β 衰变与同位旋对称性破缺

徐新星

中国科学院近代物理研究所, 中国科学院高精度核谱学重点实验室, 兰州 730000

E-mail: xinxing@impcas.ac.cn

2021-04-23 收稿, 2021-06-08 修回, 2021-06-10 接受, 2021-06-11 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB34010300)和国家自然科学基金(12022501, U1932206, U1632136)资助

摘要 研究同位旋对称性破缺对于深入理解核力与核结构有着重要意义. 我们在兰州重离子加速器国家实验室放射性束流线终端采用双面硅条与高纯锗组成强大的探测器阵列, 精确测量sd壳质子滴线附近原子核 β 衰变性质, 然后与其镜像核的衰变性质进行对比, 系统性研究轻核区同位旋对称性破缺现象.

关键词 β 衰变, 同位旋对称性破缺, sd壳, 质子滴线, 硅探测器阵列

近几十年来, 远离稳定线的奇特核研究^[1-3]一直处于国际核物理的前沿领域, 在这些核区发现的许多新的衰变模式拓广和深化了核物理研究领域和内容. 离稳定线较近的放射性核素, 由于母核与衰变子核在束缚能上的差别很小, 衰变模式主要倾向于 β 衰变. 由稳定线向滴线靠近的过程中, β 缓发粒子衰变逐渐占据主导地位. 这是一个两步过程: 首先, 母核发生慢 β 衰变; 然后, 布居在激发态的子核快发射一个或者多个粒子. 图1为丰质子核的 β 衰变纲图. 先驱核 β 衰变到粒子发射核的激发态, 其中包括同位旋相似态(isobaric analogue state, IAS), 接着此激发态发生单质子衰变、双质子发射或 α 衰变等. 探测这些出射粒子可以全面地描述一个核态的衰变特征.

对称性普遍存在于自然界中, 是现代物理学中的一个核心概念. 质子和中子的很多行为与性质就具有对称性. 1932年, Heisenberg^[4]提出了同位旋概念, 同位旋矢量是描述核子电荷无关性的算符, 把质子和中子看作同一种粒子的两种状态. 如果同位旋具有严格的对称性, 不存在破缺, 对质子和中子的理论描述并无不同. 然而实际上, 同位旋对称性是一种近似对称性, 质子间库仑相互作用和电荷相关核力的存在会导致同位

旋对称性破缺.

一个原子核与其中子数和质子数互换后形成的核素互为镜像核. 因核力近似具有电荷无关性, 丰质子核的 β^+ 衰变与其镜像核的 β^- 衰变性质应完全相同. 一对镜像核的两个对应能级称为相似能级, 一个核的能级信息未知时, 可以由其镜像核的能级信息进行估计. 描述同位旋的不对称性可用镜像不对称参数 δ 来描述: $\delta = f_i^+/f_i^- - 1$, f_i^+ 是镜像 β 跃迁的约化跃迁概率. 如果核力电荷无关性严格成立, 则镜像 β 跃迁的约化跃迁概率相等, 即参数 δ 为零. 反之, δ 不为零即是同位旋对称性破缺的标志.

近几年, 中国科学院近代物理研究所与香港大学、中国原子能科学研究院、北京大学、复旦大学等单位合作, 成功研制了用于奇特核衰变研究的硅探测器阵列^[5], 精确测量了sd壳层质子滴线附近核素($20 < A < 30$)的 β 衰变性质^[6-15], 开展了轻核区同位旋对称性破缺的系统学研究.

1 硅探测器阵列

通过复杂硅探测器阵列进行质子滴线附近核素奇特衰变测量是国际上各大实验室竞相开展的物理工作,

引用格式: 徐新星. β 衰变与同位旋对称性破缺. 科学通报, 2021, 66: 3405-3411

Xu X X. β -decay and isospin symmetry breaking (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3405-3411, doi: [10.1360/TB-2021-0394](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0394)

图1 (网络版彩色) 丰质子核β衰变的纲图

Figure 1 (Color online) β-decay scheme of proton-rich nuclei

涉足这个领域将会发现之前实验装置无法观测到的大量新的物理现象。我们成功研制了多套在兰州重离子加速器国家实验室放射性束流线终端(the Radioactive Ion Beam Line of the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL-RIBLL1)使用的由双面硅条与离子注入型四分硅构成的探测器阵列, 对奇特衰变中发射粒子的全部信息予以记录, 即完整地再现了奇特衰变的物理过程, 为开展质子滴线附近核素奇特衰变测量提供了强大的技术支撑。

第一代硅探测器阵列(图2)主要开展衰变能与半衰期测量^[5]。实验所用探测器阵列包括粒子鉴别系统、注入探测器、衰变事件记录探测器, 后续匹配大规模电子学与数据获取系统。通过位于T1、T2的时间拾取探测器给出的飞行时间(time of flight, TOF), 结合位于T2的厚度为290 μm的方硅探测器SD-ΔE和厚度约为300 μm的大面积四分硅探测器QSD-ΔE给出的能损信号(ΔE)建立ΔE-TOF图谱, 采用双重ΔE探测器的能量和时间信号, 可以提高对束流重离子的鉴别能力。DSSD1和DSSD2分别是149和66 μm厚的双面硅条探测器(double-sided silicon strip detector, DSSD), 用作停阻目标核的注入探测器, 并对注入核的衰变带电粒子进行测量。目标核注入两个DSSD, 厚度更薄的DSSD2具有更小的β粒子能损叠加效应, 可以更好地探测低能衰变质子;

而厚度相对更厚的DSSD1对高能质子和β粒子的探测效率更高。两者紧邻放置, 优势互补, 还可互相探测从对方逃逸的质子事件。QSD1是314 μm厚的四分硅探测器, 既可测量束流中穿透DSSDs的重离子, 也可测量从DSSD2逃逸的质子。约300 μm厚的QSD3和QSD4位于束流最下游, 用于测量束流中的轻粒子(¹H、²H、³H、α等), 反符合去掉穿透DSSDs的轻粒子在DSSDs中的能损信号。约1500 μm厚的QSD2、QSDU、QSD、QSDL和QSDR主要用于探测DSSDs中感兴趣核衰变产生的β粒子, 也可兼顾从DSSDs逃逸的质子。在硅探测器阵列管道外围放置5个Clover型高纯锗探测器, 用于测量衰变过程中产生的γ射线。

第二代硅探测器阵列(图3)覆盖4π空间, 可高效率记录质子滴线附近核素奇特衰变产生的轻粒子的能量、时间与空间信息。阵列中心是一块双面硅条探测器(厚度60 μm, 16×16), 周边由4块双面硅条(厚度60、300、500 μm不等, 16×16)、两块环形硅条(厚度300 μm, 32×24)以及若干四分硅探测器组成。实验过程中, 首先通过RIBLL1上的两块闪烁体探测器实现放射性核束的TOF测量, 再结合大面积离子注入型方硅探测器测量其能损, 即ΔE-TOF方法对次级束粒子进行鉴别。然后, 将感兴趣的次级束粒子注入中心60 μm的双面硅条探测器的某一个像素点, 接着在同一位置发生

图2 (网络版彩色)第一代硅探测器阵列

Figure 2 (Color online) The first-generation silicon detector array

图3 (网络版彩色)第二代硅探测器阵列实物图

Figure 3 (Color online) The second-generation silicon detector array

衰变. 出射的轻粒子会在中心探测器上有能量沉积, 一小部分可能阻止在其中, 而大部分会穿出这块探测器被周边双面硅条所探测. 中心双面硅条与束流方向成 45° 夹角放置, 对束流的有效阻止厚度为 $85\ \mu\text{m}$, 结合理论计算与实验经验, 该厚度完全可以阻止90%以内目标核. 另外, 由于采用 $60\ \mu\text{m}$ 厚的双面硅条探测器, β 粒子在注入探测器中的能损(20 keV左右)对衰变质子信号的影响也降到很小的程度. 周边双面硅条采用立方体构造, 每块双面硅条后面安装一块四分硅探测器(QSD1-6), 由300和 $1500\ \mu\text{m}$ 两种厚度构成, 主要用来测量高能质子与 β 粒子. 采用此种配置, 阵列可阻止能量最高达15 MeV的质子. 除此之外, 在探测器阵列的后端再安装一个 $300\ \mu\text{m}$ 的四分硅(QSD7), 主要用来反符合束流中的高能轻粒子. 这种设计方式使整套阵列具备

布局紧凑、覆盖立体角大与探测效率高等优点, 能够测量实验中衰变质子的能量、时间与空间信息, 即完整地再现了多粒子发射的物理过程.

2 sd壳质子滴线附近原子核的 β 衰变研究

对于sd壳丰质子核, 当价质子主要占据轨道角量为零的 $2s_{1/2}$ 轨道时, 价质子不受离心势垒影响, 它与核心的耦合很松散, 其波函数的径向部分比其他轨道更向外扩展, 出现价质子密度分布宽、核电荷半径大、质子敲出反应截面大、动量分布窄、容易形成晕结构等特点. 库仑能降低导致 $2s_{1/2}$ 轨道压低, 也可能导致镜像能级的激发能不同与镜像不对称参数 δ 不为零, 这些都属于同位旋对称性破缺的现象. 一般来说, 造成同位旋对称性破缺的来源主要有库仑相互作用和电荷相关的核力, 其中库仑相互作用是主要因素. 同位旋多重态质量方程的偏离、镜像核 β 衰变布居到镜像能级的跃迁强度不同、镜像能级的激发能不同、 β 衰变质子核同位旋相似态突破同位旋禁戒发射质子等现象, 都是同位旋对称性破缺的标志, 而其中涉及的质量、跃迁强度、镜像能差、 β 延迟质子发射都是实验可观测测量, 因此, β 衰变是研究同位旋对称性破缺的强大工具^[2].

2.1 质子滴线核 ^{27}S 的 β 衰变研究

^{27}S 是质子滴线核, Borrel等人^[16]在法国大型重离子加速器(Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, GANIL)上最早开展了其衰变谱学研究, 首次发现了 ^{27}S 具有 β 延迟双质子发射现象. 之后, Canchel等人^[17]利用

GANIL LISE3装置又一次开展了 ^{27}S 的研究. 此次实验配置了Clover高纯锗探测器, 可探测质子符合的 γ 射线. 该实验进一步确证了之前实验来自 ^{27}P IAS态双质子发射的结果, 同时发现 ^{27}P 的IAS态跃迁至 ^{26}Si 1795 keV激发态的单质子发射.

最近, Janiak等人^[18]在Dubna联合核子研究所通过光学时间投影室(optical time projection chamber, OTPC)研究了 ^{27}S 衰变性质. 该实验首次发现, 在能量332(30)和737(30) keV处有两个质子峰, 其分支比分别为19.6(15)%和6.7(8)%. 由于其他不确定因素, 332 keV质子峰分支比应介于24(3)%~28(2)%. 如果 ^{27}S 与镜像核 ^{27}Na β 衰变完全对称, 那么 ^{27}S 衰变至 ^{27}P 第一激发态与第二激发态的分支比应该远不止OTPC的测量结果, 一种原因是这两个激发态还存在其他分支, 比如 γ 发射的分支, 另一种原因是 $^{27}\text{S} \rightarrow ^{27}\text{P}$ 衰变涉及晕结构从而导致镜像衰变不对称. 但是, 由于OTPC的测量缺少 ^{27}S 衰变的 γ 射线信息, 因而无法确认是否存在镜像非对称性.

我们开展了质子滴线核 ^{27}S β 衰变谱学的精确测量. 实验首次同时测量了 ^{27}P 第一激发态发射的质子与 γ 信息, 即完全由实验观测量确定天体环境下 ^{27}P 关键共振态衰变性质, 然后推导出迄今最为精确的 ^{27}P 基态质量与 $^{26}\text{Si}(p, \gamma)^{27}\text{P}$ 共振反应率^[11], 从而确证了现代恒星演化模型中 $^{26}\text{Si}(p, \gamma)^{27}\text{P}$ 共振反应率在经典新星环境下对 ^{26}Al 产额的影响. 同时, 将实验得到的精确 ^{27}P 质量代入X射线暴天体模型, 计算发现, ^{26}Al 产额增大为原来的2.4倍^[13]. 实验得到了 ^{27}S 的衰变纲图(图4), 提取 ^{27}S - ^{27}Na 镜像衰变不对称参数, 发现镜像跃迁至最低的3个

激发态的不对称参数都超过35%, 为系统研究丰质子硫同位素的镜像不对称性提供了重要的实验数据.

2.2 近质子滴线核 ^{28}S β 衰变研究

实验上关于 ^{28}S 的 β 衰变性质仅有Pougheon等人^[19]在GANIL上开展过研究. 该实验中未使用 γ 探测器进行 β - γ 和 p - γ 符合测量, 因而无法获得 ^{28}S 的 β 延迟衰变质子发射衰变道的信息以及 β 延迟衰变 γ 发射的相关信息. 我们在HIRFL-RIBLL1开展了 ^{28}S 的 β 衰变性质研究. 实验得到了 ^{28}S 的衰变时间谱、 β 延迟质子谱、 β 延迟 γ 射线谱和质子- γ 射线符合谱等, 定出了 ^{28}S β 跃迁布居到 ^{28}P 1⁺激发态能级的能量和分支比: 1313(3) keV [17.6(26)%]、1570(3) keV [20.5(40)%]、2144(3) keV [26.1(46)%]、3460(7) keV [3.32(43)%]和4623(10) keV [3.97(37)%], 以及跃迁布居至0⁺同位旋相似态的激发能为5896(7) keV, 分支比为17.8(21)%. 结合 ^{28}S 的这些 β 衰变布居能级的相关实验数据及精确测量的 ^{28}S 半衰期(124(2) ms), 计算得到跃迁至 ^{28}P 各个能级的约化跃迁概率 f_i , 并进一步推导出全新的 ^{28}S 衰变纲图. 再结合镜像核 ^{28}Mg 的 β 衰变实验数据, 提取出了 ^{28}S 与其相似能级间的镜像不对称参数 δ , 其中跃迁至第一个1⁺态 $\delta=23$ (26)%, 至第二个1⁺态 $\delta=-28$ (27)%. 包含同位旋非守恒(isospin nonconserving, INC)核力的壳模型很好地解释了该实验结果. 在此基础上, 我们也系统地研究了丰质子硫同位素的镜像不对称性.

2.3 质子滴线核 ^{22}Si β 衰变研究

^{22}Si 是最轻的同位旋第三分量 $T_z=-3$ 的核素, 质子数减中子数 $Z-N=6$. 目前已发现的约3000种核素中, $Z-N>6$ 的核素仅有 ^{45}Fe 、 ^{48}Ni 、 ^{49}Ni , 即在轻核区, ^{22}Si 是最远离 β 稳定线的丰质子核.

从能量上来说, ^{22}Si 的 β 缓发 p 、 $2p$ 、 $3p$ 、 $p\alpha$ 衰变道均是开放的. 1987年, GANIL采用 ^{36}Ar 主束轰击Ni靶发生弹核碎裂的反应产物, 利用能损-飞行时间(ΔE -TOF)鉴别粒子, 首次发现了 ^{22}Si ^[20]. 随后, Blank等人^[21]在GANIL-LISE3装置上将感兴趣核注入300 μm 厚的硅探测器和微条气体计数器, 首次发现了 ^{22}Si 具有 β 缓发质子发射性, 同时得到了初步的 ^{22}Si 衰变的能级纲图, 然后进一步开展了与其镜像核 ^{22}O 的对比分析. 然而, GANIL的实验结果对于 ^{22}Si 的衰变性质描述非常不完备, 诸多衰变过程有待进一步明确, 而且由于统计不足, ^{22}Si 可能的 $\beta 2p$ 和 $\beta 3p$ 均未能被测量到.

图4 (网络版彩色)质子滴线核 ^{27}S 简化衰变纲图

Figure 4 (Color online) Simplified decay scheme of ^{27}S at the proton-drip line

- 11 Sun L J, Xu X X, Lin C J, et al. β -decay spectroscopy of ^{27}S . *Phys Rev C*, 2019, 99: 064312
- 12 Lee J, Xu X X, Kaneko K, et al. Large isospin asymmetry in $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ mirror Gamow-Teller transitions reveals the halo structure of ^{22}Al . *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 192503
- 13 Sun L J, Xu X X, Hou S Q, et al. Experimentally well-constrained masses of ^{27}P and ^{27}S : Implications for studies of explosive binary systems. *Phys Lett B*, 2020, 802: 135213
- 14 Liang P F, Sun L J, Lee J, et al. Simultaneous measurement of β -delayed proton and γ emission of ^{26}P for the $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ reaction rate. *Phys Rev C*, 2020, 101: 024305
- 15 Shi G Z, Liu J J, Lin Z Y, et al. β -delayed two-proton decay of ^{27}S at the proton-drip line. *Phys Rev C*, 2021, 103: L061301
- 16 Borrel V, Jacmart J C, Pougheon F, et al. ^{31}Ar and ^{27}S : Beta-delayed two-proton emission and mass excess. *Nucl Phys A*, 1991, 531: 353–369
- 17 Canchel G, Achouri L, Äystö J, et al. The β -delayed one- and two-proton emission of ^{27}S . *Eur Phys J A*, 2001, 12: 377–380
- 18 Janiak Ł, Sokołowska N, Bezbakh A A, et al. β -delayed proton emission from ^{26}P and ^{27}S . *Phys Rev C*, 2017, 95: 034315
- 19 Pougheon F, Borrel V, Jacmar J C, et al. Beta-delayed proton decay of ^{28}S . *Nucl Phys A*, 1989, 500: 287–300
- 20 Saint-Laurent M G, Dufour J P, Anne R, et al. Observation of a bound $T_{\text{Z}}=-3$ nucleus: ^{22}Si . *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 33–35
- 21 Blank B, Andriamonje S, Boué F, et al. First spectroscopic study of ^{22}Si . *Phys Rev C*, 1996, 54: 572–575
- 22 Babo M. β -delayed charged particle decays of neutron-deficient nuclei ^{20}Mg and $^{22,23}\text{Si}$. Doctor Dissertation. Caen: The University of Caen Normandy, 2016

Summary for “ β 衰变与同位旋对称性破缺”

β -decay and isospin symmetry breaking

Xinxing Xu

CAS Key Laboratory of High Precision Nuclear Spectroscopy, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
E-mail: xinxing@impcas.ac.cn

The elegant concept of isospin symmetry is of fundamental importance in nuclear and elementary particle physics. As a β -decay process changes an up quark to a down quark or *vice versa*, studies of nuclei with exchanged numbers of neutrons and protons, known as mirror nuclei, can be a powerful means to probe isospin symmetry breaking.

A series of β -decay experiments of sd-shell nuclei near the proton drip line produced by projectile fragmentation were performed at the Radioactive Ion Beam Line of the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL-RIBLL1) using a silicon array with a high detection efficiency and a low detection threshold. The secondary ions were identified by the combination of ΔE -TOF and magnetic rigidity ($B\rho$) in which the time of flight (TOF) was measured by two plastic scintillators at the second and fourth focal planes of the RIBLL1 and the energy loss (ΔE) was measured by two silicon detectors in the front of the silicon array. Double-sided silicon strip detectors (DSSDs) in the center of the array served to measure the residual energies of secondary ions on an event-by-event basis and study their decay properties with an implantation-decay correlation. Several quadrant silicon detectors (QSDs) placed behind DSSDs were used for anticoincidences of the penetrating fragments and light particles coming along with the beam, and measurements of β particles and high-energy protons. The β -delayed proton peaks with known energies and their corresponding absolute intensities were used for the energy and detection efficiency calibrations of the DSSDs. The system allows us to measure protons with energies down to about 200 keV without obvious β background in the proton spectrum and was successful to measure the energies, time, and positions of implanted ions and decay protons efficiently, supporting researchers to study the decay properties of nuclei towards the proton drip line.

The β -decay data, together with the large-scale shell-model calculations, allows detailed investigations on the mirror-nuclei systems resulting in the systematic study of isospin symmetry breaking in the sd-shell nuclear region. It was found that the mirror asymmetry parameters become larger due to the smaller separation energies while approaching the proton drip line for the extremely proton-rich sulfur nuclei $^{27,28,29}\text{S}$ and the Coulomb forces and other isospin-symmetry nonconserving forces acting between protons would lead to extended proton wave functions and cause mirror asymmetries. The properties of ^{22}Si β -decay for the transitions to the low-lying states of ^{22}Al were measured, and the reduced transition probabilities were determined. Comparing with the data on the β -decay of the mirror nucleus ^{22}O , we found a mirror asymmetry of $\delta=209(96)\%$ in the transition to the first 1^+ excited state of the respective daughters. This is by far the largest value of δ observed in the low-lying states. Shell-model calculations with isospin-nonconserving forces, including the $T=1$, $J=2, 3$ interactions related to the $s_{1/2}$ orbit that introduces explicitly the isospin-symmetry breaking force and describes the loosely bound nature of the wave functions of the $s_{1/2}$ orbit, can reproduce the observed data well and demonstrate that this dramatically large mirror asymmetry is attributed to the significant proton occupation and loosely bound nature of the wave functions of the $s_{1/2}$ orbit, which suggests that ^{22}Al is a proton-halo nucleus.

β -decay, isospin symmetry breaking, sd shell, proton drip line, silicon detector array

doi: [10.1360/TB-2021-0394](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0394)