

轻子核物理：话旧论新

宁平治 李磊 罗延安

轻子与原子核概述

近百年来，人们对构成物质世界基本“砖块”的认识不断发展深化。从原子到原子核，再到核子内的夸克（图1）。这些认识大多是通过散射实验获得的，如用从加速器出来的高速质子或电子（通称探针）轰击靶粒子。这里感兴趣的是通过电子探针来探测原子核的结构和性质。

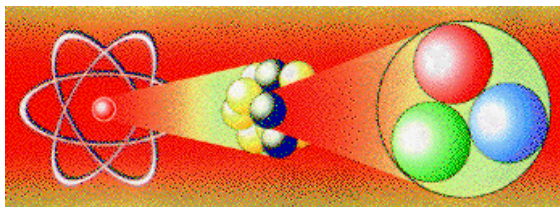


图1 原子—原子核—夸克

实际上，从20世纪50年代初开始，电子探针已用于核结构研究。1955年，美国斯坦福大学的Hofstadter和McAllister首先利用电子—质子弹性散射实验测量了质子大小。今天，美国杰弗逊国家实验室（JLab）的连续电子束设备（CEBAF）提供的高品质，高亮度，高能量分辨率的电子束流，为用电子探针研究原子核性质创造了更好的条件。通过电子弹性、准弹性、非弹性以及深度非弹性散射等过程的实验数据，已经和正在提取大量有关原子核结构与核子结构的信息。

除电子外，还有 μ 子、 τ 子及其相应的中微子（电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子）构成轻子家族。这六种“味”的轻子连同六种“味”的夸克（u、d、s、c、b、t）构成物质世界的基本“砖块”，即所谓“标准模型”（图2）。

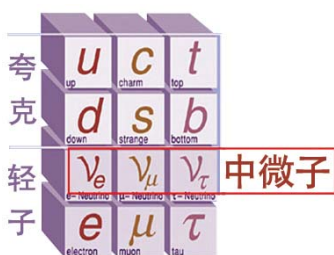


图2 物质基本“砖块”的“标准模型”

作为研究核子和原子核结构的探针，轻子与强

子相比有以下优点：①到目前为止，实验上尚未发现轻子有内部结构，因此，在研究轻子—核子相互作用时，可以不考虑轻子的内部结构，把它看作“点”粒子；②轻子与核子之间的相互作用为电磁相互作用和（或）弱相互作用，随着电弱统一理论的建立，理论上对电弱相互作用的认识比对强相互作用的认识要清楚得多；③在以电子—质子散射为例研究轻子—核子相互作用时，因为电子质量远小于质子质量，在实际计算中常可忽略不计，从而使计算大大简化。

电子与原子核的相互作用

现在进一步讨论电子与原子核相互作用的特点。图3是电子与原子核相互作用示意图。入射电子与原子核电磁相互作用的传媒粒子是光子，通过交换虚光子将一定能量和动量转移给靶核。散射电子将携带核内信息。

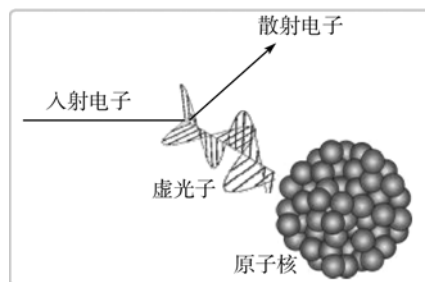


图3 电子与原子核相互作用示意图

按照入射电子德布罗意波长不同，电磁相互作用既可以施加到整个原子核的尺度上，也可以只作用到较小的核子尺度上，因而可以方便地用来分别探测原子核的整体性质和局部性质（参见图4）。

在研究由电子探针提取核内信息时，把握好电子探针能量标度与原子核内的空间尺度间的关系是必要的。例如，对于非弹性电子散射（ e, e' ）过程，电磁相互作用的传媒粒子是虚光子，其德布罗意波长 λ 与电子转移给靶的动量 q 的关系为 $\lambda \cong 1.25/q$ ，此处 q 的单位为 GeV/c （亦常用 $Q^2 \equiv -q^2$ ）。对于低能电子探针， $q < 0.3 \text{ GeV}/c$ ，相应长度分辨率约为 $5 \sim 10 \text{ fm}$ ，即只能探知原子核的整体性质（如表面效应等）；当 $q \approx 1 \text{ GeV}/c$ ，可探知核内单个核子性质和

核介质效应；对大动量转移情况， $q > 2\text{GeV}/c$ ，应可探知核内夸克效应。

在研究由电子探针提取核子内信息时，同样通过改变动量转移 Q 来改变电磁探针的波长：当 $Q^2 < 0.1\text{GeV}^2$ ，可探测核子整体（如核子电荷半径）；当 Q^2 为 $0.1 \sim 10\text{GeV}^2$ ，可探测核子内部结构；当 $Q^2 > 20\text{GeV}^2$ 则属于微扰 QCD 标度。

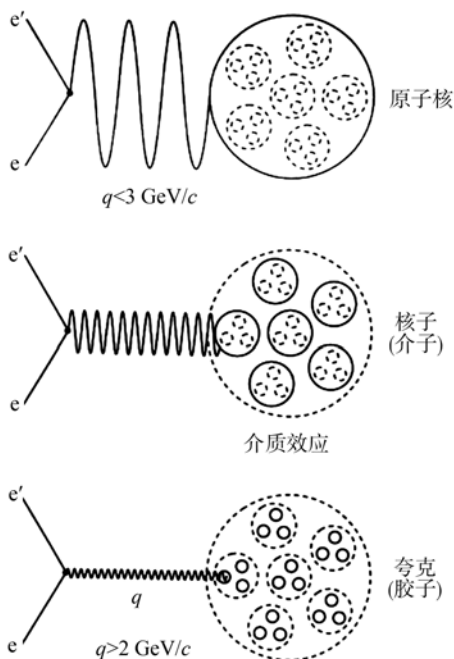


图4 不同转移动量电子探针示意图
对原子核的非弹性电子散射探测到核内不同距离尺度

中微子与原子核的相互作用

上面介绍的是轻子家族中的电子与原子核的相互作用，电子是研究较早、较清楚的轻子探针。轻子家族的另一类重要成员是中微子，它是电中性弱相互作用粒子，与物质相互作用截面非常非常小，极难探测，大约 100 亿个中微子才能发生一次与物质相互作用。直到 1956 年，在核反应堆中通过核反应 $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ，才首次观察到中微子。

熟知，电子束流和强子束流可以直接由加速器得到，而中微子束流无法直接由加速器得到。然而，随着中微子物理学和相关科学的发展，对中微子束流的需要越来越迫切，甚至近年来不断有关于建立中微子工厂的提议。

中微子探针虽然不能由加速器直接得到，却可以由加速器或反应堆间接得到。实际上许多实验室是利用加速器运行时或核电站反应堆发电时自然产

生的中微子进行各种实验。除了这些人工的中微子源以外，还有天然中微子源，如太阳中微子、大气中微子、超新星中微子等。

基本粒子的标准模型假定中微子的质量为零。当代的认识是，中微子的质量不为零，是略大于零的有限值。它的绝对值是多少，仍是实验和理论探讨的问题。如果中微子存在振荡现象，就必须以轻子数不守恒和修改标准电弱模型为代价。所以一般认为，中微子振荡现象及相关参数的实验测定涉及物理学基本理论问题，因而受到国际关注。

什么是中微子振荡？标准模型中三种味的中微子 ν_e, ν_μ, ν_τ 可认为是三个不同的弱作用本征态，对应的三种轻子数近于分别守恒。中微子相互作用总哈密顿量为 $H_i = H_{0i} + H_{wi}$ ，其中第一项 H_{0i} 表示使轻子数分别守恒的相互作用，第二项 H_{wi} 是使轻子数改变的相互作用。如果 $H_{wi} = 0$ ，则三种味的中微子 ν_e, ν_μ, ν_τ 不仅是弱作用本征态，而且也是总哈密顿量 H_i 的本征态，即能量和质量的本征态。如果 $H_{wi} \neq 0$ ，则弱作用本征态不再是能量和质量的本征态。但仍可找到 H_i 的新的能量本征态 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ 和相应的能量本征值 E_1, E_2, E_3 。态 $|\nu_i\rangle (i=1,2,3)$ 和态 $|\nu_\alpha\rangle (\alpha=e,\mu,\tau)$ 之间通过一个么正变换 $U_{\alpha i}$ 相联系： $\nu_i = \sum_\alpha U_{\alpha i} \nu_\alpha$ ， $\alpha=e,\mu,\tau, i=1,2,3$ 或用 3×3 矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

矩阵 U 称为中微子混合矩阵，它把弱本征态 $|\nu_i\rangle (i=1,2,3)$ 与质量本征态 $|\nu_\alpha\rangle (\alpha=e,\mu,\tau)$ 联系起来，矩阵元 $U_{\alpha i}$ 的数值可由中微子振荡实验数据确定。

中微子振荡的原因是三种中微子的质量本征态与弱作用本征态之间存在混合。中微子的产生和探测都是通过弱相互作用，而传播则由质量本征态决定。由于存在混合，产生时的弱作用本征态不是质量本征态，而是三种质量本征态 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ 的叠加。三种质量本征态按不同的物质波频率传播，因此在不同的距离上观察中微子，会呈现出不同的弱作用本征态成分 $|\nu_\alpha\rangle (\alpha=e,\mu,\tau)$ (图 5)。当用弱作用去探测中微子时，就会看到不同的中微子。

在研究中微子振荡和中微子质量等基本问题

时，作为检测器材料的原子核以及中微子-核相互作用知识起着重要作用，它们是构成中微子振荡实验系统误差的主要来源。需要理论和实验提供尽量精确的中微子与原子核的散射截面。

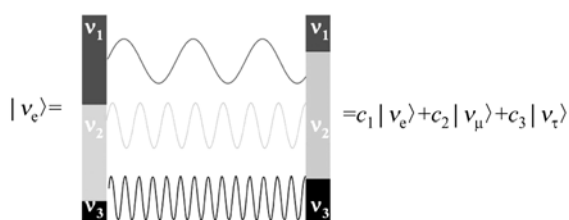


图5 中微子振荡示意图

对于中微子弱探针，由于弱相互作用强度比电磁相互作用强度约小4个量级，中微子与核子散射截面非常小，在实验上观测弱相互作用效应难度很大。在包含带电轻子和核子的散射实验中，弱作用效应很容易被强作用和电磁作用效应所掩盖。然而，弱探针的重要性在于，通过中微子-核子深度非弹性散射实验可以提取核子内夸克分布的信息，这些信息却无法单独用电子或μ子探针得到。

轻子核物理研究若干进展和问题

分五个专题介绍：

(1) 电子-核子弹性散射的形状因子问题

早年 Hofstadter 利用电子-质子弹性散射实验测量了被散射电子在不同方向的粒子数，得到微分截面，表示为点粒子截面乘以形状因子 $f(q)$ 。形状因子 $f(q)$ 反映质子的非点特征，联系着质子大小。这里 q 表示入射电子转移给靶质子的动量。质子内复杂的夸克胶子运动决定了质子内有一定的电荷分布和磁化分布，相应有电形状因子 $G_e(q)$ 和磁形状因子 $G_m(q)$ 。且 $\mu_p G_e(q)/G_m(q)=1$ 。微分截面与 $G_e(q)$ 和 $G_m(q)$ 的关系由所谓 Rosenbluth 公式表示。于是电子探针通过电子-质子弹性散射可以探知质子内部的电磁结构。在 1998 年以前的数十年中，Rosenbluth 公式的正确性，以及由截面数据提取质子形状因子 $G_e(q)$ 和 $G_m(q)$ 的正确性和可靠性是公认的，从未受到任何怀疑。

然而自 1998 年开始，主要由于 CEBAF 的高精度极化电子散射实验数据，提出了一系列新挑战，即用极化转移法精确测量质子形状因子与用严格的非极化 Rosenbluth 分离法测量的质子形状因子（已沿用数十年）差别很大。用两种方法分别测得的质子电形状因子/磁形状因子比值十分不一致，非极化

Rosenbluth 法给出 $\mu_p G_e(q)/G_m(q)=1$ 而极化转移法给出 $\mu_p G_e(q)/G_m(q) \neq 1$ (图 6)。已通过多次反复测量确认不是实验技术问题。

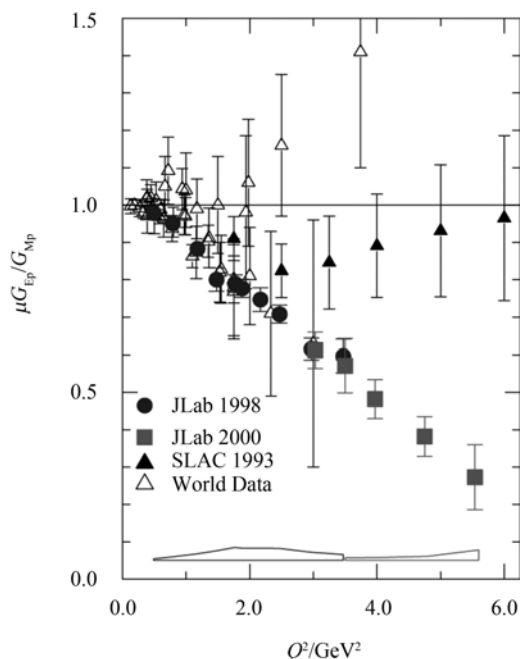


图6 非极化 Rosenbluth 法(黑三角)和极化转移法(圆点和方块)实验结果的比较

以上两种方法测量结果的明显矛盾，激发了理论家的兴趣，倾向性认为这可能是存在着更深层次的原因，如双光子交换等，促使这个领域的研究出现新的重要进展。另一方面，理论上也要求更精确的实验数据，JLab 能区由 6GeV 升级到 12GeV 后将有利于澄清该问题。

熟知电磁相互作用的传媒粒子是光子。以前由非极化 Rosenbluth 方法对质子形状因子进行理论分析时是由微扰论出发的，采取了单光子交换近似。如果进一步考虑双光子交换的贡献，需要确定可能的中间态(图 7)。近几年对中间态的定量计算在强子层次或夸克层次都在进行。

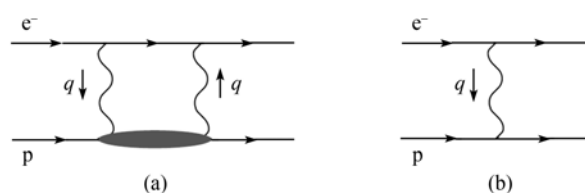


图7 电子-质子散射过程中的双光子交换(a)和单光子交换(b)。图(a)中的深色区域表示中间态

在强子层次的理论计算结果表明，简单计及一

二个能量最低的核子共振态即可使两种方法分别测得的质子电形状因子/磁形状因子比值趋于一致。然而，当严格计及 5 个能量最低的核子共振态，这种趋于一致的情况变坏。需要更多的理论工作。

(2) 电子-核子深度非弹性散射与质子自旋危机问题

近 1/4 世纪以来，已完成大量高能电子深度非弹性散射实验，这些实验数据不仅有助于揭示核子内部结构的奥秘，而且有助于研究原子核内介质效应引起强子性质的变化。

当入射电子能量增加到深度非弹性散射区域，靶质子引起的散射截面可以与质子自旋联系起来。熟知质子自旋为 1/2，这个数值理应由其内部的夸克自旋，胶子自旋，夸克轨道角动量和胶子轨道角动量的总和所贡献（图 8）。早期电子质子深度非弹实验结果给出：质子内部夸克仅携带质子自旋的 30%，远小于相对论组分夸克模型的理论预言（60%），称为“质子自旋危机”。这一发现激起理论家和实验家的不懈关注，因为这关系到人们对强子内部结构的认识是否正确。据统计，自那时以来有关此专题的理论性论文早已超过 1000 篇，实验工作涉及欧洲核子中心（CERN）、德国汉堡电子加速器（DESY）和美国的布鲁克海文国家实验室（BNL）、杰弗逊国家实验室（JLab）以及斯坦福直线加速器（SLAC）等著名实验中心。长期以来，各有关实验室进行了不同极化探针（极化入射束、极化靶）的单举（inclusive）和半单举（semi-inclusive）测量，这些测量结果都表明，质子内全部夸克自旋仅贡献质子自旋的一部分，其余部分贡献应来自胶子自旋，以及在质子内高速运动的夸克和胶子的轨道角动量。

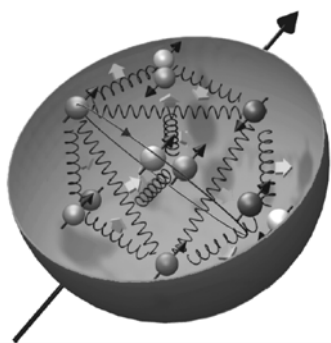


图 8 质子内部结构示意图
小球代表夸克，弹簧代表胶子，
箭头代表自旋方向或轨道角动量方向

最近几年探测质子自旋结构的实验工作一直在

进行，但进展不算乐观。JLab 和 DESY 实验观测结果表明，①质子内的 u 夸克自旋平行于质子极化方向，d 夸克自旋与质子极化方向反平行。②质子内海夸克对质子自旋贡献极小。③RHIC 实验指出，质子内胶子极化相当小。这三种贡献的总和趋于零。总之，实验结果比理论预期相差更大了。有人甚至认为出现了第二次“质子自旋危机”。情况是严峻的。不过这种情况将促进关于质子内部结构对质子自旋贡献的各种新理论设想，理论考虑的焦点似乎是，我们对夸克胶子轨道角动量的理解是否正确。理论要得到实验确认，尚需更多工作，特别是迄今新测量数据仍不完备。

(3) 电子-原子核深度非弹性散射与 EMC 效应对电子-原子核所完成的大量深度非弹性散射 (DIS) 实验发现，束缚在原子核内的核子，其 DIS 结构函数并不等于自由质子和自由中子结构函数的加权平均，这一现象称为 EMC 效应，是 1983 年以最早发现这一效应的欧洲 μ 子实验组（European Muon Collaboration）命名的。为了反映核介质的 EMC 效应，定义了束缚核子结构函数与自由核子结构函数的比值 $R(x)$ ，这里 x 是无量纲的运动学变量，称为比约肯（Bjorken）变量，定义为 $x=Q^2/2Mv$ ，此处 Q 为四动量转移， v 为能量转移，即散射电子与入射电子能量之差 $E'-E$ （图 9）。如果不存在 EMC 效应，比值 $R(x)$ 应等于 1，如果存在 EMC 效应，比值 $R(x)$ 应不等于 1。

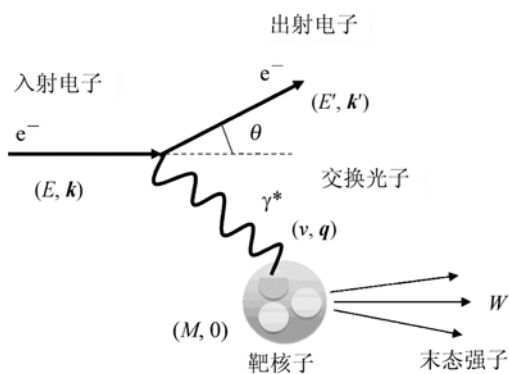


图 9 电子-核子深度非弹性散射机制

后来的一系列实验对 EMC 效应进一步证实和深化了。对 Cu 核和 Fe 核实验结果的一般趋势是，当 x 很小时，比值 $R(x)$ 明显小于 1；当 x 在 0.1~0.3 时，比值 $R(x)$ 略大于 1；当 x 在 0.3~0.8 时，比值

$R(x)$ 又小于1;当 x 趋于1时,比值 $R(x)$ 呈上升趋势(图10)。为了解释上述 EMC 效应,已发表上千篇论文,提出许多理论模型,如 π 介子盈余模型(pion excess model),集团模型(cluster model), Q^2 重标度模型(Q^2 -rescaling model),核子膨胀模型(nucleon swelling model),退禁闭模型(deconfinement model), x 重标度模型(x -rescaling model)等。这些理论模型多带有唯象性质,局限性较大。一些理论模型可以解释大 x 区行为,但不能解释其他 x 区行为,或不能解释其他实验数据(如 Drell-Yan 过程),或不能包含常规效应(核费米运动、核束缚效应)。

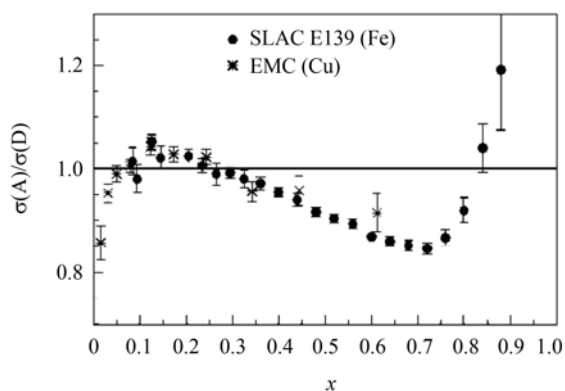


图10 EMC 效应实验数据
星号数据是早期欧洲 EMC 组测量结果
圆点数据是近期美国 SLAC 组的结果

如何对 EMC 现象给出合理的物理解释,是迄今仍存在的物理难题。特别是小 x 区物理(海夸克贡献重要)是很活跃的研究领域。在中大 x 区,核效应主要被解释为束缚和费米运动机制,加上可能的核子内部修正。在小 x 区,观测到结构函数的重叠现象(核遮蔽),它被理解为源于虚光子的类夸克-反夸克态的多次散射。JLab 最近进行了新 EMC 效应实验 E03-103,以考察非对称核物质中 EMC 效应的表现以及 $A=3,4$ 的轻核和很重核的 EMC 效应。为了深入了解核介质对束缚核子内夸克结构的影响,JLab 升级后拟进行极化 EMC 效应实验。近来理论研究的兴趣还包括考虑库仑扭曲影响和双光子交换的贡献。前者是考虑入射电子在核库仑场中被加速。EMC 效应的根源是什么?核内夸克动量如何被介质效应所修正?是否可对整个 x 区的核介质效应达到一致的理解?认识这些问题恐尚需时日。

(4) 关于电子-离子对撞机 人们越来越认识

到,胶子作为强相互作用的传播媒介起着主导作用。然而,强子物质内胶子的性质迄今仍很不了解。现有大型设备,如美国杰弗逊国家实验室的连续电子束加速器(JLab-CEBAF),以及布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(BNL-RHIC)都难于独立完成上述任务。拟议中的电子-离子对撞机(Electron Ion Collider, EIC)是 JLab12GeV 升级和 RHIC II 升级的综合和自然发展。EIC 的研究目标主要是核子与原子核内的胶子。有人说,EIC 建成后,它的高能电子探针的功能,将像高性能的胶子显微镜。因为人们已非常清楚了解高能电子与夸克的电磁相互作用,在此基础上可以研究核内胶子分布,可以用来以很高精度分辨核内夸克分布随动量转移的微小变化。

EIC 有不同的设计方案,倾向性的是 eRHIC 方案,就是在 BNL 原来的离子对撞机 RHIC 设备旁边再建一个电子对撞机,使电子贮存环与离子贮存环相交叉,并使高能极化电子束(10GeV)与高能极化质子或高能离子束(轻核)在交叉点发生 eA 碰撞。按照设计技术指标,其质心系能量为 20~100GeV,亮度可达 $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 。另一种方案是 JLab 提出的,拟利用现有的 CEBAF 直线电子加速器,再新建 30~225GeV 离子贮存环。2012 年有望获美国政府择一支持。

(5) 中微子-原子核散射与中微子振荡 对中微子与原子核相互作用的研究兴趣来自多方面,涉及中微子能量范围很宽,从几 MeV 到上千 TeV。如前所述,近年来中微子束流装置的发展促进了中微子物理的研究。在研究中微子振荡和中微子质量等基本问题时,作为检测器材料的原子核以及中微子-核相互作用知识起着重要作用,它们是构成中微子振荡实验系统误差的主要来源。人们越来越认识到,为使混合角 θ_{13} 的测量达到 0.01 的精度,需要理论和实验提供尽量精确的中微子与原子核的散射截面。2009 年 5 月在巴塞罗那召开的第六届中微子-核相互作用国际会议上,研究人员十分重视对 GeV 能区中微子-核相互作用的研究。会议明确提出,新一轮中微子振荡实验将在 1GeV 能区进行。其中主要相互作用过程是①荷电流中微子准弹性散射;②荷电流中微子 π 产生过程。这些过程对中微子振荡实验影响最大,因而尽量准确测定这两种过程的中微子-核散射截面十分重要。

中微子与原子核相互作用并不局限于检测中微

驻波与声悬浮

郑好望 任文辉 肖胜利

1886年,德国科学家孔特(Kundt)发现,谐振管中的声波能够让灰尘颗粒悬浮起来,这一发现引发了悬浮技术的大革命,而今,声悬浮的威力已经足以让所有人感到惊讶。科学家利用声悬浮技术不仅可使小动物悬浮起来(图1),而且还可将金属钨饼(密度 $18.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)悬浮在空中。



图1 被声波悬空的小动物

20世纪80年代以来,随着航天技术的进步和空间资源的开发利用,声悬浮逐渐发展成为一项很有潜力的无容器处理技术。下面简要介绍一下声悬



子,研究兴趣还在于与产生中微子的过程,以及星体物质内的中微子散射。中微子探针在宇宙学、天体物理和地球物理也有重要用处。如卡姆兰德实验首次观测到由地球深处铀与钍元素发出的中微子,这两种来源的中微子比例可反映地球形成与演化的历史规律,是研究地质学的重要手段。

中微子—核散射与强子物理也有密切联系。利用中微子探针探测核子与原子核的结构在实验和理论上已开展不少研究。特别是,通过中微子(反中微子)与核子散射过程可以提取核子的奇异性内涵。用中微子探针研究核子与核的结构性质涉及弱作用以及电磁相互作用,且两种作用给出的核信息可以互相补充。这些信息有助于在QCD理论框架下了解强子结构。特别是,通过弱相互作用的矢量—轴矢量(V-A)结构可以检验QCD理论。尤其是核子的轴矢结构,很难用电子探针和光子探针来研究。例如,用带电流中微子探针研究核子的轴形状因子,

浮的原理与应用。

一、驻波

驻波是由振幅、频率和传播速度都相同的两列相干波,在同一直线上沿相反方向传播时叠加而成的一种特殊形式的干涉现象。

设两列振幅相同、频率相同、初相皆为零且分别沿 x 轴正、负方向传播的简谐波的波动方程为

$$y_1 = A \cos 2\pi(\nu t - x/\lambda),$$
$$y_2 = A \cos 2\pi(\nu t + x/\lambda).$$

式中 A 为振幅, ν 为频率, λ 为波长,两波叠加后合成波为

$$y = y_1 + y_2 = A \cos 2\pi(\nu t - x/\lambda) + A \cos 2\pi(\nu t + x/\lambda),$$

利用三角函数关系化简得

$$y = 2A \cos 2\pi x/\lambda \cos 2\pi \nu t,$$

这就是驻波方程,式中 $2A \cos 2\pi x/\lambda$ 是各点的振幅,它只与 x 有关,即各点的振幅随着其与原点的距离 x 的不同按余弦函数规律变化。驻波方程表明,当形成驻波时,驻波中各点作振幅为 $|2A \cos 2\pi x/\lambda|$ 、频率为 ν 的简谐运动。

用中性流中微子探针探测奇异性海夸克对核子自旋的贡献等等。

以上简要介绍了轻子与原子核相互作用,以及与轻子核物理相关课题的研究进展和存在的问题,重点为电子探针和中微子探针相关问题。这些问题大多是存在数十年的老问题,也是当前科学前沿有待攻克科学难题。这些难题正呼唤有志之士和年轻学子勇于投入该领域的攻坚战。

(天津市南开大学物理学院 300071)



作者简介

宁平治,1938年生,北京人,南开大学教授,原子核物理专业博士生导师。近年出版了《原子核物理基础——核子与核》、《奇异性核物理》等著作。