

文章编号: 1007-4627(2003)03-0210-04

加速器质谱技术在核物理与天体物理中的应用*

何明, 姜山, 董克君, 武绍勇

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 介绍了利用加速器质谱技术在核物理与核天体物理中的应用研究工作, 包括放射性核素半衰期的测定、核反应截面的测量、超重元素的寻找、宇宙射线和太阳中微子性质等方面的研究工作。

关键词: 加速器质谱; 核物理和天体物理; 应用

中图分类号: TL817.4 **文献标识码:** A

1 引言

加速器质谱(AMS)技术是一种具有极高灵敏度(最低可检测样品中所含的 10^4 个原子)的一种核分析方法。自上世纪 70 年代发展起来以来, 这种技术已广泛应用于不同的研究领域。本文就 AMS 技术在核物理如半衰期、核反应截面等, 与核天体物理中, 如宇宙射线、太阳中微子的性质等的应用已经开展的工作、当前的研究状况以及以后所能开展的工作进行讨论。

2 AMS 技术在核物理中的应用

2.1 放射性核素半衰期的测量

放射性核素半衰期的直接测量方法是测量这个核素的放射性活度随时间的变化关系, 但对于半衰期比较长且含量很低的放射性核素利用这种方法非常困难, 甚至是不可能实现的。测量长寿命放射性核素半衰期的一种有效的方法就是基于关系式

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

其中, dN/dt 是放射性核素的活度, $T_{1/2}$ 为放射性核素的半衰期, N 为放射性核素的原子数。在测量了放射性核素的活度和原子数之后, 就可以得到放射性核素的半衰期。其中对于放射性核素的原子数可以利用普通质谱方法进行测量, 但是对于原子数目比较少的一些长寿命放射性核素来说, 利用普通

质谱就有很强的本底干扰而无法测量。由于 AMS 具有排除分子本底及同量异位素的能力而可以开展原子数目比较少的长寿命放射性核素半衰期的测量。

目前利用 AMS 方法已经测量了 ^{32}Si , ^{44}Ca , ^{44}Ti , ^{60}Fe , ^{79}Se 和 ^{126}Sn 6 个核素的半衰期, 如表 1 所示。表中也将用其它测量方法的结果列入其中, 以示比较。这些核素在不同的领域都有很重要的应用: 如 ^{32}Si 是宇宙射线与大气中的 Ar 散裂反应的产物, 利用它可开展海洋、地下水和沉积物等方面的定年与示踪研究; ^{79}Se 和 ^{126}Sn 可应用于环境和核废物储存等方面的研究; 而 ^{44}Ti 和 ^{60}Fe 则是天体物理中非常重要的两个核素, 宇宙射线与陨石中的一些重核的散裂反应形成 ^{44}Ti , 利用 ^{44}Ti 可在几百年范围内对陨石的地球年龄进行测定, 测量陨石中产生的 ^{44}Ti 的丰度可以推算近几百年宇宙射线注量率的变化。研究人员也利用 AMS 方法测量到了在铁陨星中由宇宙射线产生的 $^{60}\text{Fe}^{[13]}$, 而且认为 ^{60}Fe 在行星的早期热源中可能扮演着一个重要的角色, 其半衰期是一个关键数据。

2.2 核反应截面的测量

AMS 方法测量核反应截面是用该方法测量核反应产物核素的原子数, 再根据已知的照射时间和靶原子数就可得到核反应截面。

收稿日期: 2003-04-30; 修改日期: 2004-01-15

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10105017)

作者简介: 何明(1969-), 男(汉族), 河南西峡人, 博士, 副研究员, 从事加速器质谱研究。

AMS 测量核反应产物原子数的方法为: 在反应后的带有产物核靶材料或者收集材料中加入已知数量的产物核素的稳定同位素作为载体, 然后利用化学方法将产物核素与其同位素载体提取出来, 并制备成 AMS 测量所需的样品. 由于 AMS 测量某种核素的含量是通过测量同位素比来实现的, 因此

通过 AMS 测量放射性核素与所加稳定同位素的比值 r 就可以得到核反应产生的核素的原子数目 $N_p = rN_c$ (N_c 为加入的稳定同位素的原子数). 由于 AMS 测量核反应产物核素具有极高的灵敏度 (最低探测限可 10^4 个原子), 因此可对一些微小核反应截面进行测量.

表 1 AMS 测量核素的半衰期

核素	半衰期/a	测量方法	参考文献
^{32}Si	101 ± 18	活度 + AMS	[1]
	108 ± 18	活度 + AMS	[2]
	133 ± 9	活度 + AMS	[3]
	162 ± 12	活度比 + AMS 比	[4]
^{44}Ti	54 ± 21	活度 + AMS	[5]
	59.2 ± 0.6	衰变率比	[6]
	67 ± 16	衰变跟踪	[7]
^{41}Ca	$(103 \pm 7) \times 10^3$	AMS + 陨星学	[8]
	$(110 \pm 10) \times 10^3$	AMS + 活度	[9]
^{60}Fe	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^6$	AMS + 活度	[10]
^{126}Sn	$(207 \pm 21) \times 10^3$	AMS + 活度	[11]
^{79}Se	$(280 \pm 36) \times 10^3$	AMS + 活度	[12]

第一个利用 AMS 方法测量核反应截面的工作是 1980 年 Paul 等^[14]对 $^{26}\text{Mg}(p, n)^{26}\text{Al}$ 的反应截面的测量. 此工作的目的就是想解决天体物理中的一个重要过程 $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$ 的反应截面. 由于 ^{26}Al 放射性同位素靶难以制备, 因此就测量它的逆反应的反应截面, 再利用细致平衡原理得到 $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$ 的反应截面. 随后有大量的利用 AMS 测量反应截面的工作, 例如: 对 $^{16}\text{O}(n, X)^{14}\text{C}$, $^{36}\text{Ar}(n, p)^{36}\text{Cl}$, $^{16}\text{O}(p, X)^{10}\text{Be}$, $\text{Fe}(p, X)^{26}\text{Al}$ 和 $\text{Ti}(p, X)^{41}\text{Ca}$ ^[15] 等 (X 代表所有可能的反应道产物, Fe 和 Ti 为天然丰度靶) 反应, 分别测量了 ^{14}C , ^{36}Cl , ^{10}Be , ^{26}Al 和 ^{41}Ca , 得到了相应的反应截面.

近期开展的与核天体物理有关的测量反应截面的工作之一就是 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ ^[16] 的反应截面测量. 正如上面所提到的 ^{44}Ti 在核天体物理中是非常重要的一个指示核素, 它是通过 ^{40}Ca 和 α 反应产生的, 认为这是在超新星爆炸过程中合成 ^{44}Ti 的主要过程. 此项工作就是利用 AMS 技术测量相应于天体温度下此反应的截面. 另一个就是中国原子能科

学研究开展的有关 ^{26}Al 天体疑难问题的研究. 在 20 世纪 80 年代, 根据空间探测器测量到在宇宙空间存在着大量的 ^{26}Al , 可是利用有关核物理实验数据, 人们迄今所建立的所有有关天体 (包括新星和超新星) 模型几乎全无法解决星际 ^{26}Al 的问题^[17]; 即空间产生的 ^{26}Al 的数目远大于理论模型计算所得的结果. 但超新星爆发时一些重核 (如: ^{16}O 与 ^{14}N) 通过融合反应可能也是星际 ^{26}Al 的一个重要来源^[17]. 中国原子能科学研究所的 AMS 实验室目前正在开展测量 $^{14}\text{N}(^{16}\text{O}, \alpha)^{26}\text{Al}$ 反应截面的工作, 利用 AMS 灵敏度高的特点尽可能将反应能区向低能方向推进, 以迎合超新星爆发时的温度. 另一家是德国的 AMS 实验室测量 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 的反应截面^[18], 这个过程是天体中合成 ^{26}Al 的重要过程.

2.3 超重元素的研究

在原子序数 Z 为 110—114 之间存在“稳定岛”的观点引发了大量的实验去寻找稳定的或者长寿命的超重元素. 总体来讲, 还没有确切的证据能证明在 $Z=114$ 附近有稳定的或者长寿命的元素存在.

通过核反应产生超重元素是寻找超重元素的一种方法,另一种方法则是在自然界中寻找超重元素,AMS则是其重要工具.第一个开展此方面研究的AMS实验是在独居石中寻找超重元素^[19],得到了在独居石中质量数在 $345 < A < 355$ 范围内的超重元素的含量低于 10^{-10} .一个最完善的AMS实验是利用Pennsylvania大学的串列加速器寻找自然界中存在的 $Z = 110, A = 294$ 的元素^[20].有人估算²⁹⁴110与Pt的原始比值在0.02—0.06之间,受到此估算的鼓励,Pennsylvania大学的串列加速器对天然铂金中²⁹⁴110的含量进行了测量.如果此核素的半衰期为 2×10^8 a,那么目前这种核素在Pt中的含量大约为 10^{-9} .在此实验中利用飞行时间方法鉴别质量为294的核素,得到²⁹⁴110在Pt中的含量的上限为 1×10^{-11} .测量结果远低于预期的值,可能是此核素的半衰期小于 10^8 a,或者此核素在铂中的原始含量远小于0.01.

3 AMS技术在核天体物理中的应用

3.1 宇宙射线研究

宇宙空间存在着许多能量范围很宽的高能粒子——宇宙射线.这些粒子少部分($< 2\%$)是由电子和正电子组成,其余的是来自太阳和银河系的核素.AMS可用来测量由宇宙射线在陨星、月球岩石及各种地球材料中产生的长寿命的放射性核素.虽然宇宙射线包括各种元素,但质子是最重要的产生放射性同位素的成分.在地球附近能量为100—10 000 MeV的范围内(此能量范围内宇宙射线强度最强)质子占银河宇宙射线的87%.对于太阳宇宙射线,质子占到98%.

宇宙射线与陨星、月球岩石及地球的一些物质反应产生一些放射性或者稳定核素,因此宇宙射线的历史就被这些产生的核素所记录.这些核素的含量除了与宇宙射线的流强有关外,还与这些物质所经历的侵蚀、碎裂、轨道改变和气候改变(在地球上)等因素有关.AMS应用于宇宙射线的研究则是集中于宇宙射线成因核素,如:¹⁰Be, ¹⁴C, ²⁶Al, ³⁶Cl, ⁴¹Ca, ⁴⁴Ti和¹²⁹I等.目前有大量的AMS工作是关于测量宇宙射线成因核素在陨石、月球样品、冰芯和海洋沉积物等样品中的含量及分布^[21],这些测量将可为宇宙射线的长期变化提供数据.例如,

通过测量极地冰芯或海洋沉积物中宇宙射线成因核素的剖面分布就可以得到宇宙射线强度随时间的变化关系.如¹⁰Be是由宇宙射线与大气中的氧、氮反应产生,它们在大气中产生并且很快沉积到地球表面.通过测量极地冰芯中连续冰层中¹⁰Be的含量就可以反映出宇宙射线强度的变化.总之,AMS是研究宇宙射线的重要手段.

3.2 太阳中微子探测

太阳中微子的探测对于了解恒星物理是非常重要的.关于太阳中微子的丢失之谜已有很多文献对其进行了阐述^[22],AMS在太阳中微子探测方面的应用主要是通过测量太阳中微子与地球上的一些物质相互作用产生的长寿命放射性核素的原子数和已知的反应截面,得到太阳中微子的强度信息.目前主要有以下几种反应产生的放射性核素适用于用AMS测量:⁴¹K(ν, e^-)⁴¹Ca, ⁹⁸Mo(ν, e^-)⁹⁸Tc, ²⁰⁵Tl(ν, e^-)²⁰⁵Pb, ⁷Li(ν, e^-)⁷Be.下面就⁴¹K(ν, e^-)⁴¹Ca反应产生的⁴¹Ca的原子数目及可行性进行讨论.对于⁴¹K(ν, e^-)⁴¹Ca来说,此反应只对⁸B中微子灵敏,按照标准太阳模型,⁸B中微子的流强为 5.8×10^6 neutrinos/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$),反应的截面为 $(1.45 \pm 0.05) \times 10^{-42} \text{ cm}^2$ ^[23].由此,⁴¹K的俘获率为 $8.4 \times 0.3 \text{ SNU}$ (SNU为每秒每个靶原子对中微子的抓获率为 10^{-36}).⁴¹Ca的半衰期为 1×10^5 a,那么在它的3个半衰期内0.5 t KCl矿(⁴¹K的丰度为6.8%)将产生大约 10^5 个⁴¹Ca原子.在研究由中微子产生的⁴¹Ca的时候还必须考虑⁴¹Ca的其它来源,而且还必须排除⁴¹Ca的其它来源.⁴¹Ca的其它来源主要是宇宙射线与物质反应产生以及铀、钍等衰变时发出的中子等与其它物质反应产生.如果钾矿被埋在1 500 m深的地下,来自宇宙射线对于⁴¹Ca丰度的贡献只有0.77 SNU,而且在此地区如果铀和钍的含量分别小于 2.2×10^{-9} 和 $3.5 \times 10^{-9} \text{ g/g}$,钙在矿中的含量为0.1%(此假定在一些矿中是能够被满足的),那么通过⁴⁰Ca(n, γ)⁴¹Ca,及(α, p)和⁴¹K(p, n)⁴¹Ca反应产生的⁴¹Ca的原子数小于 10^4 个原子.由此从0.5 t KCl矿中将会提取出500 g的天然钙,而AMS测量的样品量一般小于50 mg,需要采用预富集的方法排除 10^4 倍天然稳定钙.此时⁴¹Ca/Ca的比值大约为 10^{-15} ,目前测量⁴¹Ca的灵敏度已经达到 1×10^{-15} .因此,利用AMS

开展太阳中微子方面的研究工作也是可能的。

4 总结及展望

AMS 技术是探测含量非常低的核素最有力的方法之一, 这种方法已发展成为一种多方面应用的工具, 广泛应用于不同的研究领域. 本文所阐述的利用 AMS 开展核素半衰期、反应截面、宇宙射线

及太阳中微子方面的研究是目前 AMS 在核物理和天体物理领域开展的相对较多的研究工作, 但它并不仅仅局限于这些方面的研究. 例如, 利用它还可以开展质子衰变和双 β 衰变等离子物理方面的研究. 总之, 随着 AMS 技术的发展和探测灵敏度的提高, AMS 在探测一些稀有事件的研究中将会起到越来越大的作用.

参 考 文 献:

- [1] Kutschera W, Henning W, Paul M, *et al.* Phys Rev Lett, 1980, **45**: 592.
- [2] Elmore D, Anantaraman N, Gove H, *et al.* Phys Rev Lett, 1980, **45**: 589.
- [3] Hofmann H J, Suter G, Wolfler W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1990, **B52**: 544.
- [4] Thomsen M S, Heinemeier J, Hornshøj P, *et al.* Nucl Phys, 1991, **A534**: 327.
- [5] Frekers D, Henning W, Kutschera W, *et al.* Phys Rev, 1983, **83**: 1 756.
- [6] Ahmad I, Bonino G, Castagnoli G C, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**: 2 550.
- [7] Alburger D E, Harbottle G. Phys Rev, 1990, **C41**: 2 320.
- [8] Clein K, Fink D, Middleton R, *et al.* Earth Plan Sci Lett, 1991, **103**: 79.
- [9] Kutschera W, Ahmad I, Paul M. Radiocarbon, 1992, **34**: 436.
- [10] Kutschera W, Billqvist P J, Henning D, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1984, **B5**: 430.
- [11] Haas P, Gartenmann P, Golser R, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, **B114**: 131.
- [12] He Ming, Jiang Songsheng, Jiang Shan, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2002, **B194**: 393.
- [13] Paul M, Glagola B G, Henning W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1989, **A277**: 418.
- [14] Paul M, Henning W, Kutschera W, *et al.* Phys Lett, 1980, **94B**: 564.
- [15] Kutschera W, Paul M. Annu Rev Nucl Sci, 1990, **40**: 411.
- [16] Hui S K, Paul M, Berkovits D, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **B172**: 642.
- [17] 彭秋和. 物理学进展, 1995, **15**(1): 79.
- [18] Arazi A, Faestermann T, Fernandez J, *et al.* Abstract of Ninth International Conference on AMS, 2002.
- [19] Schwarzschild A Z, Thieberger P, Cumming J B. Bull Am Phys Soc, 1977, **22**: 94.
- [20] Stephens W, Klein J, Zurmuehle R. Phys Rev, 1980, **C21**: 1 664.
- [21] Gove H E, Litherland A E, Elmore D, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1987, **B29**: 1-455.
- [22] Bahcall J N, Ulrich R K. Rev Mod Phys, 1988, **60**: 297.
- [23] Haxton W C, Cowan G A. Science, 1980, **210**: 897.

Accelerator Mass Spectrometry in Nuclear Physics and Nuclear Astrophysics*

HE Ming, JIANG Shan, DONG Ke-jun, WU Shao-yong
(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China)

Abstract: The application work which has been done and can be done in the nuclear physics and nuclear astrophysics using accelerator mass spectrometry is reviewed. The half-life measurement of long-lived radio isotopes, cross section measurement of nuclear reaction, searching for super heavy elements, cosmic study and solar neutrino detection are the main components which have been discussed.

Key words: accelerator mass spectrometry; nuclear physics and nuclear astrophysics; application

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10105017)