

文章编号: 1007-4627(2017)03-0380-07

# 原子核质量的测量和评估

王 猛

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

**摘要:** 质量是原子核的基本性质之一, 在核物理和核天体物理中都有重要的应用。原子核质量测量是目前核物理研究的一个前沿热点课题, 国际上各个核物理实验室积极发展新设备和技术, 在短寿命放射性核素测量和超高精度质量测量方面取得了重要进展, 本文对此进行了总结评述。在兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)上利用等时性质量谱仪测量了一些原子核的质量, 本文对其在测量精度、核态最短寿命等前沿进展做了简要介绍, 并介绍了正在发展的双飞行时间质量谱仪。原子质量评估收集所有与原子核质量相关的实验数据, 经过评估后推荐出质量值及相应误差。原子质量评估AME2016于2017年3月发表, 为科技工作者提供基准数据。

**关键词:** 原子核质量测量; 短寿命放射性核素; 原子质量评估; 数据间的关联

中图分类号: O571.21

文献标志码: A

DOI: [10.11804/NuclPhysRev.34.03.380](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.380)

## 1 原子核质量测量

### 1.1 原子核质量测量背景

根据爱因斯坦的质能等价方程, 原子核的质量等于组成原子核内核子(质子和中子)在自由状态下的质量和减去原子核的结合能, 它直接反映了核内所有相互作用, 包括强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用等共同作用的结果, 是原子核基本性质之一。高精度的原子核质量数据不断深化着人们对核结构和基本对称性的理解<sup>[1,2]</sup>。在核天体物理中, 精确的原子核质量是研究星体演化和元素合成过程理论模型的关键输入参数<sup>[3,4]</sup>。因此, 原子核质量测量结果极大地促进了人类对微观和宏观物质结构的认识, 质量测量也一直是核物理研究的重要内容。

原子核质量的测量工作在原子核学科诞生的早期就开始发展。1913年, Thomson<sup>[5]</sup>在电磁质谱仪中首次观测到Ne元素的两个同位素, 质量数分别为20和22, 直接证明了同位素的存在, 这项工作被认为是原子核质量测量的开端。自然界中存在的大多数同位素都是通过质谱仪发现的<sup>[6]</sup>, 而核质量数据的累积也促成了液滴模型和原子核壳模型的建立。

### 1.2 原子核质量测量现状

#### 1.2.1 质量测量方法

原子核的质量测量方法总体上可以分为两类: 直接

测量和间接测量。直接测量方法是利用质量谱仪, 测量带电离子在电磁场中的运动特性, 如回旋频率, 从中提取离子的质量电荷比, 进而得到原子核的惯性质量。间接方法测量的是原子核反应的反应能或放射性核素的衰变能, 从而通过和已知质量核素建立联系得到目标核素的质量。目前原子核质量测量研究中, 直接质量测量方法占据着主导地位, 但间接测量方法仍起着重要作用, 特别是对非束缚原子核, 如<sup>15</sup>Ne<sup>[7]</sup>、<sup>16</sup>Be<sup>[8]</sup>等, 是唯一的测量手段。而在超重核区, 间接方法即 $\alpha$ 衰变能的测量也提供了重要的实验数据。

#### 1.2.2 质量测量趋势

目前, 国际上核质量测量工作有两个研究前沿, 即极高精度质量测量和远离稳定线核素的质量测量。极高精度质量测量针对有重要物理目标的核素, 如<sup>3</sup>H精确的 $\beta$ 衰变能数据对研究中微子的质量有重要意义, 因而多年来一直是人们关注的热点。最近美国的佛罗里达州立大学(FSU)研究小组利用离子阱测量了<sup>3</sup>H和<sup>3</sup>He的质量差<sup>[9]</sup>, 精度达到0.07 eV, 这是通过质量测量得到衰变能的最高精度。极高精度质量面对的目标核都是稳定或长寿命核素, 目前的测量方法主要是利用离子阱, 测量相对误差的最好水平达到了 $7 \times 10^{-12}$ <sup>[10]</sup>。

原子核质量测量的另一个重要前沿是远离稳定线核素的质量测量。理论预言束缚的原子核有7 000~8 000种<sup>[11]</sup>。经过百余年的发展, 人类已发现或者合成并鉴

收稿日期: 2017-07-06; 修改日期: 2017-08-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0400504)

作者简介: 王猛(1977-), 男, 汉, 河南淇县人, 研究员, 博士, 从事实验核物理工作; E-mail: [wangm@impcas.ac.cn](mailto:wangm@impcas.ac.cn).

别了约3200种原子核, 目前有约2500种原子核的质量得到了测量。在20世纪70年代之前, 直接质量测量方法仅局限于稳定核素或极长寿命核素。Klapisch等<sup>[12]</sup>将质量谱仪首次用于欧洲核子中心(CERN)的ISOLDE在线同位素的质量测量, 从而将直接测量方法应用到了短寿命放射性核素, 极大地拓展了质量测量的研究范围。近30年来, 世界范围内建立了一批强流重离子加速器系统, 研制了先进的质量测量设备, 在不稳定核素的质量测量方面取得了巨大成功, 使原子核质量测量进

入了远离稳定线核区。

### 1.2.3 远离稳定线原子核质量测量

目前未知质量核素主要位于远离稳定线的放射性核区, 包括中重质子滴线区、丰中子核区和超重核区。这些原子核寿命短、产额低, 其质量测量面临巨大的挑战。针对这些放射性核素, 国际上主要的核物理实验室发展了相应的质量测量装置, 主要有飞行时间质谱仪、离子阱和储存环等。近年来在短寿命原子核质量测量方面的进展如图1所示。

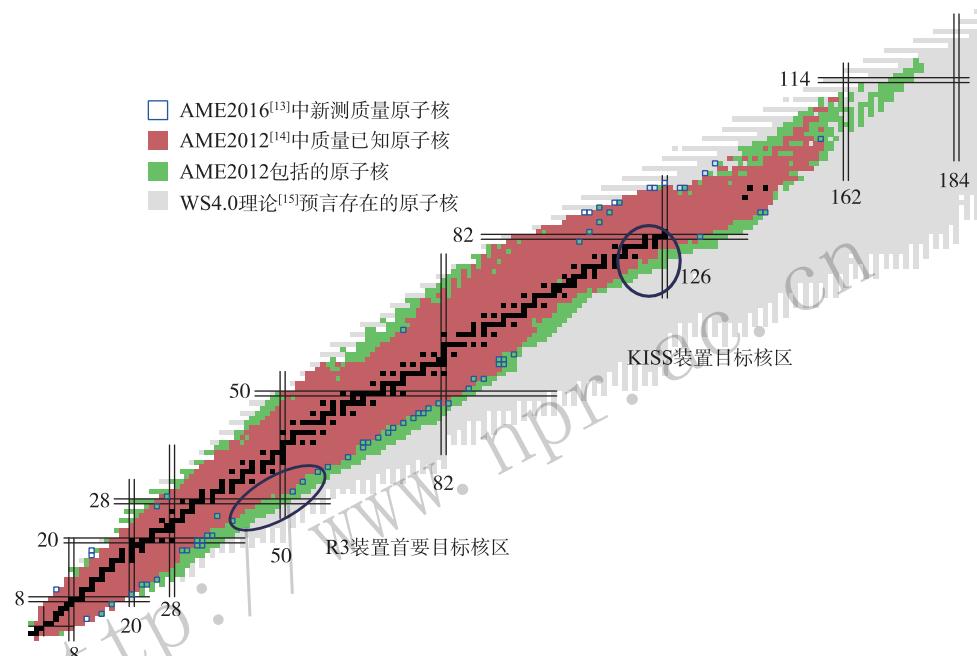


图1 (在线彩图) AME2016<sup>[13]</sup> 和 AME2012<sup>[14]</sup> 质量已知核区的比较, 以及近期质量测量的目标核区

飞行时间质谱仪包括  $B\rho$ -TOF(磁刚度-飞行时间谱仪)和MR-TOF(Multi-Reflection Time-Of-Flight, 多次反射飞行时间谱仪)。 $B\rho$ -TOF方法测量离子在束流传输线上的飞行时间, 同时测量其它辅助信息, 如从散焦面的位置得到离子磁刚度, 利用已知质量核素建立起飞行时间和质荷比的刻度方程。典型实验装置为法国大加速器实验室(GANIL)的SPEG和美国密歇根州立大学(MSU)的装置, 目前较轻丰中子核区质量, 包括<sup>22</sup>C<sup>[16]</sup>、<sup>31</sup>Ne和<sup>48,49</sup>Ar<sup>[17]</sup>, <sup>56,57</sup>Sc<sup>[18]</sup>等都由这种方法测量。另外, 日本理化研究所(RIKEN)的放射性束工厂是目前世界上最强大的放射性束流装置, 他们发现了近百种新核素并测量了约200种核素的寿命<sup>[19]</sup>, 在发展新型高精度质量谱仪的同时, 他们也利用现有放射性束流线及0°谱仪等, 测量了<sup>55,56</sup>Ca等极丰中子核的质量, 实验结果仍在分析中。 $B\rho$ -TOF谱仪一般利用飞行中放射性核素分离束线, 通过弹核碎裂产生目标核

并由束流线传输, 原则上有离子鉴别谱就可以提取出目标核的质量, 因此  $B\rho$ -TOF方法的灵敏度非常高, 可以测量远离稳定线的原子核质量。但是因为束线一般长度有限, 飞行距离较短, 极大地限制了  $B\rho$ -TOF 方法的质量分辨能力, 相应的测量误差经常在数百 keV甚至更高。

延长离子的飞行距离, 就可以提高飞行时间质谱仪的分辨能力和测量精度。束线占据的物理空间是受限制的, 而让离子多次循环经过束线是一个解决方案, 这就是 MR-TOF 谱仪的原理。该方法先慢化并俘获目标离子, 注入到 MR-TOF 谱仪中, 通过对称的电场(电镜)反射离子, 使其多次往返飞行后引出测量, 从而得到离子的质量电荷比, 提取原子核的质量。在数毫秒的测量时间里, MR-TOF 谱仪可以达到 $\sim 10^5$  的质量分辨能力。ISOLTRAP 研究组将 MR-TOF 谱仪安装到 CERN 的 ISOLDE 后面, 为后续的离子阱进一步纯

化束流，同时也作为独立测量设备，测量了<sup>52,53</sup>K<sup>[20]</sup>，<sup>53,54</sup>Ca<sup>[21]</sup>，<sup>131</sup>Cd<sup>[22]</sup>等丰中子原子核的质量。日本的一个研究小组在RIKEN的弹核碎裂产物在线分离装置RIPS后安装了MR-TOF谱仪并测量了<sup>8</sup>Li的质量<sup>[23]</sup>，在充气反冲谱仪RILAC测量了Fr、Rn等元素的缺中子同位素的质量<sup>[24]</sup>和一些超重核素的质量。在德国GSI，MR-TOF谱仪也成功地用于原子核基态和同核异能态的分离<sup>[25]</sup>。因为MR-TOF谱仪近期取得的一系列成功，国际上多个研究小组都在积极建造相应设备。特别是因为离子阱需要相似的离子俘获设备，各个在线离子阱前都可以直接接入MR-TOF谱仪并开展相关测量。因为MR-TOF有更高的灵敏度，需要的测量时间更短，因此相比离子阱，向滴线位置会推进一到两个核素。

表1 国际上针对放射性核素质量测量的主要离子阱

离子阱名称	所在实验室	目标核产生方式	代表性工作	备注
ISOLTRAP	欧洲CERN	ISOLDE	<sup>17</sup> Ne, <sup>82</sup> Zn, <sup>229</sup> Rn	Laser + MRTToF
CPT	美国ANL	<sup>252</sup> Cf裂变, 熔合蒸发	<sup>68</sup> Se, <sup>163</sup> Gd	丰中子核素
LEBIT	美国MSU	弹核碎裂	<sup>65</sup> Fe, <sup>68</sup> Se	碎裂
JYFLTRAP	芬兰Jyvaskyla	熔合蒸发, (IG)ISOL	<sup>104</sup> Sn, <sup>113</sup> Tc	元素化学性质无关
SHIPTRAP	德国GSI	熔合蒸发+SHIP	<sup>254</sup> No, <sup>256</sup> Lr	超重, 缺中子
TITAN	加拿大TRIUMPH	ISOL	<sup>11</sup> Li, <sup>8</sup> He, <sup>74</sup> Rb	短寿命核素

利用离子阱谱仪，大量短寿命放射性核素的质量得到了测量，对于有一定产额的放射性核素，一般离子阱的测量精度可以达到 $10^{-8}$ 。因为需要进行频率扫描，离子阱质量测量需要一定的目标离子产额，目前用离子阱直接测量过的产额最低核素为超重核<sup>256</sup>Lr，在4天的时间里共观测到50个离子，测量精度主要受统计误差限制，为80 keV<sup>[33]</sup>。另外，离子阱的分辨能力和测量时间直接成正比，因此对低产额、短寿命原子核质量测量比较困难。各个实验室都积极发展新方法和新技术，如新的激发模式<sup>[34]</sup>、提高测量离子电荷态<sup>[35]</sup>等提高对短寿命原子核质量测量能力。最近，SHIPTRAP利用位置灵敏探测器，发展了新型的相位投影方法<sup>[36]</sup>，大大提高了对短寿命原子核质量测量的分辨能力和灵敏度。

利用重离子储存环质量谱仪，可以对大批不稳定核素同时进行高精度的质量测量。目标核由弹核碎裂或裂变反应产生，结合电磁分离装置，注入到储存环中测量它们的循环周期(频率)，即可得到目标核的质量。因为目标核由剧烈的核反应产生，有较大的动量分布，同时储存环是一个大接受度的装置，环中储存的离子有较大的动量分布。这在一方面有利于目标核的传输，使储存环谱仪可以测量远离稳定线的低产额核素，另一

离子阱质量谱仪将离子储存到高稳定性磁场中，通过测量其回旋频率得到离子的质量电荷比，从而得到目标核的质量。离子阱有极高的测量精度，可以用于极高精度质量测量研究。同时，将离子阱和放射性束流线相连，通过ICR-TOF(离子回旋频率共振-飞行时间)方法，可以直接测量短寿命放射性原子核的质量。国际上的相关设备有欧洲CERN的ISOLTRAP<sup>[26]</sup>，德国重离子研究所(GSI)的SHIPTRAP<sup>[27]</sup>和美因兹大学的TRIGATRAP<sup>[28]</sup>，芬兰的JYFLTRAP<sup>[29]</sup>，美国阿贡国家实验室(ANL)的CPT<sup>[30]</sup>，MSU的LEBIT<sup>[31]</sup>和加拿大TRIUMPH的TITAN<sup>[32]</sup>等。表1列举了国际上针对放射性核素质量测量的主要离子阱、目标核素产生方式和代表性工作等。

方面，动量分散对循环周期的影响必须尽可能减小，才能进行高精度测量。为了实现这个目标，储存环质量谱仪有两个工作模式，即等时性谱仪和肖特基谱仪。其中肖特基谱仪利用电子冷却，使储存离子的速度分散达到 $5 \times 10^{-7}$ 量级，并利用肖特基谱仪探测离子的回旋周期。德国GSI利用这种方法，测量了大量原子核的质量，目前中重核区的丰质子<sup>[37]</sup>和丰中子<sup>[38-40]</sup>两侧的原子核质量，都主要由这种方法得到。因为冷却束流需要数秒时间，肖特基谱仪仅适用于寿命在秒以上的原子核。将储存环进行等时性设置，不需要进行冷却就可以得到较好的测量精度，因此可以用于短寿命原子核的质量测量。其原理是在储存环中运动的离子，磁刚度较大的总是在较长的轨道上运行，而磁刚度较小的运行轨道较短，通过对环的设置，对目标离子可以使轨道长度的差异正好抵消速度上的差异，从而使其循环周期不依赖于动量分散。利用等时性质量谱仪，德国GSI和中国科学院近代物理研究所已系统地测量了中重丰中子区<sup>[41,42]</sup>和 $A < 100$ 的丰质子核区原子核<sup>[43-45]</sup>的质量。

### 1.3 近代物理研究所原子核质量测量进展

在兰州重离子加速器国家实验室的兰州重离子研

究装置(HIRFL)上, 我们把冷却储存环(CSR)的实验环(CSRe)改造成了等时性质量谱仪, 精确测量了一批原子核的质量, 在缺中子区域质量测量方面走到了国际前列<sup>[43]</sup>。在最近的实验中, 我们清楚鉴别了<sup>52</sup>Co的基态和同核异能态<sup>[44]</sup>, 显示了等时性质量谱仪的良好分辨能力; 测量精度首次突破了 $10^{-7}$ , 使储存环质量测量结果可以用于研究弱相互作用CVC假设<sup>[45]</sup>。

离子在等时性设置的CSRe中的典型循环周期为600 ns, 这样仅需几十微秒的时间就可以精确测量出离子的循环周期, 从而得到其质量。因此, 从原理上等时性质量谱仪可以测量半衰期短至几十微秒的原子核态的质量。我们在CSRe上利用等时性质量谱仪, 通过监测离子回旋周期的变化, 直接观测到了<sup>94</sup>Ru的同核异能态在全裸离子中的衰变, 具体实验请参考文献[46]。离子的<sup>94m</sup>Ru<sup>44+</sup>的半衰期仅有100 μs左右, 这是直接测量寿命最短的原子核态。

储存环中离子的动量分散会影响质量测量的精度, 甚至可能带来测量的系统误差。德国GSI利用磁刚度标记方法, 即在碎片分离器FRS上加狭缝限制注入到环中离子的动量分散, 从而较大地提高了质量测量的分辨能力和测量精度<sup>[41]</sup>。但是这种方法限制了放射性核素的传输效率, 不利于测量远离稳定线的低产额核素。在测量离子循环周期的基础上, 额外测量其速度, 即可在保持较大动量接收度的情况下消除动量分散带来的影响。这可以通过在CSRe直线段安装两个TOF探测器来实现。尽管国际核物理学界已经有了各种建议, 但CSRe是目前国际上唯一可以开展相关研究的实验装置<sup>[47]</sup>。我们建造了两套新的高性能TOF探测器<sup>[48]</sup>并安装在CSRe直线段上, 初步测试实验结果验证了双TOF质量谱仪的优越性, 数据还在分析中。

## 2 原子核质量评估

### 2.1 原子质量评估介绍

如上所述, 原子核质量的测量方法种类不同, 实验数据繁多, 而单次实验仅有少数几个核的质量数据, 因此一般科研工作用到的质量数据表需要进行评估后才能给出。原子(核)质量评估AME(Atomic Mass Evaluation)是国际上权威的原子(核)质量数据来源, 为发展核理论模型、检验基本对称性、研究天体核过程以及核技术应用等提供基础数据。AME建立于20世纪50年代, 在国际纯粹与应用物理学联合会IUPAP专业委员会SUNAMCO(符号、单位、名词、原子质量、常数专业委员会)的支持下, 成立国际合作组, 负责评估原子(核)质量实验数据和理论计算结果, 定期在学术刊物

上和网络上公开发布, 供全世界科技工作者使用<sup>[49]</sup>。

AME收集所有与原子核质量相关的实验数据, 经过仔细评估给出原子核质量的最佳推荐值及其误差。原子质量评估并不是简单地收集和编辑质量数据<sup>[50]</sup>, 而是尽可能保留原始实验数据的全部信息, 这样才能够给出原子核的准确质量值和误差。这是因为原子核质量测量实验有一个特点, 即实验中测量的物理量并不是原子核的绝对质量, 而是原子核质量之间的关系。间接测量方法得到的是核衰变或核反应的能量, 即几个原子核间的关系; 即使是直接质量测量方法, 因为实验中的磁场或轨道等信息并不精确知道, 也需要利用已知质量核素来建立刻度方程, 实际得到的也是原子核质量之间的关系。这些在质量评估中必须认真考虑。保留输入数据的原始关联信息还有另外一个作用, 即当参考核的质量数据有较大改变或者精度有较大提高后, 可以对相关的原子核质量自动地重新刻度。

AME评估原理如图2所示。图中每一个点为一个原子核, 原子核之间的连线为实验得到的原子核质量间的关系, 其粗细反映了测量的精度。这样把所有原子核质量测量的实验数据放在一起, 就得到一个网络, 从中利用最小二乘法计算提取最佳推荐值及其误差。

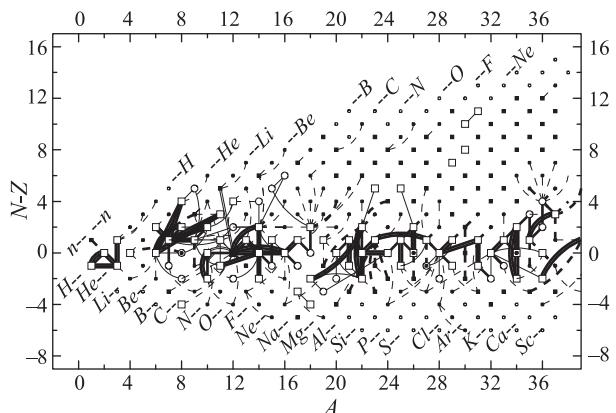


图2 AME原理图

图中每一个点为一个原子核, 原子核之间的连线为实验得到的原子核质量间的关系, 其中双线表示利用质谱仪的直接质量测量结果, 单线为间接质量测量结果。较粗的连线表示测量有较高精度。

### 2.2 原子质量评估 AME2016

最新的AME2016数据表在《Chinese Physics C》2017年的第3期发表<sup>[13]</sup>, 共收录实验数据13 035条, 从中挑选出可靠且精度较高的实验数据5 675条作为有效的输入数据。经过评估, 推荐了基态原子质量3 435个, 包括2 497个原子核的实验数据和938个外推质量。AME2016数据表的ASCII格式文件, 包括协方差矩阵

表，都可以在原子质量数据中心的网站上下载，以方便科技工作者使用<sup>[51]</sup>。

### 2.3 原子质量评估中数据间的关联

在原子质量评估中准确应用实验数据，不仅需要知道数据的误差，还需要输入数据的完整协方差矩阵，即实验数据间的关联。这里以<sup>3</sup>H 的衰变能  $Q_\beta$  值为例。精确测量<sup>3</sup>H 的  $\beta$  衰变谱，可以直接得到中微子质量的信息。而<sup>3</sup>H 的衰变能，即<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量差，是该项研究的必要输入量。多个实验室在不断地发展新方法，提高其测量精度。AME2016 中简要介绍了这项工作在过去 30 年的发展，请参考文献[13] (030002-32 页)。<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量作为重要数据，也收录在 CODATA 物理学基本常数的评估中。在 CODATA2006<sup>[52]</sup> 中，因为当时 AME2012<sup>[14]</sup> 尚未发表，<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量主要参考了 SMILETRAP 的工作<sup>[53]</sup>。在 SMILETRAP 实验中，<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量测量使用了相同的设备、实验步骤、参考离子等，实验数据间有很强的关联，在计算<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量差时，大部分的系统误差都可以消除。该实验中，<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量误差分别为 2.3 和 2.4 eV，但其质量差的误差仅有 1.2 eV，远小于其单独质量的误差值。在 CODATA2006 中，这些关联信息没有能够考虑完全(文献[53]表 5，及表 2 右半部分)，从而使得<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 之间质量差的误差达到了 3.3 eV，没有能够完全体现实验测量结果。这个问题在 2010 年国际核物理大会(INPC2010) 上做了讨论<sup>[54]</sup>。当时的 AME 评估和 CODATA2006 中<sup>3</sup>H、<sup>3</sup>He 质量的方差、协方差和关联系数值见表 2。在随后的 CODATA2010 评估中<sup>[55]</sup>，这个问题得到了修正(文献[55]第 1533 页)。在最新的 AME2016 中，<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量主要来自于最近的一个精确测量结果<sup>[9]</sup>。和文献[53]类似，在这个实验中<sup>3</sup>H 和<sup>3</sup>He 的质量有很强的关联，两个质量值误差都是 0.18 eV，而质量差的误差仅有 0.07 eV，和大型中微子实验 KATRIN 要求的精度为同一量级。如果不考虑关联，则质量差的误差为 0.25 eV。

表 2 CODATA2006 和当时的 AME 评估中，<sup>3</sup>H、<sup>3</sup>He 质量的方差和协方差(加黑)、关联系数(斜体)值

AME		CODATA2006	
		<sup>3</sup> H	<sup>3</sup> He
<sup>3</sup> H	<b>6.25</b>	<b>5.64</b>	<b>6.2500</b>
<sup>3</sup> He	0.887	<b>6.74</b>	<b>0.0274</b>
			<b>6.7600</b>

### 3 展望

近些年尽管在短寿命放射性核素测量和超高精度质

量测量方面都取得了重要进展，但仍有大量原子核的质量依然未知，这是国际上多个实验室下一步的重要研究方向。RIKEN 放射性束工厂是目前世界上最强大的通过弹核碎裂或飞行中裂变产生放射性束流的研究装置，已发现了大量新核素(如文献[56,57])并测量了多个核素的衰变寿命(如文献[16])，在丰中子核区质量测量方面可能会有突破，如图 1 所示。目前他们在发展高精度的质量测量装置，如新型等时性质量谱仪 R3 (Rare RI-Ring，稀有放射性同位素储存环)<sup>[58]</sup>，将于近期测量丰中子双幻核<sup>78</sup>Ni 及邻近原子核的质量。目前短寿命原子核质量测量的另一个主要困难在于如何产生目标核，特别是中子数  $N=126$  的丰中子核区，目前没有好的产生手段。理论预言多核子转移反应可能是一个有效的方法<sup>[59]</sup>。日本的 KISS (KEK 同位素分离系统) 装置<sup>[60]</sup>将利用多核子转移反应，产生并分离丰中子核素研究其性质，利用 MR-TOF 谱仪测量核质量是一个重要的物理目标。

目前在建的新一代大科学装置如中国的强流重离子加速器(HIAF)、德国的 FAIR 和美国的 FRIB，在研究目标中都把远离稳定线核素的质量测量放在了重要的位置，原子核的质量测量工作将有更大的发展。

随着原子核质量测量工作的发展，原子质量评估也需相应发展。评估中必须认真考虑原子质量评估中输入数据间的关联，才能够得到准确的推荐值及其误差。在未来的大科学装置实验中，测量范围将更加远离稳定线，可用的参考核将更加稀少，需要开展多个实验逐步外推。在这个过程中，下一步实验覆盖的核区质量刻度需要上一步得到的质量结果，从而过渡到放射性装置可达到的远离稳定线区域的极限。相应研究中，实验数据间的关联将变得更加重要，需发展有效的处理方法。原子质量评估将仍需要进一步发展。

### 参考文献：

- [1] LUNNEY D, PEARSON J M, THIBULT C. Reviews of Modern Physics, 2003, **75**: 1021.
- [2] BLAUM K. Phys Rep, 2006, **425**: 1.
- [3] MARTIN D, ACRONES A, NAZAREWICZ W, OLSEN E. Phys Rev Lett, 2016, **116**: 121101.
- [4] MUMPOWER M R, SURMAN R, MCLAUGHLIN G C, et al. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2016, **86**: 86.
- [5] THOMSON J J. Proceedings of the Royal Society A, 1913, **89**: 1.
- [6] ASTON F W. Nature, 1920, **105**: 617.
- [7] WAMERS F, MARGANIEC J, AKSOUTH F et al. Phys Rev Lett, 2014, **112**: 132502.
- [8] SPYROU A, KOHLEY Z, BAUMANN T, et al. Phys Rev

- Lett, 2012, **108**: 102501.
- [9] MYERS E G, WAGNER A, KRACKE H, *et al.* Phys Rev Lett, 2015, **114**: 013003.
- [10] RAINVILLE S, THOMPSON J K, PRITCHARD D E. Science, 2004, **303**: 334.
- [11] ERLER J, BIRGE N, KORTELAINEN M, *et al.* Nature, 2012, **486**: 509.
- [12] KЛАPISCH R, PRIEELS R, THIBAULT C, *et al.* Phys Rev Lett, 1973, **31**: 118.
- [13] HUANG W J, AUDI G, WANG M, *et al.* Chinese Physics C, 2017, **41**: 030002.
- [14] WANG M, AUDI G, WAPSTRA A H, *et al.* Chinese Physics C, 2012, **36**: 1603.
- [15] WANG N, LIU M, WU X Z, *et al.* Phys Lett B, 2014, **734**: 215.
- [16] GAUDEFROY L, MITTIG W, ORR N A, *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **109**: 202503.
- [17] MEISEL Z, GEORGE S, AHN S, *et al.* Phys Rev Lett, 2015, **114**: 022501.
- [18] MEISEL Z, GEORGE S, AHN S, *et al.* Phys Rev Lett, 2015, **115**: 162501.
- [19] WU J, NISHIMURA S, LORUSSO G, *et al.* Phys Rev Lett, 2017, **118**: 0722701.
- [20] ROSENBUSCH M, ASCHER P, ATANASOV D, *et al.* Phys Rev Lett, 2015, **114**: 202501.
- [21] WIENHOLTZ F, BECK D, BLAUM K, *et al.* Nature, 2013, **498**: 346.
- [22] ATANASOV D, ASCHER P, BLAUM K, *et al.* Phys Rev Lett, 2015, **115**: 232501.
- [23] ITO Y, SCHURY P, WADA M, *et al.* Phys Rev C, 2013, **88**: 011306.
- [24] SCHURY P, WADA M, ITO Y, *et al.* Phys Rev C, 2017, **95**: 011305.
- [25] DICKE T, PLASS W R, AYET SAN ANDRES S, *et al.* Phys Lett B, 2013, **744**: 137.
- [26] KREIM S, ATANASOV D, BECK D, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2013, **317**: 492.
- [27] BLOCK M. Nucl Phys A, 2015, **944**: 471.
- [28] KETELAER J, BLAUM K, BLOCK M, *et al.* Eur Phys J A, 2009, **42**: 311.
- [29] ERONEN T, KOLHINEN V S, ELOMAA V V, *et al.* Eur Phys J A, 2012, **48**: 46.
- [30] SAVARD G, WANG J C, SHARMA K S, *et al.* International Journal of Mass Spectrometry, 2006, **251**: 252.
- [31] RINGLE R, SCHWARZ S, BOLLEN G, International Journal of Mass Spectrometry, 2013, **349-350**: 87.
- [32] KWIATKOWSKI A A, ANDREOIU C, BALE J C, *et al.* Hyperfine Interactions, 2014, **225**: 143.
- [33] MINAYA-RAMIREZ E, ACKERMANN D, BLAUM K, *et al.* Science, 2012, **337**: 1207.
- [34] GEORGE S, BARUAH S, BLANK B, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, **98**: 162501.
- [35] ETTENAUER S, SIMON M C, GALLANT A T, *et al.* Phys Rev Lett, 2011, **107**: 272501.
- [36] ELISEEV S, BLAUM K, BLOCK M, *et al.* Phys Rev Lett, 2013, **110**: 082501.
- [37] LITVINOV YU A, GEISSEL H, RADON T, *et al.* Nucl Phys A, 2005, **756**: 3.
- [38] CHEN L, WALKER P M, GEISSEL H, *et al.* Phys Rev Lett, 2013, **110**: 122502.
- [39] CHEN L, PLASS WR, GEISSEL H, *et al.* Nucl Phys A, 2012, **882**: 71.
- [40] SHUBINA D, CAKIRLI R B, LITVINOV YU A, *et al.* Phys Rev C, 2013, **88**: 024310.
- [41] SUN B, KNOBEL R, LITVINOV YU A, *et al.* Nucl Phys A, 2008, **812**: 1.
- [42] KNOBEL R, DIWISCH M, GEISSEL H, *et al.* Eur Phys J A, 2016, **52**: 138.
- [43] ZHANG Yuhu, WANG Meng, LITVINOV YU A, *et al.* Nuclear Physics Review, 2016, **33**: 122.
- [44] XU X, ZHANG P, SHUAI P, *et al.* Phys Rev Lett, 2016, **117**: 182503.
- [45] ZHANG P, XU X, SHUAI P, *et al.* Physics Letters B, 2017, **767**: 20.
- [46] ZENG Qi, WANG Meng, ZHANG Yuhu, *et al.* Nuclear Physics Review, 2016, **34**(3): 414. doi: [10.11804/NuclPhysRev.34.03.414](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.414). (in Chinese)  
(曾奇, 王猛, 张玉虎, 等. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 414.)
- [47] XING Y M, WANG M, ZHANG Y H, *et al.* Physica Scripta T, 2015, **166**: 014010.
- [48] ZHANG W, TU X L, WANG M, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2014, **756**: 1.
- [49] AUDI G. International Journal of Mass Spectrometry, 2006, **251**: 85.
- [50] AUDI G, BLAUM K, BLOCK M, *et al.* At Data Nucl Data Tables, 2015, **103-104**: 1.
- [51] <http://amdc.impca.ac.cn>
- [52] MOHR P J, TAYLOR B N, NEWELL D B. Reviews of Modern Physics, 2008, **80**: 633.
- [53] NAGY S Z, FRITIOFF T, BJORKHAGE M, *et al.* Euro Phys Lett, 2006, **74**(3): 404.
- [54] WANG M, AUDI G, PFEIFFER B, *et al.* J Phys: Conf Ser, 2011, **312**: 092064.
- [55] MOHR P J, TAYLOR B N, NEWELL D B. Reviews of Modern Physics, 2012, **84**: 1527.
- [56] SUMIKAMA T, NISHIMURA S, BABA H, *et al.* Phys Rev C, 2017, **95**: 051601.
- [57] CELIKOVIC I, LEWITOWICZ M, GERNHAUSER R, *et al.* Phys Rev Lett, 2016, **116**: 162501.
- [58] YAMAGUCHI T. Physica Scripta T, 2015, **166**: 014039.
- [59] LI Cheng, ZHANG Fan, LI Jingjing, *et al.* Phys Rev C, 2016, **93**: 014618.
- [60] KIMURA S, ISHIYAMA H, MIYATAKE H, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2016, **376**: 338.

## Nuclear Mass Measurement and Evaluation

WANG Meng<sup>1)</sup>

(Key Laboratory of High Precision Nuclear Spectroscopy and Center for Nuclear Matter Science, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Mass is a fundamental property of the atomic nucleus. Nuclear mass data play an important role in nuclear physics and nuclear astrophysics. Thanks to the developments of novel mass spectrometers and radioactive nuclear beam facilities, the experimental knowledge of nuclear masses has been continuously expanding along two main directions, including: measurements aimed at high-precision mass values and at the most exotic nuclei far from the stability. The latest progress are reviewed in the paper. In the past few years, mass measurements of short-lived nuclides were performed using isochronous mass spectrometry based on the Cooler Storage Ring at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou(HIRFL-CSR). The progresses on the frontiers of short half-life and high precision are introduced. The Atomic Mass Evaluation (AME) is the most reliable source for the comprehensive information related to the atomic (nuclear) masses. The latest version of the AME, *i.e.*, AME2016, was published in March, 2017, serving the research community with the benchmark data.

**Key words:** nuclear mass measurement; short-lived radioactive nuclides; atomic mass evaluation; Correlations

Received date: 6 Jul. 2017; Revised date: 30 Aug. 2017

Foundation item: National Key R&D Program of China (2016YFA0400504)

1) E-mail: [wangm@impcas.ac.cn](mailto:wangm@impcas.ac.cn).