## 2024-11-25收到 中国的新核素合成\* † email: huangwx@impcas.ac.cn 甘再国<sup>1,2,3</sup> 黄文学<sup>1,2,3,†</sup> 徐瑚珊<sup>1,2,3</sup> 赵红卫<sup>1,2,3</sup> DOI: 10.7693/wl20241201 CSTR: 32040.14.wl20241201 (1 中国科学院近代物理研究所 重离子科学与技术重点实验室 兰州 730000) (2 中国科学院大学核科学与技术学院 北京 101408) (3 先进能源科学与技术广东省实验室 惠州 516000) Synthesis of new nuclides in China GAN Zai-Guo<sup>1,2,3</sup> HUANG Wen-Xue<sup>1,2,3,†</sup> XU Hu-Shan<sup>1,2,3</sup> ZHAO Hong-Wei<sup>1,2,3</sup> (1 Heavy Ion Science and Technology Key Laboratory, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China) (2 School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China) (3 Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 516000, China)

**摘要** 合成新核素和新元素、认知核素图和元素周期表、探索原子核存在极限 是核物理的前沿研究领域。新核素的合成研究,不仅可以揭示原子核物理学中原子核结 构、原子核衰变以及核子间基本相互作用的奥秘,而且有助于探索核天体物理学中核合 成过程和能量来源的机制,此外,对核素性质的认识还可以扩展其在人类生活中的应用。 与国际上其他发达国家相比,国内的新核素研究起步较晚,开始于20世纪90年代。在国 家的大力支持和科研人员的不懈努力下,迄今为止,我国已成功合成了41个新核素,在 全世界的排名已提升到第11位。随着研究的深入,合成新核素的难度越来越大,在新核 素的产生、分离和鉴别三方面都存在极大的挑战。文章回顾了中国新核素研究的现状及 具体研究方法,综述了新核素和新元素研究的挑战及应对措施,简述了中国新元素合成 的实验计划。

关键词 新核素,新元素,核素图,重离子物理

**Abstract** Synthesizing new nuclides/isotopes and new elements, expanding the chart of nuclides and the periodic table of elements, and exploring the limit of the existence of nuclides are frontier research fields in nuclear physics. The synthesis of new nuclides can not only reveal the mystery of nuclear structure, nuclear decay and fundamental interactions between nucleons, but also help to explore the mechanism of nucleosynthesis processes and energy sources in nuclear astrophysics. Moreover, understanding the properties of isotopes can also expand their practical applications. Compared with other developed countries around the world, research on new nuclides only started in the 1990s in China, but with the strong support of the government and continuous endeavors of researchers, 41 new isotopes have been successfully synthesized so

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(批准号: 2023YFA1606500)、中国科学院战略性先导科技专项(批准号: XDB34010000)、广东省 基础与应用基础研究重大项目(批准号: 2021B0301030006)、甘肃省科技重大专项计划(批准号: 23ZDGA014)和中国科 学院稳定支持基础研究领域青年团队专项(批准号: YSBR-002)资助项目

far, raising China's ranking to the 11th place in the world. As research advances, it is becoming more and more challenging to produce, separate and identify new isotopes. This paper reviews the current status and specific methods employed in this area of research in China, summarizes the challenges and the efforts to solve the problems in the synthesis of new isotopes, and briefly describes the experimental plans for synthesizing new elements in China.

Keywords new nuclide, new element, chart of nuclides, heavy ion physics

### 1 引言

自然界的奥秘层出不穷。人们在长期的生产 和生活中逐渐发现宇宙万物是由几十种元素构成 的,建立了化学元素这一科学概念。1869年,俄 国科学家门捷列夫创建了现代的元素周期表,揭 示了化学元素性质的周期律。1897年,汤姆孙仔 细研究阴极射线的性质,发现了电子,打破了原 子不可分的传统物质观。1911年,卢瑟福通过α 粒子轰击金薄膜实验,发现了原子核的存在。之 后,质子和中子的相继发现使人们认识到原子核 是由带电的质子和不带电的中子组成的,不同数 目的质子和中子可以组成不同的原子核。当然, 质子和中子又由不同的夸克组成。原子、原子核、 质子和中子、夸克处在众多物质结构层次的不同 层次上。描述夸克层次上基本粒子及其相互作用 的理论是标准模型,它认为维系质子和中子形成



**图1** 核素图。红色方块是中国合成的新核素,粉红三角形表示的是部分已研究 的奇异核。黑色方块是在自然界中存在的稳定核或者长寿命放射性核,β稳定线 位于此

原子核的核力是夸克间强相互作用在核子之外的 剩余相互作用。但是,从基本理论出发来定量描 述核子间的相互作用还很困难。原子核物理学中 一直存在一个未能解决的基本问题——在核力和 库仑力的作用下,一定数目的质子究竟可以与多 少数目的中子形成原子核?这就是原子核的存在 极限问题。

化学元素是具有相同核电荷数的一类原子(同 位素,质子数目相同)的总称。而不同数目的质子 和不同数目的中子组成了不同的核素,将它们按 一定的方式排列便是现在的核素图(图1)。地球上 存在288种稳定核素和天然放射性核素,它们集 中在核素图上一条狭长的区域内,通过这一区域 的中心所作的一条曲线称作β稳定线。随着不稳 定原子核越来越远离稳定线,最后一个质子或中 子的结合能会越来越小,最终有可能成为负值。 核素图上最后一个质子或中子结合能为负值的线 被称为质子滴线或中子滴线。核素图的东北角决

> 定于原子核的自发裂变,其也决定 了最重化学元素存在的极限。经典 液滴模型预言,存在最重的元素在 103号(锕系元素最后一个)附近,人 们普遍将超锕系元素(核素)称为超 重元素(核素),其质子数大于103。 超重原子核是一个复杂的量子多体 系统,理论上尚不能准确计算裂变 位垒,从而也不能准确预言原子核 存在的极限。

> 新核素的合成是指通过人工核 反应的方法合成那些在自然界中不 存在的核素。自1934年约里奥·居 里夫妇人工合成了具有β放射性的

新核素<sup>30</sup>P以来,世界各 国的科学家和研究机构 竞相开展新核素研究。 发现、合成、鉴别新核 素和新元素,拓展对核 素图和元素周期表的认 知,探索原子核的存在 极限, 始终是原子核物 理学研究的前沿焦点领 域之一。当核物理的研 究对象向着远离稳定线 及超重区拓展时,原子 核的形状、大小、密度 分布、衰变方式、壳模 型幻数、电磁矩和稳定 性等会呈现出奇异的或 者新的特性<sup>[1]</sup>。合成和研 究这些远离稳定线的原 子核,对于探索原子核 的存在极限, 检验和发 展原子核的理论模型起 着非常重要的作用。不 仅如此,这些研究在核 天体物理学关于核合成 过程和能量来源,以及 放射性核的广泛应用中 也具有重要的价值。

根据理论预言可合 成的核素大约在8000种 左右, 迄今为止, 已经 发现了大约3400种,未 来还有大量的核素等待 被实验发现。但实验上\_\_\_41 = 22Pu = 94 = 15 Os(\*\*Ar, 5n) = 196.4 = 电磁分离+a表变天联链 | 杨华彬等 | 2024 [ [40] = 发现新核素是很困难的,

					12 (23)			
序号	核素	质子数Z	合成方法	束流能量/ MeV	分离鉴别方法	科研 人员	发现 时间	参考 文献
1	<sup>90</sup> Ru	44	<sup>58</sup> Ni( <sup>35</sup> Cl, p2n)	115	转轮+γ(X)谱	周书华等	1991	[5]
2	<sup>202</sup> Pt	78	<sup>204</sup> Hg(n, 2pn)	~21	化学分离+γ谱	石双惠等	1992	[6]
3	<sup>185</sup> Hf	72	<sup>nat</sup> W(n, 2p)	14	化学分离+γ谱	袁双贵等	1992	[7]
4	<sup>237</sup> Th	90	铀盐(n, 2p)	14	化学分离+γ谱	袁双贵等	1993	[8]
5	<sup>208</sup> Hg	80	多核子转移 <sup>12</sup> C+ <sup>nat</sup> Pb	30A	热色谱管+γ谱	张立等	1993	[9]
6	<sup>239</sup> Pa	91	多核子转移 <sup>18</sup> O+ <sup>nat</sup> U	50A	化学分离+γ(X)谱	袁双贵等	1995	[10]
7	<sup>175</sup> Er	68	<sup>nat</sup> Yb(n, 2p)	14	跑兔+γ(X)谱	张学谦等	1995	[11]
8	<sup>235</sup> Am	95	<sup>238</sup> Pu(p, 4n)	35	氦喷嘴+γ(X)谱	郭俊盛等	1996	[12]
9	<sup>135</sup> Gd	64	<sup>106</sup> Cd( <sup>32</sup> S, 3n)	171	氦喷嘴+p-γ(X)符合	徐树威等	1996	[13]
10	<sup>121</sup> Ce	58	<sup>92</sup> Mo( <sup>32</sup> S, 3n)	171	氦喷嘴+p-γ(X)符合	李占奎等	1997	[14]
11	<sup>209</sup> Hg	80	多核子转移 <sup>18</sup> O+ <sup>nat</sup> Pb	600	热色谱管+β-γ符合	张立等	1997	[15]
12	<sup>81</sup> Zr	40	58Ni(32S, 4p5n)	170	氦喷嘴+p-γ符合	黄文学等	1997	[16]
13	<sup>186</sup> Hf	72	多核子转移 <sup>18</sup> O+ <sup>nat</sup> W	60A	化学分离+γ谱	袁双贵等	1997	[17]
14	<sup>238</sup> Th	90	多核子转移 <sup>18</sup> O+ <sup>nat</sup> U	60A	化学分离+γ(X)谱	何建军等	1998	[18]
15	<sup>125</sup> Nd	60	<sup>92</sup> Mo( <sup>36</sup> Ar, 3n)	169	氦喷嘴+p-γ(X)符合	徐树威等	1999	[19]
16	<sup>128</sup> Pm	61	<sup>96</sup> Ru( <sup>36</sup> Ar, p3n)	174	氦喷嘴+p-γ(X)符合	徐树威等	1999	[19]
17	<sup>129</sup> Sm	62	<sup>96</sup> Ru( <sup>36</sup> Ar, 3n)	165	氦喷嘴+p-γ(X)符合	徐树威等	1999	[19]
18	<sup>137</sup> Gd	64	<sup>106</sup> Cd( <sup>36</sup> Ar, 2p3n)	176	氦喷嘴+p-γ(X)符合	徐树威等	1999	[19]
19	<sup>139</sup> Dy	66	<sup>106</sup> Cd( <sup>36</sup> Ar, 3n)	176	氦喷嘴+p-γ(X)符合	徐树威等	1999	[19]
20	<sup>139</sup> Tb	65	<sup>106</sup> Cd( <sup>36</sup> Ar, p2n)	220	氦喷嘴+γ(X)谱	谢元祥等	1999	[20]
21	<sup>259</sup> Db	105	<sup>241</sup> Am( <sup>22</sup> Ne, 4n)	118	氦喷嘴+α衰变关联链	甘再国等	2000	[21]
22	<sup>142</sup> Ho	67	<sup>106</sup> Cd( <sup>40</sup> Ca, p3n)	232	氦喷嘴+p-γ符合	徐树威等	2000	[22]
23	<sup>149</sup> Yb	70	<sup>112</sup> Sn( <sup>40</sup> Ca, 3n)	232	氦喷嘴+p-γ符合	徐树威等	2001	[23]
24	<sup>197</sup> Os	76	<sup>198</sup> Pt(n, 2p)	14	跑兔+γ(X)谱	徐岩冰等	2003	[24]
25	<sup>129</sup> Pm	61	<sup>92</sup> Mo( <sup>40</sup> Ca, p2n)	164—190	氦喷嘴+γ(X)谱	徐树威等	2003	[25]
26	<sup>265</sup> Bh	107	<sup>243</sup> Am( <sup>26</sup> Mg, 4n)	168	氦喷嘴+α衰变关联链	甘再国等	2004	[26]
27	<sup>205</sup> Ac	89	<sup>169</sup> Tm( <sup>40</sup> Ca, 4n)	196	电磁分离+α衰变关联链	张志远等	2013	[27]
28	<sup>216</sup> U	92	<sup>180</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 4n)	189.5, 191	电磁分离+α衰变关联链	马龙等	2015	[28]
29	<sup>215</sup> U	92	<sup>180</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 5n)	204.5, 207.6	电磁分离+α衰变关联链	杨华彬等	2015	[29]
30	<sup>223</sup> Np	93	$^{187}$ Re( $^{40}$ Ar, 4n)	188	电磁分离+α衰变关联链	孙明道等	2016	[30]
31	<sup>219</sup> Np	93	<sup>187</sup> Re( <sup>36</sup> Ar, 4n)	191.5	电磁分离+α衰变关联链	杨华彬等	2017	[31]
32	<sup>224</sup> Np	93	<sup>187</sup> Re( <sup>40</sup> Ar, 3n)	188	电磁分离+α衰变关联链	黄天衡等	2018	[32]
33	<sup>220</sup> Np	93	<sup>185</sup> Re( <sup>40</sup> Ar, 5n)	200	电磁分离+α衰变关联链	张志远等	2019	[33]
34	<sup>222</sup> Np	93	<sup>187</sup> Re( <sup>40</sup> Ar, 5n)	198.7	电磁分离+α衰变关联链	马龙等	2020	[34]
35	<sup>214</sup> U	92	<sup>182</sup> W( <sup>36</sup> Ar, 4n)	184	电磁分离+α衰变关联链	张志远等	2021	[35]
36	<sup>207</sup> Th	90	<sup>176</sup> Hf( <sup>36</sup> Ar, 5n)	197—199	电磁分离+α衰变关联链	杨华彬等	2022	[36]
37	<sup>204</sup> Ac	89	<sup>169</sup> Tm( <sup>40</sup> Ca, 5n)	200, 210-214	电磁分离+α衰变关联链	黄明辉等	2022	[37]
38	<sup>160</sup> Os	76	<sup>106</sup> Cd( <sup>58</sup> Ni, 4n)	335	电磁分离+α衰变关联链	杨华彬等	2023	[38]
39	<sup>156</sup> W	74	<sup>160</sup> Os的α衰变	—	α衰变关联链	杨华彬等	2023	[38]
40	<sup>203</sup> Ac	89	<sup>169</sup> Tm( <sup>40</sup> Ca, 6n)	226	电磁分离+α衰变关联链	王建国等	2023	[39]
4.1	2270	0.4	1920 (40 + 5 )	106.4	中政八支, 古本圣晓林	拉化松炼	2024	E401

表1 中国合成的新核素\*

\* 只统计在国内的加速器和实验装置上合成的新核素,其中发现时间是指相关文献的投稿时间

远离稳定线原子核的合成和研究涉及到原子核的 产生、分离、测量技术和鉴别方法等问题。新核 的科学家大约有4000位,来自全世界100多家实 素的发现与一个国家的经济和科研发展水平密切 相关,也是一个国家综合国力的表征。绝大多数 新核素都是由欧美的发达国家发现的。根据文献

[2]和网站[3]的统计,截至目前,参与新核素研究 验室。以核素合成所在的实验室来统计每个国家 合成的核素数目,美国合成最多,达1343个核 素;德国次之,为565个;而中国已合成了41个

表2 除新核素以外的奇异核研究列表(不完全统计)										
	序号	核素	质子数 Z	合成方法	束流能量/MeV	分离鉴别方法	参考文献			
	1	<sup>69</sup> Kr	36	<sup>40</sup> Ca( <sup>32</sup> S, 3n)	170	170 氦喷嘴+ΔE-E符合				
	2	<sup>85</sup> Mo	42	58Ni(32S, 2p3n)	170	氦喷嘴+p-γ符合	[16, 42]			
	3	<sup>87</sup> Mo	42	58Ni(32S, 2pn)	170	氦喷嘴+p-γ符合	[43]			
	4	<sup>89</sup> Ru	44	<sup>58</sup> Ni( <sup>36</sup> Ar, 2p3n)	220	氦喷嘴+p-γ符合	[44]			
	5	92Rh	45	<sup>58</sup> Ni( <sup>40</sup> Ca, 3p3n)	232	氦喷嘴+p-γ符合	[45]			
	6	<sup>93</sup> Pd	46	<sup>58</sup> Ni( <sup>40</sup> Ca, 2p3n)	232	氦喷嘴+p-γ符合	[45]			
	7	<sup>206</sup> Ac	89	<sup>169</sup> Tm( <sup>40</sup> Ca, 5n)	183	电磁分离+α衰变关联链	[27]			
	8	<sup>207</sup> Ac	89	<sup>176</sup> Hf( <sup>36</sup> Ar, 5n)	197—199	电磁分离+α衰变关联链	[46]			
	9	<sup>208</sup> Ac	89	<sup>176</sup> Hf( <sup>36</sup> Ar, 4n)	197—199	电磁分离+α衰变关联链	[46]			
	10	<sup>209</sup> Ac	89	<sup>176</sup> Hf( <sup>36</sup> Ar, 3n)	197—199	电磁分离+α衰变关联链	[46]			
	11	<sup>213m</sup> Th	90	<sup>176</sup> Hf( <sup>40</sup> Ar, 3n)	183, 190	电磁分离+α衰变关联链	[47]			
	12	<sup>214</sup> Th	90	<sup>176</sup> Hf( <sup>40</sup> Ar, 2n)	183, 190	电磁分离+α衰变关联链	[47]			
	13	<sup>218m</sup> Pa	91	<sup>182</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 1p3n)	190	电磁分离+α衰变关联链	[48]			
	14	<sup>220</sup> Pa	91	<sup>187</sup> Re( <sup>40</sup> Ar, α3n)	188, 198.7	电磁分离+α衰变关联链	[49, 50]			
	15	<sup>222</sup> Pa	91	<sup>186</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 1p3n)	198.7	电磁分离+α衰变关联链	[51]			
	16	<sup>216</sup> U	92	<sup>180</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 4n)	191	电磁分离+α衰变关联链	[28, 35]			
	17	<sup>218</sup> U	92	<sup>182</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 4n)	190	电磁分离+α衰变关联链	[35]			
		<sup>218</sup> U	92	<sup>184</sup> W( <sup>40</sup> Ca, α2n)	206	电磁分离+α衰变关联链	[35]			
	18	<sup>219</sup> U	92	<sup>183</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 4n)	190	电磁分离+α衰变关联链	[52]			
	19	<sup>222</sup> U	92	<sup>186</sup> W( <sup>40</sup> Ar, 4n)	188	电磁分离+α衰变关联链	[53]			
	20	<sup>223</sup> U	92	<sup>187</sup> Re( <sup>40</sup> Ar, p3n)	188	电磁分离+α衰变关联链	[54]			
	21	<sup>258</sup> Db	105	<sup>241</sup> Am( <sup>22</sup> Ne, 5n)	118	氦喷嘴+α衰变关联链	[21]			
	22	<sup>261</sup> Bh	107	<sup>209</sup> Bi( <sup>54</sup> Cr, 2n)	270.4	电磁分离+α衰变关联链	[55]			
	23	<sup>262</sup> Bh	107	<sup>209</sup> Bi( <sup>54</sup> Cr, n)	264.1	电磁分离+α衰变关联链	[55]			
	24	<sup>264</sup> Bh	107	$^{243}Am(^{26}Mg, 5n)$	168	氢喷嘴+α 衰变关联链	[26]			

162

313.3

氦喷嘴+α衰变关联链

电磁分离+α衰变关联链

[56]

[57]

和相关文献,其中发现时间是指 相关文献的投稿时间,并按时间 先后排序。

除了合成新核素,中国的研究人员还对多个奇异核进行了详细的研究。表2罗列了部分奇异 核研究情况。虽然不是新核素, 但是这些研究对原子核的结构和 衰变性质的理解起到了非常重要 的意义。<sup>266</sup>Bh的衰变研究<sup>[56]</sup>为日 本命名Z=113号元素提供了有力 的支持<sup>[58]</sup>。迄今为止,<sup>271</sup>Ds (Z= 110)<sup>[57]</sup>是在中国装置上研究的已 经正式发表文章的最重原子核。

## 3 中国新核素的产生、分 离和鉴别方法

从图1可看到,中国合成的 新核素和相关奇异核研究主要集 中于核素图的三个区域:质量数 *A*>170的丰中子核素、60<*A*<150 的中重质量缺中子核素和*A*>200 的重和超重质量区缺中子核素。

新核素,在全世界的排名已经提升到第11位。对于超重元素的研究,文献[4]作了较为详细的综述,此处不再赘述。

<sup>243</sup>Am(<sup>26</sup>Mg, 3n)

<sup>208</sup>Pb(<sup>64</sup>Ni, n)

#### 2 中国新核素研究进展

107

110

<sup>266</sup>Bh

<sup>271</sup>Ds

25

26

与国际上的发达国家相比,国内的新核素研 究起步较晚,开始于20世纪90年代。图1显示了 中国合成的新核素及部分已经研究的奇异核在核 素图中的位置。截止到2024年底,中国先后共合 成和鉴别了41个新核素,这些新核素分别利用了 中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研 究院、中国科学院上海应用物理研究所和兰州大 学的加速器装置。

表1总结了每个新核素被合成时的合成方法、 束流能量、分离鉴别方法、科研人员、发现时间 核素所在的核区不同,产生机制、衰变性质和分 离鉴别方法也不相同。这与中国科学院近代物理 研究所新核素研究的以时间为序的三个阶段粗略 对应。文献[59]作了较为详细的论述。

对于 *A*>170 的丰中子核素,使中低质量区丰 中子核素的重离子弹核碎裂反应很难生成该核区 的核素,这些核素主要是通过多核子转移反应和 快中子在天然丰度的W、Pt、Pb和U等重靶中引 起的反应产生。多核子转移反应在兰州重离子研 究装置(HIRFL)上进行,快中子引起的反应在中 国科学院近代物理研究所600 kV高压倍加器、兰 州大学300 kV高压倍加器和中国科学院上海应用 物理研究所(原中国科学院上海原子核研究所) 1.4 m回旋加速器上进行。一般采用化学分离法对 反应产物进行分离,随后由探测器阵列进行放射 性衰变的测量。最后,根据测量到的衰变谱对这 些丰中子新核素进行鉴别。

对于 60 < A < 150 的中重质量缺中子核素,研 究人员利用中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加 速器提供的低能重离子束<sup>35</sup>Cl或中国科学院近代物 理研究所的 HIRFL提供的<sup>32</sup>S、<sup>36</sup>Ar 和<sup>40</sup>Ca,轰击缺 中子同位素<sup>58</sup>Ni、<sup>92</sup>Mo、<sup>96</sup>Ru、<sup>106</sup>Cd 和<sup>112</sup>Sn 等自支 撑金属靶,通过熔合后蒸发若干中子和质子来合 成目标核。反应生成的目标核由氦喷嘴带传输系 统迅速地传输到屏蔽较好的低本底区进行测量。 图 2 显示了实验装置、氦喷嘴带传输系统和转轮 系统。对于具有β缓发质子放射性的核素一般采 用特征的 p-γ符合方法对产物进行鉴别,对只具有 β衰变性的核素采用γ(X)谱学的方法进行鉴别。

对于A>200的重和超重质量区缺中子核素, 主要采用熔合蒸发反应产生。来自HIRFL的低能 重离子束<sup>22</sup>Ne、<sup>26</sup>Mg、<sup>36,40</sup>Ar和<sup>40</sup>Ca, 以及来自超 重元素研究专用加速器CAFE2的<sup>40</sup>Ca 和 <sup>54</sup>Cr, 轰击<sup>169</sup>Tm、<sup>176</sup>Hf、<sup>185,187</sup>Re、<sup>180,182-184,186</sup>W, <sup>192</sup>Os, <sup>209</sup>Bi 和<sup>241,243</sup>Am等靶,通过蒸发若干中子产生目标核。 依时间和设备研制的进展来说,对目标核的分离 和鉴别可以分为两个阶段,这也是中国新核素合 成研究间隔差不多十年的原因(表1)。早期通过氦 喷嘴技术快速将目标核传输至低本底区的转轮系 统,在此探测目标核的α衰变关联链,从而鉴别 目标核;而在2010年后,由于新的充气反冲谱仪 SHANS<sup>[60]</sup>研制成功,目标核可以通过磁场直接分 离,并注入到焦平面探测器系统中,其级联α衰 变被探测,从而通过"能量一时间一位置关联" 来鉴别目标核。图3显示了充气反冲谱仪 SHANS 示意图和其焦平面探测器系统。

## 4 合成新核素和新元素的挑战及应对 措施

理论预言未来还有4000多种核素等待被实验 发现。由于质子一质子之间库仑排斥力的存在, 质子滴线到稳定线的距离很近。尽管库仑势垒和 离心势垒的存在使可观测的缺中子核在一定范围 内可能越过质子滴线,但人们能够合成与研究的 缺中子核素不多。目前,对奇质子数核素而言, Np以下(Z<93)的质子滴线的核素已经被实验成功 合成<sup>[31]</sup>。在丰中子一侧,中子滴线离稳定线的距离 很远,还存在大片的未知区域等待研究。在核素 图的东北角,只有更少数的核素被合成及研究, 这属于超重新核素及超重新元素的合成研究范畴。

目前,合成这些新核素和新元素是非常困难 的,实验面临的主要挑战在于产生、分离及鉴别 三方面。

现阶段,产生核素的主要方法有重离子熔合 蒸发、弹核碎裂、重核裂变以及重核间多核子转 移反应等。由于稳定线在重核区向丰中子一侧偏 移, 熔合蒸发反应多用来产生缺中子核素, 是合 成缺中子核素的主要方法,所有超重新元素和新 核素都是通过熔合蒸发反应产生的。弹核碎裂反 应只适合产生比炮弹轻的核素, 而现有的最重稳 定核素是<sup>238</sup>U,因此对于产生比<sup>238</sup>U更重的核素无 能为力。重核裂变反应包含自发裂变与诱发裂变 两种。自发裂变反应就是在不提供外加能量的前 提下,重核自身的裂变,而诱发裂变是指重核在 中子、高能质子、重离子或光子等的轰击下发生 裂变的过程。裂变重核一般具有比较大的中子质 子比(中质比), 而裂变产物的中质比基本上与裂 变核保持一致,所以重核裂变反应多用于产生中 等质量区丰中子一侧的核素,却不能产生重质量 和超重质量区的丰中子核素。重核间多核子转移 反应是介于少数核子转移和深部非弹性散射之间 的一种核反应过程,可能是合成重质量和超重质



量区的丰中子核素的有效途径之一。目前,实验 上极度缺乏重核间多核子转移反应的相关实验数 据,实验研究还处在初步阶段,需要大量的积累 后才能用于新核素的合成。在合成超铀和超重核 素的实验研究中,锕系靶起着非常重要的作用, 但其获得并不容易,文献[61,62]对此作了详细 的回顾。总之,不论利用哪种反应方式,最根本 的还是反应截面和目标核产额的问题。随着合成 的新核素越来越远离稳定线,其反应截面越来越 小,寻找合适的反应方式以及弹靶组合变得越来 越重要。为了提高目标核产额,缩短实验时间, 必须尽量提高束流强度,建造强流加速器成为必 不可少的选择。

由于新核素的产生截面极低,产生的少量目 标原子核与极大量的已知核素混杂在一起,我们 需要将之分离出来,这需要强大的分离设备。目 前,国际上通用的放射性束流分离方法有在线同 位素分离法和在束飞行分离法。由于在线同位素 分离法可以使用厚靶,其产额可能相对较高,但 它受限于元素的化学性质,只能用于分离某些元 素的同位素,且其分离时间较长(几毫秒到几小时 不等),不适于分离短寿命核素。在束飞行分离法 中,产物在飞行中被分离,由于没有元素化学性 质的限制,这种技术原则上可以分离大部分元素 的同位素,且分离所需时间很短(短至微秒量级), 可以用于短寿命核素的分离。依据设备中是否采 用缓冲气体来平衡电荷态,在束分离方法发展出 了磁谱仪和充气反冲谱仪。对于弹核碎裂反应产 生的核素,一般采用磁谱仪分离,而充气反冲谱 仪主要用于熔合蒸发反应产物的分离。衡量分离 方法好坏的标准主要考虑分离的效率、分离所需 的时间和本底的抑制能力。对目标核素的分离来 说,分离效率高,分离所需时间短,本底抑制能 力强的设备就是好设备。

新核素的鉴别也是一个非常棘手的问题。质 子数Z和质量数A是原子核最基本的参数,核素 的鉴别就是通过直接或间接方法来确定这两个量。 间接测量通过测量核反应或核衰变过程中的能量, 结合已知核和粒子的质量,根据能量守恒定律确 定未知核的质量。目前,超重核素的常规鉴别方 法是将目标核注入到探测器后采用"能量—时间 一位置关联"的方法寻找其α衰变链,结合已知 核素的α衰变能和半衰期间接鉴别出目标核的Z 和A。这种方法需同时满足两个要求:一是衰变 方式必须有特征性(如α衰变); 二是目标核的半衰 期不能太长,时间太长可能导致很大的偶然符合 概率,无法有效地指认目标核。对于弹核碎裂反 应产生的核素,可以基于离子光学和反应运动学, 通过  $B\rho$ - $\Delta E$ -TOF 方法实现核素的鉴别。这种方法 只能针对弹核碎裂反应产生的核素。然而,大量 还未被发现的新核素位于丰中子核区,并不具有 特征的α或质子衰变,且不能通过弹核碎裂反应 产生。对于重核和超重核区,理论预言很多尚未 合成的重核或超重核的α衰变链终点的核素会自 发裂变,只能借助衰变系统性或激发函数等进行 间接鉴别,这极大地增加了低截面核素的鉴别难 度;另外,对于超重稳定岛上的核素,一些核素 预言的寿命可达1000年甚至更长且其衰变方式不



确定,很难再用 "能量一时间一位置 关联"方法进行鉴 别。因此,迫切需 要研发核素的质量 数和电荷数的直接 测量的新技术与新 方法,根据质荷比 与频率或飞行时间 等可测量物理量之 间的关系来直接确 定带电粒子的质量。 目前,对原子核质 量进行直接测量的 设备主要是扇形场 质谱仪、储存环、 射频四极质量分析 器、潘宁离子阱和



图4 超重元素研究专用加速器 CAFE2(上图)和充气反冲谱仪 SHANS2(下图)

飞行时间质谱仪。它们各具特色, 互为补充。但 对新核素的鉴别而言, 多反射飞行时间质谱仪无 疑是一个非常重要的方向,由于其具有灵敏度高、 测量时间短、质量分辨本领较高且无须频率扫描 等多方面的特点, 有着很大的应用潜力。

鉴于上述提及的挑战,国内也提出了相应的 应对措施,已经开始建设相关的实验装置,尝试 从产生、分离及鉴别三方面同时解决。

我国"十二五"重大科技基础设施——强流 重离子加速器装置(HIAF)已于2018年12月23日 开工建造,计划于2025年建成并投入运行,现已 进入加速器设备的紧张安装阶段,其离子源已经 顺利出束。HIAF的超导直线加速器能够提供极强 重离子束流,将是国际上开展核物理研究的最佳 装置之一。在HIAF低能实验段,将建造先进的 充气反冲谱仪、丰中子核素分离器以及相关的实 验测量装置,从超导直线加速器引出能量精确可 调的强流重离子束流,利用熔合蒸发反应和多核 子转移反应产生缺中子新核素、超重新元素和丰 中子超重新核素。用于核素质量数直接指认的多 反射飞行时间质谱仪也正在建设中。在HIAF高 能实验段,我们也正在建造高能放射性束流线, 利用弹核碎裂反应和Bρ-Δ*E*-TOF方法实现核素的 产生、分离和鉴别。

新元素的合成是国际竞争的一个重要前沿。 经过半个多世纪的不懈努力,国际核物理界取得 了巨大成就,将元素周期表从92号扩展至118号, 发现了周期表上第七周期的所有元素。现在正全 力合成119和120号新元素。由于靶材料稀缺,国 际上采用的反应道主要集中于利用<sup>50</sup>Ti、<sup>51</sup>V、<sup>54</sup>Cr 和<sup>55</sup>Mn轰击<sup>243</sup>Am和<sup>248</sup>Cm等少数弹靶组合。理论 预言,合成119和120号新元素的截面极低,在目 前最先进的重离子加速器装置上,数月甚至数年 才能产生一个目标核素。为了提升我国的新核素 和新元素的合成研究能力,中国科学院近代物理 研究所已经建成了超重元素研究专用加速器 CAFE2和新的充气反冲谱仪SHANS2(图4)<sup>[63]</sup>,目 前已进入常规运行阶段。即将建成的HIAF将更 有利于开展新元素的合成实验研究。

**致 谢** 感谢兰州重离子研究装置的加速器团 队提供稳定的束流和技术支持。

#### 参考文献

- [1] 罗亦孝. 物理, 1998, 27:403
- [2] Thoennessen M. The Discovery of Isotopes: A Complete Compilation. Springer, 2016.p.413
- [3] Discovery of Nuclides Project. https://frib.msu.edu/public/nuclides
- [4] 周小红,徐瑚珊.物理,2019,48:640
- [5] Zhou S, Zeng X, Li J et al. Chin. J. Nucl. Phys., 1991, 13:193
- [6] Shi S, Huang W D, Li Y et al. Z. Phys. A, 1992, 342:369
- [7] Yuan S, Zhang T, Pan Q et al. Z. Phys. A, 1993, 344: 355
- [8] Yuan S, Zhang T, Xu S *et al*. Z. Phys. A, 1993, 346:187
- [9] Zhang L, Yuan S, Jin G et al. Nucl. Phys. A, 1993, 553:489
- [10] Yuan S, Yang W, Mou W et al. Z. Phys. A, 1995, 352:235
- [11] Zhang X , Yuan S , Yang W $et\ al.$  Z. Phys. A , 1996 , 353 : 353
- [12] Guo J, Gan Z, Liu H et al. Z. Phys. A, 1996, 355:111
- [13] Xu S, Xie Y, Li Z et al. Z. Phys. A, 1996, 356:227
- [14] Li Z, Xu S, Xie Y et al. Phys. Rev. C, 1997, 56:1157
- [15] Zhang L, Zhao J, Zheng J et al. Phys. Rev. C, 1998, 58:156
- [16] Huang W X, Ma R C, Xu X J et al. Z. Phys. A, 1997, 359: 349
- [17]Yuan S<br/> , Yang W , Li Z $et\,al.$  Phys. Rev. C , 1998 , 57 : 1506
- [18] He J, Yang W, Yuan S et al. Phys. Rev. C, 1999, 59: 520
- [19] Xu S W, Li Z K, Xie Y X et al. Phys. Rev. C, 1999, 60:061302
- [20] Xie Y, Xu S, Li Z et al. Euro. Phys. J. A, 1999, 6:239
- [21]Gan Z $\rm G$  , Qin Z , Fan H M  $et\,al.$  Euro. Phys. J. A , 2001 , 10 : 21
- [22] Xu S W, Li Z K, Xie Y X et al. Phys. Rev. C, 2001, 64:017301
- [23] Xu S W , Li Z K , Xie Y X  $\it et al.$  Euro. Phys. J. A , 2001 , 12 ; 1
- [24] Xu Y, Yang W, Yuan S et al. J. Radio. Nucl. Chem., 2003, 258:439
- [25] Xu S W, Xie Y X, Xu F R *et al*. Euro. Phys. J. A, 2004, 21:75
- [26]Gan Z $\rm G$ , Guo J $\rm S$ , Wu X Let al. Euro. Phys. J. A , 2004 , 20 ; 385
- [27] Zhang Z Y, Gan Z G, Ma L *et al.* Phys. Rev. C, 2014, 89:014308
- [28] Ma L, Zhang Z Y, Gan Z G *et al*. Phys. Rev. C, 2015, 91:051302
- [29] Yang H B, Zhang Z Y, Wang J G et al. Euro. Phys. J. A, 2015, 51:88
- [30] Sun M D, Liu Z, Huang T H et al. Phys. Lett. B, 2017, 771: 303
- [31] Yang H B, Ma L, Zhang Z Y et al. Phys. Lett. B, 2018, 777:212
- [32] Huang T H, Zhang W Q, Sun M D et al. Phys. Rev. C, 2018, 98: 044302
- [33] Zhang Z Y, Gan Z G, Yang H B et al. Phys. Rev. Lett., 2019, 122:192503
- [34] Ma L, Zhang Z Y, Gan Z G et al. Phys. Rev. Lett., 2020, 125: 032502
- [35] Zhang Z Y, Yang H B, Huang M H et al. Phys. Rev. Lett., 2021,

126:152502

- [36] Yang H B, Gan Z G, Zhang Z Y et al. Phys. Rev. Lett., 2022, 105:L051302
- [37] Huang M H, Gan Z G, Zhang Z Y et al. Phys. Lett. B, 2022, 834: 137484
- [38] Yang H B, Gan Z G, Li Y J et al. Phys. Rev. Lett., 2024, 132: 072502
- [39] Wang J G, Gan Z G, Zhang Z Y et al. Phys. Lett. B, 2024, 850: 138503
- [40] Yang H B, Gan Z G, Zhang Z Y et al. Phys. Rev. C, 2024, 110: 044302
- [41] Xu X J, Huang W X, Ma R C et al. Phys. Rev. C, 1997, 55: R553
- [42] Huang W X, Ma R C, Xu S W et al. Phys. Rev. C, 1999, 59: 2402
- [43] Huang W X, Ma R C, Xu X J et al. Phys. Rev. C, 1997, 56:1152
- [44] Li Z, Xui S, Xie Y et al. Euro. Phys. J. A, 1999, 5:351
- [45] Xu S W, Li Z K, Xie Y X et al. Euro. Phys. J. A, 2001, 11:375
- [46] Yang H B, Gan Z G, Zhang Z Y et al. Phys. Rev. C, 2022, 106: 064311
- [47] Zhou H B, Gan Z G, Wang N et al. Phys. Rev. C, 2021, 103: 044314
- [48] Zhang M M, Yang H B, Gan Z G et al. Phys. Lett. B, 2020, 800: 135102
- [49] Huang T H, Zhang W Q, Sun M D et al. Phys. Rev. C, 2017, 96: 014324
- [50] Ma L, Zhang Z Y, Yang H B et al. Phys. Rev. C, 2021, 104: 044310
- [51] Hua W, Zhang Z, Ma L et al. Chin. Phys. C, 2021, 45:044001
- [52] Zhang M M, Tian Y L, Wang Y S et al. Phys. Rev. C, 2019, 100: 064317
- [53] Lu H Y, Liu Z, Li Z H et al. Phys. Rev. C, 2023, 108:014302
- [54] Sun M D et al. Phys. Lett. B, 2020, 800: 135096
- [55] Zhao Z et al. Phys. Rev. C, 2024, 109:034314
- [56] 秦芝,吴晓蕾,丁华杰等.原子核物理评论,2006,23:400
- [57] Zhang Z Y et al. Chin. Phys. Lett., 2012, 29:012502
- [58] Karol P J et al. Pure Appl. Chem., 2016, 88:139
- [59] Gan Z G et al. Euro. Phys. J. A, 2022, 58:158
- [60] Zhang Z Y et al. Nucl. Instr. Meth. B, 2013, 317, Part B: 315
- [61] 刘佳佳,张钰海,张丰收.原子能科学技术,2025,59:待发表
- [62] Roberto J B et al. Euro. Phys. J. A, 2023, 59:304
- [63] Xu S Y et al. Nucl. Instr. Meth. A, 2023, 1050:168113

#### 读者和编者

# 《物理》有奖征集 封面素材

为充分体现物理科学的独特之美,本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊 跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰,色泽饱满,富有较强的 视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用,均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649029。

《物理》编辑部