

1988年核物理新闻

朱维和编译

(核工业部秦山核电站)

二 中微子双 β 衰变的 实验观测

近50年来已认识到核双 β 衰变的研究可作为探测中微子基本特性的一种工具。重要的未知的中微子特性之一就是其静止质量。通常假设中微子是无质量的,但大多数大统一理论预示其静止质量实际上不等于零。如果求得一个可测量的质量,这种发现可能是大统一理论的胜利,并提供一个对这些理论的约束条件。有质量的中微子亦是从事星系动力学方面的工作中观测到的神秘的黑洞物

一个较窄的区域内,这就提供一个机会来用单个自旋角分布的拟合。结合测量到的SF截面,可以从实验上确定初始碰撞的分波区段。这就弄清了SF过程的第一阶段的作用状况。在与复杂粒子符合下的SF,可以研究粒子带走角动量而使裂片核处在 $M \neq 0$ 的自旋状态。 M 的取值显然应与该复杂粒子探测角有关;角度愈小, M 取值愈小,角度在 $\pi/2$ 时则 M 取值最大,这时将使角分布呈各向同性。

在过渡能区,核已具有很高的激发能。利用共面偏离宽度,可以很好地预示总的轻粒子发射数。这个宽度似乎与单核子激发能有关。对于复核 $Z \geq 102$ 后,宽度比较轻复合的要高一个常数;这似乎与冷核条件有关。

当入射能更高时,SF占的比重增加。ICF截面相对SF的减小,表明在碰撞中散开的核子挣脱平均势场(对应ICF)的机会比起大块核子团飞出(对应SF)的机会变小。当ICF峰完全消失后,对于周缘碰撞的SF过

质的一种选择物。另一个感兴趣的中微子谜就是或者这种粒子与其反粒子不同(狄拉克中微子),或者中微子与反中微子只不过是同一种粒子的稍有不同的螺旋态(马约拉纳中微子)。

答案可能隐藏在双 β 衰变过程中核内两个中子同时转变为两个质子而放出的两个电子的总动能谱中。这种现象在普通单 β 衰变成周期表中下一个元素或是能量上禁戒的或是强自旋禁止的,但跳到再下一个元素是允许的情况下才得以发生。标准模型预期两个反中微子应与电子一起发射,导致宽分布的电子谱。另一方面,如中微子是非零质量的马约拉纳粒子,那末一个虚中微子可能与一

程仍然存在,这时不应有任何核子团被靶核俘获。所以SF除了可以跟随QE、DIC外,更高能量时也可能是跟随擦碎过程。SF的研究看来也是很重要的。

参 考 文 献

- [1]戴光曦、漆玉金、郑纪文、刘希明、刘巍、陈源达、R.Stokstad等,高能物理与核物理(待发表)
- [2]J.Randrup, et.al., Nucl.Phys.,A429,105, 1984
- [3]戴光曦、玻克等,高能物理与核物理 9,454, 1985
- [4]戴光曦、刘希明和刘国兴,高能物理与核物理 11, 515, 1987
- [5]R.Vandenbosch, J.R.Huizenga, 原子核裂变,原子能出版社,1980
- [6]胡济民,原子核理论(I),原子能出版社, 1987
- [7]U.Jahnke, J.Phys.Colloque C4,Suppl.,4, 317 (1986)

个电子同时发射，并在第二个电子发射同时被再吸收，而在终态中不留下中微子。对这种“无中微子”模式，总和能谱在等于全跃迁能量的能量下有一尖峰。与高能虚中微子有关的较大相空间使无中微子模式的寻找成为一种有质量马约拉纳中微子的十分灵敏的探测器。

已提出总和能谱的第三种方案，其中两个中微子结合成一个majoron（对与重子数减去轻子数不守恒有关的无质量粒子的命名）。这种能谱有一个宽的三体分布峰，高出二中微子极大值很多。

然而电子谱的测量不是一件易事，由于衰变率极低，其半衰期不太可能比 10^{20} 年小得多。在有不可避免的放射性污染痕迹的情况下要观测这样微小的衰变率确是一种困难的实验任务。

在60年代，这方面的研究大有进展：“地球化学”实验成功地探测到古老的岩石中由 ^{130}Te 和 ^{82}Se 的双 β 衰变产生的氙和氦同位素。其相应的半衰期表明更大的可能性是二中微子模式而不是较快的无中微子模式。但因化石气体不能显示能谱，所以尚不清楚：或者就狄拉克中微子而论完全不存在无中微子模式，或者它只象被一个极小的马约拉纳中微子质量所抑制。亦有与核壳模型算出的较短半衰期不符合的情况。已提出建议，认为在地质年代中有一些气体可能从岩石中逸出了。因此还需要对电子能谱进行观测。

曾用锗晶体进行过最灵敏的直接寻找无中微子谱的工作，这种晶体天然含有7.8%的双 β 发射体 ^{76}Ge 。虽然圣巴巴拉的加利福尼亚大学组和劳伦斯伯克里实验室组曾得出接近 10^{24} 年的半衰期限值，但没有观测到无中微子峰的证据。现正在用富集 ^{76}Ge 的锗晶体进行有希望的新实验。在别的地方有些希望提高探索灵敏度的研究组正在研究大的 ^{136}Xe ， ^{100}Mo 和其他双 β 衰变发射体的源。

1987年8月欧文的加利福尼亚大学实验室终于直接观测到二中微子模式。他们测量

了时间投影室（TPC）中的能谱。TPC是一种用大量丝线去跟踪双 β 衰变产生的两个电子（当电子离开源后）的装置，在这种情况下采用薄膜 ^{82}Se 源。TPC的结果证实了地球化学半衰期并触发了理论的再检验。

理论和实验的现状表明，如果电子中微子是马约拉纳粒子，则其有效质量小于 1eV 。普通的中微子质量的摆动（Seesaw）模型意味着用这种微小值我们正在探测远高于加速器能量的新物理学的质量标度。我们现在有了一种直接的二中微子测量，并且只要有可测的中微子质量的可能性，无中微子双 β 衰变的探索将继续进行。

探索新的宏观力

探索新粒子和新的相互作用是近代物理的中心论题。这种探索一般集中于高能物理的前沿：对应于极短程相互作用的重粒子上。然而，还有另一个前沿：由极轻玻色子传递的极弱相互作用。能有质量如此小以致能产生宏观力（力程在1米到100千米之间）的玻色子传递的相互作用吗？这种相互作用如果足够弱（如小于引力的1%）就很可能逃脱探测。核结合能随 A （原子序数）的变化在这些效应的新近探索中起决定作用。

已有一些逗人的迹象表明这种力可能存在。Stacey等研究了矿井中的地心引力，获得的 G 值（引力常数）比实验室测量导出的值约大1%。他们认为此值是强度约为引力的1%、力程约为10米到1000米之间的斥力相互作用的证据。Fischbach等重新分析了比较各种试验物体向着地心的加速度的Eöt-vos的实验数据。他们发现所报导的作用在一试验物体上的力与其重子-质量比之间有显著的关系。他们认为这种关系和Stacey结果是重子间交换一个新的矢量粒子产生的“第五种力”的两种表现形式。

这就激发起对预期的第五种力的多方面探索。布鲁克海文和西雅图的核物理实验室

已报导了首批结果。两者都比较了两个不同材料的物体向着附近悬崖或山坡的水平加速度。

布鲁克海文的 Thieberger 发展了一种由一个浮在水中的空心铜球构成的微分加速度计，并将它置于哈得孙河边的悬崖上进行工作。第五种力可能产生一个微小的水平力，引起铜球平行于水面漂移。Thieberger 观测到铜球以一种他不能用任何已知的机理解释的方式向着悬崖边漂移，但它与第五种力的预期完全一致。

华盛顿大学研究组 (“Eöt-Wash”) 制作了一台连续转动的扭力天平，并将它置于大学校园的山坡上进行工作。这种扭力天平结合某些发明可以减小系统误差。为了减小外来的扭矩，试验物体设计成各个方面都是一样的。它们有相同的外部尺寸，并用金箔包裹以保证同样的表面性质。

用 Be 和 Cu 试验物体所得的数据产生零的结果，这与原来第五种力的预期很不一致。布鲁克海文和 Eöt-Wash 结果之间的这种分歧可能是由于与提出的第五种力性质不同的一种相互作用所造成的吗？例如假设这种力是与重子数 (B) 和轻子数 (L) 的线性组合、而不是只与 B 成正比。Eöt-Wash 组比较 Be 和 Al 试验物体试验了这种假设，并再次得到零的结果。他们的数据只对一种与 $B-2L$ 有关的力才可能与 Thieberger 数据相一致，但这不能解释 Stacey 的结果。

同时，华盛顿大学的 Boynton 等在华盛顿英达克斯的悬崖中开凿的隧道内完成了扭力天平的实验。他们的探测器是一个拼合环，一半是铍，另一半是铝。实验者用监测环的扭转周期来探索第五种力。他们观测到一个小的信号，并把它作为比原来提出的第五种力要弱但与正比于 $B-2L$ 的相互作用一致的一种第五种力的证据。

两个理论组已提出了适应布鲁克海文，Eöt-Wash 和 Boynton 结果的模型。洛斯阿拉莫斯组受量子引力研究的启发，认为应该预

期有通常引力子(按照推测传递引力的粒子)的标量和矢量配偶，它产生约为引力强度的引力和斥力相互作用。他们建议，如果标量和矢量相互作用的力程为几百公里，则布鲁克海文和西雅图的结果可以互为一致。Peccei, Sola 和 Wetterich 提出由一种用来以强 CP 破坏问题的轴子“解”的方式解宇宙常数问题的标量粒子传递的相互作用。

Eckhardt 等最近测量了作为距 600 米高电视塔顶的垂直距离的函数的引力常数，并报导了与对应一种引力相互作用的牛顿引力有显著的偏离。他们论证了矿井和电视塔地球物理结果强力支持量子引力的情况。

然而 Eöt-Wash 数据表明，没有与组分相关的其力程需考虑地球物理结果的相互作用的证据。

也许存在新的宏观相互作用？但尚无自然的现象学图象能说明微分加速度计和地球物理的结果。

原始核合成和宇宙 QCD

原始核合成是早期宇宙中物理条件的最好探测器。在标准模型中，大爆炸产生宇宙中 90% 的 ^4He ，所有的 ^3H 以及大部分 ^3He 和 ^7Li 。标准模型中核合成的约束条件限制轻中微子种类的数目为 2 至 4 种，并限制平均重子密度 (质子和中子密度) 小于封闭宇宙所需的密度的 20%。这些约束条件具有深远的意义。对中微子味数的约束是一种强有力的基本物理学论点，而现在正在被实验室实验所证实。对重子密度的约束，当与膨胀宇宙学相结合时就意味着宇宙中 80% 以上的物质是非重子的。

量子色动力学 (描述强核相互作用的理论) 预期早期宇宙冷却到约 100 MeV 的温度时经历了从自由夸克到约束夸克的转变。最近的工作表明，如果在一次相变中发生夸克熔合成强子的情况，那末在相变中产生的重子密度的非均匀性可能有原始核合成的显著

结果。在一类范围有限的模型中可使封闭宇宙所需的**重子密度**符合原始核合成约束条件。由于这些模型预期有一个与标准模型不同的原始 ${}^7\text{Li}$ 丰度值，所以它们可以对照标准模型进行试验，并且高密度非均匀性模型预期 ${}^{14}\text{N}$ 和原子序数(A)大于120的 γ 过程(快中子俘获)元素的宇宙学生成。在一类范围广得多的模型中，QCD转变可在标准低重子密度宇宙中留下可探测的残留物。这种情况下残留物是 $A > 120$ γ 过程元素的宇宙学生成。在这种情况下仍然保留了对平均重子密度和中微子味数的标准模型约束条件，而对接近QCD转变的临界温度时强的合成物质的性质的一组新的约束条件是由原始 γ 过程丰度引入的。

探测宇宙QCD转变可以告诉我们有关年龄只有 $10\mu\text{s}$ 的宇宙中的情况，并能提供对核物理感兴趣的现象的了解。核合成残留物的产生要求QCD转变是一次相变。因此，这些残留物的探测可能是一种强有力的论证，表明QCD包含一次相变。有趣的是注意到早期($10\mu\text{s}$)的宇宙可能是在其历程中在平衡或近平衡状态下发生QCD转变的唯一的时

核合成残留物的产生分三个阶段。重子密度非均匀性是在一次相变中产生的。中子的扩散把足够低密度的区域转变成其中中子数局部多于质子数的环境。这样，在中子富集条件下的核合成产生了特有的残留物。

重子数的扩散系数估计表明宇宙膨胀太快而不能保持化学平衡。如果宇宙在稍微过冷却后进入一个二相结构形态，那末最终的密度非均匀性将会太小以致于不能影响核合成。如果夸克物质大量过冷却，则转变将剧烈发生。这将导致熵的不均匀产生，这意味着在重建压力平衡的情况下将产生重子密度的非均匀性。

曾研究过核合成前及合成时的中子扩散。由QCD转变造成的富中子环境能以大得足以影响核合成的规模产生。长度规模(在这种规模上富中子区可以影响核合成)的下

限比 100GeV 的温度下的共移水平距离要大些。因此电弱跃迁将不会影响核合成。

一些研究组的研究表明，与具有相同的总 Ω_b (重子密度与封闭宇宙所需的**重子密度**之比)的均匀宇宙相比，中子-质子分离的宇宙产生更少的 ${}^4\text{He}$ 和更多的 ${}^2\text{H}$ 。这些影响大得足以使 $\Omega_b=1$ 分离模型与 ${}^4\text{He}$ 和 ${}^2\text{H}$ 丰度一致。然而，这种模型产生比标准模型约大九倍的 ${}^7\text{Li}$ ，但是由于中子的滞后扩散 ${}^7\text{Li}$ 量亦可能减少一些。可惜，由于我们缺乏对 ${}^7\text{Li}$ 的星系核合成的了解，妨碍了利用 ${}^7\text{Li}$ 作为硬性约束条件。 $\Omega_b=1$ 模型的一个更严重的问题是难以有一个可接受的轻元素核合成和不能同时在宇宙 γ 过程中产生过多的 $A > 100$ 的元素。这样，普通的核天体物理学对这种重子为主的宇宙学提供了一个重要的约束条件。

氘核的两面性

核物理的中心问题之一是核的夸克结构是否可以探测。核中夸克效应的实验鉴定构成对核的了解(从核子和介子观点来看和从夸克观点来看)的重大进展，并有助于把介子-核子理论与量子色动力学(QCD)统一起来。最近在SLAC核物理实验室(NPAS)完成了有关这一问题的两个实验：第一个实验是研究高能氘核(一个质子结合一个中子)的光致衰变；第二个实验是测量高动量转移下氘核的弹性电子散射。这些实验包括现有的两个最简单的核过程，因此十分适合于理论解释。

早已认识到，当动量转移足够高时测得的核子上电子散射截面和导出的 π 介子上电子散射截面的能量关系与简单夸克计算定律(尺寸标度)的预期是一致的。亦已注意到高能(大于 2GeV)质子的光致反应亦符合这些定律预期的简单能量关系。由于 π 介子和核子是比较简单的密集物体(它们的性质可以用组分夸克很好地加以描述)，因此这些结果并不特别惊人。如果始态和终态夸克在比起强子尺寸来要小得多的相互作用长度

(传递相互作用的光子的波长)之内,则夸克计算定律可以从QCD简单地推导出来。

值得考虑的是哪种夸克波函数能最佳描述 π 介子和核子,因而甚至这些简单反应的精确QCD描述亦是不可靠的。然而,普遍承认对于足够高的能量下 π 介子和核子上的在外的过程,尺寸标度是正确的。涉及原子序数(A)大于1的核的尺寸标度反应开始的能量仍然是一个未解决的问题而且有待于实验测定。有一些证据表明早期的氘核上电子散射数据与一种基于QCD的模型相一致,这种模型已经过大的修正以便适用于低的动量转移值(约1GeV/c)的情况。然而这种修正是有争议的而且不是普遍承认的。

年前,出乎意料的是发现了一种核反应的第一个证据,这种反应显示出一种符合未修正的夸克计算定律的能量关系。NPAS完成的实验涉及氘核唯一地光致衰变成一个质子和一个中子。这一结果提供了至今GeV能区中核反应的夸克效应的最明显的证据。如果这种过程的简单QCD解释是正确的,则其含义就是可以断定氘核中所有6种夸克(至少在一小部分时间内)是非常接近的(0.15fm)。虽然预期在核物质密度(0.17核子/fm³)下核子有部分重叠,但令人惊奇的是发现了密度最低的核(氘核)却有大的重叠。(氘核的平均密度只有0.06核子/fm³)。至今尚未发现在只涉及核子和介子的普遍核理论框架内对这些数据的解释。

NPAS的第二个实验已获得结果。该实验的目的是为了分离在最高可能的动量转移下弹性电子-氘核散射中的磁形状因子(描述靶粒子和入射粒子的电磁相互作用中磁贡献的一种因子)。该实验结果与光致衰变实验相矛盾。弹性磁形状因子的最显著的特征是在约1.4GeV/c的动量转移下有一个衍射极小值。这种衍射极小值的观测是特别重要的,由于它不能用氘核的简单夸克模型来预期,不过根据氘核中核子容易对它作出解释。例如,这种图象可以解释为由氘核的有

限大小而造成的,它是由两个核子间的短程斥力和长程引力之间的平衡来确定的。

虽然这些新的电子散射数据在定性上与氘核的介子-核子模型相符合,但最简单的非相对论性冲量近似不能预期精确的磁形状因子的动量转移关系;为了合理描述测得的形状因子,必须要求有介子交换。要达到对这些数据有较好的理论认识,还需要作很多工作,与此同时亦认识到一个很重要的事实:即使达到2.7GeV/c的动量转移,虚光子似乎亦能与氘核和介子流有效地相互作用。即使在这样高的动量转移下,氘核的磁形状因子亦不受夸克组分散射的支配。

显然,氘核的高能光致衰变和高动量转移下的弹性电子-氘核散射两者的一致解释的进展对理论物理学提出了重大的挑战。这两个实验结果之间也许没有矛盾,因为在氘核光致衰变过程中对各组分的有效动量转移比电子-氘核散射研究中的要大得多。除了今后的理论发展之外,主要是要把这些测量扩大到更高的能量和动量转移,以便确定这些分离的趋向是否继续保持下去。

核平均场描述的真实性

本世纪核科学知识的成就之一就是核壳模型的发展及其根据核多体理论的解释。在原子系统中(那里电磁力占统治地位)观测到类似的壳结构,但在通过强作用力相互作用的密集粒子系统中却不能指望有这种行为。在核发现40年后核壳模型的新近发展是对其高度非直观性质的实证。用简单的术语,核中核子可描述为在一个平均势阱(平均场)中运动的无关联粒子,这种势阱是由该核子与其他核子相互作用所产生的。泡利不相容原理要求每个核子占据一个特定的量子本征态或这种势阱中的“轨道”,因此产生一种壳结构。

根据核多体理论,这种所谓的“平均场”描述是一个按照多粒子关联的级数展开式中

的主要贡献项。壳模型的显著成就归因于下列事实，即核子可以散射出其轨道一个很短的时间（在测不准原理允许的限度内），这是因为能量守恒和泡利不相容原理之故。这些短寿命涨落的结果是核子不是一直占据其平均场轨道。因此对全占据的偏离提供了平均场描述的不充分性的定量量度。然而核中轨道的占据几率的测量不是一件容易的事情。

在 MIT/Bates, ALS/Saclay (法国), Mainz (西德) 和 NIKHEF-K (荷兰) 的中能装置上的高精度电子散射测量中逐渐出现了一些有关占据几率的实验数据。 ^{208}Pb 和 ^{208}Tl 的电荷分布的差别的精确测量（这种差别主要是由于加上一个 $3S_{1/2}$ 轨道的质子所造成的）证实了单核子轨道的概念在平均场理论限定的核内是正确的。然而，如果假定这一轨道只有 70% 的时间被占据着，那么就可以最好地解释这种数据。类似地，非弹性散

射实验（其中一个核子从一个轨道转移到另一个轨道上）表明激发几率只有平均场理论预期值的一半。如果假设轨道的占据几率只有 70%，这种单核子跃迁率的“猝熄”亦是容易理解的。在最近的测量中（其中有一个质子从其轨道中击出并与散射电子同时被符合探测）也得出了同样的定量结论。理论上预期最后壳层中的轨道的占据几率约为 70% 似乎是比较好的。

最近从其他核反应得出的另一个证据证实了这一结论。这样，在核壳模型引入 40 年后的今天我们已有了确定平均场描述的限度的实验结果。因此，理论和实验工作现正集中于多粒子关联的这个十分激动人心的领域（超过平均场理论），在那里丰富多彩的核多体问题也许将表现为一种最感兴趣的类型。

（编译自 Physics Today, 1989, No.1）