

EMC 效应已被解释了吗?

厉光烈 曹志军

1985年,苏联科学家 Akulinichev 等宣布, EMC 效应可以在传统核物理的框架里用核内核子束缚能和费米运动来解释,而不必在核内引入多夸克集团或假定核内夸克禁闭半径加大. Akulinichev 等的发现一度使许多核物理学家和粒子物理学家认为 EMC 效应已经得到了解释. EMC 效应真的得到解释了吗? 本文将回答这个问题.

首先让我们对 EMC 效应的发现以及围绕它所开展的理论研究作一简单回顾.

意外的发现

大家知道,核子不是点粒子,它有着复杂的内部结构. 在粒子物理理论中,通常认为核子是由夸克组成的. 通过高能轻子(电子、 μ 子和中微子)与核子的深度非弹性散射实验,可精确测定核子的结构函数即核子内部夸克组分的动量分布,这样就可以了解夸克在核子中的行为,进而获得关于核子内部结构的信息. 粒子物理学还告诉我们,夸克将永远被禁闭在由它们组成的粒子里. 夸克可以在粒子这个口袋内自由运动,但逃逸不出这个口袋.

在 EMC 效应发现之前,按照传统核物理的观点,人们一直认为原子核内核子的结构函数与自由核子的结构函数应该差不多一样. 这是因为,对于高能轻子与原子核的深度非弹性散射过程来说,原子核内核子的平均束缚能比入射轻子与核内核子间的动量传递要小得多. 因此在散射过程中,原子核可以被看作是核子组成的费米气体,入射轻子与核内某个核子的作用不会受到其它核子的影响,即核子在核内的弱束缚效应对高能轻子与原子核的深度非弹性散射过程不会有什么贡献.

1982年,欧洲 μ 子实验组(European Muon Collaboration, 即 EMC 组)用 μ 子在氢、氘和铁靶上作深度非弹性散射实验,发现束缚在原子核内核子的结构函数与自由核子的结构函数明显不同,这就是 EMC 效应. 图 1 给出了他们的实验结果. $R^{Fe/D}(x)$ 是铁核与氘核内核子的平均结构函数之比, x 是核内核子中夸克所带动量在核子平均动量中所占的份额. 按照传统核物理的观点, $R(x)$ 应差不多为 1. 严格地讲,当 x 很小时,由于核屏蔽效应的存在, $R(x)$ 小于 1; 当 x 较大时,考虑到核子在原子核内有缓慢的费米运动, $R(x)$ 大于 1. 除此之外, $R(x)$ 应差不多为 1. EMC

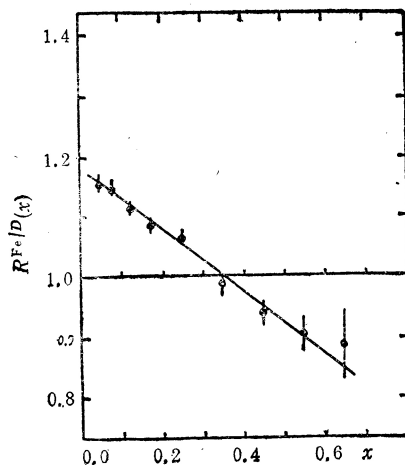


图 1

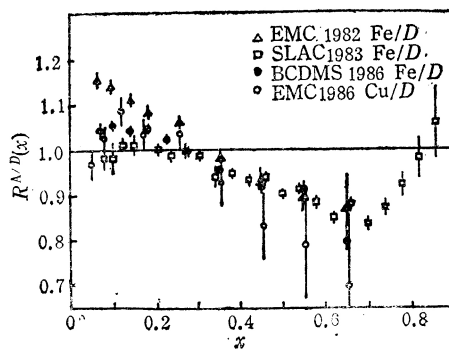


图 2

组的实验结果使人感到意外,它们明显地偏离了 $R(x) = 1$. 这表明,尽管核子在核内的束缚很弱,核子周围核物质的存在仍然明显地影响它的结构函数. 与自由核子相比,核内核子夸克的动量分布明显地移向低动量端. EMC 效应的发现使人们不得不否定传统核物理的习惯看法.

随后不久,另一有趣的实验结果发表了. 原来,斯坦福直线加速器实验中心(SLAC)的一个小组,在七十年代曾用高能电子完成了在液氢和液氘靶上对核子结构函数的测量,他们实验时盛液氢、液氘的容器是用铁或铝制的. 当他们看到 EMC 组的结果后,立即对当年实验中为消除本底而进行空靶测量所得的实验数据进行了“考古”分析,并很快肯定了 EMC 组的结果,在图 2 中, x 表示 EMC 组的最初实验数据, \square 表示

SLAC 小组的实验数据。从图中可以看出,在 $0.05 < x < 0.65$ 区域内两组的实验结果基本一致,但在小 x 区存在着较大的分歧。不久前, CERN 快报报道了 EMC 组和 BCDMS 组的一些新的实验数据,在图 2 中分别用 \circ 和 \bullet 表示。从图中可以看出,新的实验数据修正了 EMC 组最初在小 x 区域得到的结果,从而消除了 EMC 组与 SLAC 组的上述分歧,令人信服地表明: EMC 效应的存在是确定无疑的。

否定之否定

引起核内核子中夸克动量分布这一变化的物理原因是什么呢? 归结起来,看法大致有三类:

1. 核内除核子外还存在着 π 介子、核子共振态 Δ_{33} 等,这些非核子成份本身含有低动量的夸克使得核内低动量夸克组分增加。另外由于它们携带了一部分动量,使核内核子中夸克的动量减小,整个夸克的动量分布压向低动量端。

2. 假设核内核子之间有一定几率发生了融合(overlap),形成了六夸克、十二夸克等多夸克集团。夸克在这些集团内运动,它们的活动区域变大,按测不准原理,夸克的动量分布将移向低动量端。

3. 由于核内核子周围存在着核物质,使得它们就像置于蒸笼里正在蒸着的馒头一样会发胀,从而核子中的夸克能在更大的范围内运动,也就是说夸克的禁闭半径变大。这同样使夸克动量分布移向低动量端。

人们倾向于认为 EMC 效应可能意味着核内存在着夸克自由度。如果真如此,EMC 效应便可作为探测核内夸克自由度的一种实验手段。由于探寻核内夸克效应的实验是核物理学家多年来的愿望,因此 EMC 效应的发现引起了核物理学界和粒子物理学界的极大兴趣。

但是,1985 年苏联科学家 Akulinichev 等指出,原子核内核子的束缚能对 EMC 效应的作用不容忽视。他们利用费米气体模型和实验上测量到的化学势 μ (即 $\mu = -8\text{MeV}$),通过基态求和规则估算出原子核 ^{56}Fe 中核子的平均单粒子能量为 -39MeV ,并用它成功地解释了在铁靶上观测到的 EMC 效应。

Akulinichev 等的发现,否定了人们认为不能用传统核物理而必须在核内引入夸克自由度才能解释 EMC 效应的看法,从而使 EMC 效应失去了原有的魅力。

EMC 效应得到解释了吗? 没有!

Akulinichev 等用以估算核内核子平均单粒子能量的方法仅对密度无关的核子-核子相互作用来说才是对的。而在核多体理论中,任何与密度无关的核子-核子相互作用都无法给出与实验相符合的 μ 值(理论给出的 μ 值仅为实验值的一半)。因此,他们的方法是不自洽的。我们采用密度相关的 Skyrme 力,用 Hart-

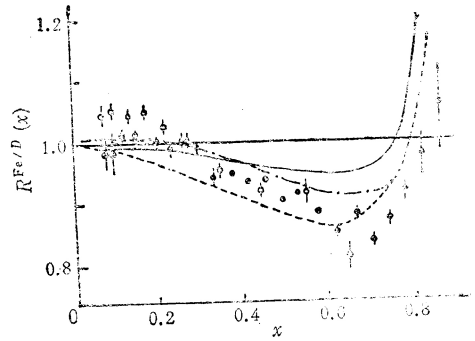


图 3

ree-Fock 自洽场方法解得的原子核 ^{56}Fe 的单粒子波函数和能量,所给出的平均单粒子能量就其绝对值来说比 Akulinichev 等给出的约小 $1/3$ 。因此, Akulinichev 等过高地估计了核内核子束缚能对 EMC 效应的贡献。苏联科学家 Frankfurt 和 Strikman 也有同样的看法,但他们的出发点与我们的不同。他们指出, Akulinichev 等既然在计算中已经考虑到相对论修正,那么所用的核子谱函数理应是相对论归一化的,但 Akulinichev 等所用的却是非相对论归一化的。他们估计,如果采用相对论归一化的谱函数,核内核子束缚能对 EMC 效应的贡献就原子核 ^{56}Fe 来说,将会减小约 $1/3$ 。最近 Birbrair 等进一步指出,在通常的轻子-核子的深度非弹性散射公式中出现的强子张量是对非极化强子而言的,在将其应用于轻子-核深度非弹性散射公式时应该代之以他们引入的极化强子张量,因为核内核子的自旋取向是一定的。不过我们已证明, Birbrair 等只是从另一角度给出了 Frankfurt 和 Strikman 的结果。

图 3 给出了我们利用上述原子核 ^{56}Fe 的 Hartree-Fock 单粒子波函数和能量计算出的 $R(x)$ 随 x 的变化(实线和点划线)和 Akulinichev 等的计算结果(虚线)以及 EMC 效应的最新实验数据(\bullet —SLAC, \circ —BCDMS)的比较。在我们的计算结果中,实线和点划线分别是采用相对论和非相对论归一化的单粒子波函数算出的结果。从图中可以看出,我们的计算结果与 Akulinichev 等给出的有很大差别。在采用正确的单粒子能量和相对论归一化的波函数以后,仅用包括费米运动修正在内的束缚能效应已经不能解释 EMC 效应。

EMC 效应仍然没有得到很好的解释,仍然是一个值得探索的问题! 还有许多工作要做,无论是在实验方面还是在理论方面。