
新研究让原子核结构更“透明”

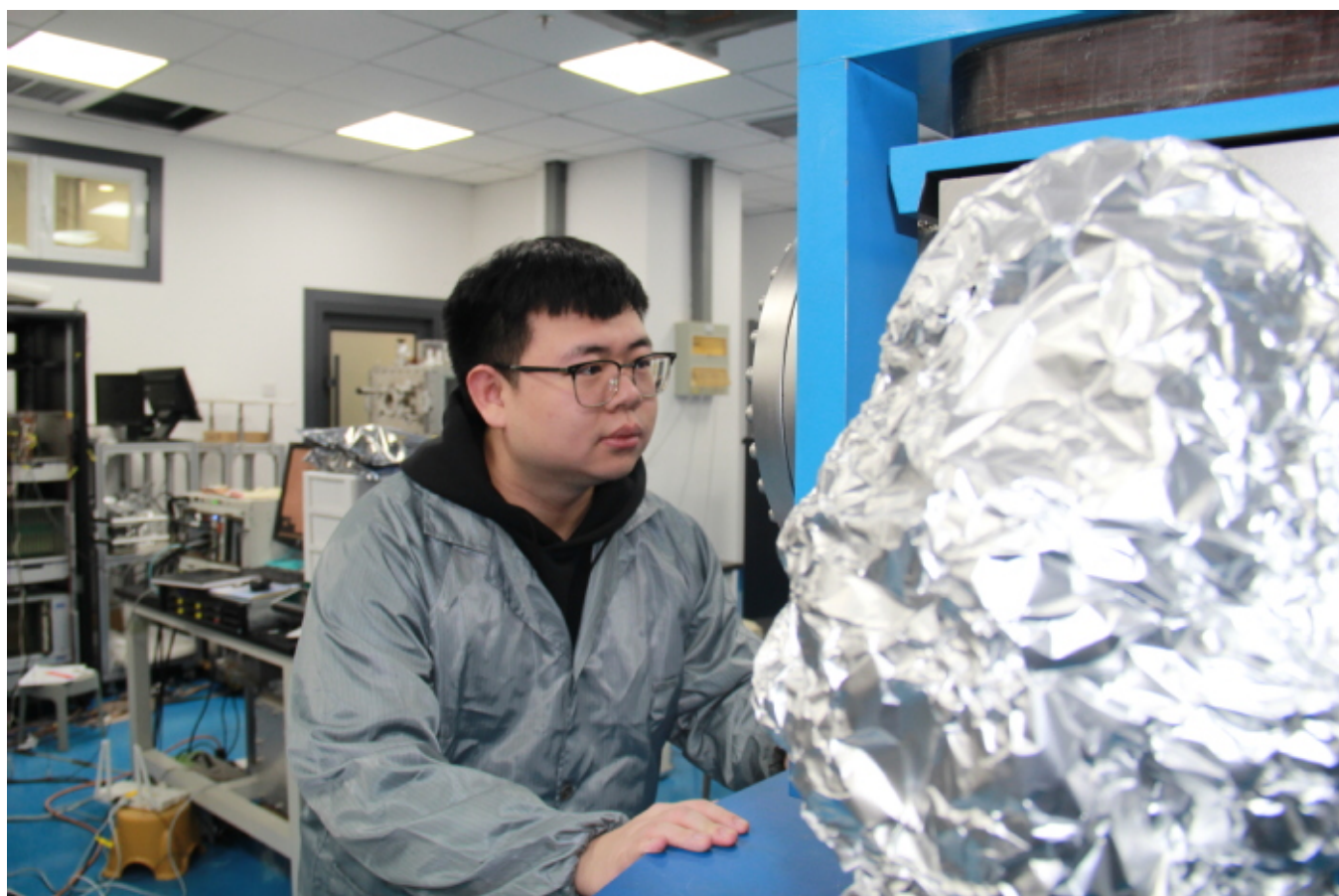
作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/30868.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

新研究让原子核结构更“透明”。对于大多数人来说，能够在学生时代发表一篇学术论文已经是不小的成就，更不用说在国际顶级学术期刊上发表。然而，对于1999年出生的于越来说，这一切却成为了现实。距离毕业还有两年时间，他参与的研究就登上了顶级期刊。面对这样的成功，他诚恳地说：这一方面多靠我们团队的老师和师兄们的悉心指导与长期积累，另一方面它也是一项实验与理论、研究所和高校深度合作的研究成果。

近日，中国科学院近代物理研究所依托其先进的兰州重离子加速器冷却储存环实验平台，运用首创的磁刚度识别等时性质谱术，对一系列奇特原子核的质量进行了精确测定。这一研究不仅填补了原子核质量数据领域的多项空白，还开创了一种揭示原子核中是否存在质子晕结构的新方法。相关论文于11月27日发表于《物理评论快报》。



于越正在观察飞行时间探测器打火现象。叶满山摄。

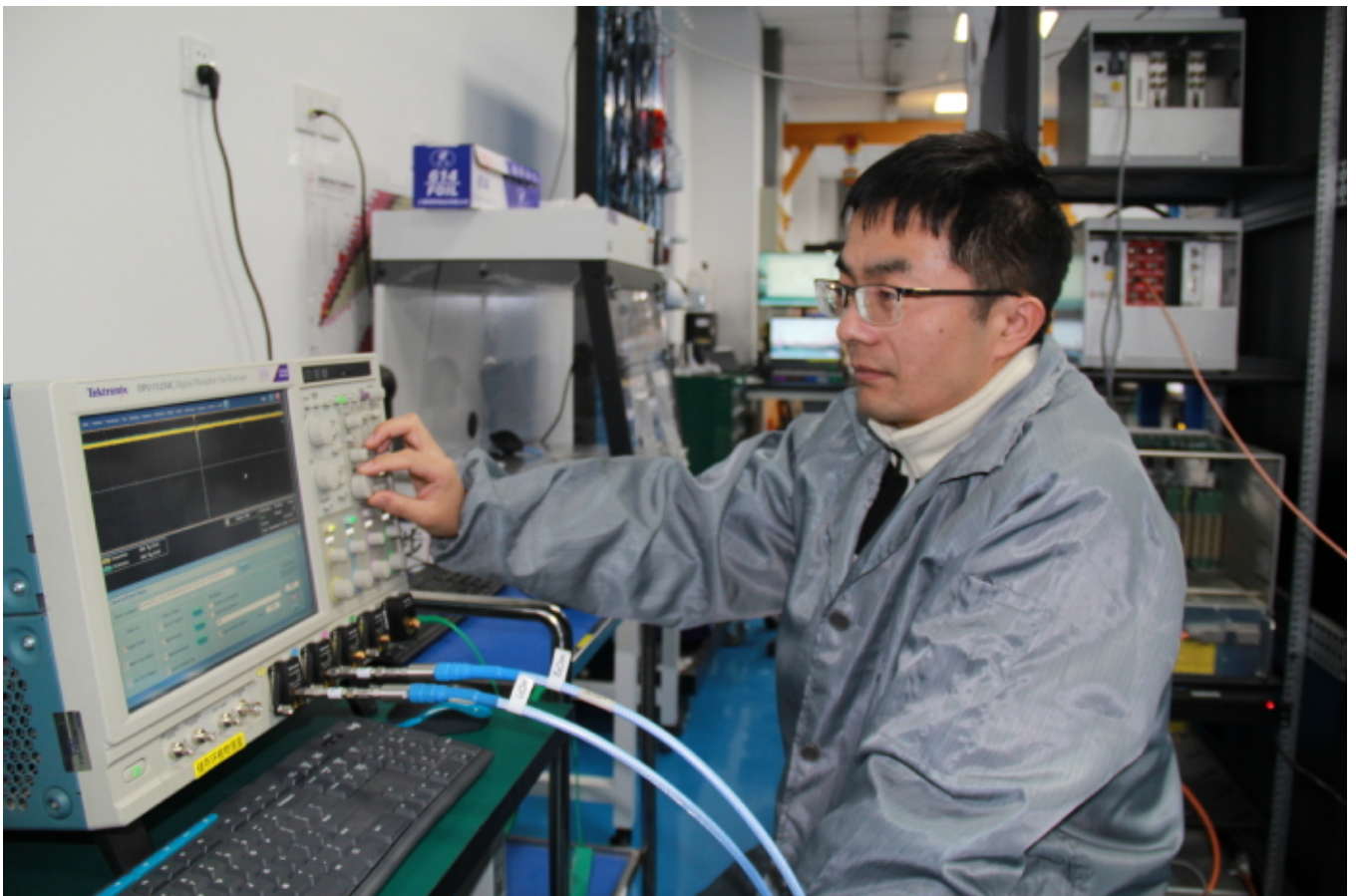
步入原子核研究的大门

2020年，正在西安交通大学读大三的于越，参加了近代物理研究所的夏令营。在参观了原子核质量测量实验室后，他心中萌生了一个强烈的念头。出于对宇宙奥秘的深深好奇，于越决定毕业后直接跟随张玉虎教授，投身于原子核质量测量的研究中。

从那一刻起，于越与原子核便结下了不解之缘。他说：年轻人总是对未知世界充满好奇，正是这种好奇心让我选择了原子核质量测量的道路。

原子核，这个构成物质的基本单元，其内部结构既复杂又神秘。它是构成我们物质世界的基石，长期以来，科学家们一直在努力通过各种技术手段探索原子核的真相，来揭示宇宙万物的运行规律。而对原子核质量的精确测量，是这一探索过程中的重要一环。

与于越同为论文第一作者的邢元明副研究员对此深有体会：原子核有很多独特的性质，而质量是其所有性质中最为基本的。通过测量原子核质量，可以揭示原子核内部结构的奥秘。对原子核的浓厚兴趣，一直激励着我们团队从事原子核质量测量的研究工作。



邢元明正在调整示波器采集测试数据。叶满山摄。

晕核：一种奇异的原子核

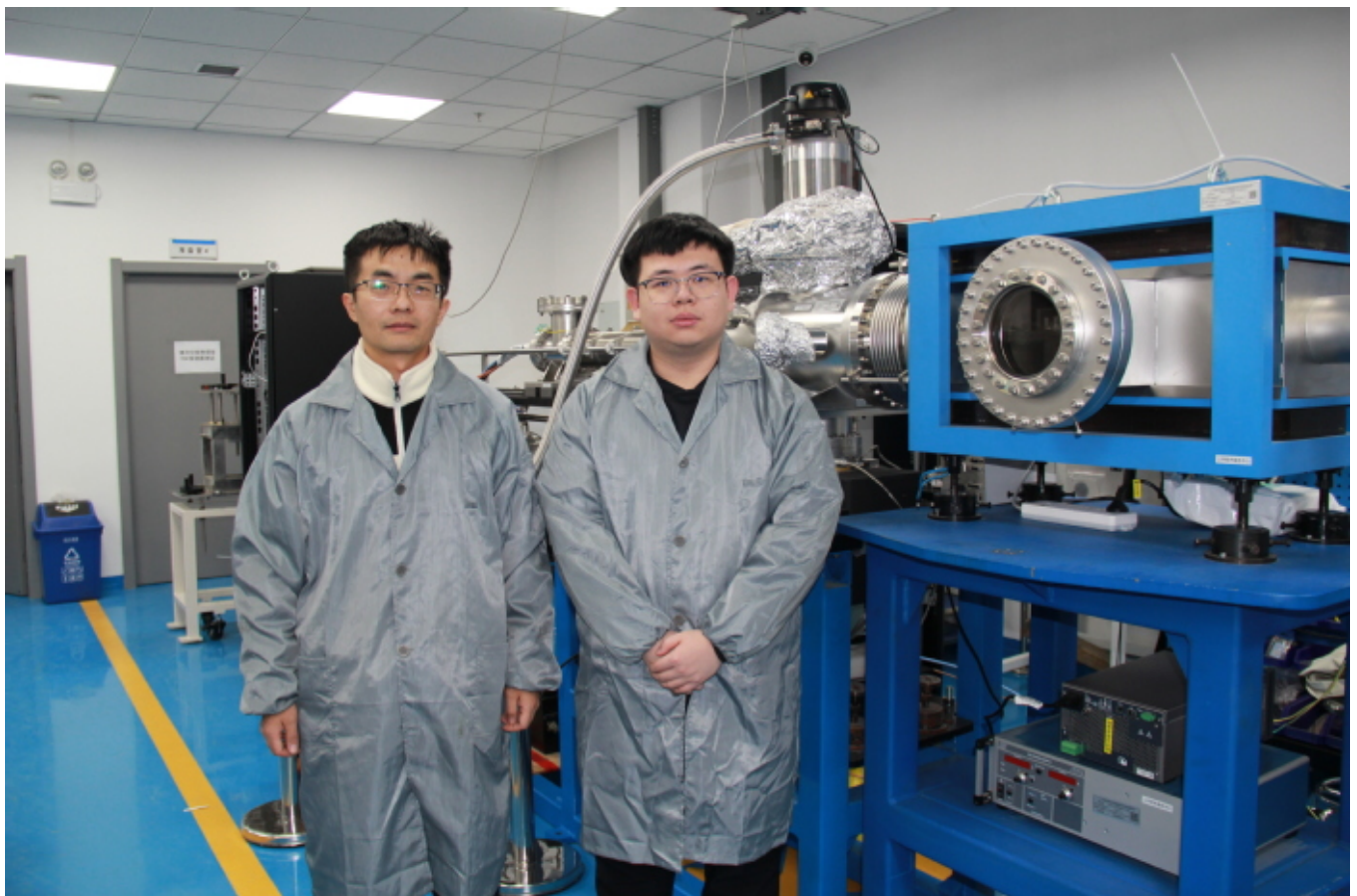
通常情况下，原子核半径会随着核子数的增加而增大。但在1985年，实验核物理学家Tanihata等人在美国伯克利国家实验室（LBNL）却发现了一个奇怪的现象：仅有3个质子和8个中子的锂-11，竟然和拥有82个质子、126个中子的铅-208大小差不多。

科学家们进一步研究发现，原来是锂-11中的两个中子松散地结合在其余核子周围，形成了如同光晕一般的中子晕，才使得锂-11的半径特别大。至此，锂-11成为第一个经实验观察到的典型晕核。

晕核的发现展示了原子核呈现出的多样性，扩展了我们对原子核的认知。邢元明介绍，作为一种奇特的原子核，晕核自发现之后就引起了核物理学家们的巨大关注。

自锂-11的中子晕被发现之后，又有多个晕核相继被发现。这些晕核主要包括单核子晕核和双核子晕核，都是些较轻的、靠近滴线的弱束缚核。所谓的弱束缚是指随着质子数或中子数的增加，原子核对外层的质子或者中子的束缚作用减弱，原子核也变得不稳定起来。弱束缚的原子核中会出现一些奇特的物理现象，比如这里说的晕现象。由于晕核有助于加深人们对原子核内核子相互作用的理解，所以晕核的发现也吸引了众多核物理理论学家采用各种理论模型对其进行研究，并预言未知的晕核。

原子核由中子和质子构成，晕核也分为中子晕核和质子晕核。但在此前的研究中，中子晕发现相对较多，而质子晕发现极少。这是由于质子间的库仑斥力作用，质子晕的形成条件比中子晕更为苛刻，实验上识别质子晕核也存在着极大的挑战。目前实验上确认的质子晕核只有三个(硼-8，氮-12以及氦-17)，此外还有若干可能存在争议的质子晕候选核。



邢元明和于越与新型飞行时间探测器离线测试终端合影。叶满山。

镜像能量差揭示质子晕结构

包括于越、邢元明在内的近代物理所原子核质量测量团队，利用首创的磁刚度识别等时性质谱术，对硅-23、磷-26、硫-27和氩-31等奇特原子核的质量进行了精确测量，并将硫-28的质量精度提高了11倍。这些高精度的质量数据不仅填补了多项原子核质量数据的空白，还帮助确定了磷、硫和氩三种元素的质子滴线，结束了长期以来的争论。这些珍贵的原子核质量数据，可以帮助全世界的核物理学家们更加深入地了解原子核的内部结构和相互作用规律。

在获得高精度的原子核质量数据后，原子核质量测量团队也并没有止步于此。

在通讯作者、实验核物理中心首席科学家张玉虎研究员的指导和带领下，他们进一步提取了一种叫做镜像能量差的物理量，这一物理量基于镜像核质量差值计算得到，反映了一对镜像核（即质子数和中子数互换的一对原子核）之间核子结合能力的差异。如果质子数较多的原子核具有质子晕结构，而中子数较多的镜像核没有晕结构，即使扣除掉库仑能的差异，它们之间仍然会呈现出镜像对称性破缺，进而在镜像能量差上体现出差异。

基于这一新方法，团队发现部分新测质量的原子核中确实出现了镜像对称性破缺现象。这一发现背后的物理原因是这些原子核中可能存在质子晕结构。通过进一步的理论计算和分析，团队支持了磷-26、27，硫-27、28等传统质子晕候选核中存在质子晕的结论，并首次提出氩-31可能是一个新的双质子晕核。同时，他们还指出质子晕候选核铝-22并不是一个晕核，但其第一个 $1+$ 激发态却具有质子晕结构等。

这项工作堪称实验和理论团队之间深度合作的典范。邢元明特别强调说，我们能取得这项成果，来自于北京大学、安徽大学、兰州大学以及近物所的核物理理论团队们给出的决定性理论支持也必不可少，尽管有的理论计算结果未在论文中展示出来，但他们的贡献也不应被忽视。

虽然这项工作结合了实验与理论，很有创新性，但发表过程总是充满变数。

而当收到第一轮审稿意见时，我们发现三位审稿人中有一位持反对意见，认为我们的提出的判据没有先例，不支持在《物理评论快报》发表。这一意见无疑给我们带来了不小的压力，但好在另外两位审稿人给予了积极的反馈。于越表示，面对这样的审稿结果，我们没有气馁，在张玉虎研究员的带领下，对审稿人提的一系列批评和意见进行了认真研究和回复，根据审稿意见对文章进行了仔细修改，同时北大裴俊琛老师也做了进一步的理论计算和分析。

令人欣慰的是，最终原本持反对意见的审稿人被说服，表示愿意重新审视自己此前的观点，并且认为，文章经过修改后有了显著的提升。

最终，三位审稿人的一致认可无疑是对这项工作的一种极大肯定。邢元明表示，以后核物理学家可以将高精度原子核质量用作探测同位旋对称性破缺和揭示质子晕结构的灵敏探针，这将有望促进人们对原子核晕结构的进一步研究和探索。

谈及未来，于越笑着说：我只希望这不是我最后一篇发表在重要期刊上的科学成果。原子核质量测量工作触及到对原子核最基本性质的研究，它不仅仅与奇异核结构有关联，也对核能利用、核医学、核天体物理等领域有重要的意义。原子核质量的应用范围十分广泛，我未来会继续从事这

项事业，争取再攀高峰。（来源：中国科学报 叶满山）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.222501>

作者：张玉虎等 来源：《物理评论快报》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发