

文章编号: 1007-4627(2002)04-0395-04

AMS 在核物理与天体物理研究中的应用

郭之虞, 张 川

(北京大学重离子物理研究所、重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 加速器质谱学方法在核物理与天体物理研究中有重要应用. 主要介绍了该方法在寻找泡利不相容原理的违背事例和超新星活动研究等工作中的应用.

关键词: 加速器质谱学; 泡利不相容原理; 超新星

中图分类号: O657.6; O571; P14 **文献标识码:** A

1 引言

加速器质谱学(AMS)是20世纪70年代末在国际上兴起的一种具有极高灵敏度的现代核分析技术. 它主要用于测量 ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca 和 ^{129}I 等长寿命放射性核素在样品中的同位素比值, 灵敏度可达 10^{-15} , 在地球科学、考古学与古人类学、生命科学和环境科学等各个领域均有广泛应用^[1].

AMS方法在核物理中的应用主要集中在以下3个方面^[2]:

(1) 测量放射性核素的半衰期. 如测量了 ^{10}Be , ^{32}Si , ^{41}Ca , ^{44}Ti 和 ^{60}Fe 等核素的半衰期.

(2) 确定核反应截面. 自1980年以来, 用AMS已经测量了大量核反应截面数据, 主要是低能中子、高能中子和高能质子引发的核反应.

(3) 寻找奇异粒子和稀少事件. 例如, 曾经用AMS寻找过自由夸克与夸克物质、超重元素以及低 Z 元素的巨质量同位素. 用AMS寻找泡利不相容原理的违背事例是近年来这方面的新尝试.

基于以上的测量, 还可以研究其它与此相关的问题. 例如, 超新星的活动、太阳中微子的失踪以及星际 ^{26}Al 的来源等天体物理的一些问题.

2 应用 AMS 寻找泡利不相容原理的违背事例

1925年, 泡利提出了泡利不相容原理(PEP), 即原子中不可能有两个或两个以上的电子处于同一量子态. 这一原理可以更普遍地表述为: 在费米子

(即自旋为 \hbar 的半奇数倍的微观粒子, 如电子、质子和中子等)组成的系统中, 不能有两个或者更多的粒子处于完全相同的状态. 1953年, Green^[3]在量子场论的研究中提出, 粒子可以既不符合费米统计也不符合玻色统计, 而是符合一种仲费米或仲玻色统计. 1987年, A. Yu. Ignatiev和V. A. Kuzmin建立了一个存在小几率偏离PEP的单振子模型, 并用一个变量 β 来描述系统对PEP的偏离程度, 即当 $\beta=0$ 时系统满足普通的统计关系, 否则违背PEP. Greenberg等^[4]进一步将其推广至局部量子场论, 使用二阶仲费米场得出违背PEP的几率为 $\beta^2/2$. 长期以来, 曾有许多人试图从实验上对PEP进行检验, 寻找违背PEP的事例. 1999年, Baron等^[5]总结了一些实验所给出的费米子 β^2 的上限.

对PEP的实验检验可归纳为两大类: 寻找被PEP所禁止的电子态或核子态, 以及寻找被PEP所禁止的电子跃迁或核子跃迁. AMS方法由于其具有极高灵敏度而适合于在第一类实验中使用.

PEP原理被违背最简单的情形是1个原子的K层有3个电子或1个核子的 $1s_{1/2}$ 层有3个质子, 如图1所示. 非泡利Ne'原子的L层上有7个电子, 所以它的化学性质跟氟原子十分相似. 一般而言, 原子序数为 Z 的元素的非泡利原子与原子序数为 $(Z-1)$ 的元素的普通原子在化学性质上表现相似. 故可从 $(Z-1)$ 元素的天然样品中寻找 Z 元素的非泡利原子, 然后通过以下方程得出非泡利原子和同 Z 普通原子的含量比:

收稿日期: 2002-08-10; 修改日期: 2002-10-17

作者简介: 郭之虞(1944-), 男(汉族), 江苏常熟人, 教授, 从事核技术及应用研究.

$$\frac{[{}^AZ']}{[{}^AZ]} = \frac{[{}^AZ']}{[Z-1]} \frac{P(Z-1)}{P(Z)P({}^AZ)}$$

其中, 上角 A 表示同位素原子的质量数, $[{}^AZ']/[Z-1]$ 是测量的比值, $P(Z)$ 和 $P(Z-1)$ 是银河元素丰度, $P({}^AZ)$ 是银河同位素丰度.

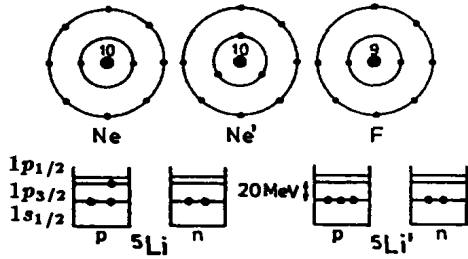


图 1 上: 普通 Ne 和 F 原子与 K 层有 3 个电子的非泡利 Ne' 原子; 下: 普通 5Li 核子与 $1s_{1/2}$ 层有 3 个质子的非泡利 ${}^5Li'$ 核子

Nolte 等^[6]曾用 AMS 对非泡利原子 ${}^{20}Ne'$, ${}^{36}Ar'$ 和非泡利核子 ${}^5Li'$ 进行了测量, 并分别给出了它们的含量上限. 为了测量 ${}^{20}Ne'$, 他们用离子源从天然 CaF_2 样品中引出 F^- 束流, 并将 F^- 离子加速到 46 MeV. 质谱计按 $A=20$ 设定, 结果测得 $[{}^{20}Ne']/[F] < 6 \times 10^{-18}$. 已知 $P(Ne)/P(F) = 3\ 300$ 及 $P({}^{20}Ne) = 0.9$, 再根据上面的公式即可推知 $[{}^{20}Ne']/[{}^{20}Ne] < 2 \times 10^{-21}$. 类似地, 通过从 $AgCl$ 中引出 Cl^- 离子的测量和计算, 得到 $[{}^{36}Ar']/[{}^{36}Ar] < 4 \times 10^{-17}$. 非泡利核子 ${}^5Li'$ 的测量是用金属锂样品进行的, 结果为 $[{}^5Li']/[{}^5Li] < 1.3 \times 10^{-14}$, 相应于 $[{}^5Li']/[{}^4He] < 3 \times 10^{-22}$.

Javorsek 等^[7]也曾报道了他们对铍的非泡利原子 Be' 的探测工作. 与一般 Be 的电子组态 $1s^2 2s^2$ 不同的是, Be' 的电子组态是 $1s^4$, 其化学性质接近于 4He , 故须从含有 4He 的样品中寻找 Be' . 与 Fischbach 等^[8]在所发表的论文中提到的实验手段相比, 他们的工作有以下两个改进: (1) 使用了高灵敏度的 AMS 方法代替传统质谱技术; (2) 采用了纯金属铍、铍矿石、含 He 的天然气和实验室空气 4 种样品, 而不是仅以空气为样品. 上述 4 种样品经过化学处理和冷水冷凝器或液氮冷阱过滤后形成 Be' 和 He 的混合气体, 然后被送入离子源. 在 5 keV 的 Cs^+ 离子束流的轰击下, Be' 转化成普通 Be , 随后 Be 被阴极的 Sm_2O_3 或 Yb_2O_3 氧化为 BeO^- 离子,

再用 AMS 方法测量, 实验结果如表 1 所示.

表 1 美国普渡大学 AMS 实验室 Be' 原子的测量结果

样品	$[Be']/[He]$	Be' 在样品中的含量
纯金属铍	$< 2 \times 10^{-8}$	$< 9 \times 10^{-12}$ a
铍矿石	$< 6 \times 10^{-9}$	$< 1 \times 10^{-11}$ a
含 He 的天然气	$< 6 \times 10^{-9}$	$< 1 \times 10^{-11}$ a
实验室空气	$< 5 \times 10^{-9}$	$< 3 \times 10^{-14}$ b

a $[Be']/[Be]$, b $[Be']/[Air]$.

3 应用 AMS 研究超新星

3.1 树轮 ${}^{14}C$ 曲线中的超新星爆发记录

超新星爆发后在其残余物中会产生 π 介子, 每个 π 介子随后衰变成两个 GeV 能量的 γ 光子. 这些 γ 光子在到达地球高层大气时会引发正、负电子簇射, 正、负电子再与大气分子的原子核碰撞产生韧致辐射 γ 射线. 该 γ 射线的能量不断降低, 其能量在 10—40 MeV 时足以引发大量 (γ, n) 和 $(\gamma, 2n)$ 反应. 产生的快中子被慢化并与大气中的氮发生 ${}^{14}N(n, p){}^{14}C$ 反应, 最后所生成的 ${}^{14}C$ 被氧化成 ${}^{14}CO_2$, 并通过碳-氧循环而进入树木的年轮.

如果超新星距地球足够近, 则在树木年轮中应能记录下相应的 ${}^{14}C$ 变化. Damon 等^[9]选择了距地球 4 000 光年的超新星 SN1006AD 为研究对象, 用 AMS 方法测量了树木年轮中的 ${}^{14}C$ 在该超新星的射线到达前后的变化. 图 2 所示为由于该超新星爆发引起的 $\Delta{}^{14}C$ 脉冲. 显然, ${}^{14}C$ 数量从公元 1008 年开始迅速增长, 并在公元 1011—1015 年间达到最大值, 其后缓慢下降. 这与太阳耀斑引起的现象明显不同, 应该是超新星爆发的记录. 公元 1021 年开始的 ${}^{14}C$ 数量上升则是太阳黑子活动期的反映.

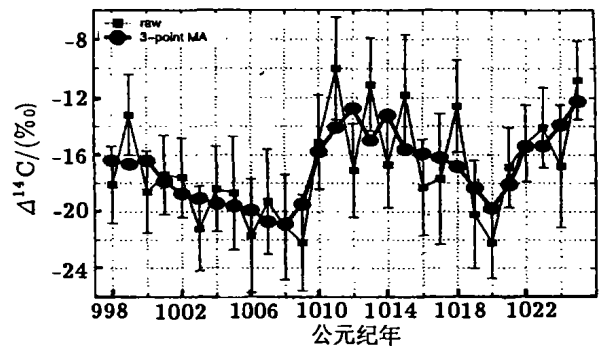


图 2 超新星 SN1006AD 在树木年轮中产生的 $\Delta{}^{14}C$ 脉冲

3.2 地壳⁶⁰Fe 含量反映的超新星爆发记录

一些长寿命的放射性同位素是用来确定其是否来自于超新星的更直接的线索, 其中⁶⁰Fe 是这种情况下最理想的同位素. 这是由于: (1) 就人类目前所知, 超新星爆发是产生明显数量⁶⁰Fe 的主要来源, 而宇宙射线产生的⁶⁰Fe 本底是很低的; (2) ⁶⁰Fe 的半衰期为 (1.49 ± 0.27) Ma, 这足以让它顺利到达地球. 理论上, 一个质量 $M \geq 15 M_{\odot}$ (太阳质量) 的超新星通常会发射出 $10^{-5} M_{\odot}$ 量级的⁶⁰Fe, 当这些⁶⁰Fe 以 10 km/s 的速度各向同性地扩大到半径 $R=30$ pc (秒差距) 的球体时, 其表面密度大约是 4×10^9 ⁶⁰Fe/cm², 此信号足以在地层中留下记录.

Knie 等^[10] 对地球样品中的⁶⁰Fe 进行了研究. 为获得相对较高的同位素含量, 其样品选自增长率只有几个 mm/Ma 的南太平洋水下 1 300 m 深处的锰铁地壳. 用 AMS 方法测定了 0—2.8, 3.7—5.9 和 5.9—13.4 Ma 等 3 个层位中 $[\text{Fe}^{60}]/[\text{Fe}]$ 的数值, 结果发现在充分考虑了各种误差之后, 在两个较年轻的层位中⁶⁰Fe 的信号明显高于本底. 这一结果的最合理解释是在大约 5 Ma 前在距离太阳系大约 30 pc 远的地方发生过一次超新星爆发.

3.3 用 AMS 研究超新星遗迹中的⁴⁴Ti 产率

1994 年在观察 Cassiopeia A (SN1680) 时首次发现了伴随⁴⁴Ti 产生所发出的能量为 1.16 MeV 的 γ 射线. 其后, 1998 年用哈勃望远镜又发现了一个新的 1.16 MeV γ 射线源, 编号为 GRO J0852-4642, 如图 3^[11]. 该超新星遗迹 (SNR) 紧靠强脉冲星 Vela, 在低能 X 射线区不可见, 在高能 X 射线区可见两旋臂结构 (RX J0852.0-4622). ⁴⁴Ti 的半衰期 $T_{1/2} = (59.2 \pm 0.6)$ a, 所以⁴⁴Ti 可以作为在过去的几百年里超新星活动的重要探测工具. 图 4 所示的是 GRO J0852-4642 区域的 γ 射线谱, 除局限在新发现的 SNR 区域的 1.16 MeV 的⁴⁴Ti 峰外, 还有一个 1.8 MeV 的²⁶Al 峰, 且在整个 Vela 扩展区均很强. 研究表明, 该 SNR 是由一颗距离约为 200 pc、年龄约为 680 a 的超新星所产生的^[11].

一般认为, ⁴⁴Ti 产生于超新星爆发后形成的富含 α 粒子的冻出区域中, 其主要反应渠道很可能是 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ 反应, 故该反应截面对于天体物理学的研究是十分重要的. 在能量高于 2.5 MeV 的区域, 该反应截面可以通过 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ 反应中的

瞬发 γ 射线来测量, 但在相关天体物理条件的低能区域, 由于反应截面的降低, 上述方法已不再适用. 根据 AMS 测量较小的反应截面具有极高灵敏度的特点, Hui 等^[12] 建立了一套测量 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ 反应截面的 AMS 方法, $[\text{Ti}^{44}]/[\text{Ti}]$ 值的测量灵敏度可达 1×10^{-14} . 据此估计共振强度低至 10—100 meV 的反应截面均是可以测量的.

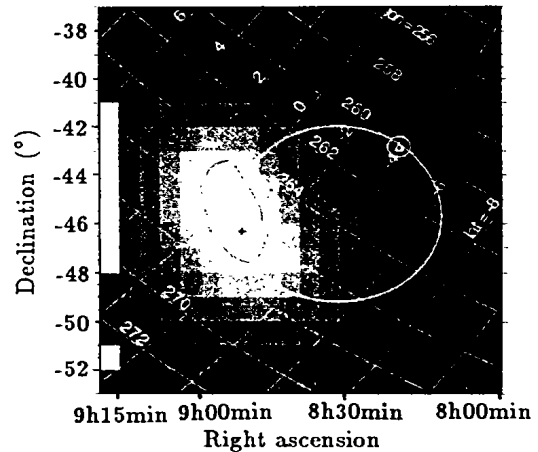


图 3 脉冲星 Vela 区的 γ 射线图 ($1.066 \text{ MeV} < E < 1.246 \text{ MeV}$)

◆ 强脉冲星 Vela; △ 超新星遗迹 Puppis-A; + RX J0852.0-4622; 亮区 超新星遗迹 GRO J0852-4642.

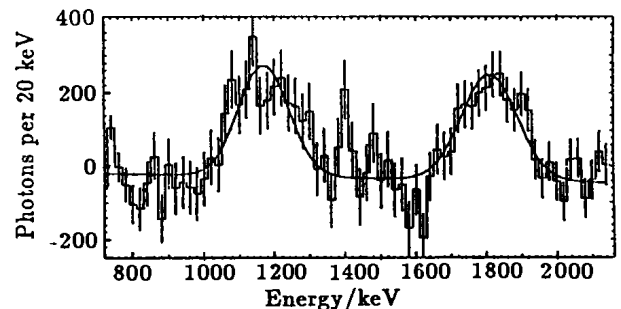


图 4 超新星遗迹 (GRO J0852-4642) 的 γ 射线谱

4 结束语

因为加速器质谱学方法测量某些放射性同位素的含量能够达到极高的灵敏度, 所以它正在逐渐成为核物理和天体物理领域的重要研究工具. AMS 除了业已在寻找泡利不相容原理的违背事例和研究超新星活动等工作中取得了一些很有价值的结果外, 在研究太阳中微子的失踪和寻找星际²⁶Al 的来源等工作中也存在应用的可能.

长期以来, 对太阳中微子的研究一直存在一个

矛盾: 标准太阳模型预言的中微子数量比 Davis 历时 20 年的测量结果高出 3 倍, 即大量中微子失踪了. 1976 年, M. S. Freedman 等建议用 AMS 方法测量 ^{205}Pb 来推算太阳中微子的注量率. 该设想是基于地球内部中微子引发的 $^{205}\text{Tl}(\nu_e, e^-)^{205}\text{Pb}$ 反应, 该反应所产生的半衰期 $T_{1/2} = 1.5 \times 10^7 \text{ a}$ 的 ^{205}Pb 能在稳定的 Tl 矿中积累. 此后, Ernst 等^[13] 在德国的 UNILAC 加速器上进行了测量 ^{205}Pb 的尝试, 但未能有效地排除 ^{205}Tl 的干扰.

目前天体物理学领域还存在着另一个困难, 即

有一半超产额的星际 ^{26}Al 不明来源. 近年来, 彭和秋提出它们很可能来自于入射能量为 8—10 MeV 的 $^{14}\text{N}(^{16}\text{O}, \alpha)^{26}\text{Al}$ 和 $^{14}\text{N}(^{14}\text{N}, \text{D})^{26}\text{Al}$ 等重离子反应. 为验证此假说, 姜山等^[14] 建议用 AMS 方法测量相应的反应截面. 此工作目前正在进行当中.

随着 AMS 技术的不断成熟, 它将为核物理和天体物理学的研究提供更加精确和更加丰富的测量数据.

致谢 感谢孟杰教授的十分有益的讨论.

参 考 文 献:

- [1] 郭之虞. 加速器质谱学[A]. 见: 现代核分析技术及其在环境科学中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1994: 79—128.
- [2] Kutschera W, Paul M. Accelerator Mass Spectrometry in Nuclear Physics and Astrophysics [J]. Annual Review on Nuclear and Particle Science, 1990, **40**: 411.
- [3] Green H S. A Generalized Method of Field Quantization [J]. Phys Rev, 1953, **90**: 270.
- [4] Greenberg O W, Mohapatra R N. Local Quantum Field Theory of Possible Violation of the Pauli Principle [J]. Phys Rev Lett, 1987, **59**: 2 507.
- [5] Baron E, Mohapatra R N, Teplitz V L. Limit on Pauli Principle Violation by Nucleons [J]. Phys Rev, 1999, **D59**: 036003.
- [6] Nolte E, Faestermann Th, Gail H, *et al.* Search for a Violation of the Pauli Exclusion Principle for Atomic Electrons and for Nucleons [J]. Nucl Instr & Meth, 1990, **B52**: 563.
- [7] Javorek I I D, Bourgeois M, Elmore D, *et al.* New Experimental Test of the Pauli Exclusion Principle Using Accelerator Mass Spectrometry [J]. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 2 701.
- [8] Fischbach E, Kirsten T, Schaeffer O A. Experimental Limits on the Existence of Anomalous Electrons [J]. Phys Rev Lett, 1968, **20**: 1 012.
- [9] Damon P E, Peristykh A N. Radiocarbon Calibration and Application to Geophysics, Solar Physics, and Astrophysics [J]. Radiocarbon, 2000, **42**: 137.
- [10] Knie K, Korschinek G, Faestermann Th. Indication for Supernova Produced ^{60}Fe Activity on Earth [J]. Phys Rev Lett, 1999, **83**: 18.
- [11] Iyudin A F, Schonfelder V, Bennett K, *et al.* Emission from ^{44}Ti Associated with a Previously Unknown Galactic Supernova [J]. Nature, 1998, **396**: 142.
- [12] Hui S K, Paul M, Berkovits D, *et al.* ^{44}Ti Atom Counting for Nuclear Astrophysics [J]. Nucl Instr & Meth, 2000, **B172**: 642.
- [13] Ernst H, Korschinek G, Kubik P, *et al.* ^{205}Pb : Accelerator mass spectrometry of a very heavy radioisotope and the solar neutrino problem [J]. Nucl Instr & Meth, 1984, **B5**: 426.
- [14] Jiang Shan, He Ming, Jiang Songsheng, *et al.* Development of AMS Measurements and Applications at the CIAE [J]. Nucl Instr & Meth, 2000, **B172**: 87.

Applications of Accelerator Mass Spectrometry to Nuclear Physics and Astrophysics

GUO Zhi-yu, ZHANG Chuan

(Institute of Heavy Ion Physics, Peking University and Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

Abstract: As an ultra high sensitive analyzing method, accelerator mass spectrometry is playing an important role in the studies of nuclear physics and astrophysics. In this article, accelerator mass spectrometry (AMS) applications in searching for violation of Pauli exclusion principle and study on supernovae are discussed as examples.

Key words: accelerator mass spectrometry; Pauli exclusion principle; supernova