科学通报 2015 年 第 60 卷 第 15 期: 1329 ~ 1335
香山科学会议 专栏 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
第 502 次学术讨论会·我国核物理和核科学装置发展研讨

北京丰中子束流装置及其应用前景

曾晟[①], 柳卫平[①*], 叶沿林[②], 郭之虞[②]

① 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
② 北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871
* 联系人, E-mail: wpliu@ciae.ac.cn

2014-12-30 收稿, 2015-01-30 接受, 2015-04-07 网络版发表

摘要 放射性核束物理和核天体物理是国际核物理研究的前沿, 关键科学问题包括: 壳演化和新幻数、原子核的中子稳定极限(中子滴线)、超重新元素的合成、原子核的晕结构、新的衰变模式、宇宙中铁以上重元素的核合成机制等. 为了解决这些关键科学问题, 世界各国都投入大量人力物力建造可以用来产生放射性核束的大型实验装置. 综述了国内外已有、在建和计划中的核物理不稳定核束装置情况, 并介绍了新一代装置——北京丰中子束流装置(BISOL)的设想. BISOL 装置计划采用反应堆和强流氘加速器双驱动源, 综合在线同位素分离和炮弹碎裂两种成熟技术, 可产生比国内外现有装置强度高 1~2 个量级的极端丰中子束流, 同时通过建设强流氘加速器, 提供国际最强的加速器中子源之一, 以此为基础大力推进核能系统材料研究.

关键词
丰中子放射性核束
在线同位素分离
炮弹碎裂
核能材料研究

放射性核束物理是国际上原子核物理的学科前沿. 从 20 世纪 80 年代中期开始放射性束的实验后, 人类研究的核素范围迅速扩大, 发现了许多新现象和新效应. 远离稳定线核的性质与多类天体过程、核物质的状态方程密切相关, 是前沿交叉科学的重要问题. 为了解决这些激动人心的科学问题需要投入大量人力物力建造可以用来产生高强度放射性核束的大型实验装置.

另一方面, 按照国家核能发展战略, 我国的核能须走出自主创新的道路. 核能系统的安全性、经济性及服役寿命与核能材料密切相关. 目前国内外都缺乏能够用于核能材料耐辐照性能检验的中子辐照装置. 多用途的加速器装置可用于核能、航天、辐照、核反应数据等广泛的应用和研究领域.

1 科学背景

原子核是由几个到几百个核子组成的量子体系, 是人类研究物质结构的一个重要层次. 自然界存在的长期稳定的原子核不到 300 个, 它们构成人类生存环境中所有物质的核心, 并以自己的演变提供了自然界稳定的能源, 也提供了人类利用核能的基础[1]. 稳定原子核在核素图上形成中子/质子之比接近 1 的稳定线(同位旋基本对称), 目前人们对稳定线附近的原子核已经有了比较系统的认识. 向稳定线的两侧扩展, 增加中子数(N)或质子数(Z), 就形成丰中子或丰质子核区(同位旋不对称区), 这里的原子核稳定性不断减弱, 寿命逐渐缩短, 直到最后一个核子结合能为 0, 到达稳定性的极限(滴线). 理论预言滴线以内有一定稳定性的原子核有大约 8000~10000 个, 但目前实验室能够产生的不到 1/3, 对其基本性质有一定研究的就更少. 自 20 世纪 80 年代中期以来, 非稳定核的初期研究发现了一系列奇特新现象, 如晕结构[2~4]、集团自组织[5]、新幻数[6,7]、连续态强耦合等, 并观察到奇特原子核的反应截面突变、多反应道耦

引用格式: 曾晟, 柳卫平, 叶沿林, 等. 北京丰中子束流装置及其应用前景. 科学通报, 2015, 60: 1329–1335
Zeng S, Liu W P, Ye Y L, et al. Beijing Isotope-Separation-On-Line Neutron-Rich Beam Facility and its application prospects (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1329–1335, doi: 10.1360/N972014-01402

合、多步过程等新的反应机制和效应. 这些现象预示着在远离稳定线的区域, 原子核的结构和作用方式会发生系统的演变, 并出现以新的结构自由度和新的有效相互作用为表征的新物理(图 1).

与此同时, 宇观世界的研究发现, 核反应提供了恒星抗衡引力收缩的能源, 也是宇宙中除氢以外所有化学元素赖以合成的唯一机制[8,9]. 天体核过程可粗略分为恒星平稳演化阶段的核燃烧和原初核合成, X射线暴及超新星等爆发性事件中的核燃烧两类. 前者发生在相对低温的物理环境中, 反应率很低, 主要涉及铁峰以下稳定核素及长寿命核素的热核反应, 过程很长, 对恒星寿命起决定作用. 后者发生在高温物理环境中, 反应率高、持续时间短(亚秒级), 反应流在远离稳定线的路径发展, 有大量不稳定核素卷入, 涉及热核反应、光核反应, 衰变和中微子反应等[10,11]. 核天体物理的快速质子俘获(rp)和快速中子俘获(r)过程的发展路径[12,13], 正好落在非稳定核研究的主要区域. 自然界的众多宇观核物质体系(如中子星或夸克星), 也都处于同位旋极端不对称状态. 因此非稳定核研究与核天体物理研究在学术上形成自然的融合, 相互促进.

原子核稳定性的另一端是重元素存在的极限, 它们受到裂变和α衰变的限制. 92 号元素铀是自然界存在的最重元素, 超铀核素都是利用核反应在实验室合成的. 早期的原子核液滴模型认为, 重核中极强的库仑排斥力必然导致裂变, 因而不应存在超镄(Z > 100)核素. 在 20 世纪 60 年代考虑了原子核量子态壳层结构的理论模型中, 科学家预言了在Z = 114~126, N = 184 附近存在一片寿命较长的核素, 就是“超重核稳定岛”[14]. 由于超重元素涉及一系列重大的基本科学问题和可能的重大应用(增加一个稳定元素可能导致产生众多新材料), 国际核物理界把新元素合成和进入“超重核稳定岛”作为不懈努力的目标, 几十年来一直以巨大的热情持续探索. 经过半个多世纪的不懈努力, 人工合成了Z = 93~118 的一系列超重核素[15,16], 对整个科学界都产生了巨大的影响. 已有的实验数据显示“超重核稳定岛”可能是存在的. 但是, 预言的超重岛位于目前合成路线的更丰中子一侧(至少还缺 7 个中子), 目前还没有合适的反应机制产生“超重核稳定岛”上的核素, 也没有合适的方法鉴别不具有α放射性的长寿命核素. 非稳定丰中子核的大量产生和深入研究, 特别是关键丰中子核的熔合反应或大质量转移反应机制的研究, 有可能发现进入“超重核稳定岛”的新路径, 实现历史性的突破.

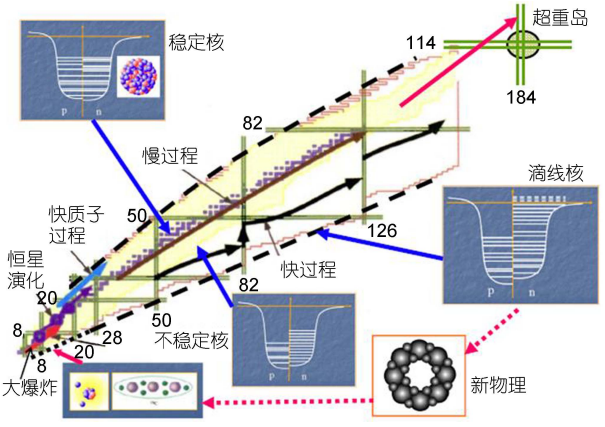


图 1 (网络版彩色)放射性核束物理涉及的新问题

Figure 1 (Color online) Typical nuclear physics frontiers

非稳定物理涉及众多新的核素样本和核数据, 有可能在新型核材料、新型核能装置等方面引发目前还难以估量的重大应用.

2 国内外装置现状

由于有激动人心的科学和需求目标牵引, 国际国内自 20 世纪 90 年代开始, 兴建了一批放射性核束装置[17,18], 目前又在继续更新换代, 典型的如日本理化所的RIBF-BigRIPS[19]、德国GSI-SuperFRS[20], 法国GANIL-SPIRAL2[21], 美国MSU的FRIB[22]等. 它们的主要目标, 就是提供高强度的非稳定核束流, 使研究工作逐步进入稳定性极限区域.

我国在 20 世纪 90 年代建成了中国科学院近代物里研究所的HIRFL-RIBLL[23]和中国原子能科学研究院的GIRAFFE[24]放射性束流线, 2008 年以来兰州的大科学工程HIRFL-CSR[25]逐步投入使用, 北京的科学工程BRIF也进展顺利. HIRFL为炮弹碎裂(PF)型装置[26], 包括回旋加速器SSC和同步储存环CSR, 可以产生每核子能量在兆电子伏至千兆电子伏能区的各种稳定核和放射性核束流. BRIF为在线同位素分离(ISOL)型装置[27,28], 驱动加速器是 1 台 100 MeV质子回旋加速器, 后加速用 1 台端电压为 15 MeV的串列静电加速器. 此外, 我国近期将在广东启动重离子研究装置HIAF的建设. 该装置类似于德国GSI的FAIR, 主加速器为储存环重离子同步加速器, Bi束最高能量可达每核子 4.2 GeV, 可以作为PF型放射性核束装置使用[29].

现有的装置(无论是PF型还是ISOL型)基本上是

通过一次反应产生放射性核束，都存在自身的弱点[30]：PF装置利用稳定弹核制约了碎裂产物可达到的丰中子核区，且束流品质差，束流能量较高，研究时大多需要降能；而ISOL装置虽然束流品质较好，但是分离不同的核素需不同离子源，同时有效分离时间可达秒级，制约了微秒级短寿命核离子束的产生，只适于产生寿命较长的不稳定核素.

以北京丰中子束流装置(BISOL)和EURISOL为代表的新一代装置采用ISOL和PF相结合的创新技术路线，结合前述 2 种方法的优点而弥补其弱点. 利用反应堆或强流轻粒子加速器做为驱动源，通过第一步反应产生丰中子不稳定产物，利用ISOL法分离后加速，再利用PF法 2 次打靶，经过第二步炮弹碎裂反应产生更加远离稳定线的反应产物，通过电磁分离后得到不稳定核束. 由于ISOL法得到的丰中子不稳定产物强度相对很高，使得丰中子核素产生截面的增加足以超过束流强度(相对于稳定核束)的损失，因此可以产生高强度的丰中子不稳定束流[30]. 不同类型的装置产生放射性核束的方法示于图 2.

3 BISOL 装置简介

3.1 总体设计

由我国原子能科学研究院和北京大学提出的BISOL装置，是以反应堆和强流氘束超导直线加速器双驱动的放射性束装置，其总体布局如图 3 所示.

由于热中子诱发^{235}U裂变截面相当大(580靶)，高通量反应堆在产生丰中子核素方面具有天然的优势. BISOL的反应堆驱动源是利用原子能院现有高通量研究堆(CARR)的热中子束诱发^{235}U裂变. 靶源设计具有创新性，有希望获得高强度的放射性束流.

强流氘束超导直线加速器作为另一个驱动源与国际上SIPRAL2 和EUROISOL的主流技术相一致，从而具有较高的可靠性和成熟度，能够保障RIB装置的稳定运行. BISOL装置氘束超导直线加速器设计

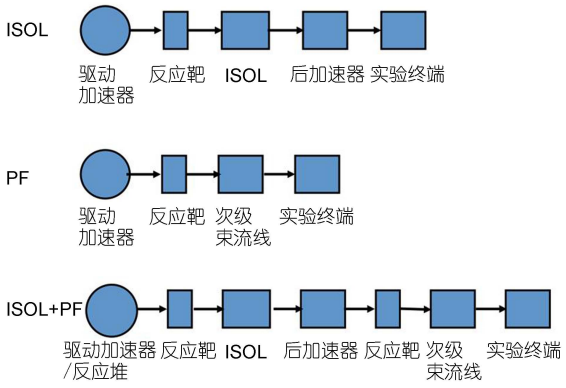


图 2 (网络版彩色)各类型装置产生不稳定核束方法示意

Figure 2 (Color online) Comparison of RIB production path and conceptual design of new generation facility

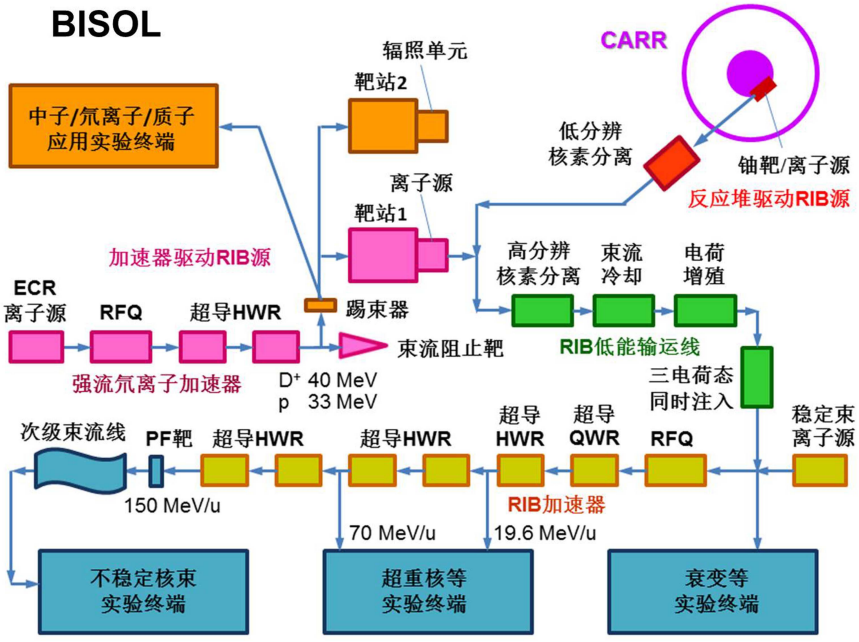


图 3 (网络版彩色)BISOL 装置总体布局

Figure 3 (Color online) The general design of BISOL

能量为 40 MeV, 束流强度 10 mA, 采用(d, n)反应可以产生高强度快中子, 再由快中子诱发 ^{238}U裂变.

BISOL 设计的在线同位素质量分辨可达 1000~20000, 可以针对不同种类的同位素进行高效率或高分辨率分离, 即对于高产额核素如 ^{132}Sn进行高效率的分离, 对于更加丰中子的裂变核素进行高分辨的分离, 产生的典型丰中子束流的强度如 ^{78}Ni可达 250 个/s[31]. 裂变产物通过在线同位素分离系统分离后, 经过电荷倍增系统进一步提高放射性束电荷态, 再经超导直线加速器加速到每核子能量 150 MeV, 被加速的丰中子核束二次打靶经炮弹碎裂反应形成高强度极端丰中子放射性束.

BISOL装置同时采用稳定重离子的ECR离子源, 可提供高强度的稳定重离子束流, 开展核反应、核结构、超重核、材料辐照效应、重离子治癌和其他应用研究, 实现装置的综合效益.

3.2 BISOL丰中子束流强度计算

对BISOL装置能够产生的束流品种和强度进行了计算, 其中靶源和分离效率参考法国的PIAFE[32]放射性束流装置计划. 利用国际上公认较为可靠的LISE++程序, 对裂变产物 ^{91}Kr, ^{132}Sn, ^{142}Xe 的弹核碎裂进行了计算, 具体数据见表 1.

3.3 BISOL与国际同类装置的比较

BISOL建成后可以提供极端丰中子放射性束. 以上计算表明, 离子束强度比"十二五"末国际上最先进的放射性核束装置高数十倍, 其中 ^{78}Ni双幻数极端丰中子核束强度可达 250 个/s. 相应束流强度的计算结果示于图 4[28]. 从图中可以看出, 在目前理论计算的中子滴线位置, 束流强度可以达到 10^{-4} pps量级, 这使得从实验上直接研究中等质量核区的中子滴线位置成为可能, 见图 5[31].

国际上通用的比较丰中子束流装置的做法是裂变率的比较, 因为裂变率与后续束流强度成正比, 该参数越高, 则束流强度越高. BISOL与国际同类装置裂变率比较见表 2, 在国际未来的装置中占领先水平.

表 1 BISOL 束流强度计算 a)

Table 1 Neutron-rich beam intensities of BISOL

核素	裂变产额	产生率(个/s)	靶源和分离效率(参考PIAFE) (%)	电荷倍增器传输效率 (%)	电荷态选择与直线加速器传输效率(%)	束流强度 (个/s)
^{91}Kr	3.2×10^{-2}	6.4×10^{13}	13.0	10	50	4×10^{11}
^{142}Xe	4.3×10^{-3}	8.8×10^{12}	2.0	10	50	9×10^{9}
^{132}Sn	5.9×10^{-3}	1.2×10^{13}	9.0	10	50	5×10^{10}

a) 按 5g ^{235}U, 裂变截面 585b, 中子通量 3×10^{14}/(s cm^2), 裂变率 2×10^{15}/s 计算得到的束流强度

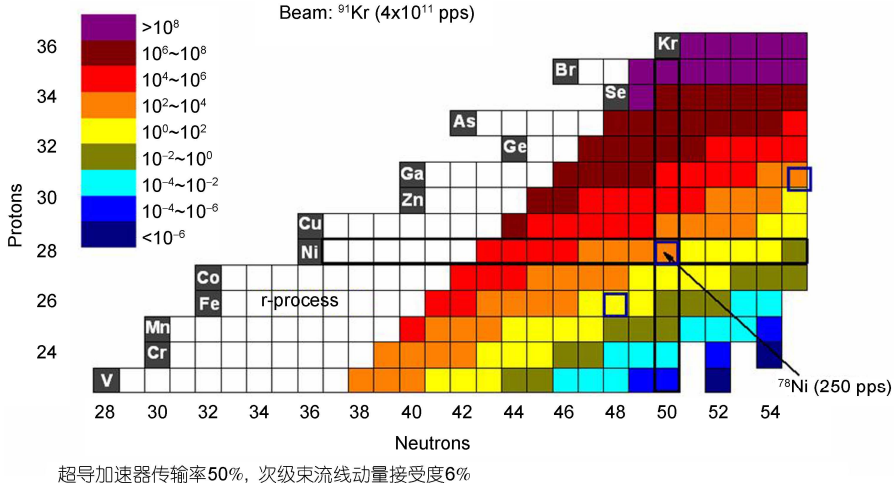


图 4 丰中子束流强度分布计算[28]

Figure 4 Neutron-rich beam intensities of BISOL[28]

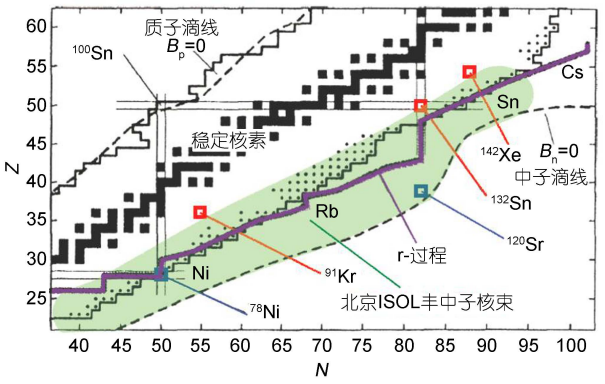


图 5 (网络版彩色)BISOL 建成后覆盖的研究领域. 图中阴影区域为BISOL 拟产生的丰中子核束[31]

Figure 5 (Color online) Physics opportunities in BISOL. Hatched area are neutron-rich beams produced by BISOL[31]

表 2 BISOL 与国际同类装置裂变率比较

Table 2 Comparison of fission rates

装置	国家	每秒裂变率	技术说明
BISOL	中国	2×10^{15}	反应堆中子, 5 g ^{235}U靶; D 转换中子
CARIBU	美国	10^{9}	^{252}Cf 自发裂变
SPIRAL2	法国	1×10^{14}	D 转换中子, 280 g ^{238}U 靶
TRIUMF	加拿大	5×10^{13}	光致裂变
SCRIT	日本	2×10^{11}	光致裂变

3.4 BISOL的应用前景

BISOL装置有多种运行方式. 第一种典型的运行方式是双源双用, 即利用CARR产生的放射性核束经后加速后供核物理实验用, 同时氘离子加速器引出束流打靶后产生高通量中子供核能材料辐照测评用. 第二种运行模式是在CARR检修停运期间可以用氘离子加速器产生的放射性核束经后加速后供核物理实验用. 第三种运行模式是CARR或氘离子加速器产生的放射性核束不经后加速直接用于低能放射性核束物理实验, 同时后加速器对稳定同位素加速并用其进行核反应、核结构、超重核、材料辐照效应、重离子治癌和其他应用研究.

在核能相关材料, 特别是聚变和裂变堆材料的研究中, 中子的辐照损伤是一个关键问题[33,34]. 由于缺乏合适的中子源, 目前难以进行材料抗中子辐照的直接实验测评工作. BISOL装置的驱动加速器产生的D离子束打在 5 mm厚的石墨转换器上可以产生最高能量为 40 MeV的强流中子, 中子呈前冲分布, 其能谱峰值在 10 ~ 20 MeV之间, 与IFMIF[35]十分接近, 很适于模拟 14 MeV的聚变中子. 打在最靠近转换器的 25 cm^3 体积的Fe材料内能产生约 7~8 dpa/fpy的辐照损伤, 在 150 cm^3 体积内能产生约 1.5~2 dpa/fpy的辐照损伤. 这个体积的靶已经可以用于研究材料的宏观力学性质. 采用不同转换器和慢化片, 还可以产生不同能谱的中子. 在BISOL采用CARR驱动产生放射性核束时, D离子驱动加速器就可并行开展核材料中子辐照评测和辐照损伤研究.

中子引起的核反应数据也是BISOL驱动加速器应用的重要方向. 非弹性中子散射截面、中子活化截面、40 MeV中子诱发裂变截面等数据, 对于中子辐照核材料损伤发生率、核废料处理、Th/U燃料循环研究、核安全等课题及其相应计算程序的发展是必需的. 其中对活化产生长寿命同位素的研究和小量样品的活化研究同样需要强流中子源.

在以上各种运行模式下均可启用氘离子加速器后的踢束器, 踢出1%的脉冲D束流, 在不影响其他实验的同时进行核反应预平衡模型和核天体物理研究, 以及粒子活化分析、中子成像、核医学及核药物制备、中子探测器的测试、电子设备抗辐射等更为广泛的应用研究.

4 总结与展望

核物理基础研究的前沿是放射性核束物理与核天体物理, 这些领域对新的加速器, 特别是不稳定核的加速器物理装置有强劲的需求. 现有和在建的装置, 无论是PF型还是ISOL型, 都存在自身的弱点. 新一代装置采用ISOL和PF相结合的创新技术路线, 结合前述两种方法的优点可以产生高强度的丰中子不稳定束流.

BISOL利用了CARR反应堆中子通量高的优点, 综合了ISOL和PF两种成熟技术, 利用巧妙的组合, 可产生极端丰中子束流, 其强度比国内外现有装置高约1~2个量级, 双驱动源的设计不仅可以在产生不稳定核束时互为补充, 还可以在进行核物理实验的同时进行核能科学感兴趣的裂变产物核相关的核反应、核结构及衰变性质的研究, 并提供一系列非常重要的数据, 为以后的核能科学研究提供必要的技术基础. 同时采用稳定重离子的ECR离子源, 可独立开展超重核研究、材料辐照效应研究、重离子治癌研究和其他应用研究.

由于我国基础研究的投入日益加强, 我国核物

理基础研究将面临大好的机遇, 建议尽快启动HIAF科学平台的建设和BISOL工程的立项, 并适时启动BISOL的工程建设, 使我国的核物理和核科学研究早日跻身国际先进行列.

参考文献

1 Eddington A S. The internal constitution of the stars. Nature, 1920, 106: 14–17
2 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, et al. Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region. Phys Rev Lett, 1985, 55: 2676–2679
3 Li Z H, Liu W P, Bai X X, et al. First observation of neutron-proton halo structure of the 3.653 MeV 0^+ state in ^{6}Li via ^{1}H(^{6}He, ^{6}Li)n reaction. Phys Lett B, 2002, 527: 50–54
4 Schmitt K T, Jones K L, Bey A, et al. Halo nucleus ^{11}Be: A spectroscopic study via neutron transfer. Phys Rev Lett, 2012, 108: 192701
5 Yang Z H, Ye Y L, Li Z H, et al. Observation of enhanced monopole strength and clustering in ^{12}Be. Phys Rev Lett, 2014, 112: 162501
6 Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, et al. New magic number, N= 16, near the neutron drip line. Phys Rev Lett, 2000, 84: 5493–5495
7 Steppenbeck D, Takeuchi S, Aoi N, et al. Evidence for a new nuclear 'magic number' from the level structure of ^{54}Ca. Nature, 2013, 502: 207–210
8 Bethe H A. Energy production in stars. Phys Rev, 1939, 55: 434–456
9 Rolfs C E, Rodney W S. Cauldron in the Cosmos. Chicago: The University of Chicago Press, 1988
10 Lou J L, Li Z H, Ye Y L, et al. Observation of a new transition in the β-delayed neutron decay of ^{18}N. Phys Rev C, 2007, 75: 057302
11 Su J, Liu W P, Shu N C, et al. Reexamining the β decay of ^{53,54}Ni, ^{52,53}Co, ^{51}Fe, and ^{50}Mn. Phys Rev C, 2013, 87: 024312
12 Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. Synthesis of the elements of stars. Rev Mod Phys, 1957, 29: 547–650
13 Wallerstein G, Icko Iben Jr, Parker P, et al. Synthesis of the elements in stars: Forty years of progress. Rev Mod Phys, 1997, 69: 995–1084
14 Sobiezen Ski A, Gareev F A, Kalinkin B N. Closed shells for Z>82 and N>126 in a diffuse potential well. Phys Lett, 1966, 22: 500–502
15 Oganessian Y T, Utyonkoy V K, Lobanov Y V, et al. Experiments on the synthesis of element 115 in the reaction ^{243}Am(^{48}Ca,xn)$^{291-x}$115. Phys Rev C, 2004, 69: 021601
16 Khuyagbaatar J, Yakushev A, Düllmann C E, et al. ^{48}Ca+^{249}Bk fusion reaction leading to element Z = 117: Long-lived α-decaying ^{270}Db and discovery of ^{266}Lr. Phys Rev Lett, 2014, 112: 172501
17 Tanihata I. Radioactive beam science, past, present and future. Nucl Instrum Methods B, 2008, 266: 4067–4073
18 Ravn H L, Bricault P, Ciavola G, et al. Comparison of radioactive ion beam intensities produced by means of thick targets bombarded with neutrons, protons and heavy ions. Nucl Instrum Methods B, 1994, 88: 441–461
19 Fukuda N, Kubo T, Ohnishi T, et al. Identification and separation of radioactive isotope beams by the BigRIPS separator at the RIKEN RI Beam Factory. Nucl Instrum Methods B, 2013, 317: 323–332
20 Geissel H, Weick H, Winkler M, et al. The super-FRS project at GSI. Nucl Instrum Methods B, 2003, 204: 71–85
21 Lewitowicz M. The SPIRAL2 project: Physics and challenges. Acta Phys Polo B, 2009, 40: 811–819
22 Thoennessen M. Plans for the facility for rare isotope beams. Nucl Phys A, 2010, 834: 688–693
23 Sun Z, Zhan W L, Guo Z Y, et al. RIBLL, the radioactive ion beam line in Lanzhou. Nucl Instrum Methods A, 2003, 503: 496–503
24 Bai X X, Liu W P, Qin J C, et al. A facility for production and utilization of radioactive beams. Nucl Phys A, 1995, 588: 273–276
25 Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al. The heavy ion cooler-storage-ring project (HIRFL-CSR) at Lanzhou. Nucl Instrum Methods A, 2002, 488: 11–25
26 Zhan W L, Xia J W, Zhao H W, et al. HIRFL today. Nucl Phys A, 2008, 805: 533–540
27 Zhang T J, Li Z G, Yin Z G, et al. Design & construction status of CYCIAE-100, a 100 MeV H-cyclotron for RIB production. Nucl Instrum Methods B, 2008, 266: 4117–4122
28 Liu W P, Li Z H, Bai X X, et al. BRIF and CARIF progress. Sci China Phys Mech Astron, 2010, 53: 586–590
29 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China. Nucl Instrum Methods B, 2013, 317: 263–265
30 Liu W P. The prospects for accelerator-based nuclear physics facilities (in Chinese). Physics, 2014, 43: 150–156 [柳卫平. 加速器核物理大科学平台现状及展望. 物理, 2014, 43: 150–156]
31 Cui B Q, Gao Y, Ge Y C, et al. The Beijing ISOL initial conceptual design report. Nucl Instrum Methods B, 2013, 317: 257–262
32 Kester O, Habsa D, Groß M, et al. RNB production with thermal neutrons. Nucl Phys A, 2002, 701: 71–77
33 Moslang A, Wiss T. Materials for energy: From fission towards fusion. Nat Mater, 2006, 5: 679–680
34 Zinkle S J. Fusion materials science: Overview of challenges and recent progress. Phys Plasmas, 2005, 12: 058101
35 Mosnier A. The IFMIF 5 MW Linacs. In: Proceedings of LINAC08, Victoria, Canada, 2008. 1114–1118

Beijing Isotope-Separation-On-Line Neutron-Rich Beam Facility and its application prospects

ZENG Sheng[1], LIU WeiPing[1], YE YanLin[2] & GUO ZhiYu[2]

[1] *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*
[2] *State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

Radioactive-ion beam (RIB) experiments open up new exciting fields and frontiers in nuclear physics and nuclear astrophysics. The experiments can provide unprecedented opportunities to explore new phenomena such as new magic numbers and probe the isospin mechanisms occurring in shell evolution. Other experiments probe the limits of nuclear stability on the neutron-rich side, provide insights into the synthesis of superheavy elements and nuclear giant halo structures, and offer the possibility to investigate new nuclear decay modes as well as the nucleosynthesis of nuclides beyond Iron. To achieve this goal, many nuclear physics laboratories all over the world are building large-scale powerful new RIB facilities. The "Beijing Isotope-Separation-On-Line Neutron-Rich Beam Facility (BISOL)" is a joint project proposed by the China Institute of Atomic Energy (CIAE) and Peking University. This facility will combine two techniques: Projectile fragmentation (PF) and isotope separation on line (ISOL). The BISOL facility will operate based on a dual driver system, including reactor driving and intense deuteron-beam driving modes. The existing high flux research reactor, the China Advanced Research Reactor at CIAE provides reactor driving. At the BISOL facility ISOL separation of fission fragments, post acceleration, and fragmentation of neutron-rich fission fragment beams will be available. By combining ISOL and PF techniques in one facility the technical advantages of both can be merged. The BISOL will deliver intensive rare ion beams of very neutron-rich isotopes; the intensity of these beams will be of the order of at least 1–2 magnitudes higher than currently available ones. Intense deuteron-beam driving is an established technology, which provides an intense neutron beam source and can be operated independently in the facility. Characterizing material performance and performing lifetime experiments are the challenges facing researchers working on the current and next-generation nuclear energy systems. Intense radiation sources, especially neutron sources, are indispensable for these experiments. The intense deuteron accelerator proposed in this project will be able to generate intense neutron beam. These beams will be able to probe nuclear materials and will provide vital results to push forward the boundaries of nuclear physics.

radioactive ion beam, Isotope-Separation-On-Line, projectile fragmentation, nuclear material research

doi: 10.1360/N972014-01402