

# 加速器核物理大科学平台现状及展望\*

柳卫平<sup>†</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2013-10-20收到

<sup>†</sup> email: wpliu@ciae.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140301

## The prospects for accelerator-based nuclear physics facilities

LIU Wei-Ping<sup>†</sup>

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**摘要** 文章首先回顾了加速器核物理大科学平台的发展历史, 随后总结了核物理研究前沿对加速器平台的需求, 介绍了不稳定核束的产生和加速方法, 综述了现有的加速器装置情况, 最后给出了在建的和计划中的加速器装置展望。

**关键词** 加速器核物理平台, 不稳定核束, 炮弹碎裂(PF)方法, 在线同位素分离(ISOL)方法, 两步法

**Abstract** A historic overview of large-scale accelerator-based nuclear physics facilities is presented, followed by a summary of the demands of future nuclear physics research on such facilities. The production and acceleration of unstable nuclear beams are described, and the current status of accelerator facilities as well as the prospects of those under construction or being planned are reviewed.

**Keywords** accelerator-based nuclear physics facility, unstable nuclear beam, projectile fragmentation method, isotope separator on-line method, two-step method

## 1 加速器核物理大科学平台的发展历史

一般说来, 核物理用的加速器是利用电场把带电粒子能量加速到超过库仑势垒, 将原子核打碎并研究其内部的性质的装置。加速器按内部结构可分为回旋加速器、静电/串列加速器、直线加速器和同步加速器等类型。加速器代表性的指标包括, 加速粒子种类、能量、流强和束流品质等。

应该说, 加速器是核物理发展的基础条件,

如果没有加速器, 人们难以找到彻底探测原子核内部结构的手段。上世纪40年代以来, 核物理研究从稳定核束加速器为开端, 依次发展了回旋、静电/串列、直线和同步加速器, 目前很多加速器仍在使。到了90年代, 可以产生不稳定核束(也称放射性核束)的加速器装置逐渐增多, 国际目前加速器的介绍见国际纯粹与应用物理学会的网站<sup>[1]</sup>。

在我国改革开放前, 核物理工作者通过在加速器上的实验研究, 为核物理实验和关键核数据测量作出了重要贡献。赵忠尧先生于1955年利用从美国带回的零部件建成高压倍加器, 我国使

\* 中国科学院数学物理学部“核物理与等离子体物理”发展战略研究计划资助项目

用加速器开展核物理研究的序幕自此开启。到了1958年，回旋加速器在中国科学院原子能研究所(1984年更名为中国原子能科学研究院)建成，我国进入了原子能时代，全面开展了核物理研究和核数据测量。于60年代初建成的兰州SFC回旋加速器，使得我国核物理科学平台的布局更加完善。

在改革开放之后，通过新建北京和兰州的大型加速器，使我国的核物理基础研究进入了国际主流领域。1978年，北京串列加速器建成，我国进入了可以开展高精度核物理研究的行列，时至今日，这个加速器提供的束流时间仍然供不应求，为我国的核物理研究作出了重要贡献。1988年，兰州重离子加速器建成，标志着我国核物理研究平台与国际水平接轨。北京和兰州两个大科学装置，奠定了我国国际水平的核物理实验的研究基础。

目前，以兰州的中国冷却储存环(CSR)和北京串列加速器升级工程为代表，我国成为了国际核物理研究中心之一。于2009年建成的兰州CSR工程，是国际上代表性的炮弹碎裂(PF)型不稳定核束产生装置，也是国际第二个重离子冷却储存环。正在兴建的北京串列加速器升级工程(BRIF)，是我国唯一的、国际上为数不多的在线同位素分离(ISOL)型不稳定核加速装置。

本文内容只包括用于核物理基础研究不稳定核束大科学平台进展介绍，不涵盖用于核技术应用的加速器和用于粒子物理的高能加速器。

## 2 核物理研究前沿对加速器平台的需求

目前，国际上公认的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。

### 2.1 放射性核束物理

自然界稳定的原子核不到300个，构成了我们生存环境中所有物质的基础，也提供了我们利用核能的源泉。稳定原子核的中子和质子数，在轻核区近似相同，到了重核区，中子数逐渐增加，目前人们对这些原子核的性质已经有了比较系统的认识。不过，向稳定线两侧扩展，增加中子数( $N$ )或质子数( $Z$ )，就到达了丰中子或丰质子核区。这时，原子核的稳定性不断减弱，寿命逐渐缩短，直到到达原子核稳定性的极限(滴线)位置。原子核理论计算推断，在滴线以内的原子核大约有8000—10000个，比稳定核多出数十倍，蕴含着丰富的、与稳定原子核不同的规律。自上世纪80年代中期以来，这些预言在一些研究中陆续得到证实，如核子分布的晕结构、壳结构的新幻数、连续态强耦合等。这些现象说明了在滴线核区，原子核的结构和作用会发生系统的演变。不过，由于不稳定核加速器装置提供了不稳定束流的种类和强度的限制，我们目前达到的核区疆界仅为理论预测的四分之一，这促使国内外的核物理工作者继续发展新的不稳定核的科学装置，并用于开展研究。研究的总体情况见图1。

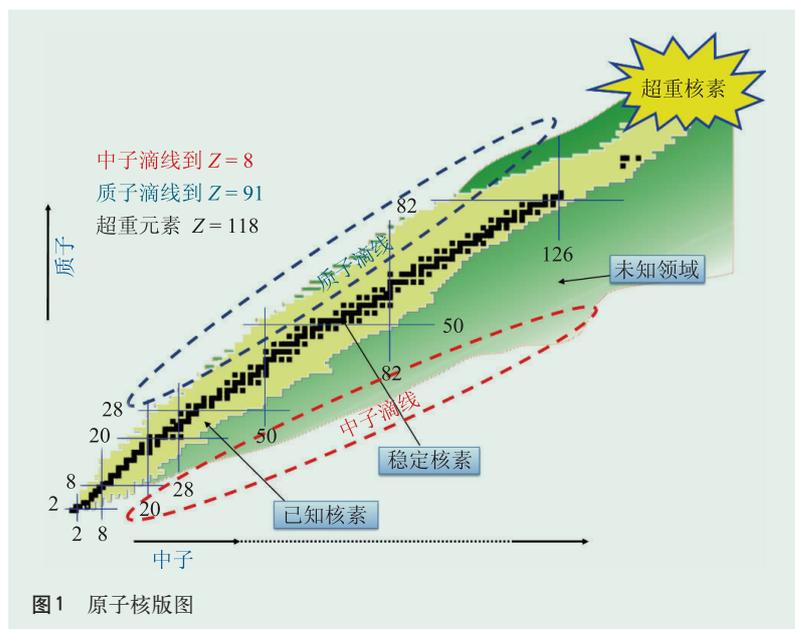


图1 原子核版图

## 2.2 核天体物理

天体核过程是恒星抗衡引力收缩的能量，也是宇宙中化学元素能够合成的机制。天体核过程可分为恒星平稳演化阶段的核燃烧和原初核合成，以及新星等爆发性事件中的核燃烧两类。后者发生在高温物理环境中，由于反应率高，持续时间短，反应流沿远离稳定线的路径发展，有大量不稳定核素参加核燃烧进程。它们对应的是快速质子俘获(rp)和快速中子俘获(r)过程，需要靠加速器提供不稳定核束，测量大量不稳定核素的结构、反应和衰变特性。

总之，放射性核束物理和核天体物理的研究前沿，要求不稳定核的中子-质子不对称性更高，分离速度更快，束流强度更强。这些需求为建造大型不稳定核加速器装置提供了强劲的推动力，世界各国已建成和计划建造的新一代不稳定核束装置见图2。

## 3 不稳定核束的产生和加速方法

由于上述物理需求，国际上新发展的核物理大科学装置均围绕不稳定核束的产生展开，以下简述不稳定核束的产生和加速的方法。

### 3.1 产生不稳定核束的 ISOL 与 PF 方法

国际上产生不稳定束流，按产生方式可分为 ISOL 方法与 PF 方法。

ISOL(isotope separator on-line)方法使用驱动加速器的稳定的核束(通常是轻粒子束流)打靶，将不稳定反应产物用离子源收集，再利用常规加速器(后加速器)进行加速，形成不稳定核束，其束流和加速器是一体的。ISOL 方法局限于产生寿命较长的不稳定核素(大于 1 ms)，但其束流品质好，能量范围宽(几十 keV 到 100 MeV/A)。

PF(projectile fragmentation)方法，即炮弹碎裂

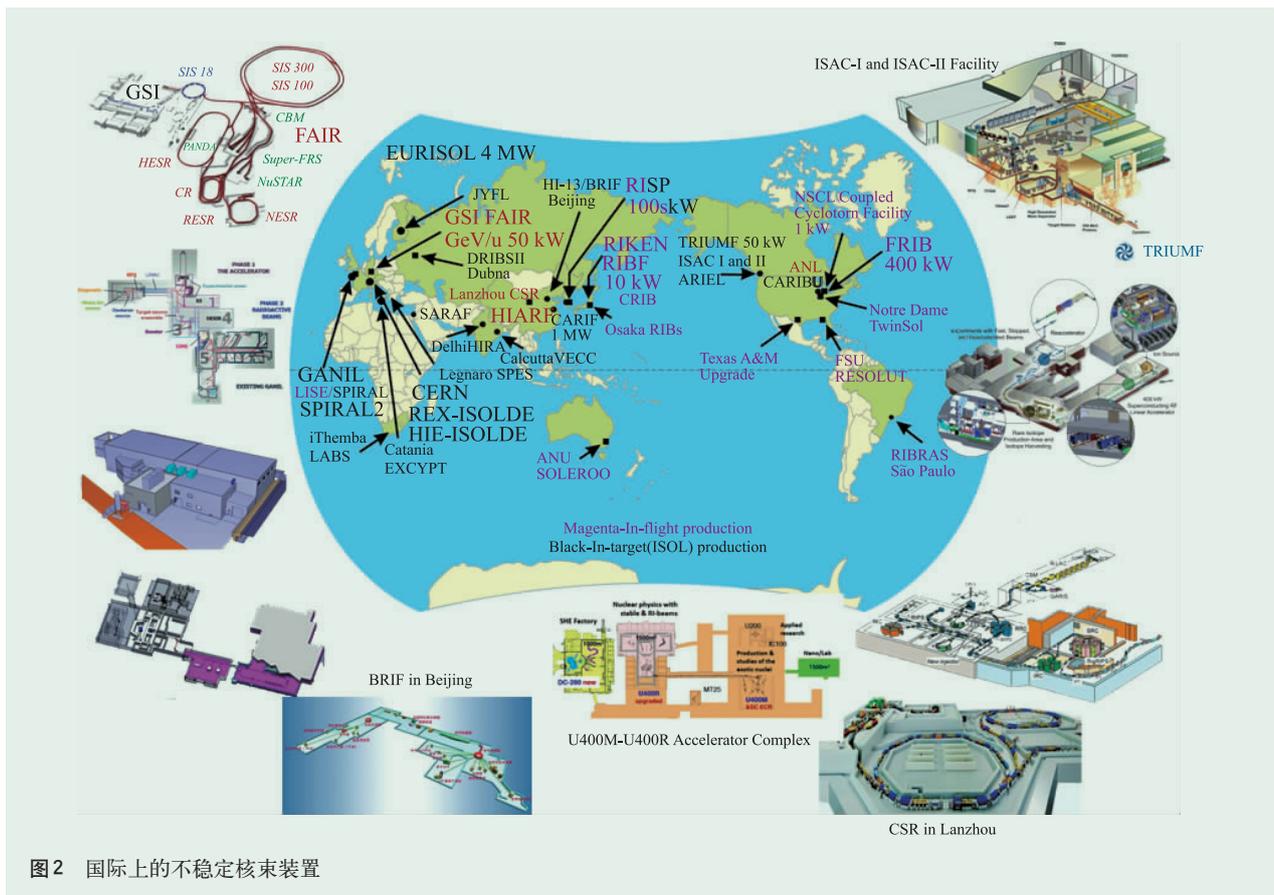


图2 国际上的不稳定核束装置

方法,也称飞行中分离方法,它利用驱动加速器加速后的稳定核束(通常是重离子核束)打靶,再利用电磁分离装置分离需要的反应产物,其束流与加速器是分立的。这些反应产物的速度与稳定核束相当,形成不稳定束流,提供实验使用。PF方法可产生寿命短至几百纳秒的不稳定核素,更加接近中子或质子滴线。其缺点是束流品质差,束流能量与初级束流接近,进行较多研究时需要降能。如通过冷却储存环的电子冷却,可使束流的品质有所改进。

两类装置产生不稳定核束的路径比较见图3。由上述讨论可见,两种方法具有高度的互补性。

### 3.2 新的方法:两步法

现有的和在建造的装置(无论是PF型还是ISOL型)都是通过一次反应产生放射性核素。它们都存在自身的弱点:PF装置利用稳定炮弹制约了碎裂产物可达到的丰中子核区;而ISOL装置分离不同的核素需要不同的离子源,同时有效分离时间为秒级,制约了微秒级短寿命核束的产生。如果扬长避短,把两者的优点结合起来,可以避免两者的弱点,形成更加有竞争力的核物理实验装置,这就是两步法思想的由来。这种方法的优势在产生丰中子束流方面体现尤为明显。

具体说来,两步法是利用反应堆和加速器的驱动源,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,通过第二步反应产生不稳定反应产物,通过电磁分离后产生不稳定核束。由于ISOL法得到的丰中子不稳定产物强度相对很高,加上中子-质子比与待分离的丰中子核素较稳定核接近得多,丰中子核素的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。这个方法的流程见图3。

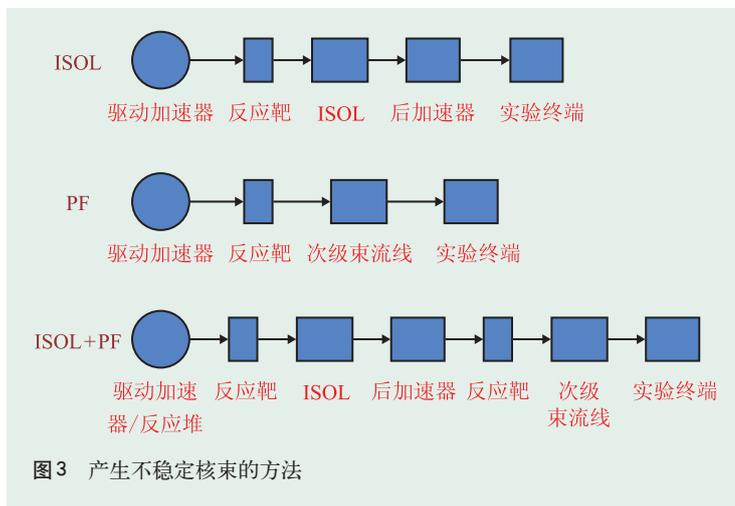


图3 产生不稳定核束的方法

## 4 现有的加速器装置情况

上世纪90年代开始,由于核物理研究前沿发展到不稳定核的物理,国际上开始建造不稳定束流加速器装置。

采用ISOL方法产生不稳定束流的装置,由于离子源技术比较复杂,建成并运行的较少,但由于其束流品质高,能量适中,具有独特的地位。早期有比利时的基于回旋加速器的装置,目前有加拿大的TRIUMF和美国橡树岭的HRIBF,北京的BRIF装置正在建造中,这些装置的情况见表1。

采用PF法的国内外不稳定束流装置,由于技术相对简单成熟,建成并运行的较多。按传输效率和束流品质分为几个阶段:早期装置是比较初步的放射性束流装置,开拓了不稳定核束研究领域,如美国的LBL的次级束流线、法国GANIL的LISE和中国科学院兰州近代物理研究所的RIBLL装置等;现有改进型装置包括法国的GANIL-SPIRAL2、德国的GSI-SuperFRS、日本的RIBF-BigRIPS、美国MSU的次级束流线和中国科学院兰州近代物理研究所的CSR上的RIBLL-II装置等。它们的目的是提供高强度的非稳定核束流,使研究工作进入不稳定核的未知区域,见表2。

我国在上世纪90年代建成了HIRFL-RIBLL

表1 ISOL型不稳定核束装置一览

装置(国家)	运行时间	驱动加速器参数	后加速器参数
LISOL(比利时)	1989年	30 MeV 质子 200 $\mu$ A 回旋	K110 回旋
SPIRAL(法国)	2001年	95 A MeV 重离子 6 kW 回旋	K265 回旋
SPIRALII(法国)	2010年	40 MeV 重离子超导直线	K265 回旋
REX ISOLDE(瑞士)	2001年	1.4 GeV 质子 2 $\mu$ A 同步	3 A MeV 直线
EXCYT(意大利)	2006年	重离子 回旋	15 MV 串列
ALTO(法国)	2010年	50 MeV 10 $\mu$ A 电子直线	15 MV 串列
HRIBF(美国)	1997年	50—100 MeV 质子、氘和 $\alpha$ 粒子 20 $\mu$ A 回旋	25 MV 串列
ISAC-1(加拿大)	2000年	500 MeV 质子 100 $\mu$ A 回旋	1.5 A MeV 直线
ISAC-2(加拿大)	2010年	500 MeV 质子 100 $\mu$ A 回旋	6.5 A MeV 直线
BRIF(中国)	2014年	100 MeV 质子 200 $\mu$ A 回旋	15 MV 串列

表2 PF型不稳定核束装置一览

实验室(国家)	运行时间	驱动加速器参数	次级束流线名称
GANIL(法国)	1985年	95 A MeV 重离子回旋	LISE, SISSI
GSI(德国)	1989年	1 A GeV 重离子直线+同步	FRS, ESR
Dubna(俄罗斯)	1996年	重离子回旋	ACCULINNA, COMBAS
KVI(荷兰)	2007年	K600 重离子回旋	TRIMP
NSCL(美国)	1981年, 2001年	K500—1200 重离子回旋	A1200, A1900
RIBF(日本)	1992年, 2005年	135—400 A MeV 重离子回旋	RIPS, BIGRIPS
IMP(中国)	1988年, 2009年	80 A MeV 重离子回旋, 1 A GeV CSRm 同步	RIBLL, RIBLL-II, CSRc

和CIAE-GIRAFFE放射性束流线, 2008年以来, 兰州的大科学工程HIRFL-CSR逐步投入使用, 北京的ISOL科学工程BRIF也进展顺利, 将于2014年竣工。

## 5 在建和计划中的加速器装置

### 5.1 在建装置总体描述

目前在放射性核束物理与核天体物理关键科学问题的驱动下, 加上广阔的核科学应用需求, 国内外两大类装置都在快速发展, 近期比较多的是PF装置, ISOL的发展潜力很大。同时从需求上说, 强流极端丰中子的束流最为迫切。随着研究工作越加接近滴线区, 不稳定核束的强度急剧降低, 需要发展新一代的装置。未来的解决方案是: 多采用两步法, 可以得到高强度的不稳定束

流。未来的两步法的思路是将ISOL与PF的特点相结合, 其原因在于ISOL产生次级束后加速再碎裂产生的丰中子束流强度, 比传统的PF一步过程要高。在建装置有: 美国MSU的FRIB上的次级束流线和德国的FAIR上的SuperFRS装置等(见表3和图2)。

### 5.2 我国未来核物理大科学装置的计划

针对未来高流强、高品质、多用途的发展方向, 我国通过多年的技术积累和对国际发展趋势的分析, 也提出了未来发展的路线图。一是HIAF多用途装置, 已列入国家发展和改革委员会一期计划, 可以在核物理基础研究和多学科应用中发挥重要作用。二是北京ISOL装置, 这是堆器结合、双驱动和基础应用结合的平台, 可以产生国际最强的丰中子束流, 并可兼顾核科学的多项应

用, 已列入发展和改革委员会候选计划之中。

HIAF工程是利用强流直线加速器作为前加速, 利用2个环形同步加速器作为后加速, 形成国际上强度和能量组合最高的加速器装置, 可以开展核物理、高能量密度物理、强子物理和核技术应用方面的研究工作。

结合未来的发展趋势, 北京ISOL装置采用创新的两步法技术路线, 利用两次反应(ISOL+PF)产生丰中子放射性核束。同时采用双驱动方案提供装置的多用途和灵活性。

第一个驱动是反应堆, 由于热中子诱发U-235裂变截面很大(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。装置利用反应堆的热中子束诱发U-235裂变, 裂变产物通过在线同位素分离后, 进行后加速。这个驱动方式的特点是产生的裂变束流强度非常高。

第二个驱动是强流氘核束流, 采用(d, n)反应可以产生高强度快中子, 由于快中子诱发U-238裂变, 裂变产物通过在线同位素分离后, 进行后加速。这个驱动方式技术上相对成熟, 可以有效地在反应堆维护时开展工作。

北京ISOL产生的中能丰中子核束二次打靶分离后形成高强度极端丰中子核束, 由于丰中子弹核比稳定核多出5—8个中子, 极端丰中子核的产生截面比稳定束提高4—6个量级。考虑核束强度相对于稳定离子束强度低2—3个量级和其他损失因素, 极端丰

中子核束强度比在建装置提高1—2个量级。其设计思路见图4。

表3 在建和计划中的不稳定核束装置

地点(装置)	驱动加速器	后加速器	装置类型
美国(FRIB)	重离子直线 200 A MeV		PF
德国(FAIR)	重离子同步 1.5 A GeV		PF
欧洲(EURISOL)	质子, 1 GeV, 1—5MW	超导直线 100 A MeV	ISOL+PF
韩国(RAON)	70 MeV 质子 70 kW	重离子直线 200 A MeV	ISOL+PF
中国(HIAF)	重离子同步 4.4 A GeV		PF
美国(FRIB)	重离子直线, 148 A MeV, 400 kW	计划中 15 A MeV	PF
加拿大(ARIEL)	电子直线 10 mA 50 MeV		MeV
中国(Beijing ISOL)	60 MW 反应堆/直线 10 mA 20 MeV A d	超导直线 150 A MeV	ISOL+PF

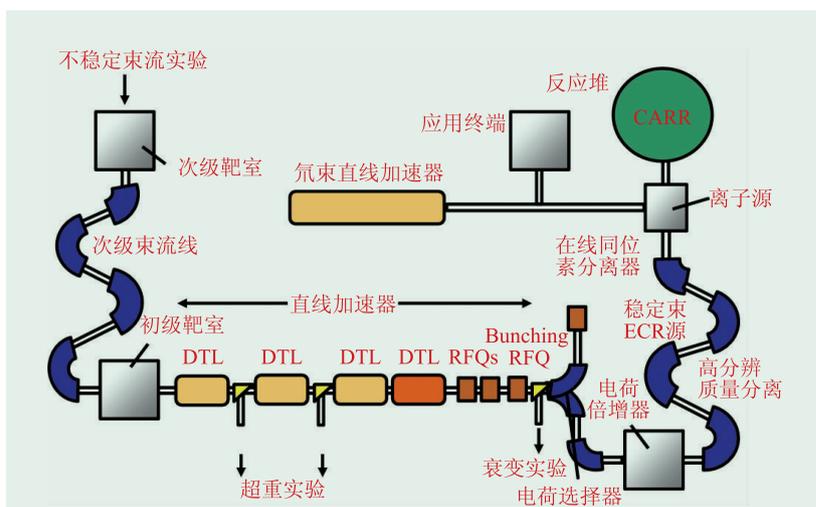


图4 北京ISOL设计思路(Bunching RFQ为射频四极聚束段, RFQs为多节射频四极加速段, CARR为中国先进研究堆, DTL为漂移管直线加速段)

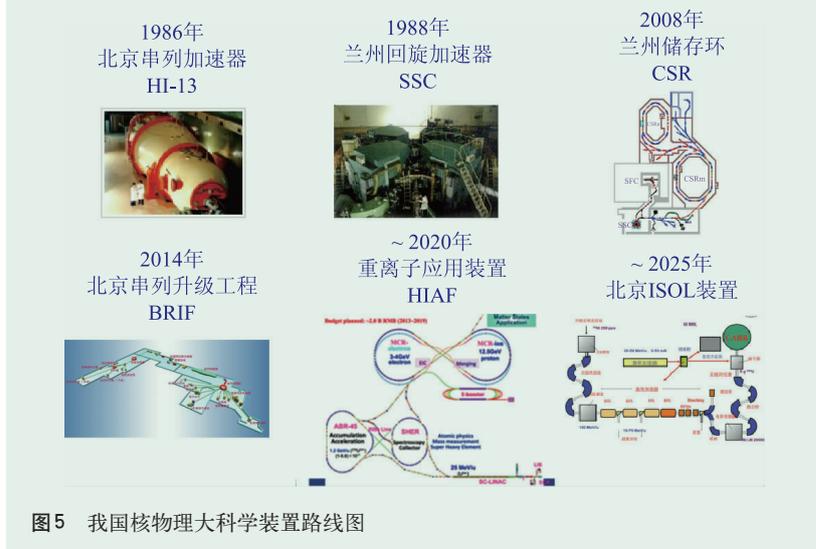


图5 我国核物理大科学装置路线图

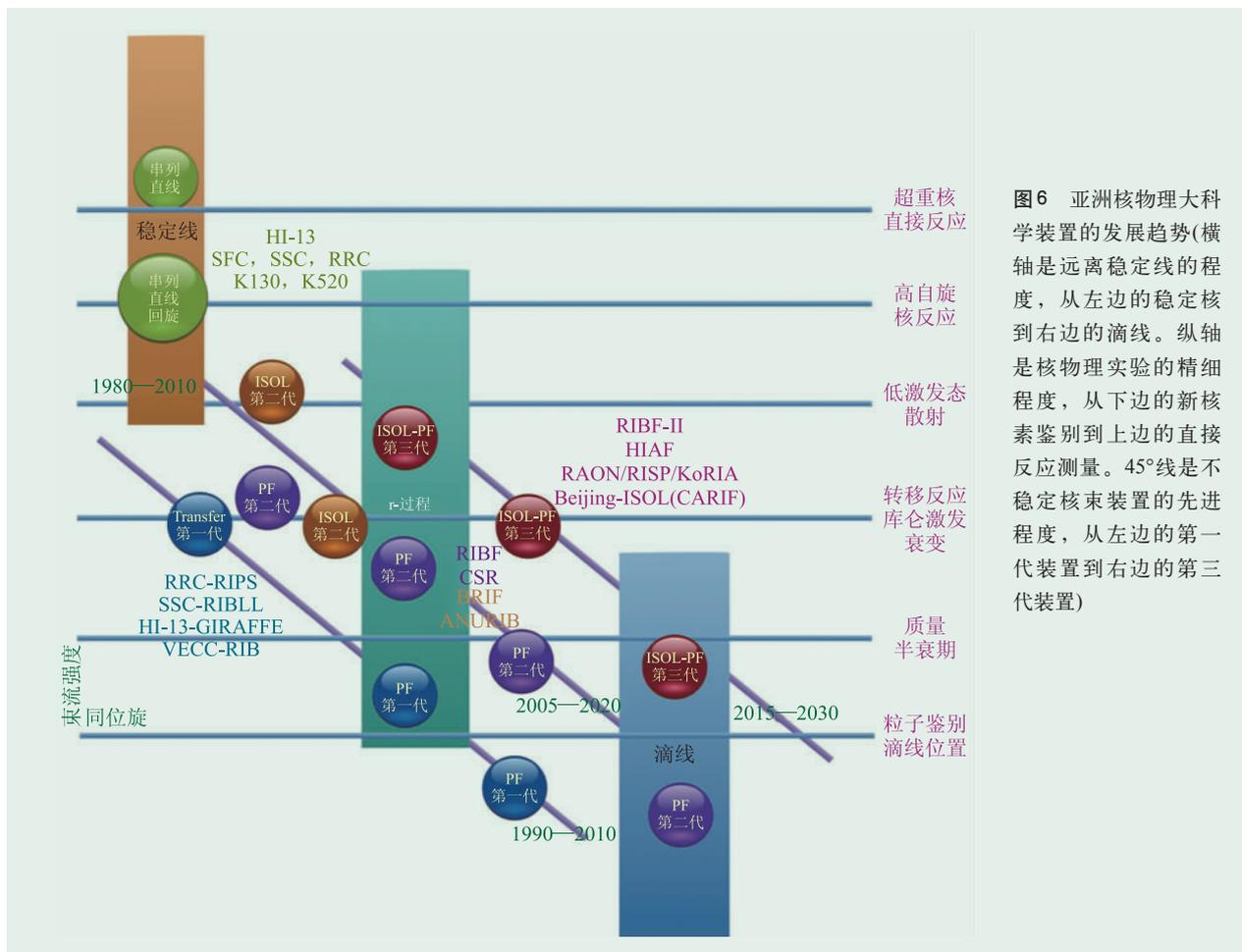


图6 亚洲核物理大科学装置的发展趋势(横轴是远离稳定线的程度,从左边的稳定核到右边的滴线。纵轴是核物理实验的精细程度,从下边的新核素鉴别到上边的直接反应测量。45°线是不稳定核束装置的先进程度,从左边的第一代装置到右边的第三代装置)

## 6 结束语和展望

国际放射性核束物理与核天体物理的需求,驱动国际上发展了PF和ISOL型的不稳定核束加速器,在未来,这两种方法的结合将可以提供更强的丰中子放射性核束。由于我国的基础研究投入日益加强,我国的核物理基础研究将面临大好的机遇,几乎每隔5年,就会有一个大型的科学平台建成,我国核物理大科学平台的发展预测路线图见图5,可以预期,在未来的20年,我国核物理基础研究将步入国际最先进的

行列,亚洲也将成为国际核物理研究新的中心(亚洲核物理大科学装置的发展趋势见图6)。核物理学家将可以回答核物理中一些根本的科学问题。这些未来的进展可能是:高强度放射性束流的研究平台,使人们将可以了解r过程的场所,同时为了解中子滴线的位置提供条件。通过核结构和核物质状态方程的研究,将了解中子星的形成条件和中子滴线的新作用;通过新的反应机制和丰中子的炮弹,将了解超重核的位置并找到超重岛;通过对关联和多体核力的研究,将弄清结团和多体现象,从而形成结构和反应统一的核理论。

### 参考文献

[1] 中国原子能科学研究院网站:www.ciae.ac.cn  
 [2] 中国科学院兰州近代物理研究所网站:www.impcas.ac.cn  
 [3] 国际核物理加速器装置介绍(Research Facilities in Nuclear

Physics), 见: IUPAP report 41, <http://www.triumf.info/hosted/iupap/icnp/report41.html>

[4] 兰州HIAF项目建议书,内部资料,2013年  
 [5] 北京ISOL项目建议书,内部资料,2013年