



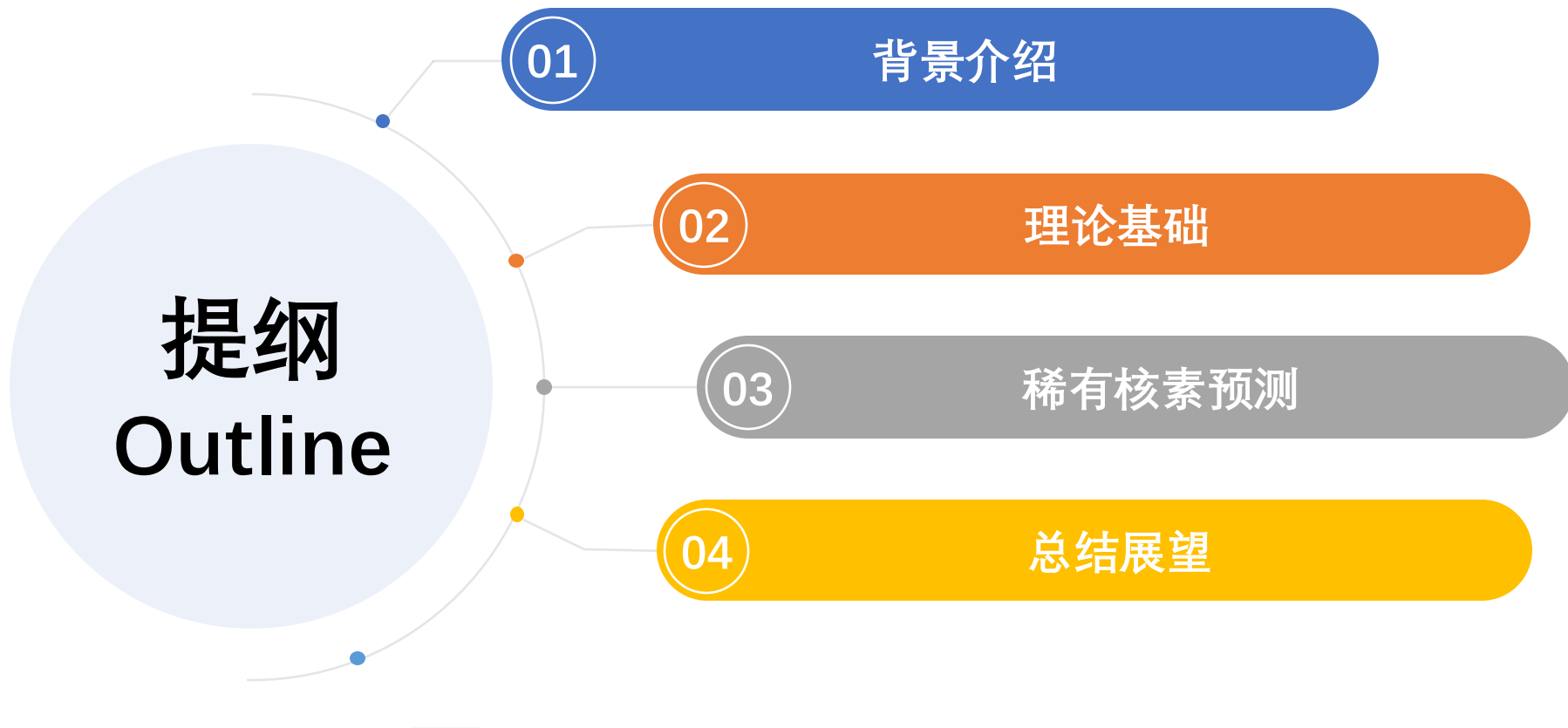
# 散裂反应和炮弹碎裂反应中稀有核素产生的高精度机器学习模型构建

马春旺 ([machunwang@126.com](mailto:machunwang@126.com))

河南省科学院核科学与技术研究所



# 炮弹碎裂反应中的稀有核素产生





# I. 背景介绍

放射性核束工厂

稀有核素工厂

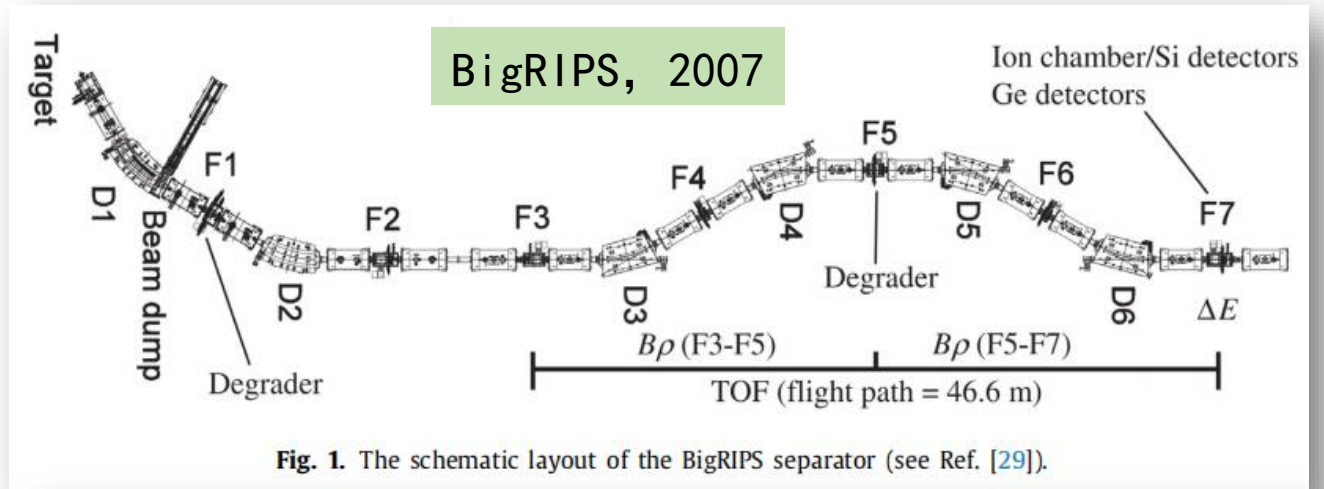
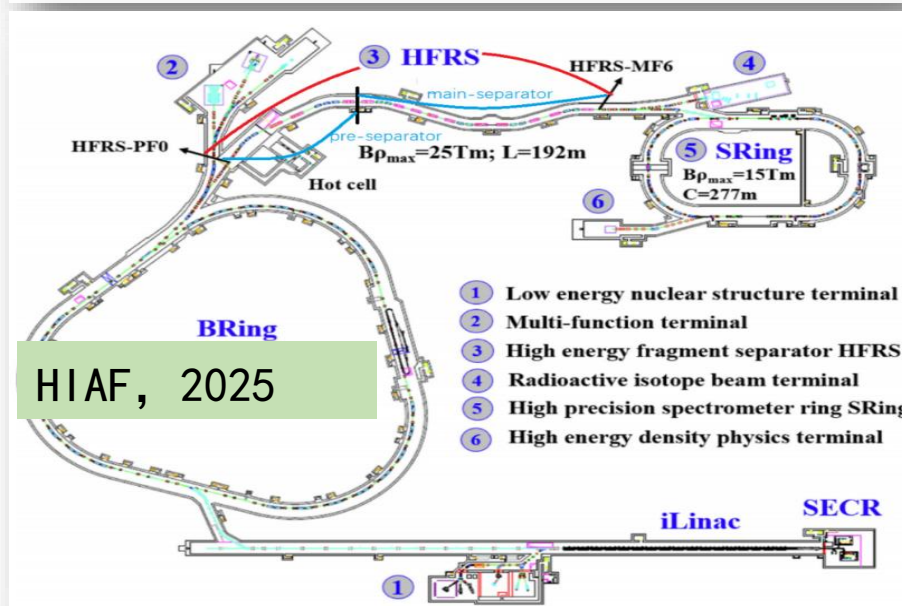
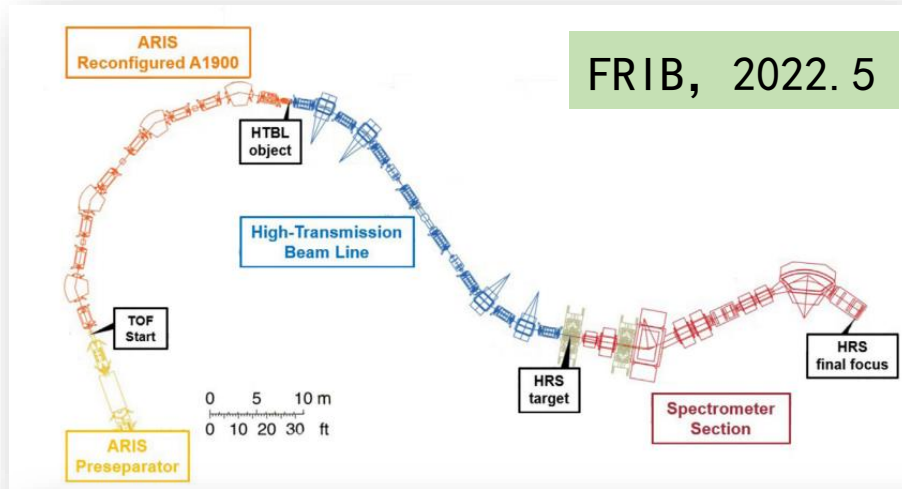
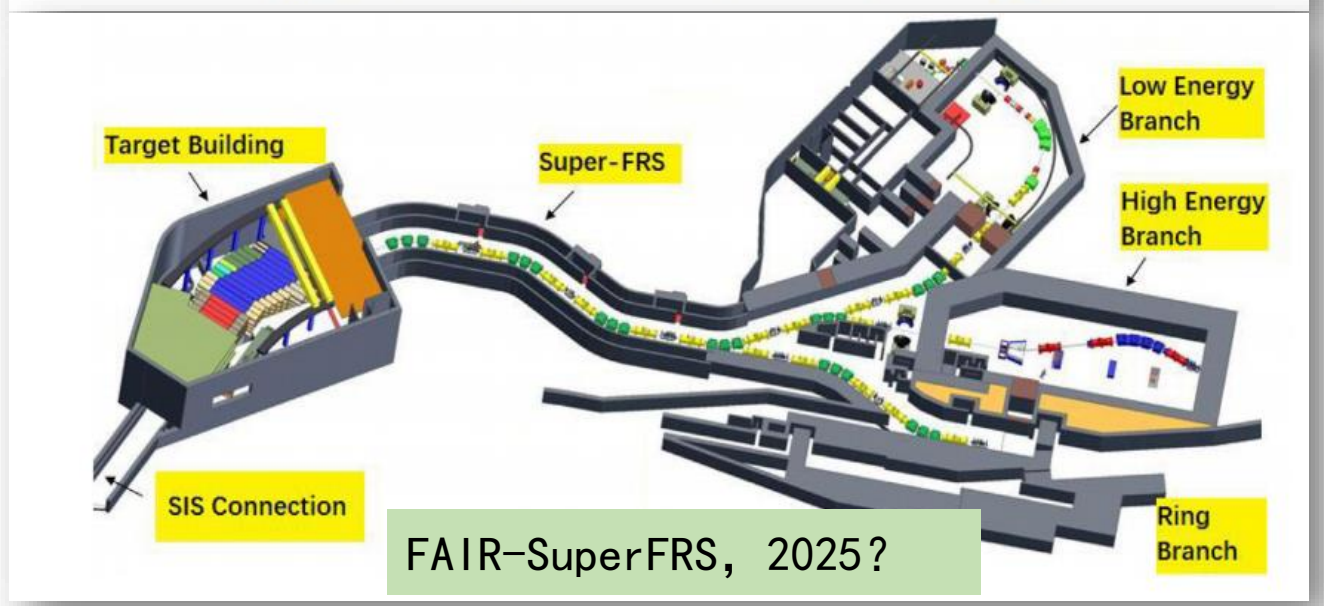


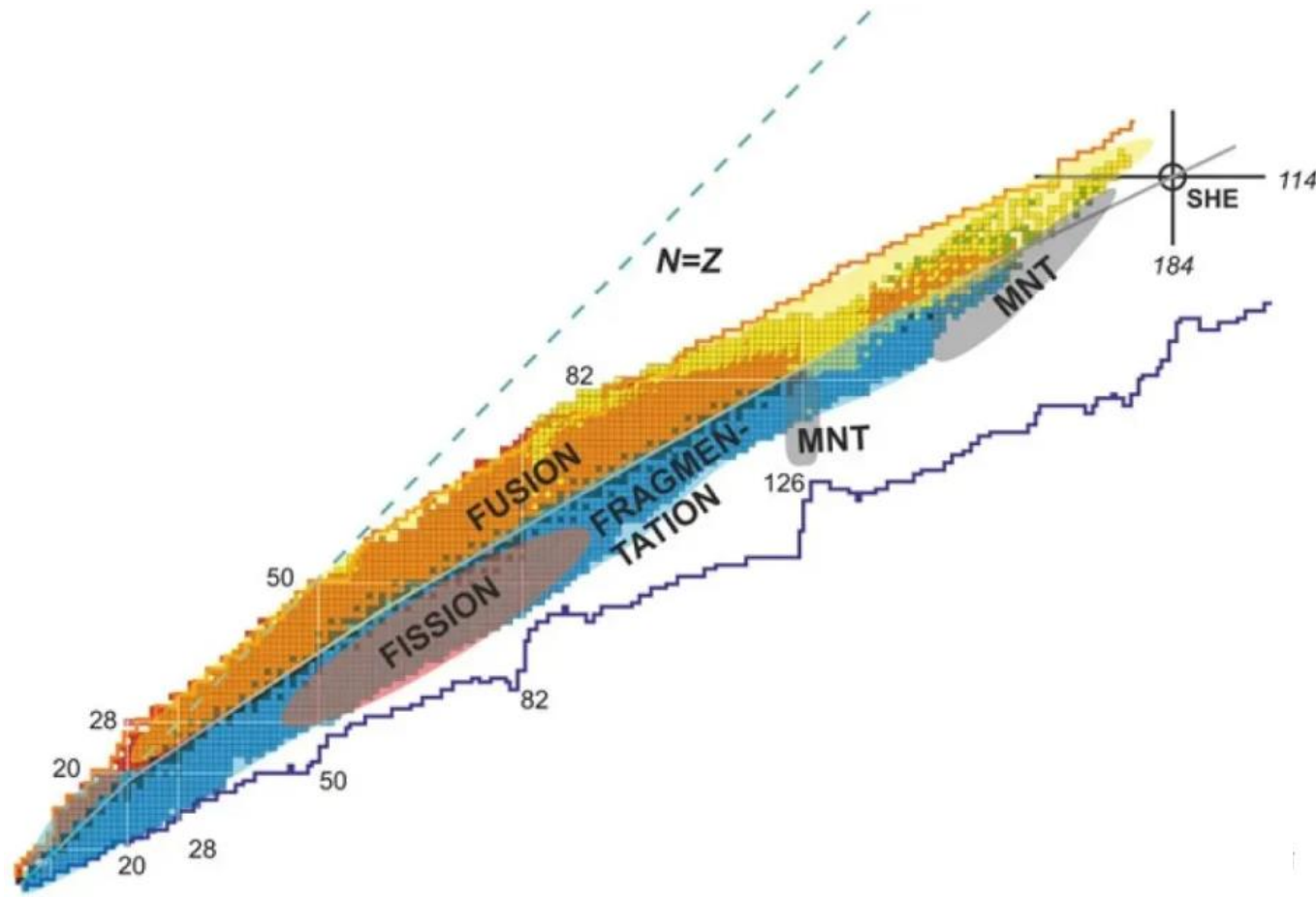
Fig. 1. The schematic layout of the BigRIPS separator (see Ref. [29]).



# I. 背景介绍

核素形成：  
质子外核素产生  
都来自于核反应

核碎裂反应（炮弹碎裂反应、散裂反应）是产生稀有核素的重要方式之一



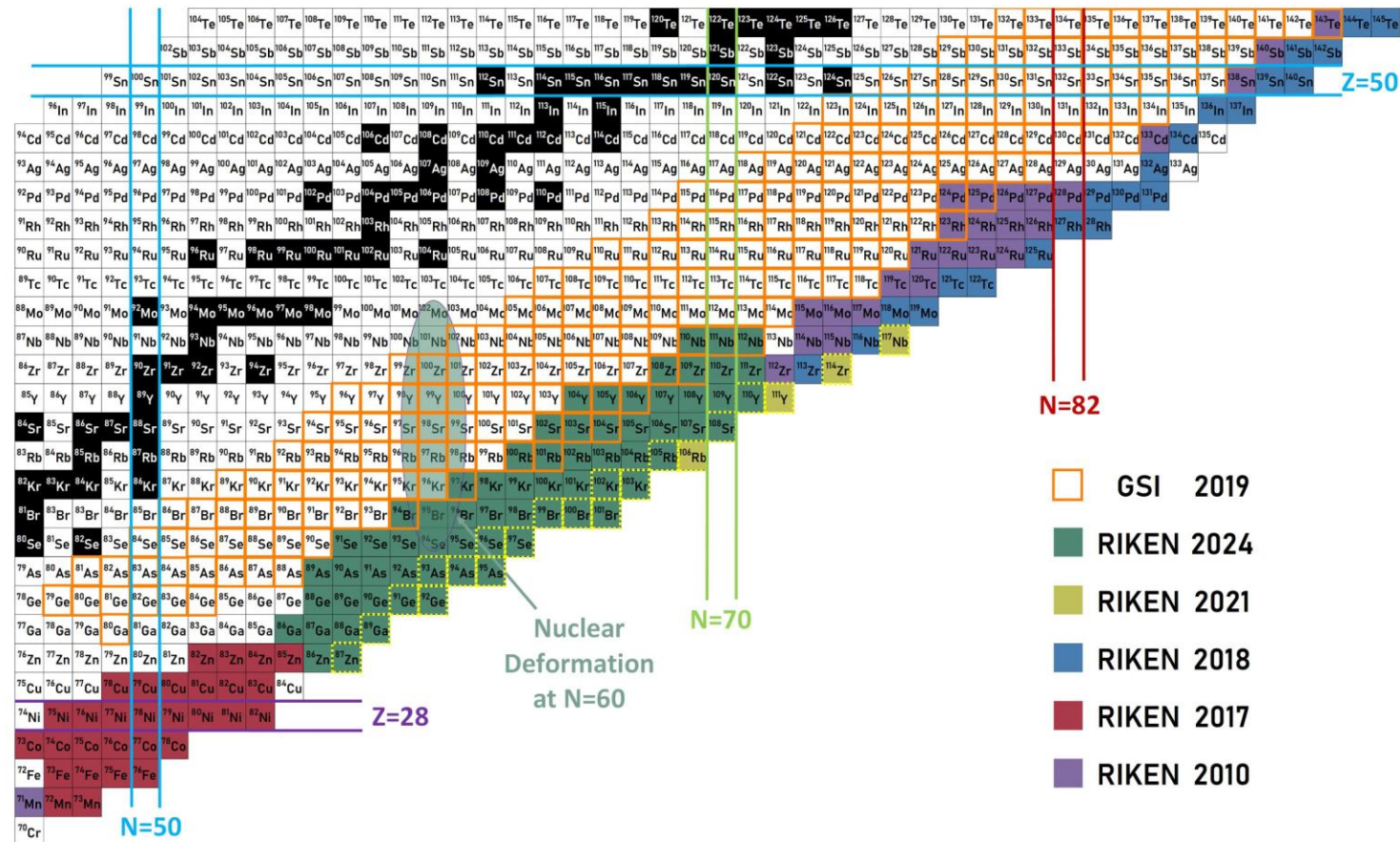
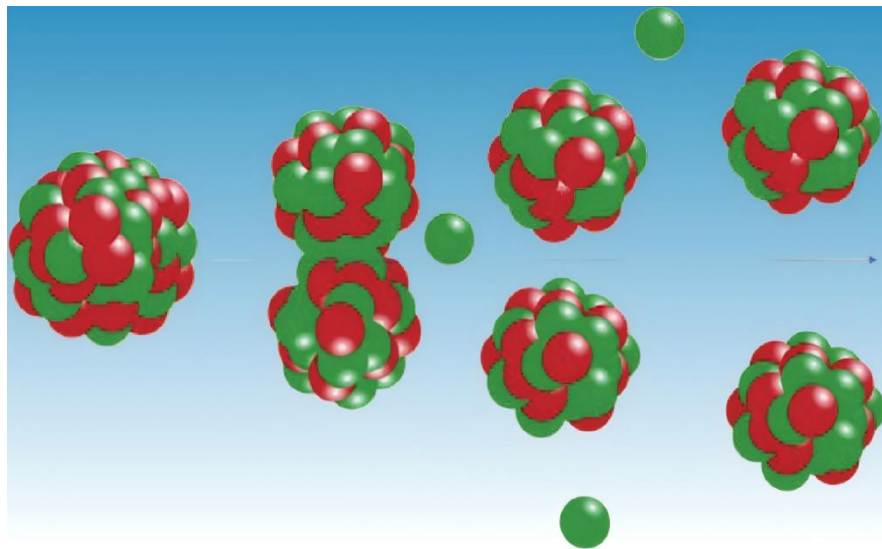
## 核素合成的主要方式

轻核聚变反应	重核熔合反应
Fusion	Fusion
多核子转移反应	<b>（重离子诱发）弹核碎裂反应</b>
Multi Nucleons Transfer	Projectile Fragmentation
<b>（轻粒子诱发）核散裂反应</b>	重核裂变反应
Spallation	fission





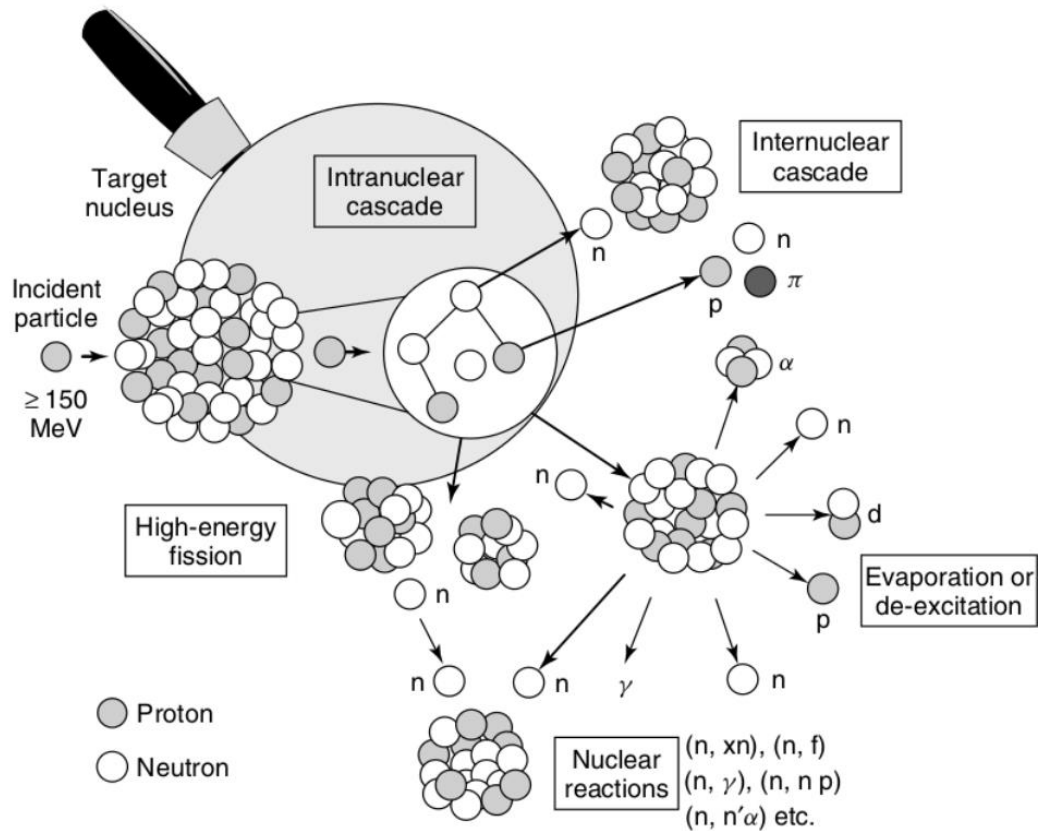
# I. 背景介绍



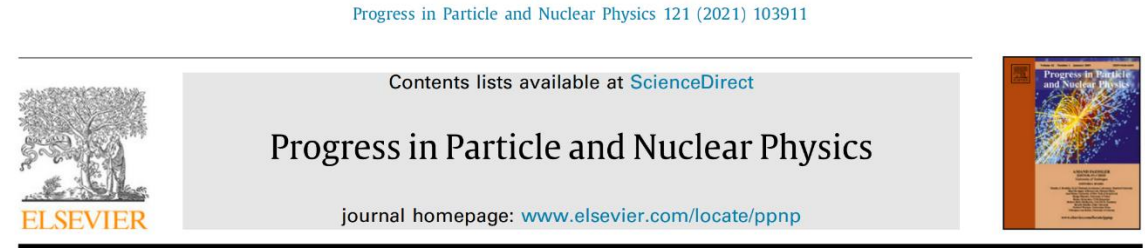
重核裂变

重核的飞行裂变与核素产生（2010–2024RIKEN&GSI）

# I. 背景介绍



(轻粒子诱发) 核散裂反应



Review

## Nuclear fragments in projectile fragmentation reactions

Chun-Wang Ma<sup>a,b,\*</sup>, Hui-Ling Wei<sup>a</sup>, Xing-Quan Liu<sup>c</sup>, Jun Su<sup>d</sup>, Hua Zheng<sup>e</sup>, Wei-Ping Lin<sup>c</sup>, Ying-Xun Zhang<sup>f,g</sup>

<sup>a</sup> School of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

<sup>b</sup> Key Lab. Optoelectronic Sensing Integrated Application of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

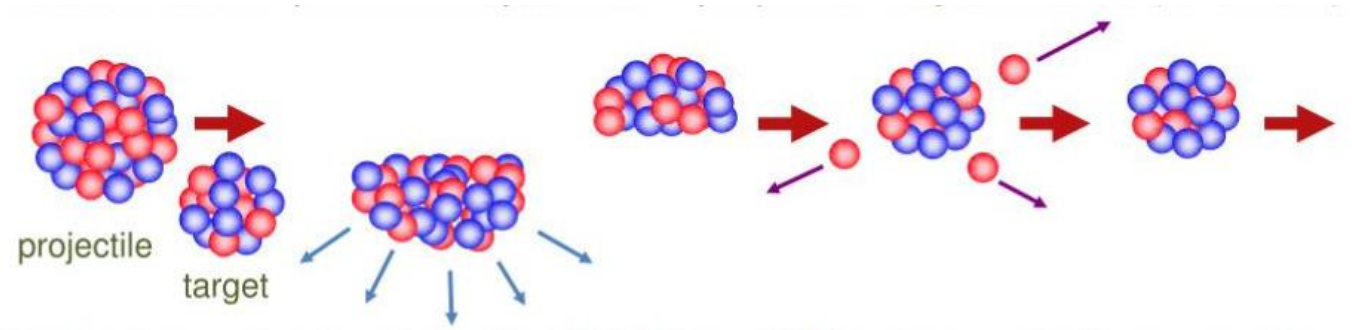
<sup>c</sup> Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China

<sup>d</sup> Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

<sup>e</sup> School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

<sup>f</sup> China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

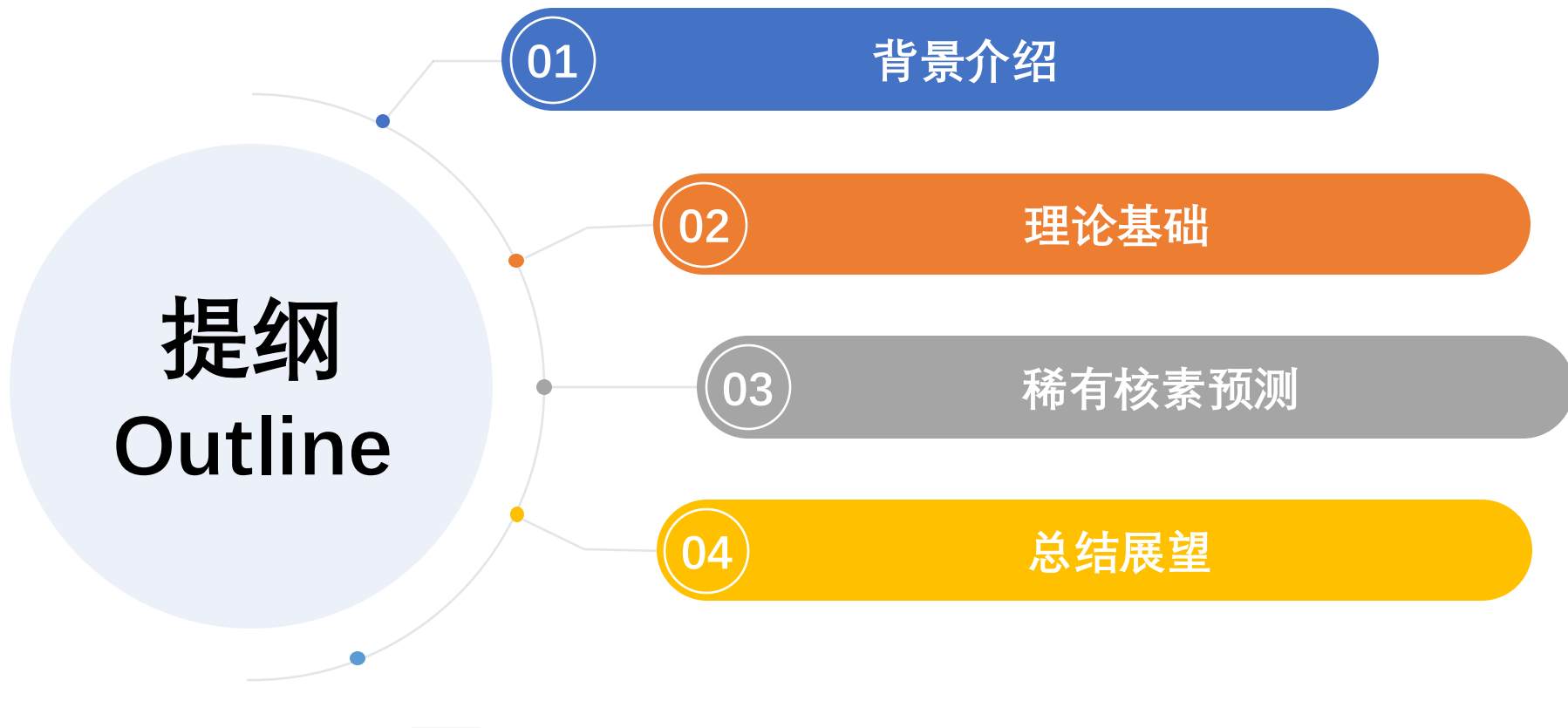
<sup>g</sup> Guangxi Key Lab. Nucl. Phys. Techn., Guangxi Normal University, Guilin 541004, China



(重离子诱发) 炮弹碎裂反应



# 炮弹碎裂反应中的稀有核素产生



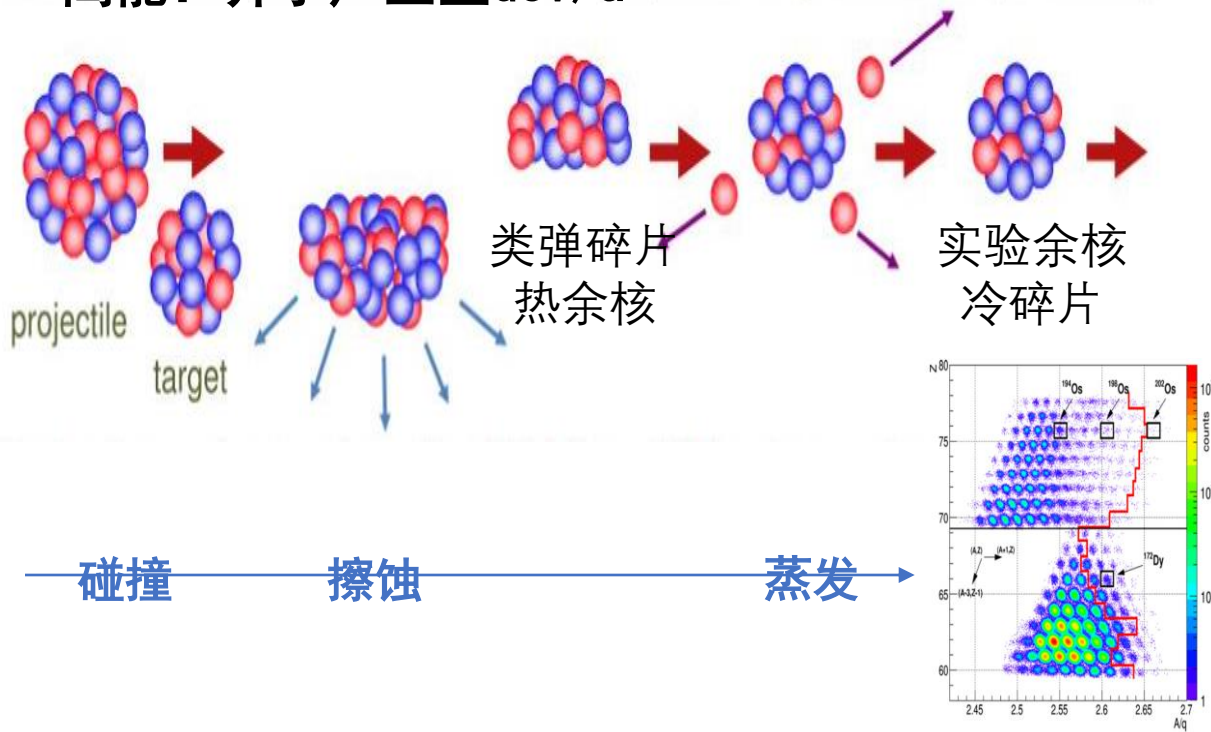


# II. 理论基础

## 炮弹碎裂反应

中能：库伦位垒至介子产生能区

高能：介子产生至GeV/u



## 放射性/稀有核素RIB工厂

**G2**

**第二代RIB装置**

稳定核束炮弹

**G3**

**第三代RIB装置**

稀有核素炮弹

极限（滴线）核产生

更好核素鉴别，长TOF

更低下限 $10^{-15}\text{mb}$

更丰富核素性质



# II. 理论基础

PHYSICAL REVIEW C 75, 064613 (2007)

New isotope  $^{44}\text{Si}$  and systematics of the production cross sections of the most neutron-rich nuclei

O. B. Tarasov,<sup>1,2,\*</sup> T. Baumann,<sup>1</sup> A. M. Amthor,<sup>1,3</sup> D. Bazin,<sup>1</sup> C. M. Folden III,<sup>1</sup> A. Gade,<sup>1,3</sup> T. N. Ginter,<sup>1</sup> M. Hausmann,<sup>1</sup> M. Matos,<sup>1</sup> D. J. Morrissey,<sup>1,4</sup> A. Nettleton,<sup>1,3</sup> M. Portillo,<sup>1</sup> A. Schiller,<sup>1</sup> B. M. Sherrill,<sup>1,3</sup> A. Stolz,<sup>1</sup> and M. Thoennessen<sup>1,3</sup>

参数化公式EPAX不能描述新发现的 $^{44}\text{Si}$ 截面，  
需要新的截面预测方法！

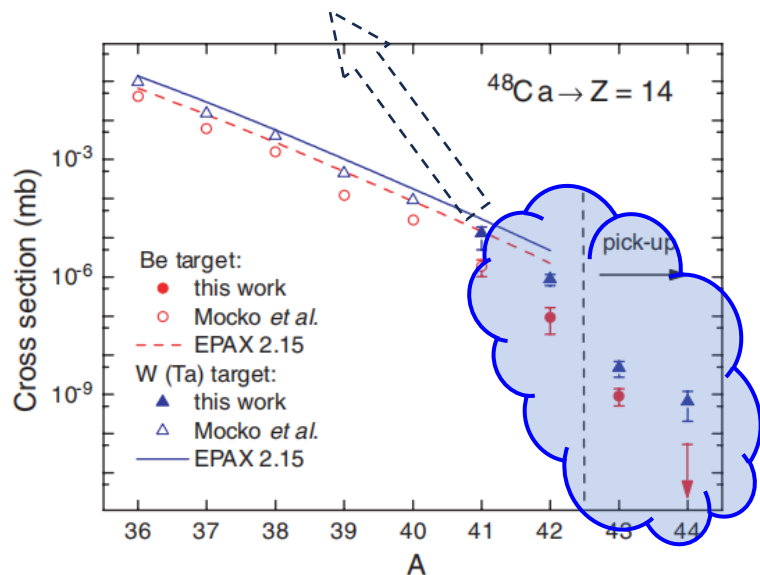


FIG. 3. (Color online) The cross sections for production of neutron-rich silicon nuclei from Ref. [10] and the present work. The data with  $A < 43$  (i.e.,  $N < 28$ ) are compared to the EPAX systematics for limiting fragmentation [17].

两体转移反应中， $Q_{gg}$ (反应能)系统学方法已经被广泛  
用来预测核素的截面

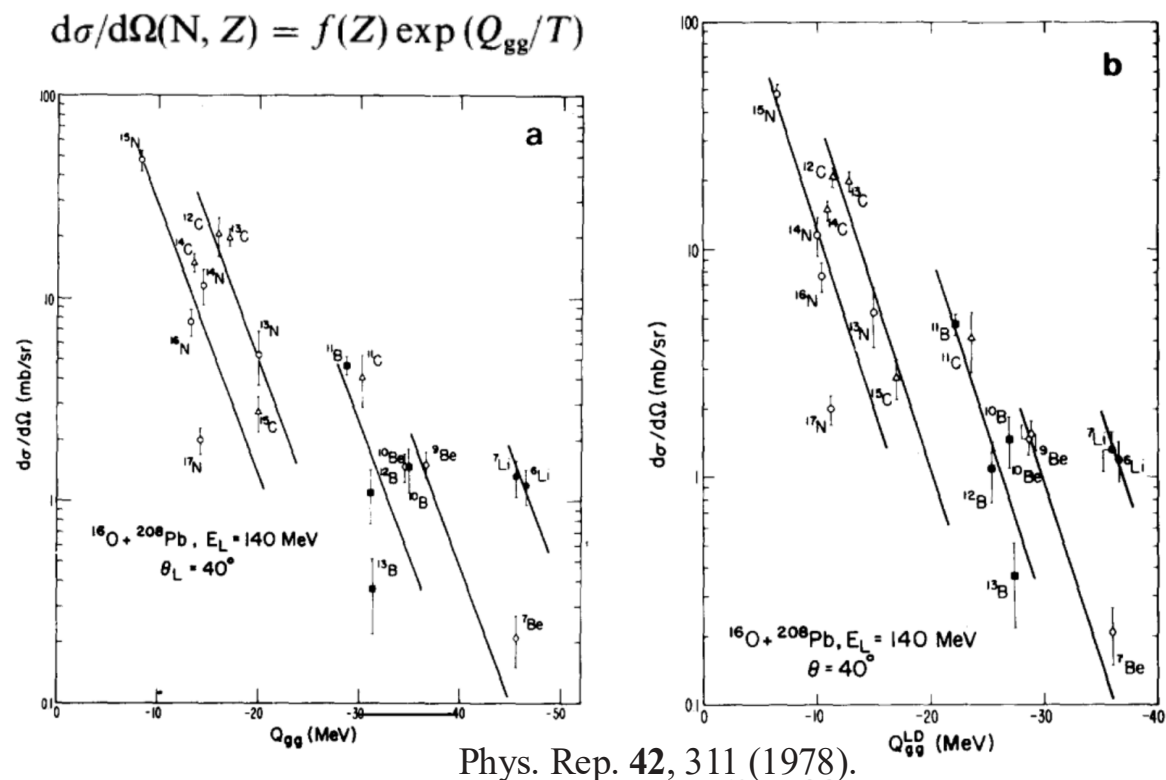


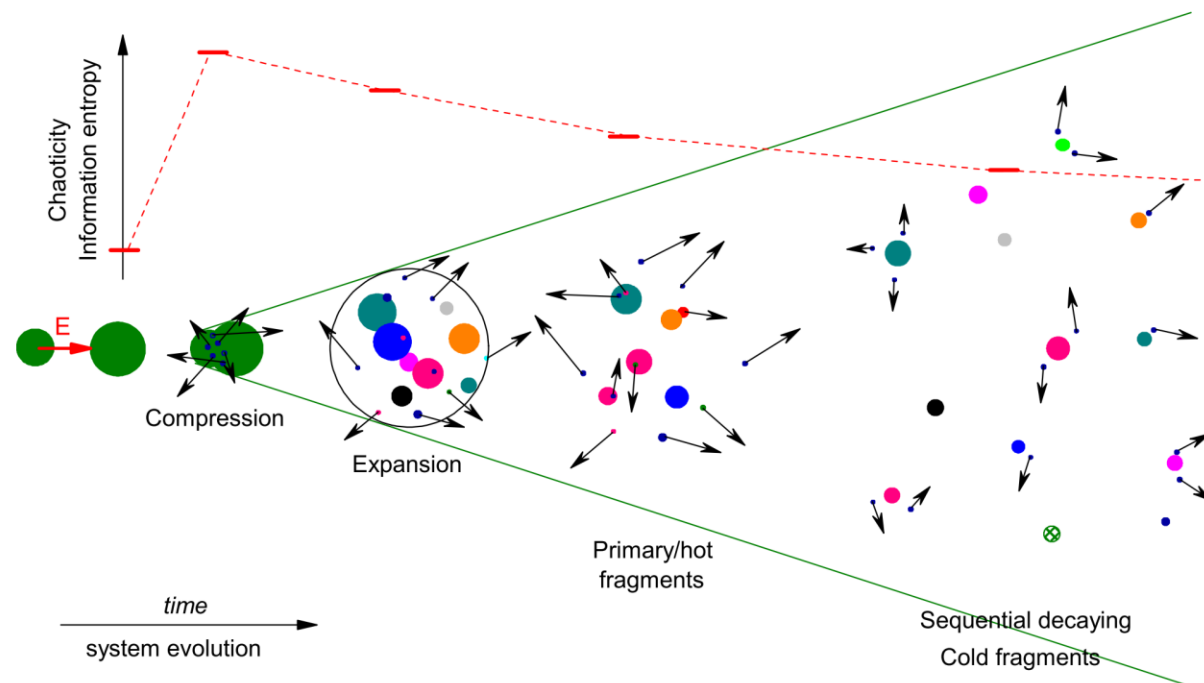
Fig. 19. Isotope-production cross sections observed for reactions induced by  $^{16}\text{O}$  on  $^{208}\text{Pb}$  at the laboratory angle  $\theta_L = 40^\circ$  and 140 MeV incident energy. In (a) the dependence on the ground-state  $Q$ -value,  $Q_{gg}$ , of the corresponding transfer reaction is shown, and in (b) the dependence on the liquid-drop values  $Q_{gg}^{LD}$  (see eq. (36)) is shown. The lines correspond to the parameters  $T = 5.3$  MeV (a) and  $T = 2.7$  MeV (b).



# II. 理论基础

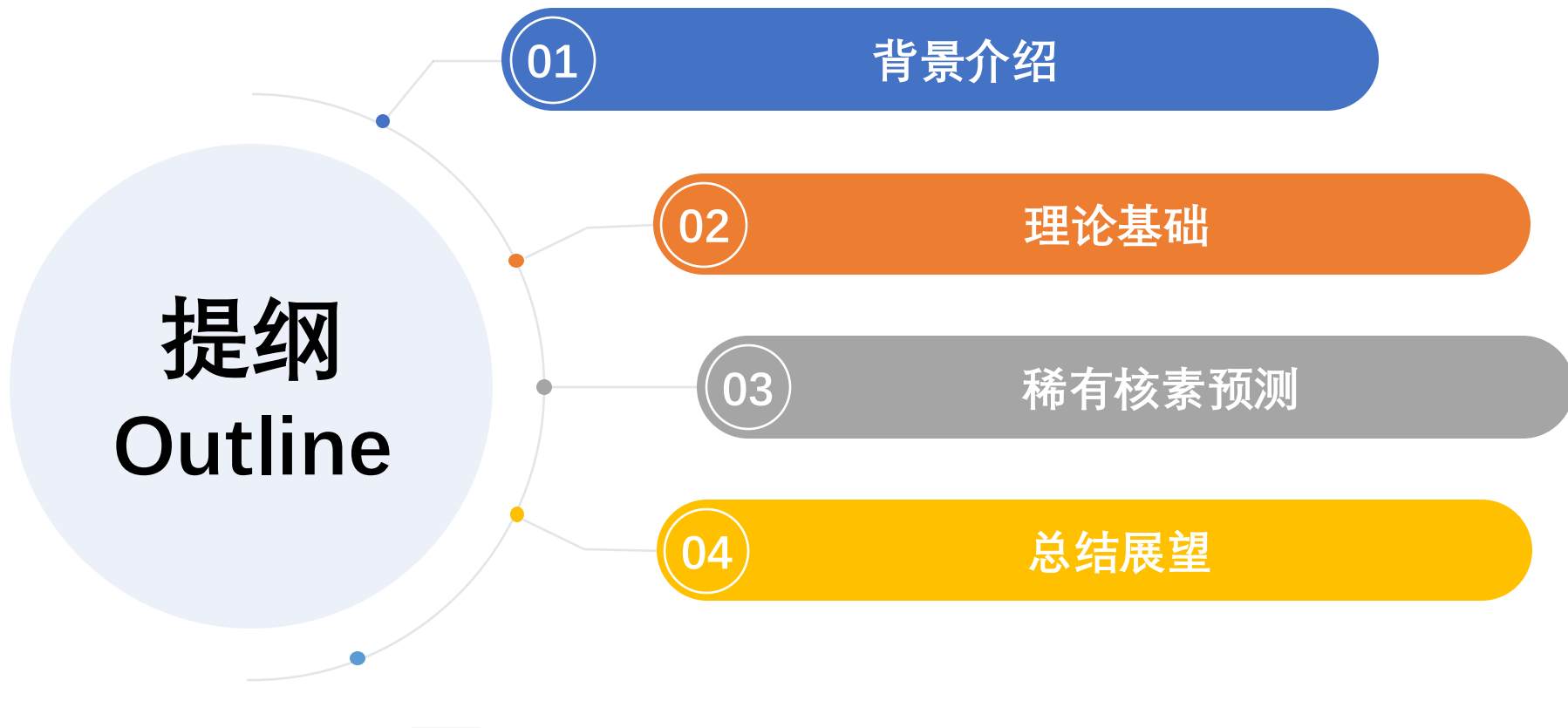
## 新一代RIB工厂炮弹碎裂反应

- 一定入射能量上的剧烈核反应
- 产生大量放射性核素
- 第二代RIB的主要原理之一
  - 稳定核素束流炮弹
- 第三代RIB的主要技术之一
  - 束流增强的稳定核素束流/提高极限核素产额
  - 大不对称度核素束流炮弹|同位旋增强
  - 将核素推向核素图的边界极限
  - 进一步理解极限核素产生的方式





# 炮弹碎裂反应中的稀有核素产生



# III. 稀有核素预测

## BNN方法对散裂反应产物的模型建构

Chinese Physics C Vol. 44, No. 1 (2020) 014104

### Isotopic cross-sections in proton induced spallation reactions based on the Bayesian neural network method\*

Chun-Wang Ma(马春旺)<sup>1,2,1)</sup> Dan Peng(彭丹)<sup>2</sup> Hui-Ling Wei(魏慧玲)<sup>2</sup> Zhong-Ming Niu(牛中明)<sup>3</sup>  
Yu-Ting Wang(王玉廷)<sup>2</sup> R. Wada<sup>4</sup>

Chinese Physics C Vol. 44, No. 12 (2020)

### A Bayesian-neural-network prediction for fragment production in proton induced spallation reaction\*

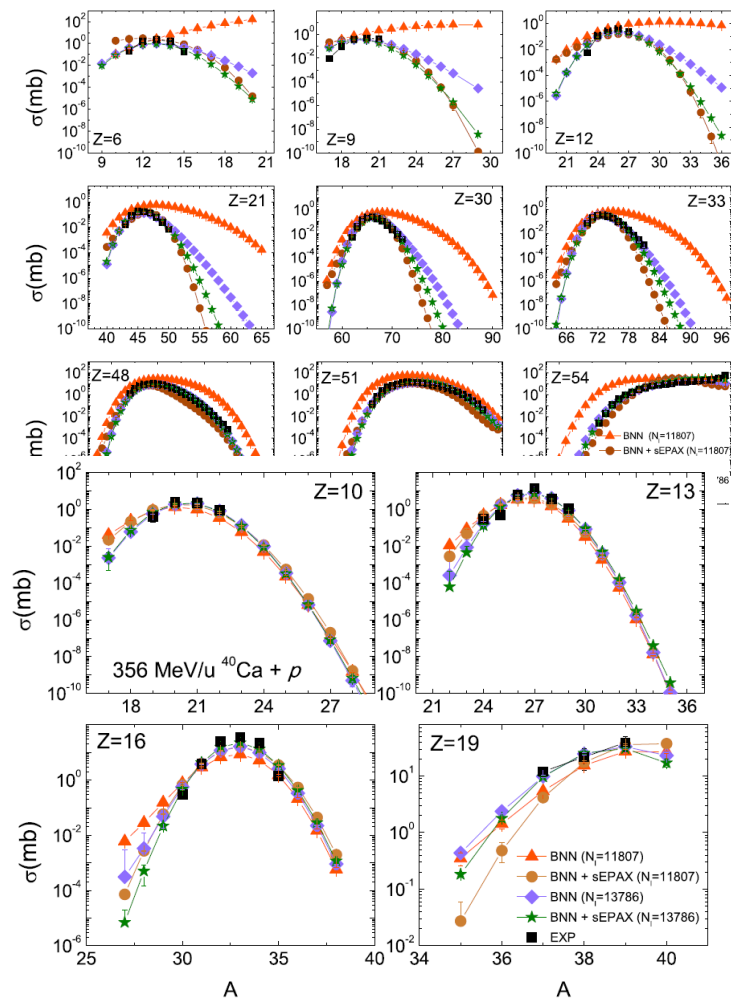
Chun-Wang Ma(马春旺)<sup>1,2,1)</sup> Dan Peng(彭丹)<sup>2</sup> Hui-Ling Wei(魏慧玲)<sup>2</sup> Yu-Ting Wang(王玉廷)<sup>1,2</sup> Jie Pu(普洁)<sup>1,2</sup>





# III. 稀有核素预测

## BNN方法对散裂反应产物的模型建构



IOP Publishing

Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 49 (2022) 085102 (14pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6471/ac7069>

## Bayesian evaluation of residual production cross sections in proton-induced nuclear spallation reactions

Dan Peng<sup>1</sup>, Hui-Ling Wei<sup>1</sup>, Xi-Xi Chen<sup>1</sup>, Xiao-Bao Wei<sup>1</sup>,  
Yu-Ting Wang<sup>1,2</sup>, Jie Pu<sup>1,2</sup>, Kai-Xuan Cheng<sup>1,2</sup>  
and Chun-Wang Ma<sup>1,2,\*</sup> 

- BNN+sEPAX预测模型（13.786K数据集，1(5)-1(32)-1结构）
- 适用Ca-Au元素区域
- 适用能区从几十个MeV到几个GeV质子散裂反应
- 激发曲线——BNN学习中形成自我能量依赖





mass ... 10<sup>1</sup>

# III. 稀有核素预测

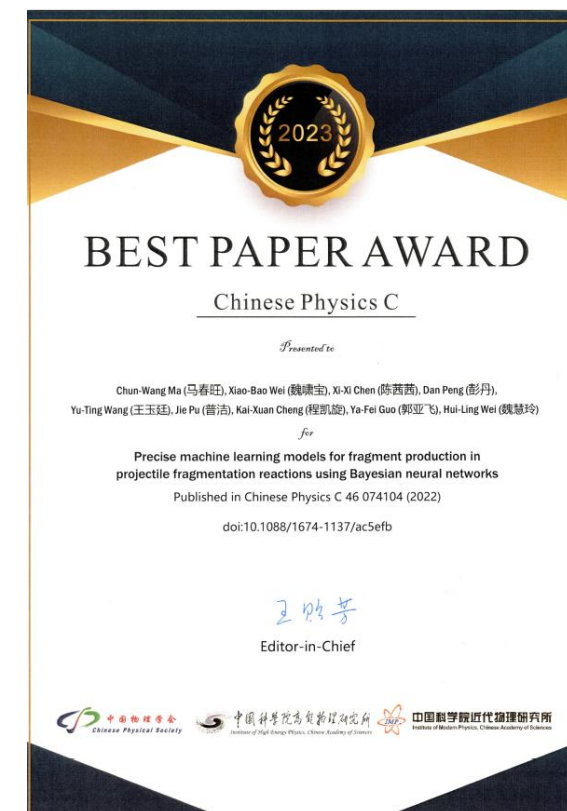
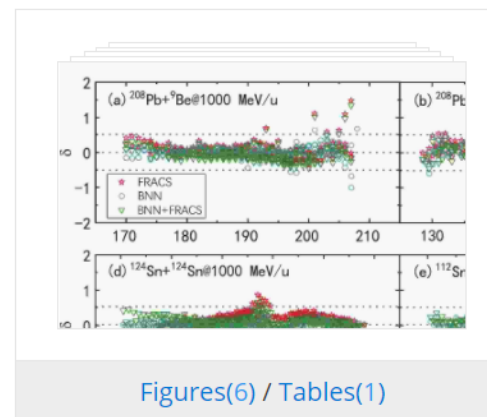
## BNN方法对炮弹碎裂反应产物的模型建构

Chinese Physics C > 2022, Vol. 46 > Issue(7) : 074104 DOI: 10.1088/1674-1137/ac5efb

### Precise machine learning models for fragment production in projectile fragmentation reactions using Bayesian neural networks

Chun-Wang Ma , Xiao-Bao Wei , Xi-Xi Chen , Dan Peng , Yu-Ting Wang , Jie Pu , Kai-Xuan Cheng , Ya-Fei Guo , Hui-Ling Wei 

- 炮弹碎裂反应产物的BNN和BNN+FRACS预测模型
- 6393实验点+53个实验结果
- 适用 $^{40}\text{Ar}-^{208}\text{Pb}$ 常用的炮弹核
- 适用能区从几十个MeV/u到1 GeV/u
- 余核范围: Li-ApZ (不包括拾取反应)



# III. 稀有核素预测

NUCL SCI TECH (2022) 33:155  
<https://doi.org/10.1007/s41365-022-01137-4>



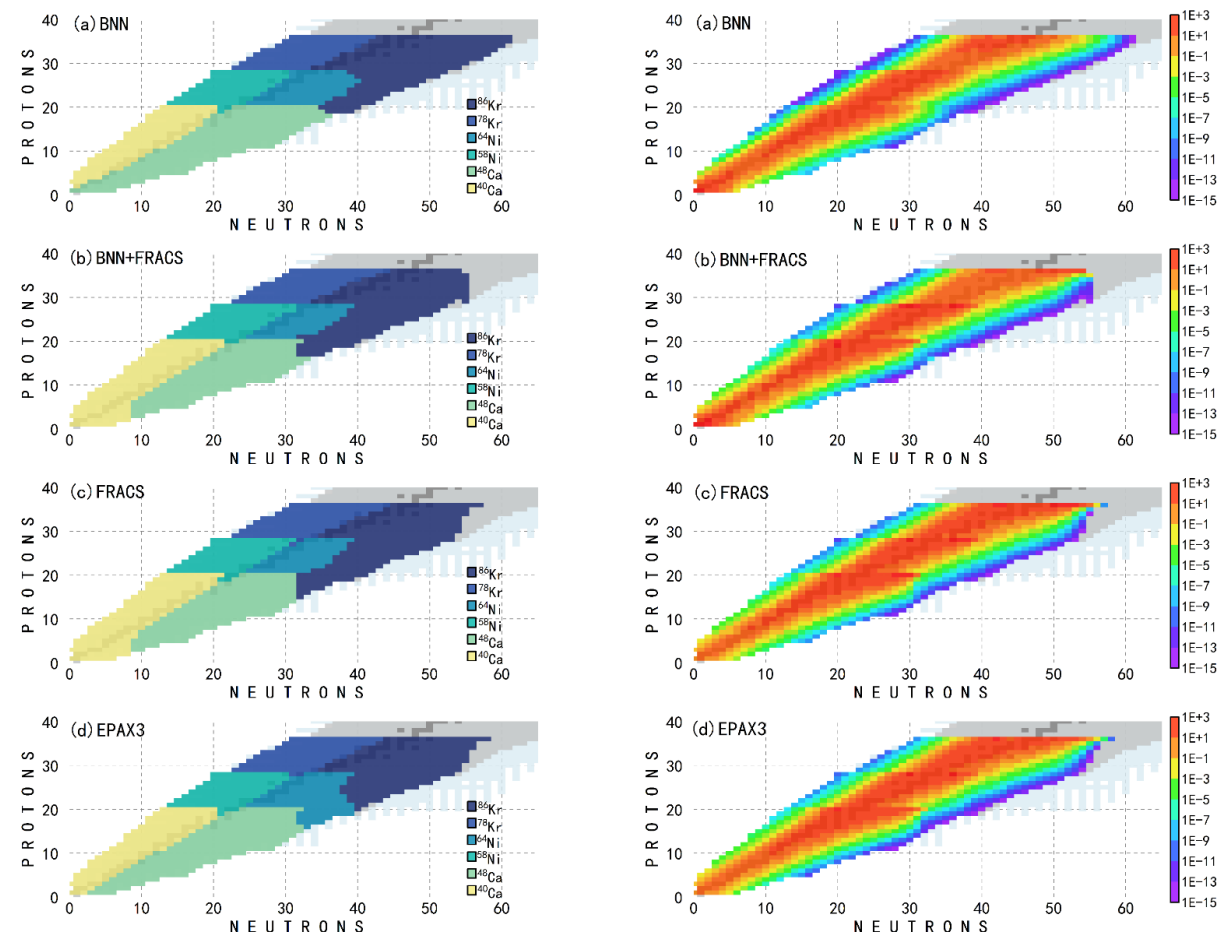
## Multiple-models predictions for drip line nuclides in projectile fragmentation of $^{40,48}\text{Ca}$ , $^{58,64}\text{Ni}$ , and $^{78,86}\text{Kr}$ at 140 MeV/u

Xiao-Bao Wei<sup>1</sup> · Hui-Ling Wei<sup>1</sup> · Yu-Ting Wang<sup>1</sup> · Jie Pu<sup>1</sup> · Kai-Xuan Cheng<sup>1</sup> ·  
Ya-Fei Guo<sup>1</sup> · Chun-Wang Ma<sup>1</sup>

探讨在新一代稀有核素工厂FRIB的极限探测条件下，利用典型稳定核束流炮弹碎裂反应中稀有核素产生截面的多模型预测结果

- 对 $Z \leq 11$ 的元素，按可探测下限 ( $10^{-15}\text{mb}$ )，两侧滴线核素都可被探测
- 对RIKEN发现的钠中子滴线核 $^{39}\text{Na}$ ，其评估实验值与BNN模型的预测结果几乎相同，验证了模型的可靠性和精确预测能力

## Landscapes for predicted fragments with $\sigma > 10^{-15}\text{mb}$



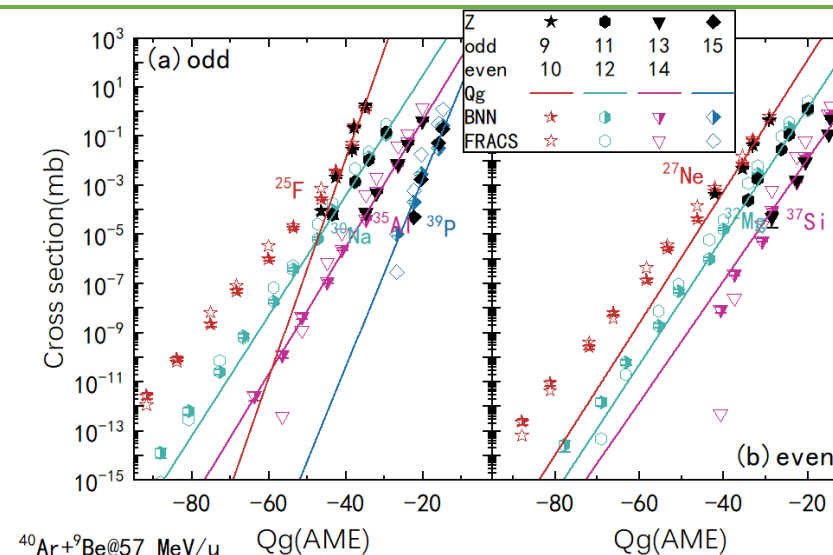
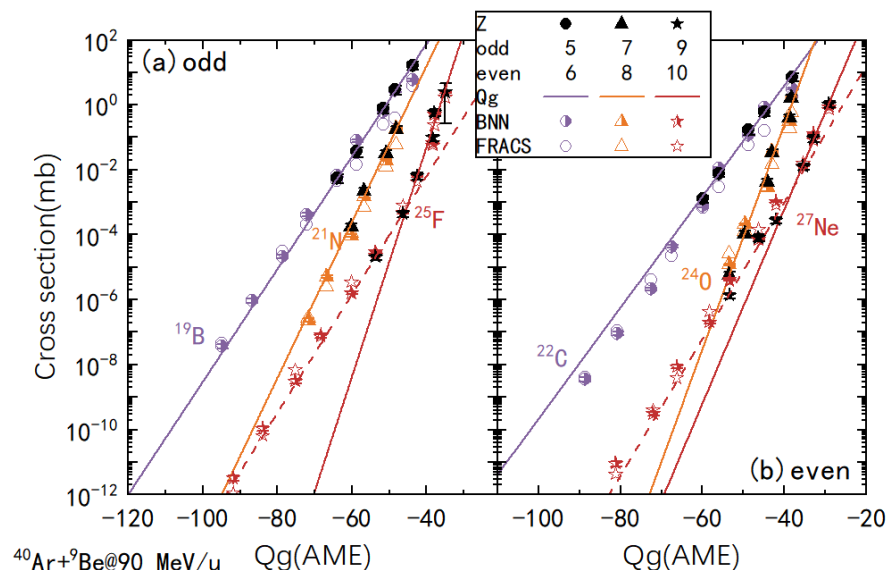
# III. 稀有核素预测

PHYSICAL REVIEW C **111**, 034607 (2025)

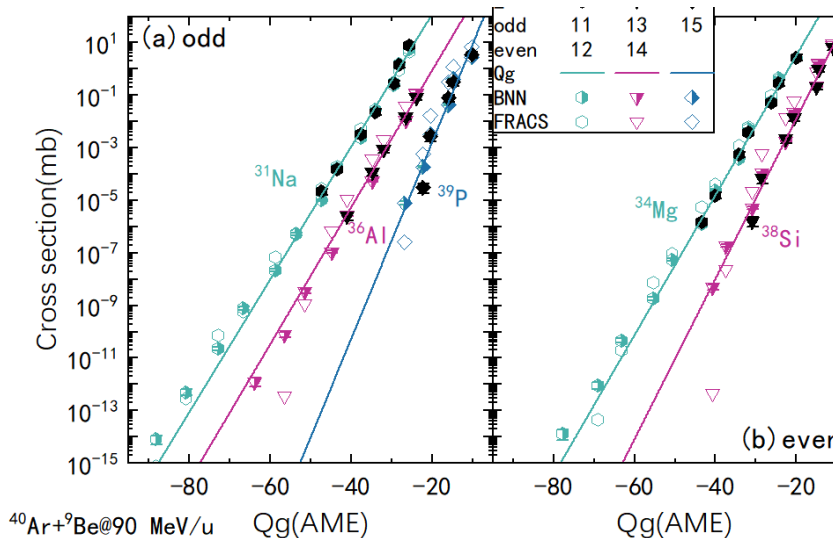
Predictions from several models for the cross sections of light neutron-rich isotopes by  $Q_g$  systematics in  $^{40}\text{Ar}$  projectile-fragmentation reactions

Xiao-Bao Wei<sup>1,2</sup>, Hui-Ling Wei<sup>1,\*</sup>, Chun-Wang Ma<sup>3,†</sup>, Chun-Yuan Qiao<sup>1</sup>, Ya-Fei Guo<sup>1</sup>, Jie Pu<sup>1</sup>, Kai-Xuan Cheng<sup>1</sup>, Yu-Ting Wang<sup>1</sup>, Zeng-Xiang Wang<sup>1,2</sup>, Tian-Ren Zhuo<sup>1</sup>, Dan Peng<sup>4</sup>, Shi-Tao Wang<sup>2,5</sup>, Shu-Wen Tang<sup>2,5</sup>, Yu-Hong Yu<sup>2,5</sup>, Xue-Heng Zhang<sup>2,5</sup>, Ya-Zhou Sun<sup>2</sup>, Shu-Ya Jin<sup>2</sup>, Guo-Li Zhang<sup>2,5</sup>, Xuan Jiang<sup>2,5</sup>, Zhi-Yao Li<sup>2,5</sup>, Ying-Feng Xu<sup>2</sup>, Fen-Hua Lu<sup>2</sup> and Tuo-Qi Liu<sup>2</sup>

利用 $Q_g$ 系统学, FRACS, BNN多模型对 $^{40}\text{Ar}$ 炮弹核产生轻质量核区滴线核素截面预测, 在进行截面预测结果交叉检验的同时, 也发现了有趣的壳效应现象



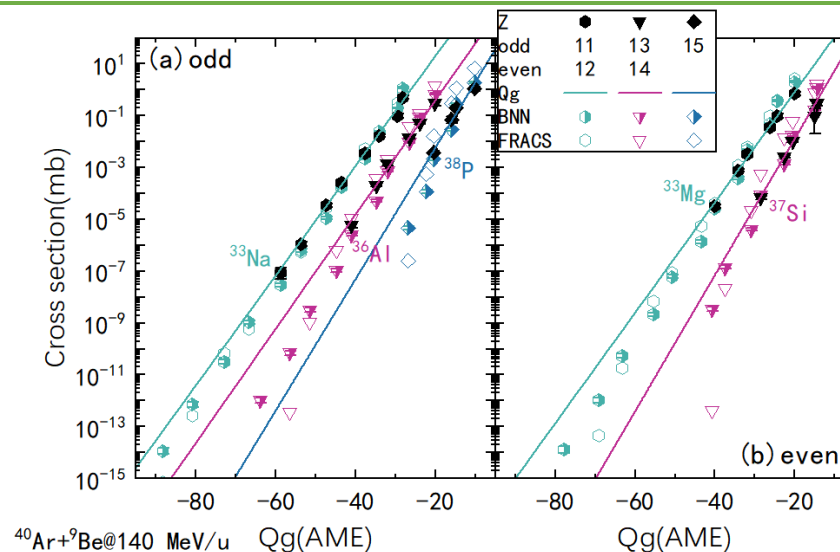
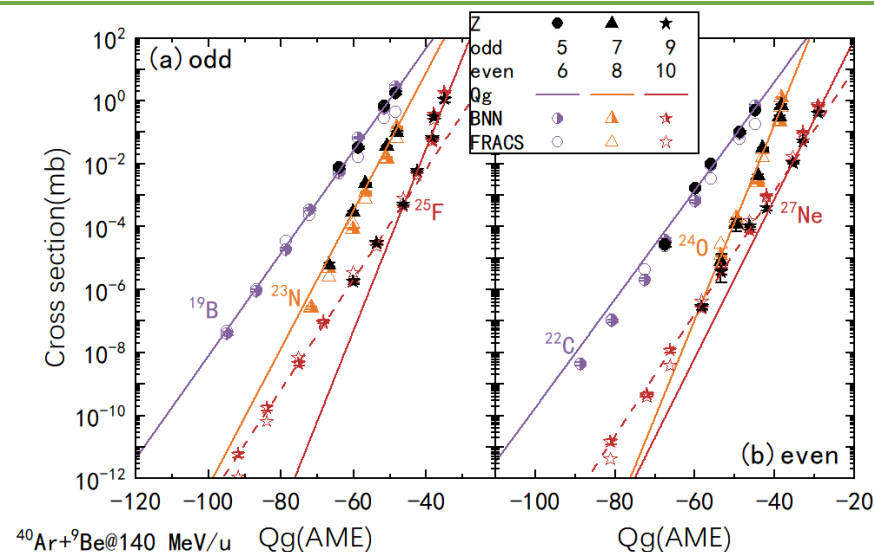
@IMP



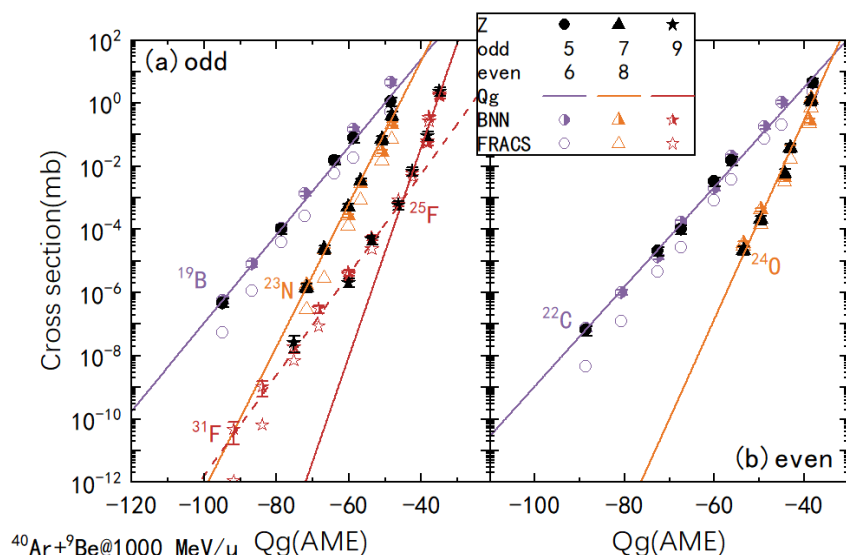
@RIKEN



# III. 稀有核素预测



@NSCL



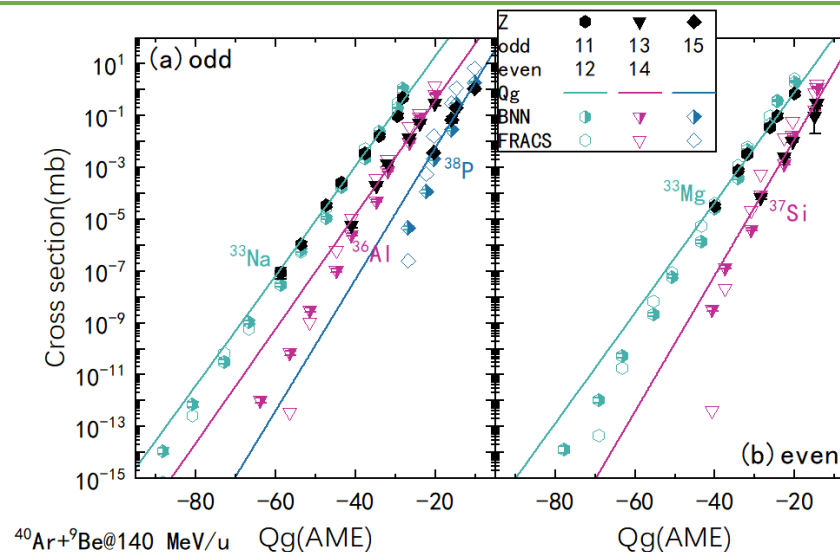
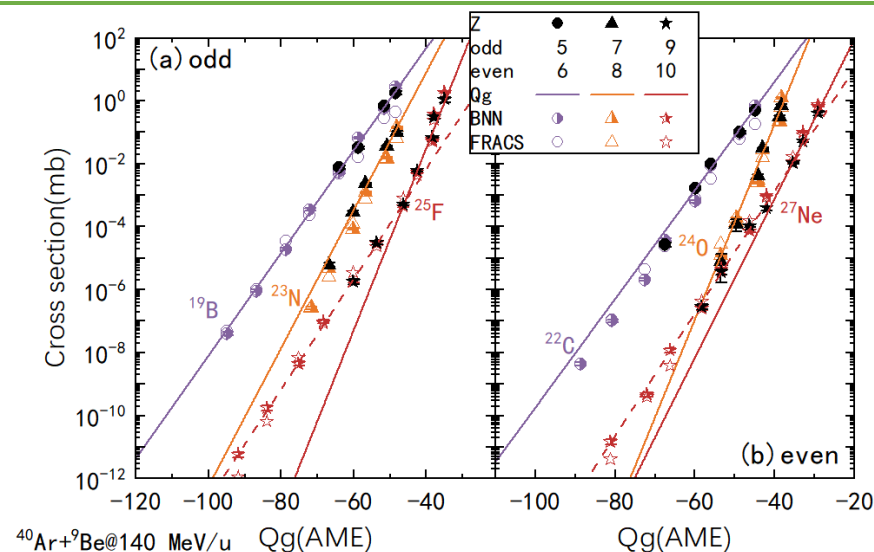
@GSI

■ 氟与氖同位素链中在跨越 $N=16$ 处截面有明显的增强，为 $N=16$ 新幻数提供了新的实验证据。

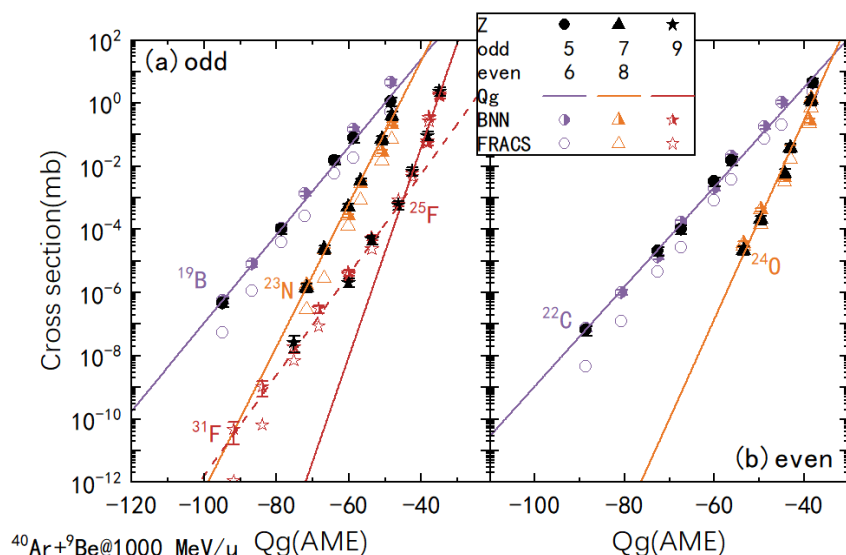
■ 然而， $N=14$ 壳在碳，氮，氧同位素链的影响，在 $^{40}\text{Ar}$ 体系碎裂测量结果中，并没得到很好的体现。

新幻数 $N=14, 16$ 的演化以及存在的范围，仍需实验上进一步对其探究！

# III. 稀有核素预测



@NSCL



@GSI

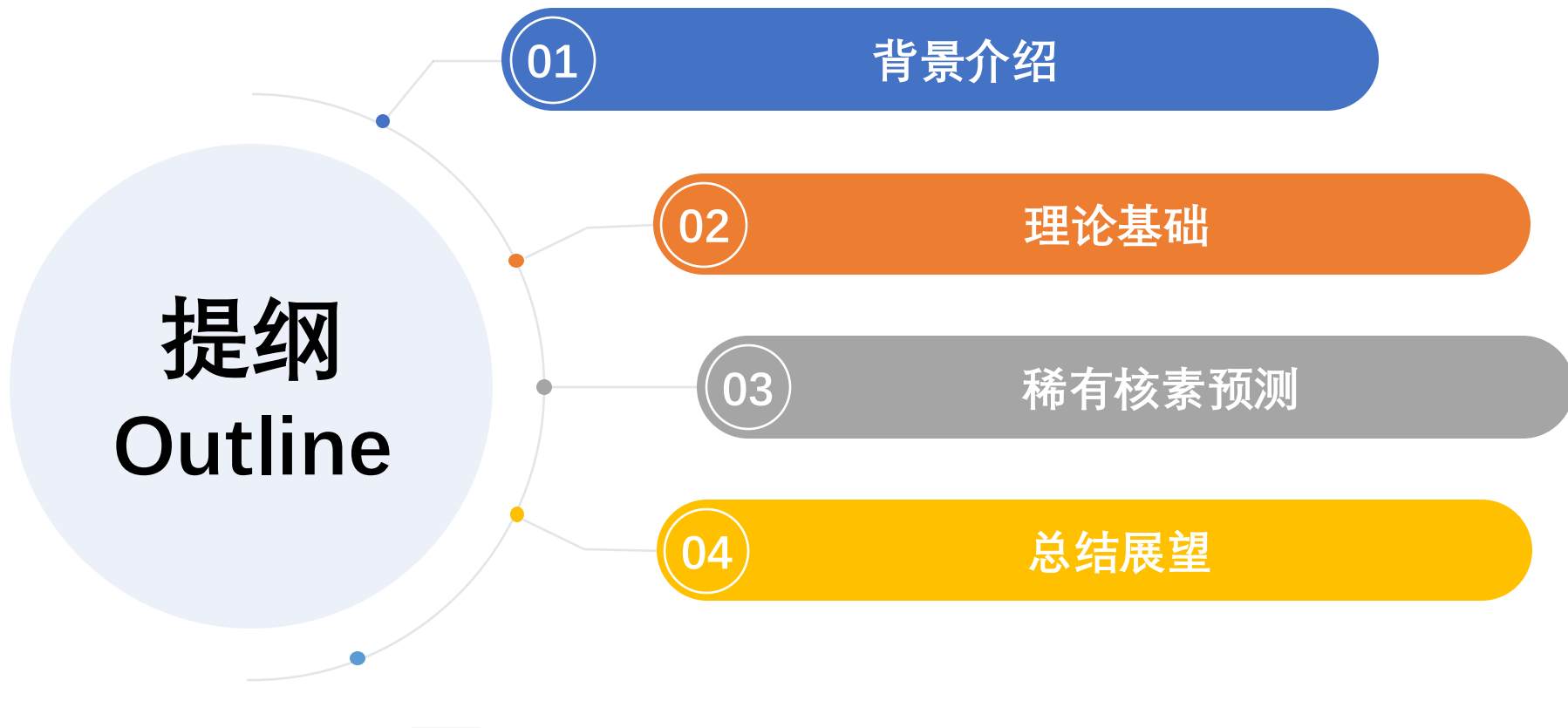
■ 氟与氖同位素链中在跨越 $N=16$ 处截面有明显的增强，为 $N=16$ 新幻数提供了新的实验证据。

■ 然而， $N=14$ 壳在碳，氮，氧同位素链的影响，在 $^{40}\text{Ar}$ 体系碎裂测量结果中，并没得到很好的体现。

新幻数 $N=14, 16$ 的演化以及存在的范围，仍需实验上进一步对其探究！



# 炮弹碎裂反应中的稀有核素产生



## IV. 总结展望

---

- 基于BNN方法，构建了散裂反应和炮弹碎裂反应中稀有核素产生截面的高精度预测模型
- 利用经验的Qg系统学验证了BNN模型预测结果的可靠性
- 为利用HIAF等装置发现新核素提供了可靠预测理论方法





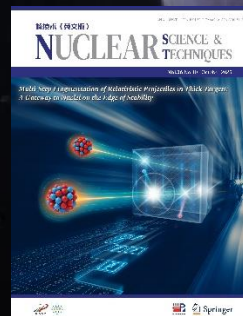
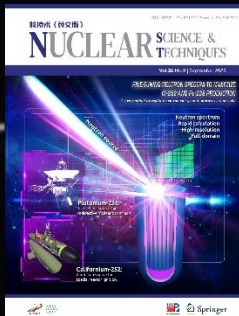
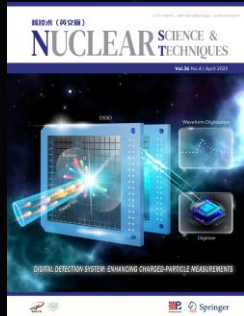
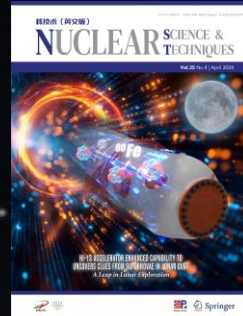
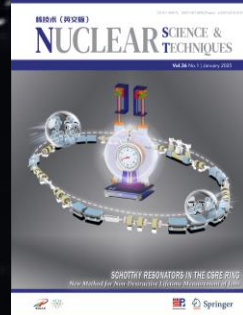
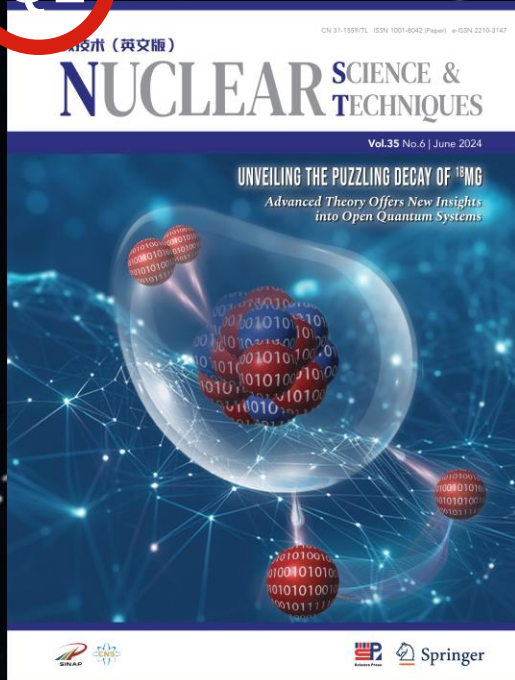
# Nuclear Science & Techniques (NST)

JCI2024=1.55

IF 2024 = 3.8

中科院分区表  
物理与天体物理  
1区 Top

Q1



1990年创刊, “Nuclear Science & Technology”学科第一本中国主办的英文期刊, 创刊主编杨福家院士。

## Scope

- Nuclear Physics
- Particle Accelerators
- Nuclear Energy Science
- Nuclear Electronics
- Nuclear Chemistry

## Indexed in

SCI-E, Ei Compendex, Scopus, Inspire, Inspec, CSCD

Editor-in-Chief



Professor: Yu-Gang Ma



核技术NST 公众号



核技术NST 视频号

NST@sinap.ac.cn  
<http://www.nst.sinap.ac.cn>





《中国核学会核领域期刊分级  
目录(2024)》T1级  
《科技期刊世界影响力指数  
(WJCI) 报告》Q2区



# 核技术 Nuclear Techniques

主办: 中国科学院上海应用物理研究所、中国核学会 出版: 科学出版社

主编: 马余刚 院士

中国核学会会刊

《核技术》旨在展示最新的核科学技术发展动向和国内外最新核科技成果，及时反映我国核科学技术的现状和学术水平。1978年创刊，月刊，1988年被确定为中国核学会中文会刊。出版领域为同步辐射技术及应用，加速器技术、射线技术及应用，核化学、放射化学、放射性药物和核医学，核电子学与仪器，核物理、交叉学科研究，核能科学与工程等。

多次入选“百杰期刊”和“中国期刊方阵”，  
多次获得上海市和中国科学院期刊审读优秀奖

2015-2016年

荣获中国科协“精品科技期刊工程”项目  
获“期刊数字影响力100强”称号

2018年

获中国科协“中文科技期刊精品建设计划  
——学术创新引领项目”支持

2019年

获“中国科技期刊卓越行动计划  
——梯队期刊”项目支持

2017年

获“第4届中国精品科技期刊”(F5000)  
获上海市新闻出版专项资金资助

2023年

被EI数据库收录  
获科学出版社“最美期刊封面奖”

2020、2022-2024年

入选第二十七届北京国  
际图书博览会(BIBF)  
“中国精品期刊展”

2022年

被DOAJ数据库收录

2024年

入选中国科技期刊提能拓展计划

2025年

ISSN 0253-3219  
CN31-1342/TL

E-mail: LHB@sinap.ac.cn

电话: 021-39194977

网址: www.hjs.sinap.ac.cn



入选中国科技期刊提能拓展计划

2024年

入选中国科技期刊提能拓展计划

北大核心学科排名第1



# 散裂反应和炮弹碎裂反应中稀有核素产生的高精度机器学习模型构建

马春旺 ([machunwang@126.com](mailto:machunwang@126.com))

河南省科学院核科学与技术研究所