

加速器质谱技术在核物理中的应用

李业祥

(四川大学原子核科学技术研究所)

新兴的加速器质谱技术(AMS),开拓了核技术应用的新领域。本文简述了加速器质谱技术的主要优点和发展过程,着重介绍了加速器质谱技术在核物理中的应用,其中包括:长寿命同位素半衰期的测量;核反应截面的测量;寻找奇异粒子和测量太阳中微子等实验及应用。

近十年来,加速器质谱技术(AMS)迅速发展起来,逐渐形成一门新兴的学科分支——加速器质谱学。

加速器质谱技术是把加速器作为超灵敏质谱仪在核技术领域的应用,在研究自然界微量长寿命同位素方面,已经成为一个有力的分析测量手段。加速器质谱技术的主要优点是测量灵敏度极高,待测同位素的丰度可以低至 10^{-12} — 10^{-15} ,测量速度快,样品用量可以少至mg以下,特别适合于长寿命同位素的测定。目前加速器质谱技术正以它独有的高丰度灵敏度而广泛地应用于考古学、地球科学、海洋科学、人类学、天体物理学和核物理学。在核物理学中,加速器质谱技术已经为一些基本物理量(如长寿命同位素的半衰期、核反应截面等的测量提供了新的实验手段,并在搜寻奇异粒子和解决太阳中微子“失踪”问题上开辟了新的应用前景。

一、历史的回顾

加速器质谱技术的应用可以追溯到半个世纪以前。1939年,美国加利福尼亚大学 L. W. Alvarez 和 R. Cornog 在伯克利新建的直径为60英寸的回旋加速器上寻找质量数为3的同量异位素 ^3He 或 ^3H 时,意外地发现 ^3He 是稳定的^[1-3]。由于他们所使用的氦是从具有一亿年历史的洞穴中取来的,足以说明 ^3He 是稳定的。Alvarez 和 Cornog 分别测量了洞穴中氦和大气中氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值,发现两者中 ^3He 的含量相差10倍。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的绝对值分别为 10^{-8} 和 10^{-7} ,可见加速器作为灵敏质谱仪的效力。

由于加速器束流品质和重粒子探测技术等条件的限制,在 Alvarez 和 Cornog 实验之后近40年,加速器作为高灵敏度质谱仪的巨大分析能力,一直没有受到重视。直到1977年,洛伦兹实验室的 R. A. Muller 提出用回旋加速器测定 ^{14}C 和 ^{10}Be 以及其它长寿命放射性同位素^[4,5],人们才意识到 AMS 技术在用 $^{14}\text{C}(T_{1/2} = 5730\text{年})$ 来测定年代和用天然长寿命同位素[如 $^{10}\text{Be}(1.6 \times 10^6\text{年})$, $^{26}\text{Al}(7.2 \times 10^5\text{年})$ 和 $^{36}\text{Cl}(3.0 \times 10^5\text{年})$]作其它用途的巨大潜力。与此同时, Rochester 大学的一个研究小组的实验证实,根据 ^{14}N 的不稳定性,能把 ^{14}C 从同量异位素 ^{14}N 中分离出来^[6]。紧接着又发表了在 McMaster 大学和 Rochester 大学用加速器质谱技术测量天然 ^{14}C 的报告^[7,8]。不久还发表了测量 ^{10}Be 和 ^{36}Cl 的报告^[9,10]。这样,加速器质谱技术终于在回旋加速器和串列加速器上获得了新生。现在,世界上许多国家都先后在回旋加速器、串列加速器,甚至静电加速器上开展了加速器质谱技术的方法和应用等方面的研究工作,并取得了相当显著的成果^[11-13]。

二、长寿命核的半衰期测量

在核物理学中,许多放射性同位素的半衰期(通常半衰期小于一年)可以采用衰变率随时间变化的函数关系来测定。采用这种方法,并不需要知道放射性同位素的原子个数 N 。然而,如果半衰期太长(比如 10^3 — 10^8 年),用衰变计数的方法进行测量是困难的,因为在测量时间内难以获得足够的衰变计数。必须测出放射性同位素的原子数目,以便由 $dN/dt = -\lambda N$

和 $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ 关系式算出半衰期 $T_{1/2}$ 。在过去,对可以获得大量原子数目因而足以克服稳定同量异位素本底干扰的情况,人们采用低能质谱技术,通过测定放射性同位素的原子数目,测量了许多长寿命核的半衰期。然而,对一些天然丰度太小的长寿命同位素,低能质谱技术就显得无能为力;人们只好借助于加速器质谱技术的高丰度灵敏度和高甄别能力。到目前为止,已经有四个长寿命同位素 ($^{32}\text{Si}^{[14,15]}$, $^{44}\text{Ti}^{[16]}$, $^{60}\text{Fe}^{[17]}$, $^{10}\text{Be}^{[18]}$) 的半衰期采用 AMS 技术进行了测量。在这些测量中,AMS 技术的优势在于它不受稳定同量异位素本底的影响,而且能以较高的精度测量放射性同位素与稳定同位素的比值。这在采用非 AMS 技术的方法中是难以做到的。例如 ^{32}Si 和 ^{60}Fe 的半衰期测量,在采用 AMS 技术之前,一切关于这两个放射性同位素半衰期的测量都是采用反应截面系统学,计算出核反应产生的 ^{32}Si 和 ^{60}Fe 的原子数目而测定出来的。所以,测得的半衰期值存在很大的误差。Argonne 国家实验室和 Rochester 大学采用 AMS 技术测得 ^{32}Si 的半衰期分别为 101 ± 18 年和 108 ± 18 年,显然两者符合很好。此外,Argonne 国家实验室还采用 AMS 技术对 $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 的值进行了绝对测量,测得的结果将 ^{60}Fe 的半衰期值由原来的 $T_{1/2} = (1-3) \times 10^5$ 年改进为 $T_{1/2} > (1.49 \pm 0.27) \times 10^6$ 年。这一改进对天体物理学来说是很重要的。 ^{60}Fe 是属于已经灭绝了的放射性同位素之列,它在早期太阳系中的存在,可以从某些陨石中放射性同位素衰变的稳定产物异常来确定。已经找到了 ^{26}Mg , ^{107}Ag 和 ^{129}Xe 三种同位素过量的证据,它们是由原始的 ^{26}Al ($T_{1/2} = 7.2 \times 10^5$ 年), ^{107}Pd ($T_{1/2} = 6.5 \times 10^6$ 年) 和 ^{129}I ($T_{1/2} = 1.6 \times 10^7$ 年) 衰变所引起的。由此可以算出元素核合成的最晚时间到早期太阳系形成之间的时间标度。 ^{60}Fe 的衰变引起同位素 ^{60}Ni 过量的证据还没有找到。

三、核反应截面的测量

放射性核素的产生截面,通常可以采用核反应和放射化学的方法来测量。然而,当生成

的放射性核半衰期太长,以致难以获得有效的衰变计数时,最好的方法是采用 AMS 技术直接数出生成核的个数。最早采用 AMS 技术测量的核反应截面是 $^{26}\text{Mg}(\text{p}, \text{n})^{26}\text{Al}$ 反应截面^[19]。实验是由质子轰击 ^{26}Mg 箔进行的。在测量中,添入 ^{27}Al 作为归一化标准,并在 10^{-11} 量级测量了 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 的值。由于 ^{26}Mg 不能形成稳定的负离子,所以尽管 $^{26}\text{Mg}/^{26}\text{Al}$ 的值差不多为 10^{10} ,也不必用化学分离的方法把两者分离开。R. J. Schneider 等人^[20]采用 AMS 技术测量了 160MeV 能点 $^{27}\text{Al}(\text{p}, \text{pn})^{26}\text{Al}$ 反应截面,测得 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 约 $(1.61-2.88) \times 10^{-13}$ 。

用 AMS 技术研究的另一个重要反应截面是用高能质子与 Ni 反应产生 ^{60}Fe 的截面。实验的主要技术问题是如何把 ^{60}Fe 从固有的、相当强的 ^{60}Ni 本底中分离出来。在 ^{60}Fe 半衰期实验中,Argonne 的研究人员让 ^{60}Fe 离子通过一层铝箔(厚度为 $2.8\text{mg}/\text{cm}^2$),使强的 ^{60}Ni 成分在进入探测器之前受到部分抑制。该法测量 $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 的灵敏度大约只有 10^{-10} 。因此,他们研究出另一种方法,在谱仪的真空室内充入压强为几个 Torr 的氮气,这样,不同离子在飞行的途中将经过多次电荷交换,损失掉不同的能量,从而有效地将它们分离开。在实验中,Argonne 的实验研究人员在三小时的测量中,只观察到一个 ^{60}Fe 计数,但是,他们从谱中毫不含糊地直接确认出这个计数就是 ^{60}Fe ,从而得到 $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$ 的值约为 3×10^{-14} 。

四、寻找奇异粒子

尽管多年来人们对自由夸克、超重元素、反常重同位素、引力子、磁单极子、超光速粒子等的搜寻未能取得肯定的结果,然而人们寻找这些奇异粒子的热情从来没有低落过。AMS 技术在这些搜寻实验中仍然是有用武之地的。70 年代末,美国斯坦福大学的一个研究小组多次报告他们进行的悬浮试验,在一些很小的超导铌球上(每个铌球约重 10^{-4}g , 约有 10^{18} 个铌原子)观察到了分数电荷存在的有力证据,进一步激发了人们寻找自由夸克的热情。采用 AMS 技

术,是因为带有分数电荷的粒子在加速和束流分析过程中有一个非常独特的标记,只是这种假设的自由夸克的质量尚不清楚,然而这个问题,AMS技术却可以通过避开磁聚焦或对成分的分析,采用一个纯粹的静电系统把所有的粒子(与质量无关)从离子源送到终端探测器上来解决。最简单的这类实验是在费米实验室700keV的高压倍加器上完成的。这种特殊的实验是专门用来找寻从铍丝上萃取出来的 $+\frac{1}{3}e$ 粒子。实验是在几分之一秒时间内把铍丝从4.2K加热至室温或数百度,从而希望把约束在低温铍丝中的分数电荷粒子释放出来。在实验过程中,任何带有正电荷的粒子的能谱(只要粒子的质量在10MeV/c²到100GeV/c²范围内)都能被面垒探测器测量出来,实验没有观察到表明有 $+\frac{1}{3}e$ 粒子存在的迹象。鉴于这一实验可直接用于检验斯坦福大学的实验结果所提出的假设,所以在Toronto, Caltech和Rochester等大学采用串列加速器作AMS实验,更为广泛地寻找物质中的分数电荷粒子。这些测量所包括的分数电荷和质量范围是很宽的。在某些情况下,就每一个“正常”原子而言,对分数电荷粒子探测的灵敏度大约可达 10^{-13} 。

五、太阳中微子的测量

太阳中微子问题是物理学界和天文学界共同关心的问题。太阳中微子问题,是由美国Brookhaven国家实验室J. R. Davis和Princeton高级研究所J. N. Bahcall等人提出来的。他们经过20多年的实验,证明在地球上探测到的太阳中微子通量,大约只有按太阳标准模型理论计算的太阳中微子通量的三分之一。由于太阳的标准模型理论已经被天文光学测量结果证明是正确的,因此太阳中微子实验和理论之间的严重不符,已经无法用现有的知识来解释,成为著名的太阳中微子失踪之谜。为了揭开此谜,除采用其它的靶物质(如⁷¹Ga, ¹¹⁵In)继续进行Davis的同一类实验外,还可以

采用AMS技术进行测量。有人认为,太阳的产能方式是周期循环的,循环周期大约为一千万年,目前太阳可能处在产能的低潮时期。所以,Davis的结果只反映了相对较短的时间内的中微子的产生率。如果能测量到数百万年内的平均值,也许能接近理论值。²⁰⁵Tl和⁹⁸Mo在俘获太阳中微子后可以生成半衰期为数百万年的²⁰⁵Pb和⁹⁸Tc,所以²⁰⁵Pb和⁹⁸Tc这两种同位素可以在铀矿和钼矿中累积上百万年。据估计,在经过10⁷年累积之后,1kg的铀矿中可能含有10⁵个²⁰⁵Pb原子。采用AMS技术把铀矿中所含的²⁰⁵Pb原子找出来,就可以算出太阳中微子的通量。目前,由于实验设备上还存在一些问题,仅仅完成了一些检验性的实验。通过计算,估计铀矿中²⁰⁵Pb/²⁰⁵Tl的值约为10⁻¹⁹,还需要采取进一步的放射化学措施,才能使这个比值达到可以采用AMS技术测量的水平。当然,也可以采用能量较高的重离子加速器,使²⁰⁵Pb核外的82个电子全部剥离掉,从而有效地把²⁰⁵Pb与²⁰⁵Tl分开。采用AMS技术进行²⁰⁵Pb和⁹⁸Tc的实验,除了同量异位素的分离外,在离子源的效率方面也需要作出重要的改进。总的来说,采用AMS技术测量太阳中微子通量,主要的困难还是在加速器方面。可以相信,随着加速器技术的发展,现有的困难是可以克服的。

- [1] L. W. Alvarez and R. Cornog, *Phys. Rev.*, **56** (1939), 379.
- [2] L. W. Alvarez and R. Cornog, *Phys. Rev.*, **56** (1939), 613.
- [3] L. W. Alvarez, *Phys. Today*, **35** (1982), 25.
- [4] R. A. Muller, *Science*, **196**(1977), 489.
- [5] R. A. Muller et al., *Science*, **196**(1977), 521.
- [6] K. H. Purser et al., *Rev. Phys. Appl.*, **12**(1977), 1487.
- [7] C. L. Bennett et al., *Science*, **198** (1977), 508.
- [8] D. E. Nelson et al., *Science*, **198** (1977), 507.
- [9] C. L. Bennett et al., *Science*, **202** (1978), 215.
- [10] K. H. Purser et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **162** (1979), 537.
- [11] W. Wolfli et al. (eds.), *Proc. Third Inter. Symp. on Accelerator Mass Spectrometry*, Zurich, Switzerland, (1984); W. Wolfli et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **233(B5)**, (1984), 91.
- [12] H. E. Gove et al. (eds.), *Proc. Fourth Inter. Symp. on Accelerator Mass Spectrometry*, Niaga-

(下转第174页)