



原子质量评估的发展趋势和新进展

黄文嘉 王猛

The Development Trends and New Advances in Atomic Mass Evaluation

HUANG Wenjia, WANG Meng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC62>

引用格式:

黄文嘉, 王猛. 原子质量评估的发展趋势和新进展[J]. *原子核物理评论*, 2024, 41(1):263–268. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC62

HUANG Wenjia, WANG Meng. The Development Trends and New Advances in Atomic Mass Evaluation[J]. *Nuclear Physics Review*, 2024, 41(1):263–268. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC62

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于核数据的中子诱发原子离位损伤截面评估方法

Evaluation Methods of Neutron-induced Atomic Displacement Damage Cross Section Based on Nuclear Data
原子核物理评论. 2023, 40(2): 303–313 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022079>

原子核质量及相关物理量的系统研究

Systematic Study on Nuclear Mass and Related Physical Quantities
原子核物理评论. 2023, 40(2): 141–180 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022098>

基于相对论Hartree-Fock理论的原子核壳结构性质研究

Nuclear Shell Structure Properties Described by Relativistic Hartree-Fock Theory
原子核物理评论. 2020, 37(3): 478–491 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC61>

等时性质量谱仪中 $N=Z$ 核质量测量的方法探索

Study of Mass-measurement Method for $N=Z$ Nuclei with Isochronous Mass Spectrometry
原子核物理评论. 2019, 36(3): 294–304 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.294>

质子滴线外奇异原子核的衰变研究

Decay Studies of Exotic Nuclei Beyond the Proton Dripline
原子核物理评论. 2023, 40(3): 327–340 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2022132>

HIRFL-CSR上等时性质量测量进展

Progress of Isochronous Mass Spectrometry at HIRFL-CSR
原子核物理评论. 2020, 37(3): 301–308 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC40>

文章编号: 1007-4627(2024)01-0263-06

原子质量评估的发展趋势和新进展

黄文嘉^{1,2}, 王猛²

(1. 先进能源科学与技术广东省实验室, 广东 惠州 516007;
2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 原子质量评估 (Atomic Mass Evaluation, AME) 是一项收集和综合评价与原子质量相关 (例如质谱术、衰变和核反应等) 实验数据的重要工作, 它被广泛认为是国际上权威可靠的原子质量信息来源。随着质量测量技术的不断发展, 不仅测量的精度得到了显著提高, 而且可测核素的范围也得到了扩大, 同时揭示了许多奇特原子核的新现象。精确的质量数据为原子核结构、原子核反应以及核天体物理等基础核物理研究领域提供了不可或缺的参考。本工作对最新出版的原子质量数据评估 AME2020 进行了概述, 并对当前主要质量测量实验装置的精度进行了检验, 同时举例说明了重要实验数据。AME2020 的发布对于广泛的科学研究和技术应用领域具有深远的实际影响。

关键词: 原子质量评估; 奇特原子核; 质谱仪; 衰变和核反应

中图分类号: O571.21

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC62

0 引言

质量 (结合能) 是原子核内所有相互作用总和的反映, 是原子核最基本的属性之一。精确的质量数据对于发展核理论模型, 确定原子核滴线位置, 检验基本对称性, 研究天体核合成过程以及核技术应用等领域至关重要^[1]。超高精度的质量数据甚至可用于研究弱相互作用, 检验 CPT 对称性以及帮助确定基本物理常数^[2]。一个原子的质量等于构成它的所有粒子 (质子、中子和电子) 的质量总和减去两部分结合能: 电子结合能与原子核结合能。电子结合能的范围大约在 14 eV (氢) 到几百 keV (铀) 之间, 通常情况下, 可以通过精密的原子光谱实验获得。在某些情况下, 当实验数据不可用时, 可以利用半经验公式来估算电子结合能^[3]。一般认为电子的结合能计算精度较高, 即使对最重的离子精度也在 eV 量级, 因此可以通过中性原子质量直接计算出原子核的结合能。

质量测量的历史几乎可以追溯到核物理开端, 至今已有一百多年^[4]。原子质量的测量方法主要可分为两类: 直接测量和间接测量。直接测量通过分析电离原子在电磁场中的运动特性来测量其惯性质量, 结果通常以原子质量单位 (u) 表示。间接测量则是通过记录核反应或衰变过程中的能量变化, 来推断目标核素与其他核素

之间的质量关系, 这类测量的结果一般以电子伏特 (eV) 为单位。在 2003 年发表的原子质量评估^[5]中, 大部分核素质量信息来源于核反应与衰变。其中, 靠近稳定线长寿命原子核的中子俘获 (n, γ) 实验相对质量精度达到 10^{-10} (参见文献^[6]), 是整个质量评估体系中“支柱” (backbone) 数据的主要来源。

随着测量技术的不断发展, 潘宁阱 (penning trap) 已成为精度最高的质谱仪^[1]。例如, 德国美因茨大学利用离线潘宁阱 LIONTRAP 测量了 HD⁺ 分子离子与 ¹²C⁶⁺ 的回旋频率比^[7], 从中得到氘原子核的质量为 2.013 553 212 535 (17) u, 相对精度达到 8×10^{-12} 。由于原子质量单位 u 被定义为 ¹²C 原子质量的十二分之一, 因此, 在使用 ¹²C 作为参照核进行质量测量时, 不会由于参考核本身的不确定性而对实验结果产生额外的误差。美国麻省理工学院通过测量 CO⁺ 和 N₂⁺ 的回旋频率比^[8], 得到 ¹⁴N 的质量精度为 1.7×10^{-11} 。自 2003 年后, 原子质量评估中的 backbone 数据逐渐被潘宁阱质谱仪的测量结果所取代。图 1 展现的是 ¹⁴N 原子质量测量精度随时间的变化趋势。从图中可以看到, ¹⁴N 的相对质量精度从最初的 $\sim 3 \times 10^{-5}$ (几百个 keV) 逐步提高到目前的 $\sim 2 \times 10^{-11}$ (几个 eV)。每过十年, 相对质量精度就提高约一个数量级。

收稿日期: 2023-08-30; 修改日期: 2024-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFA1601500)

作者简介: 黄文嘉 (1988-), 男, 广东韶关人, 副研究员, 博士, 从事核结构与核反应研究; E-mail: huangwj@impcas.ac.cn

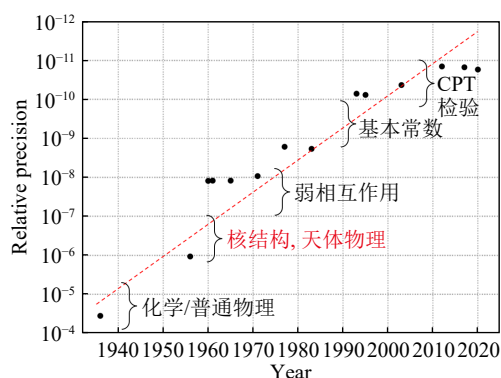


图 1 ^{14}N 原子质量精度随时间的演化 (在线彩图)

不同质量精度下的物理研究在相应区域标出, 红色虚线为引导线。

过去, 对于短寿命核素的质量测量主要依靠基于放射性束流线的 TOFI (Time-Of-Flight Isochronous)^[9] 和 SPEG (Spectromètre à Perte d'Énergie Grande Acceptance)^[10] 飞行时间质谱术, 以及通过 β 衰变端点能 (end-point) 实验方法。现今, 随着潘宁阱质谱术 (penning trap mass spectrometry)、储存环等时性质质谱术 (Isochronous Mass Spectrometry, IMS) 和多反射飞行时间质谱术 (Multi-reflection Time of Flight mass spectrometry, MR-ToF) 等高精度质谱术的广泛应用, 质量测量已经达到前所未有的精度水平^[11]。图 2 展示了 AME2020^[12-13] 与 AME2003^[5] 实验评估数据的残差分布情况 (残差定义为 $M_{\text{AME20}} - M_{\text{AME03}}$)。在低质量丰中子区 ($20 \leq Z \leq 28$), AME2020 所测得的质量盈余系统性地小于 AME2003 的评估结果, 最大的偏差甚至超过 1 MeV。这主要是由于在 2003 年以前的测量主要依赖于 TOFI 和 SPEG 测量, 这些测量方法存在明显的系统偏差。在中重质量丰中子区 ($28 \leq Z \leq 50$), AME2020 评估结果显示新报道的质量盈余值显著大于 AME2003 的评估结果。这种差异源于该区域的核素质量数据过去主要是通过 β 衰变端点能获得。如果对衰变子核的能级结构认识不足, 可能会忽略级联伽马射线的能量, 导致计算得到的 Q 值低于实际值, 进而使得

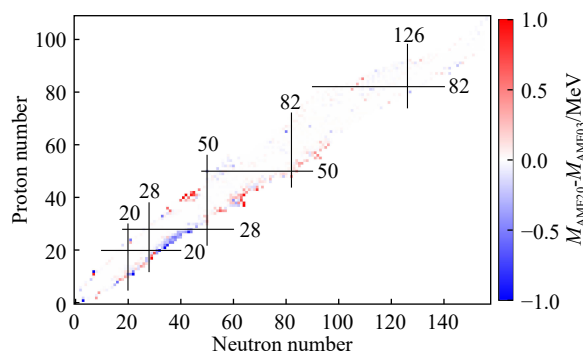


图 2 AME2020 和 AME2003 两版质量数据的残差

母核的质量被低估。由此可见, 在过去 10 到 20 年间, 我们对远离稳定线原子核的质量面形状以及对原子核中核子相互作用的理理解经历了深刻的变化。

1 质量评估 (AME) 方法

无论是直接还是间接质量测量, 都是建立两个或多个核素之间的质量关系。早在 20 纪 60 年代, 人们就发现实验数据常常对多个核素的质量进行过度确定, 也就是说, 同一核素的质量可以通过不同的实验方法获得。因此, 一种特定的核素可能会与许多不同核素形成多种联系, 这些关联构成了一个复杂的网络。AME 的创始人 Wapstra^[14] 首次将最小二乘法用于解决这种复杂的核素质量关系问题, 这种方法一直被使用至今。最小二乘法用于评估原子质量的核心思想是线性化每个实验数据, 而不是直接采用论文发表的最终质量值。例如, 针对潘宁阱的实验数据, AME 实际上是采用最原始的实验数据: 目标离子与参考离子的回旋频率比。通过回旋频率比, AME 构建目标核素与参考核素之间的质量差作为输入数据。这种方法的优点在于, 当参考核质量发生改变时, 目标核素的质量也会自动重新调整^[15]。最后, 通过协方差矩阵, 考虑不同核素之间的关联, 我们可以得到最优的质量值、分离能以及相应的误差。AME 通过最小二乘法统一处理所有的实验数据, 通过比较最初构建的输入数据与最终的评估结果, 揭示数据间的差异和不一致性。只有通过评估程序并具有一定权重的实验数据才会被视为 AME 的有效输入数据。如果某个原子核只被测量过一次, 它的质量就直接由其反应 Q 值决定。在这种情况下, 我们不能通过最小二乘法拟合判断其正确性, 而需要借助别的方法, 例如利用质量面的平滑特性或者相关理论进行检验。在 AME 中, 通过最小二乘法得到质量的核素称为初级 (primary) 核, 而只从单一数据得到质量的原子核被称为次级 (secondary) 核。

在最小二乘法的基础上, 我们可以获得最优的原子质量值及其相应误差。除此之外, AME 还关注于每个实验数据如何影响原子质量的确定。Audi^[16] 在 1986 年提出了信息流矩阵 (flow-of-information matrix) 的概念, 使我们得以追踪每个输入数据对各个核素质量的贡献 (更多细节可查阅本文第一作者博士论文^[17])。图 3 展示了围绕 ^{102}Pd 原子核的信息流矩阵。 ^{102}Pd 和 ^{102}Ru 之间的质量差, 等价于 ^{102}Pd 双电子俘获能量, 首先由德国重离子研究所 GSI 利用潘宁阱质谱仪 SHIPTRAP^[18] 直接测得, 结果为 1 203.27(0.36) keV。这一结果与 AME2003 的评估结果 1 173.0(2.4) keV 相比偏离个 10σ 。由于这一核区能量测量一致性较好, 且当时没有新的质谱数据,

AME2012 并未采纳 SHIPTRAP 的测量结果。然而，最近芬兰的质量测量组 JYFLTRAP 利用潘宁阱重新测量了 ^{102}Pd 和 ^{102}Ru 的质量差 [19]，他们的结果 1203.47 (0.045) keV 与 GSI 的数据高度吻合。经过进一步分析，我们认为原始 ^{102}Rh 的 β 衰变数据 [20] 可能存在系统误差，因此在新的质量评估中舍弃了旧的 β 数据，采纳了潘宁阱的数据。通过图 3 可以看到，在 AME2012 中， ^{102}Pd 的质量主要由 $^{102}\text{Pd}(n, \gamma)^{103}\text{Pd}$ 反应决定 (91.87%)，而在 AME2020 中则完全由 $^{102}\text{Pd}-^{102}\text{Ru}$ 潘宁阱质谱术决定。除此之外， ^{102}Rh 和 ^{103}Pd 也从初级核变成了次级核，前者完全由贝塔衰变 $^{102}\text{Rh}(\beta^+)^{102}\text{Ru}$ 决定，后者由中子俘获 $^{102}\text{Pd}(n, \gamma)^{103}\text{Pd}$ 决定。

因此，原子质量评估是一个动态的过程，随着新数据的不断纳入，原子质量在最小二乘法的框架下持续更新。信息流矩阵揭示了特定数据的信息是如何“流向”并影响到每个质量值，这对于理解不同数据间的差异、设计未来实验方案以获取更高精度具有重要的作用。

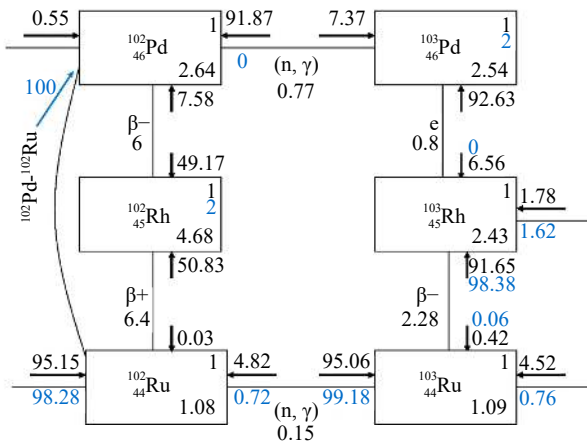


图 3 ^{102}Pd 附近信息流矩阵 (在线彩图)

矩形表示核素，矩形右下方表示的是质量精度 (keV)，矩形右上方表示的是质量分类的标记 (1 表示质量通过最小二乘法得到，2 表示质量来源于单一实验结果)。矩形之间的连线表示相应的关联类型，类型下方的数字表示相应的实验精度 (keV)，箭头表示该类型对质量的重要性 (%)。黑色和蓝色数字分别是 AME2012 和 AME2020 的评估结果。

2 原子质量评估 AME2020

2.1 概述

最新一期的原子质量评估 AME2020 于 2021 年 3 月在《中国物理 C》上发表 [12-13]。AME2020 共审查了 13 812 条实验数据，并从中筛选出了 5 841 条作为有效的输入数据。经过评估，得到了 2 550 个基态核素和 406 个同质异能态 (半衰期大于 100 ns) 的质量值。此外，我们还对约 1 000 个实验尚未确定的核素质量进行了外

推。对于那些偏离原子核质量面平滑趋势的数据，AME 并未直接采纳，而是给出了相应的推荐值 (参见文献 [12] 中的表 F)。与上一期质量评估 AME2016 相比，AME2020 提高了 427 个核素的质量精度，并且新收录了 74 个质量数据 (如图 4 所示)。这些新数据主要来源于日本理化研究所 (RIKEN)-(MR-ToF 和 Bp-ToF) 质谱术 [21-22]、中国科学院近代物理研究所 (IMP) 储存环等时性质谱术 CSR-IMS [23]、美国阿贡国家实验室 CPT 潘宁阱质谱术 (Phase-Imaging Ion-Cyclotron-Resonance, PI-ICR) [24] 以及 IMP 的 α 衰变谱仪 (Spectrometer for Heavy Atoms and Nuclear Structure, SHANS) [25-26] 和其他衰变实验数据 [27]。

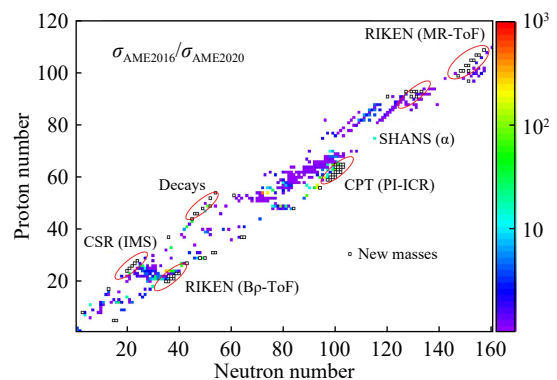


图 4 AME2020 相较于 AME2016 在质量精度上有所提升的核素 (在线彩图)

黑色空心方块代表新收录的质量数据，相应的测量技术也在图中相应位置进行了标注。

2.2 质谱仪符合度对比

当前原子核质量信息主要来源于质谱仪的精确测量。鉴于 AME 考虑所有与原子质量相关的实验数据，理解不同质谱仪产生的实验数据之间的一致性显得尤其重要。为了量化不同质谱仪数据的一致性，AME 引入了“部分一致性因子” (Partial Consistency Factor, PCF)，其数学表达式为

$$\chi_n^p = \sqrt{\frac{Q}{Q-M} \frac{1}{P} \sum_{i=1}^p v_i^2}, \quad (1)$$

其中： Q 表示总的输入数据数量； M 表示相关核素数量； P 代表每组 (通常指相同的测量装置) 输入数据的数目。 $v_i = \frac{\bar{q}_i - q_i}{dq_i}$ 表示原始输入数据 $q_i \pm dq_i$ 与最终评估值 \bar{q}_i 之间的差异。对于每种特定的实验方法，我们可以计算一个对应的 χ_n^p 值。如果对全部输入数据求和， χ_n^p 将退化为归一化卡方。图 5 列出了世界上主要质谱测量实验装置的 PCF 值。可以看到，大多数实验装置的 PCF 值接近 1，表明这些实验结果相互之间是一致的。然而，华盛顿大学 (Washington) 的潘宁阱质谱仪的 PCF 值显著大于 1，

这意味着它的数据与其他数据存在不一致,可能存在系统误差。在 AME2020 中,我们对该质谱仪报道的实验误差进行了调整,将其扩大了 2.5 倍。调整后, ^4He 和 ^{16}O 的质量误差从 AME2016 的 63 pu 和 173 pu 增大到 AME2020 中的 158 pu 和 319 pu (1 p 等于 10^{-12} , 详情可见文献 [12] 6.1 章节的讨论)。通过对全局质量数据进行评估,可以揭示特定实验方法中可能被忽视的系统误差,并帮助质量评估者了解不同实验装置的性能差异。

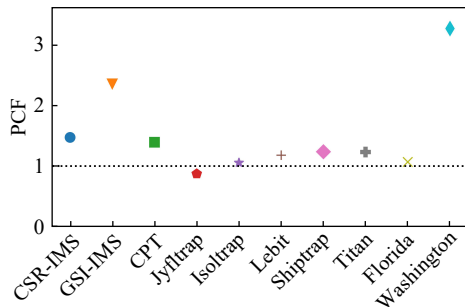


图 5 不同质谱仪的 PCF 值

2.3 Z~100 质量区原子核质量测量

超重元素的稳定性主要受到核内质子和中子的壳效应影响 [28]。高精度的质量数据对于提取原子核结合能、确定壳强度和探索原子核结构新现象至关重要 [29]。目前,关于重核以及超重核区的质量信息主要来源于 α 衰变实验 [30]。通过这些实验,我们测量 α 衰变能确定衰变母核和子核之间的质量关系。对于偶偶核,从基态到基态的衰变通常最有可能发生,这种情况在 α 衰变谱中易于辨认,因为它们具有最高的强度。然而,对于奇 A 核和奇奇核,它们倾向于衰变到子核的激发态,因此需要通过 α - γ 符合测量来确定准确的基态能量差,这无疑增加了实验的不确定性。此外,部分衰变子核可能发生自发裂变,导致无法完整获取 α 衰变链上原子核质量信息。因此,对重核质量进行直接测量尤为关键。

最近,RIKEN 的质量测量组利用 MR-ToF 质谱术对 Z~100 质量区的重核质量进行了直接测量 [31],最小质量误差约为 50 keV,同时从新数据中提取了中子 $N = 152$ 壳强度。值得一提的是, ^{249}Md 和 ^{250}Md 这两个核素位于两条 α 衰变链 ^{261}Bh - ^{257}Db - ^{253}Lr - ^{249}Md 和 ^{266}Mt - ^{262}Bh - ^{258}Db - ^{254}Lr - ^{250}Md 之上 (图 6)。有了 ^{249}Md 和 ^{250}Md 这两个核素的新质量数据以及已知的 α 衰变能量数据,我们就可以推算出这两条衰变链上所有核素的质量。通过质谱术直接测得的重核质量数据因此也被称为“锚点”(anchor point)。锚点有助于减小间接测量带来的累计误差,并可作为基准点来指导未来实验的设计和理论的发展。总之,直接质量测量提供了超重元素研究

的基础数据,帮助科学家探索未知的核素,扩展核素图的边界,并对极端条件下的物理规律进行更深入的了解。

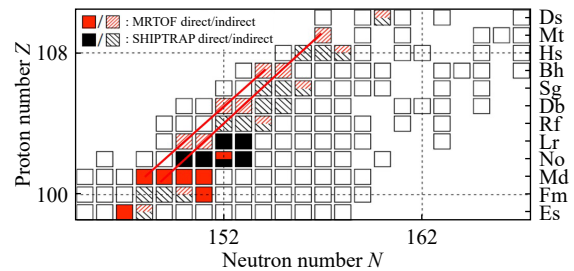


图 6 Z~100 质量区原子核质量测量结果(在线彩图)其中红色方框标记的核素质量来源于最新的 MR-ToF 质谱术测量结果 [31],两条红线分别代表两条 α 衰变链。

3 总结展望

精确测量远离稳定线奇特原子核质量是当前核物理研究的前沿热点,近年来取得很大的进展。利用世界上最强流强的放射性束流装置,RIKEN 测量了一大批远离稳定线丰中子核素的质量 [21-22],极大地拓展了我们对原子核质量的认知,但质量精度需要进一步提高 [32]。此外,日本稀有放射性同位素储存环 (Rare RI-Ring) 也已经投入使用,取得了重要成果 [33]。同时,IMP 的 CSR 质量测量小组采用双飞行时间探测器(磁刚度识别等时性质谱术)对中重质量区的丰质子核素进行了一系列测量 [34-35],站在了国际研究的前沿。

作为最权威的原子质量数据来源,AME 致力于收集与评估所有与质量测量相关的数据。通过最小二乘法将不同实验数据统一处理,AME 是揭示不同数据之间差异、评估不同实验装置性能的唯一方法。在其发展的七十年历史中,AME 并不是一成不变,而是随着我们对实验数据认识的加深不断改进 [36]。随着下一代大科学装置的建立,例如中国强流重离子加速器 (HIAF)、德国反质子-离子研究装置 (FAIR)、美国稀有同位素束流装置 (FRIB) 和法国新型加速器 (SPIRAL2),预计将会有更多未知原子核的质量被测量。在面对这样的数据洪流时,要求 AME 必须不断发展新的、有效的数据处理和评估方法,以确保为核物理和相关领域提供准确可靠的原子质量数据,从而推动科学研究的不断发展。

参考文献:

- [1] BLAUM K. *Phys Rep*, 2006, 425: 1.
- [2] MYERS E G. *Atoms*, 2019, 7: 37.
- [3] LUNNEY D, PEARSON J M, THIBAUT C. *Rev Mod Phys*, 2023, 75: 1021.
- [4] AUDI G. *Int J Mass Spectrom*, 2006, 251: 85.
- [5] WAPSTRA A H, AUDI G, THIBAUT C. *Nucl Phys A*, 2003,

- 729: 129.
- [6] DEWEY M S, KESSLER E G, JR DESLATTES R D et al. *Phys Rev C*, 2006, 73: 044303.
- [7] RAU S, HEISSE F, KOHLER-LANGES F, et al. *Nature*, 2020, 585: 43.
- [8] THOMPSON J K, RAINVILLE S, PRITCHARD D E. *Nature*, 2004, 430: 58.
- [9] WOUTERS J M, VIEIRA D J, WOLLNIK H et al. *Nucl Instr and Meth B*, 1987, 26: 286.
- [10] SAVAJOLS H. *Hyperfine Interact*, 2001, 132: 245.
- [11] YAMAGUCHI T, KOURA H, LITVINOV Y A, et al. *Prog Part Nucl Phys*, 2021, 120: 103882.
- [12] HUANG W J, WANG M, KONDEV F G, et al. *Chin Phys C*, 2021, 45: 030002.
- [13] WANG M, HUANG W J, KONDEV F G, et al. *Chin Phys C*, 2021, 45: 030003.
- [14] WAPSTRA A H. Treatment of Input Data for a Least Squares Nuclidic Mass Adjustment[C]//Proc Int Conf Nuclidic Mases, 1960.
- [15] WANG M. *Nuclear Physics Review*, 2017, 34(3): 380. (in Chinese) (王猛. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 380.)
- [16] AUDI G, DAVIES W, LEE-WHITING G. *Nucl Instr and Meth A*, 1986, 249: 443.
- [17] HUANG W J, Direct Mass Measurements and Global Evaluation of Atomic Masses[D]. Paris: Université Paris Saclay, 2018.
- [18] GONCHAROV M, BLAUM K, BLOCK M, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 028501.
- [19] NESTERENKO D A, CANETE L, ERONEN T, et al. *Int J Mass Spectrom*, 2019, 435: 204.
- [20] HISATAKE H. *J Phys Soc Japan*, 1961, 16: 1280.
- [21] MISHIMASA S, KOBAYASHI M, KIYOKAWA Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 022506.
- [22] MISHIMASA S, KOBAYASHI M, KIYOKAWA Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 122501.
- [23] FU C Y, ZHANG Y H, WANG M, et al. *Phys Rev C*, 2020, 102: 054311.
- [24] ORFORD R. A Phase-imaging Technique for Precision Mass Measurements of Neutron-rich Nuclei with the Canadian Penning Trap Mass spectrometer[D]. Montreal: McGill University (Canada), 2019.
- [25] HUANG T H, ZHANG W Q, SUN M D, et al. *Phys Rev C*, 2018, 98: 044302.
- [26] MA L, ZHANG Z Y, GAN Z G, et al. *Phys Rev Lett*, 2020, 125: 032502.
- [27] PARK J, KRUCKEN R, LUBOS D, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99: 034313.
- [28] GIULIANI S A, MATHESON Z, NAZAREWICZ W, et al. *Rev Mod Phys*, 2019, 91: 011001.
- [29] MINAYA RAMIREZ E, ACKERMANN D, BLAUM K, et al. *Science*, 2012, 337: 1207.
- [30] WAPSTRA A H, AUDI G. *Eur Phys J A*, 2002, 15: 1.
- [31] ITO Y, SCHURRY P, WADA M, et al. *Phys Rev Letts*, 2018, 120: 152501.
- [32] IIMURA S, ROSENBUSCH M, TAKAMINE A, et al. *Phys Rev Letts*, 2020, 130: 012501.
- [33] LI H F, NAIMI S, SPROUSE T M, et al. *Phys Rev Letts*, 2022, 128: 152701.
- [34] WANG M, ZHANG Y H, ZHOU X, et al. *Phys Rev Letts*, 2023, 130: 192501.
- [35] ZHOU X, WANG M, ZHANG Y H, et al. *Nature Physics*, 2023, 19: 1091.
- [36] HUANG, W J, AUDI G. *EPJ Web of Conferences*, 2017, 146: 10007.

The Development Trends and New Advances in Atomic Mass Evaluation

HUANG Wenjia^{1,2,1)}, WANG Meng²

(1. *Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516007, Guangdong, China;*

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: The Atomic Mass Evaluation (AME) serves as a comprehensive source that collects and evaluates all experimental data related to atomic mass, including different techniques such as mass spectrometry, decay, and nuclear reactions. It is widely recognized as an authoritative and reliable repository of atomic masses in the world. In recent years, advancements in mass measurement technologies have significantly enhanced measurement precision, expanded the measurable range of nuclei, and unveiled new phenomena within exotic atomic nuclei. High-precision mass data provide indispensable references for fundamental nuclear physics research such as nuclear structure, nuclear reactions, and nuclear astrophysics. This article provides an overview of the latest Atomic Mass Evaluation, AME2020, and examines the accuracy of current major mass-measurements devices, and illustrates important experimental results. The release of AME2020 has profound practical implications for a wide range of scientific research and technological applications.

Key words: atomic mass evaluation; exotic nuclei; mass spectrometry; decays and nuclear reactions

Received date: 30 Aug. 2023; **Revised date:** 02 Mar. 2024

Foundation item: National Key R&D Program of China (2021YFA1601500)

1) E-mail: huangwj@impcas.ac.cn