年吴健雄及其合作者在NIST开展的极化原子核⁶⁰Co的衰变实验。他们发现， $\langle \mathbf{s} \cdot \mathbf{p} \rangle$ 在奇偶变换下是奇的，其中 \mathbf{s} 为⁶⁰Co的自旋， \mathbf{p} 为电子动量，进而验证了弱相互作用中宇称是不守恒的。

后期的实验都力求直接利用中子进行类似的实验，研究中子衰变中的中子自旋和电子动量的关联 $\langle \mathbf{s}_n \cdot \mathbf{p}_e \rangle$ 。此数据与中子寿命一起可以用来确定标准模型的一个关键参数，即Cabibbo—Kobayashi—Maskawa矩阵的矩阵元 V_{ud} 。洛斯阿拉莫斯国家实验

室和欧洲大型强子对撞机实验室均在开展相关实验。

正反物质不平衡

Andrei Sakharov 首次提出，宇宙中正反物质的不对称应该可以从基本原理计算出来。他提出，如果在爆炸期间同时满足三个条件，则可以引起初始的对称态向不对称态演变，即重子数(B)不守恒，电荷宇称(CP)不守恒(如果 CPT 对称建立，则时间反演不守恒)和远离热平衡。

T 不守恒和 B 不守恒，均可以利用基于中子的灵敏实验进行探测。在中子的衰变中，科学家们还没有找到时间反演不对称性的证据；而时间反演不对称性，也会影响中子电偶极矩(EDM)的大小。理论分析得到的中子电偶极矩大约在 $eR=10^{-18}e\cdot\text{cm}$ 。而目前法国格勒诺布尔的劳厄—朗之万研究所(ILL)测得的中子电偶极矩上限值，则低于 $10^{-25}e\cdot\text{cm}$ ，此结果已用以约束标准模型之上的超对称理论和其他模型。通过提高超冷中子数密度、观测时间以及所施加的电场的大小等方式，科学家们期望可以把中子电偶极矩的上限提高两个数量级。筹划中的实验包括美国橡树岭国家实验室散裂中子源的 nEDM 合作项目。

B 不守恒的证据可能以中子—反中子振荡的形式表现出来。类似于中微子振荡，这样的振荡需要一种新的相互作用使 B 变成 2 倍。利用慢中子束流，ILL 的灵敏度实验已经发现了这种现象的证据。

夸克—夸克弱相互作用

与弱相互作用引起的 β 衰变不同，夸克间的弱相互作用不会产生逃逸出核子的对象，但其却可以通过弱

相互作用中宇称破缺来研究。例如，橡树岭的 NPDGamma 合作组，通过研究中子和质子转化为氘和光子的过程，期望找到质子和中子夸克间弱相互作用的证据。理论预言，NPD-Gamma 实验中自旋和动量关联的不对称大约只有亿分之 1—4，而在中子衰变中不对称产额大约为 10%。

精确可控的慢中子束极化度和中子—物质间小的作用截面，使寻找慢中子穿过宏观物质时所形成的微小作用力成为了可能。NIST 最近进行了一个实验，发现当横向极化的慢中子穿过液氦时，中子自旋转动的上限为每米 1 微弧度。这个结果极强地约束了长程的奇宇称力。

测试引力

利用中子干涉仪，1974 年科学家首次观测到了中子在地球引力场中的干涉，这个实验也成了量子力学教科书的一个经典示例。通过磁场，可以很容易将入射束流中的中子极化，或者控制干涉仪臂内中子的能量和动量。这样就可以用中子干涉仪验证贝尔不等式、量子消相干以及量子力学中的其他法则，还可以产生所谓的 Greenberger—Horne—Zeilinger 态。正如 Lord Rayleigh 用光干涉仪测量透明

材料的折射率，中子干涉仪可用于测量材料的中子光学相移。在轻核(^4He 或者更小的核)中，精确地测量中子—原子核散射长度有助于理论家理解核的三体力。

引力比其他相互作用都弱的一个可能解释是，引力场线在短程时会逃逸到额外维的时空。按照高斯法则，引力的平方反比定律在距离低于 $10\mu\text{m}$ 时需要修正。鉴于对暗物质和暗能量组成知识的匮乏，人们猜测是不是存在新的相互作用。对暗能量密度的理论分析表明，在 $100\mu\text{m}$ 量级时可能会发现新现象。而具有小磁矩和电极化率的中子，是在短尺度范围测量引力的一个很好选择。

充分冷却的中子会漂浮在一个镜面之上，其位置和能量都可由量子力学的束缚态表示。在最低的束缚态，能量为 1.4peV ，中子在距离镜面 $10\mu\text{m}$ 量级的距离上徘徊。在 ILL 的实验中，超冷中子通过中子镜面上方的一狭缝时，会形成不同的束缚态。最近，用图 2 所示的设备，ILL 的研究组观察到了中子在低引力束缚态间的跃迁。

总之，在近些年的高灵敏度实验中，研究人员已经实现了慢中子越来越多的应用，慢中子物理学也可能会带给我们更多的惊喜。

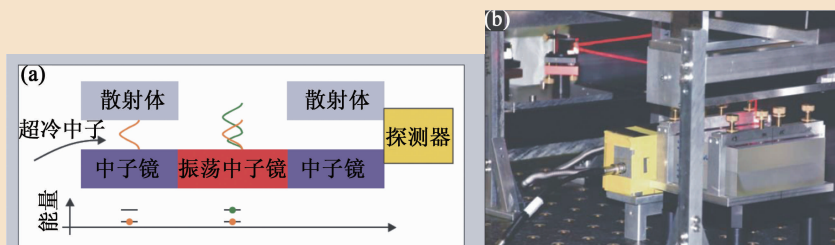


图 2 当一束水平方向入射的中子通过窄间距镜子时，可以实现超冷中子在引力束缚态间的量子跃迁 (a) 在地球引力场中，超冷中子在镜面上方徘徊，距离镜面的高度与其量子化能量有关。若把散射体放在镜面上方合适的高度，则只能传输处在最低引力束缚态的中子，其垂直空间分布几率用橙色曲线表示。调谐到一个跃迁共振处的振动反射镜，则可将中子转变成基态和激发态的叠加(绿色)。二次散射体保证了只有基态才会被探测器记录；(b)展示了 ILL 的真实装置