

加速器质谱学与核物理

杨锦晴 周善铸

(中国科学院上海原子核研究所)

自从第一台加速器运转以来,核物理学家们利用加速器提供的离子束完成了许多实验,在核结构和核力的研究上积累了大量的数据,在基本粒子的研究上也给出了许多新的发现。在此同时加速器技术也得到了不断地提高,不过它却是以不断地增加束流能量及离子种类作为其主要目标,人们很少注意到这些为核物理研究而建造起来的加速器本身的分析本领。从严格地意义上讲,加速器从来没有作为核物理实验本身的一部分。

其实,第一个用加速器作为质谱仪的实验早在1939年就由Alvarez和Cornag提出。他们用Berkeley新建的60英寸回旋加速器发现了天然的 ${}^3\text{He}$,并测定了 ${}^3\text{H}$ 的半衰期。但是加速器的这种巨大的分析本领当时并没有引起人们的充分注意。自1939年的第一个实验以来它被遗忘了近四十年。直到1977年以后,加速器质谱技术才又得到迅猛发展,并成为研究自然界中微量长寿命同位素的一个有力的分析工具。与传统的衰变计数方法相比,它具有明显高的灵敏度(同位素分析能力达 10^{15} 之一),所需的样品量仅为1mg左右(比传统法少一千倍)。同时,因为它是直接测量被测核素,因而它不受放射性同位素本身的寿命及衰变特性的制约。人们对它的兴趣日益扩大,目前已发展成一门新的科学分支——加速器质谱学。自1977年从三个实验室开始发展起来的这门新技术,十余年来已迅速发展三十余个实验室遍布世界许多国家。它像旋风一样卷入了各种类型和大小加速器,还为此建造了多台专用的加速器。专题的国际会议已开过四次,而融合在其它学科中或作为会议内容一部分或被邀作报告的非专题会议则不胜枚举。

加速器质谱学的发展初期,兴趣都集中在考古、地质、地理、水文等领域中的应用。近年来,它在核物理本身中的应用也日益受到重视,特别活跃在一些力量雄厚的大实验室中。由于它的超高灵敏度,一些过去根本无法测量或者难以测准的核物理量,如绝对值特别小或阈能附近的核反应截面、非常长寿命核素的半衰期等均已得到了一些较好的结果。另一方面,由于它对加速器离子源及输运系统的效率等都有较高的要求,逼使人们不断地改进原来的装置,从而改善了核物理的实验条件。本文准备从以下几个方面就与核物理有关的几个问题作简单的介绍。

1、提供浓缩的同位素束流

由于加速器质谱分析要求使用很微量的样品,因此对离子源的结构和输运效率必须进行很大地改进。例如在Argonne实验室的Tandem—Linac系统中发展了一种离子源^[1],允许样品是一颗半径为3mm的小粒,而且溅射效率非常高。实验物理学家们利用这个条件将200mg浓缩度为93%的金属粉末 ${}^{64}\text{Ni}$ 压成一颗小粒(自然丰度为0.91%),从而提供了能量为290MeV强度为300nA的 ${}^{64}\text{Ni}^{19+}$ 同位素束流,共运行了十天进行 γ 谱学研究,其费用大约为\$30/h。当时他们还准备发展一个效率更高的负离子源,以适应加速器质谱学的需要。完成之后,其费用可下降到大约\$0.30/h,将为实验核物理打开一条新的途径。

2、长寿命放射性同位素的研究

加速器质谱学的最重要的贡献之一是

用来测量核的未知的半衰期。在过去的半衰期的常规测量方法中,都是用衰变率随时间的变化规律得到,因而只能对一些较短的半衰期进行测量。对半衰期较长的放射性同位素,虽然可以用低能质谱仪测量,但是它要求有足够多的样品,还必须有效地克服由丰度高得多的稳定同量异位素所引起的干扰。但是加速器质谱方法有效地克服了这些障碍,它可以用少得多的样品,而且在加速到高能以后再使用粒子选择器有效地排除掉干扰元素。其基本原理是:用标准 α 、 β 或 γ 计数器测量一个样品的衰变率 dN/dt ,再将此样品装入离子源电离加速后测其样品量 N ,由基本衰变规律 $dN/dt = -\lambda N$ 就可求得半衰期。这种方法与放射性同位素的半寿命及衰变特性无关,因而可以把半衰期的测量扩展到用常规方法难以达到的范围,尤其在低浓度、极长寿命的测量中更显示出它所独有的强大威力。一般来说,它可以用于几乎所有放射性同位素的测量,这在很大程度上将取决于将来一代加速器离子束的能量。

半衰期长于一年的放射性同位素共有140种,到目前为止用加速器质谱方法测过的只有十个左右。与加速器质谱学在其它领域中的应用研究不同,在放射性同位素未知寿命的测量中必须精确地测定放射性同位素与其同量异位素的绝对比;而对其应用研究来说,通常可以与一个被校正过的标准源比较得到。所以,未知半衰期测量的精度可能不如用加速器质谱仪来断定的精确度高,但是在这种绝对比的测量中,可以迫使人们去仔细地了解每一个影响测量的因素,其结果无疑将推进加速器质谱技术本身的发展。

Argonne实验室^[1]和Rochester大学^[2]用加速器质谱方法测量了 ^{35}Si 的半衰期均为 108 ± 18 年,与早期的由截面及地质年代学的测量结果大相径庭。Argonne实验室还用串列超导Linac系统测量了 ^{60}Fe 的半衰期 $(1.49 \pm 0.27) \times 10^6$ 年。从而对 ^{60}Fe 半衰期的早期测量结果进行了改正。另

外,还有 ^{125}Sn 及 ^{26}Al 的测量等,这些测量结果不但为核物理测量开辟了一个新天地,也为太阳系的形成、星际起源等问题的研究提供了有用的工具。

3、核反应截面的测量

常规的核反应总截面的测量方法是测量产物核的活性,一般这种方法只限于半衰期较短的核素。但是,如果用加速器质谱方法,对原子核直接计数的话,截面的测量将不受半衰期的限制,因而使截面测量范围大大地扩展。

在早期的实验中已经用这种方法并借助于负Mg离子的不稳定性测量了几个能量点下的 $^{26}\text{Mg}(p, n)^{26}\text{Al}$ 的反应截面^[3]。实验中用 ^{27}Al 作为归一,测量了 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 的比值,结果非常成功,即使 $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$ 的比仅为 10^{-10} 也不需要化学分离方法将 ^{26}Mg 从 ^{26}Al 中分离出来。 $^{26}\text{Mg}(p, n)^{26}\text{Al}$ 反应是应用加速器质谱方法于核物理研究中的一个早期例子,当时仅对原有设备作了很小的修改,所测得的截面是mb级的,他们估计要测到 μb 以上的反应截面将是可能的,在某些反应截面的测量中其测量精度可以达到或者好于1%。

将加速器质谱方法用于截面测量的另一个例子是 $^{27}\text{Al}(p, pn)^{26}\text{Al}$ 反应的研究。由质子及 α 粒子引起的产物核为 ^{26}Al 的各种反应截面的测量是核天体物理中的重要数据,也是摆在实验核物理学家面前的一个急待解决的问题。过去曾对 $^{27}\text{Al}(p, pn)^{26}\text{Al}$ 反应作过许多测量,但是这些测量的误差很大而且结果各异。在1977年, Furukawa等曾用正电子湮没的符合谱仪测量方法研究了15-50MeV质子引起的这一反应的反应截面。1987年, R. J. Schneider等将入射能量扩展到160MeV并用加速器质谱方法对产物核 ^{26}Al 直接计数。他们首先用Harvard Cyclotron Laboratory提供的160MeV的质子束对纯度为99.999%的 ^{27}Al 叠靶进行轰击,并用 $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$

反应作为监督反应。轰击后用 Ge(Li) 谱仪测量靶片中监督反应 $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$ 的产物核 ^{24}Na 的 1.369 和 2.754 MeV 的 γ 射线 ($T_{1/2} = 15\text{h}$) 以对质子通量进行校正。测量后的靶片再用宾州大学的串列加速器对 ^{27}Al 进行加速器质谱分析。由此得到的截面很好地落在过去测量值的很宽的误差带中, 而其总的系统误差仅为 5.7%。另外应该注意的是, 用加速器质谱方法, 每个样品所需的测量时间为 90min, 而用过去的衰变计数方法则至少需要 10,000min。无疑, 加速器质谱方法使得测量精确度和测量速度都得到了大大的提高, 许多以前很难测量的截面现在也可以进行了, 例如天体核物理中的许多阈下俘获反应截面、 $^7\text{Li}(\text{Li}, \gamma)^{14}\text{C}$ 的总截面、导致很重的长寿命核的重离子反应截面以及像 $^{127}\text{I}(n, \gamma)^{128}\text{I}(n, \gamma)^{129}\text{I}$ 双中子俘获截面等。

4. 寻找未知

加速器质谱学在核物理研究中最令人振奋的课题是探索迄今为止还没有被观察到的粒子图像, 如夸克、轻 Z 核的反常重的同位素、超重元素等。没有人怀疑是夸克组成了重子的结构, 然而夸克却不能从重子放出。虽然已有上百个实验去寻找夸克, 但都给出了否定的结果。如今人们将目光集中在加速器质谱这一强有力的分析手段上, 因为这种方法避开了任何磁聚焦和分析单元。它利用纯粹的电系统, 将离子从离子源输送到探测

器中。这个过程与质量无关, 它有效地避开了自由夸克的质量是未知的这一问题。目前, 在 Fermi 实验室、Toronto 以及 Rochester 等实验室都在用加速器质谱方法寻找部分电荷的粒子。这些测量覆盖了很宽的电荷和质量范围, 在某些情况下达到了 10^{-18} (部分电荷粒子/每正常原子) 的精度, 但是至今还没有找到肯定的证据。

寻找反常重同位素的工作也在进行。根据已有的多种计算的预告表明, 自然界中反常重同位素的浓度大约为 $10^{-10} - 10^{-12}$, 随着加速器的改进, 这种搜寻也将继续下去^[4]。

加速器质谱学尚在不断地发展。虽然它已愈来愈广泛地被应用于地理、水文等许多领域, 然而在核物理本身的研究工作还作得不多。从目前的发展趋势看似乎有一个合理的分工: 需要高精度和大量测量的工作在专用的小加速器上进行, 而原有的大加速器实验室则利用他们相对雄厚的力量去处理应用于核物理和其它领域中的新问题。相信随着这一技术的发展, 它必将在核物理研究中发挥出巨大的威力。同时它在核物理研究中的应用也一定会大大地促进加速器质谱技术本身的发展。

参考文献

- [1] W. Kutschera, Proc. Symposium on AMS, Argonne May 11 - 13 (1981) 43
- [2] D. Elmore et al., Phys. Rev. Lett. 45 (1980) 589
- [3] M. Paul et al., Phys. Lett. 94B (1980) 303
- [4] T. K. Hemmick et al., Nucl. Inst. & Meth. B29 (1987) 389