

面向高能质子束实验终端的
散裂反应机制研究

苏军

反角白光中子实验装置用户研讨会，2026



01

背景与研究动机

新型核技术的数据需求
反应机制复杂性
现有模型的局限

02

IQMD+GEMINI模型

多体动力学基础
输运—退激耦合
模型特色与联合检验

03

结果与讨论

反应机制研究
核数据预测
核数据检验平台

需求 → 模型发展 → 机制理解与数据应用

01

PART

背景与研究动机

从新型核技术的数据需求，聚焦中高能反应机制和模型精度问题

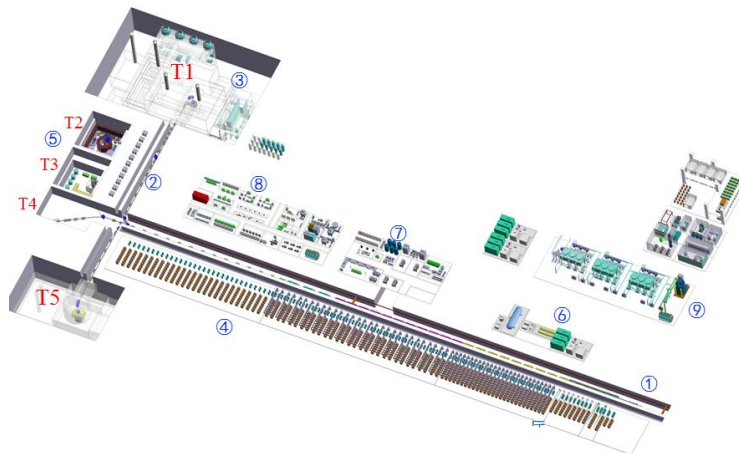
数据需求

机制复杂

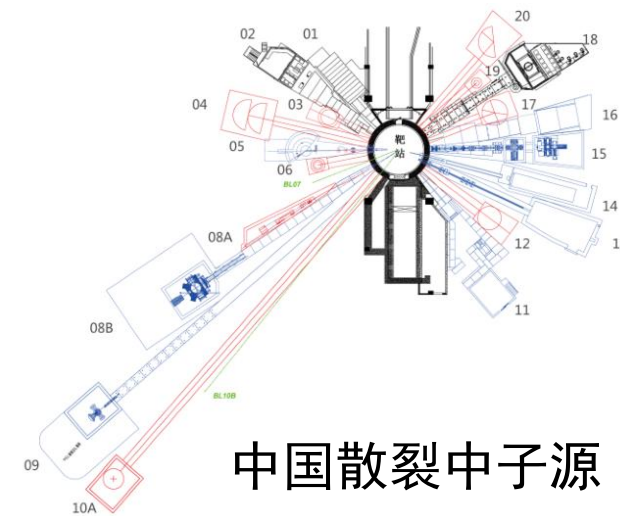
模型瓶颈



- CiADS与核废料嬗变
- 核药生产
- 聚变材料



加速器驱动嬗变研究装置



中国散裂中子源

传统核反应数据覆盖0.025eV-20MeV



GeV能区中子/质子反应数据新需求

- ◆ 近代物理研究所基于HIRFL-CSR加速器，ADS关键材料中子学实验测量
- ◆ CiADS：超导直线束流将于2026年验收，次临界反应堆建设周期稍长
- ◆ 散裂中子源科学中心白光中子源、高能质子束实验终端

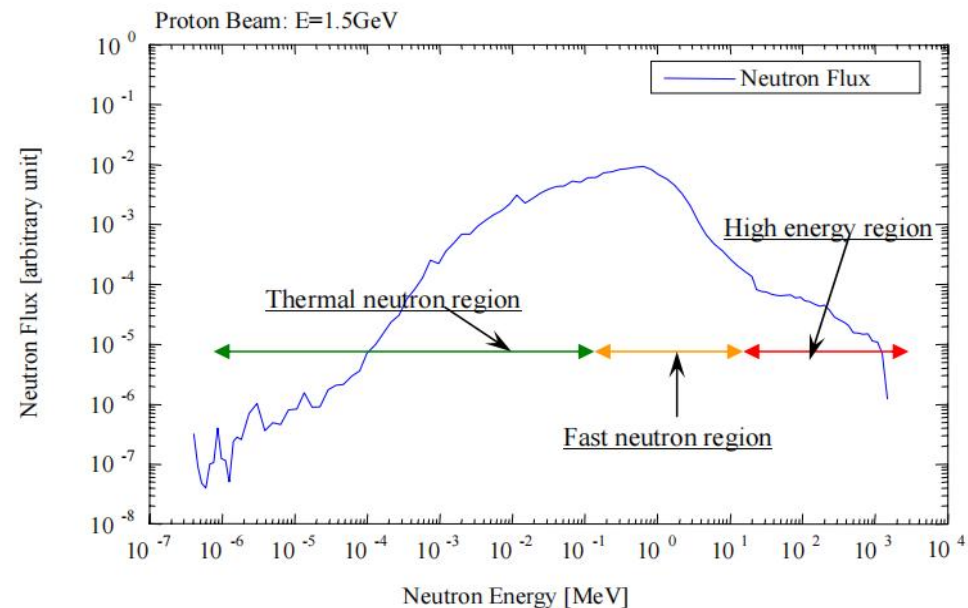
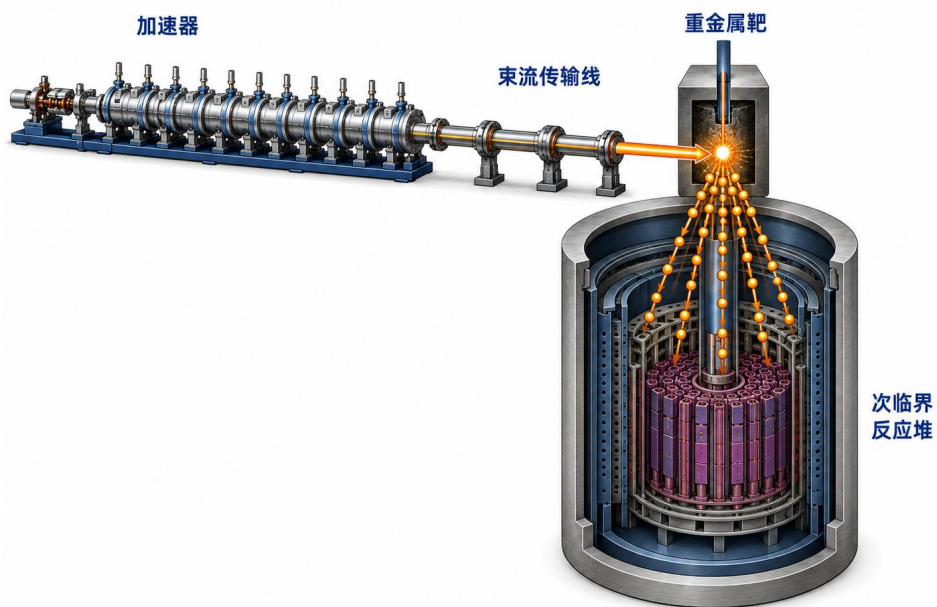


Fig. Typical spectrum in the ADS

- 散裂反应提供外源中子，堆-靶耦合难
- 中子能谱宽，高能中子评价数据库缺乏
- 增殖与嬗变两大功能，需要计算的核素多

- 中子双微分截面→外源中子
- 裂变截面、裂变产额→嬗变效率、燃耗深度
- 带电粒子谱→结构材料活化与损伤



keV

200 MeV

GeV

统计/现象学集成模型

TALYS · EMPIRE

典型范围：keV—约200 MeV

光学模型 + 直接反应
预平衡 + Hauser-Feshbach
裂变与统计退激

优势：适合系统评价与数据库生成
局限：高能快过程并非显式动力学

核内级联模型

INCL++ · Bertini

典型范围：数十 MeV—GeV

静态势阱中的粒子级联
逐次核子—核子碰撞
再耦合蒸发/裂变模型

优势：散裂靶与粒子输运应用成熟
局限：平均场及结构演化较简化

输运/分子动力学模型

JQMD · IQMD · BUU

典型范围：数十 MeV—GeV/u

平均场 + 两体碰撞
Pauli阻塞与多体动力学
逐事件产生预碎片

优势：统一描述N+A和A+A反应
局限：计算量与模型依赖较强

共同瓶颈：动力学终止与退激切换、预碎片激发能/角动量、退激模型及结构—反应耦合



从热中子到高能中子反应道

中子核反应

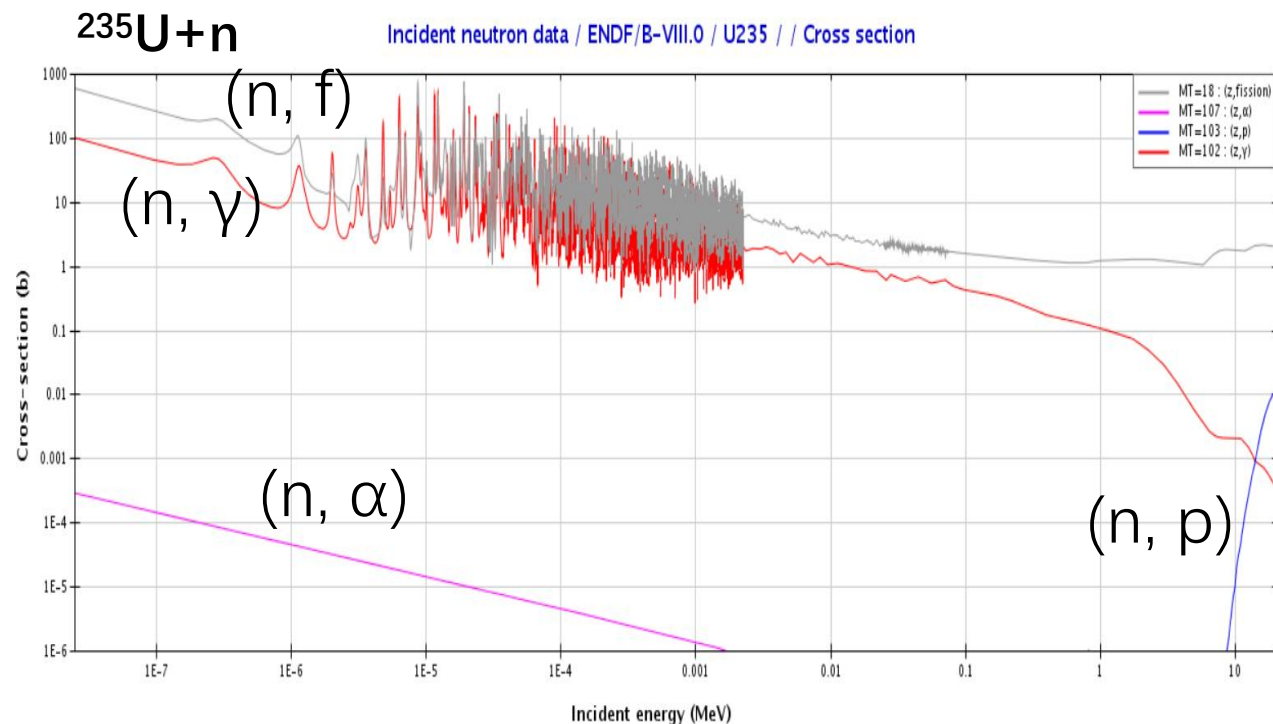
热中子, 约0.025eV
散射、裂变、辐射俘获

慢中子, eV-keV区
裂变、辐射俘获的共振行为

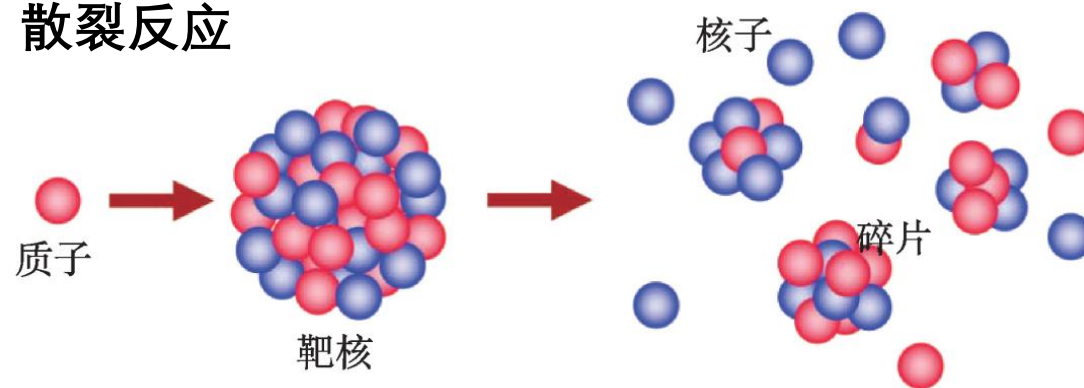
快中子, MeV区
阈值反应道

高能中子, 20MeV-GeV
散裂反应

高能质子核反应: 散裂反应



散裂反应



02

PART

IQMD+GEMINI模型

以逐事件输运描述快过程，并与统计退激模型连接

多体动力学

预碎片

统计退激



N体薛定谔方程

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_{1...N}^{(k)}(t)\rangle = H_{1...N} |\psi_{1...N}^{(k)}(t)\rangle$$

=

BBGKY 方程

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} F_{1...s} - [H_{1...s}, F_{1...s}] = \text{Tr}_{s+1} \sum_{i=1}^s [V_{i,s+1}, F_{1...s+1}]$$

- ① 波函数为高斯波包直积
- ② Wigner半经典近似
- ③ 平均场+核子核子散射

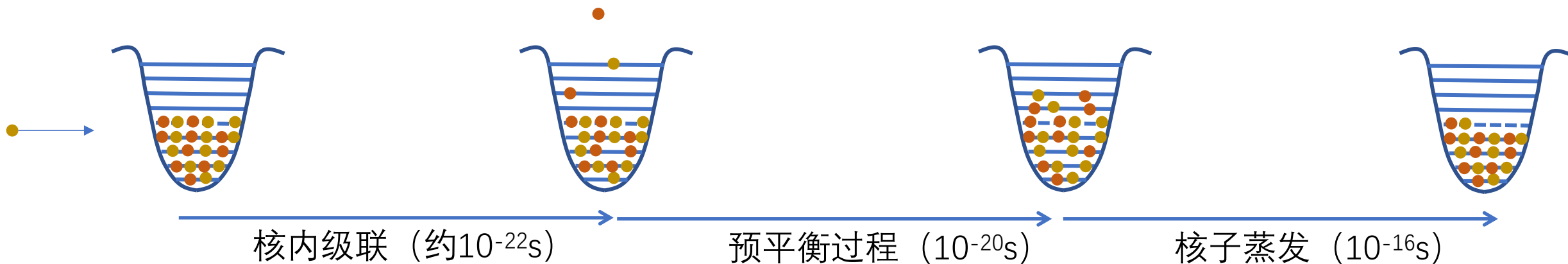
IQMD 模型

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_i &= \frac{\partial \langle H \rangle}{\partial \mathbf{p}_i} \\ \dot{\mathbf{p}}_i &= \frac{\partial \langle H \rangle}{\partial \mathbf{r}_i} \end{aligned}$$

- ① 忽略三体关联
- ② 二级Born 近似
- ③ HF平均场近似
- ④ T 矩阵近似
- ⑤ 量子弛豫时间近似

TDHF+QRx 模型

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [\hat{h}, \hat{\rho}] - \frac{1}{\tau_{\text{relax}}} (\hat{\rho} - \hat{\rho}_{\text{eq}}[\rho, j, E_{\text{tot}}])$$



IQMD
半经典近似
结构与反应耦合未解决

GEMINI

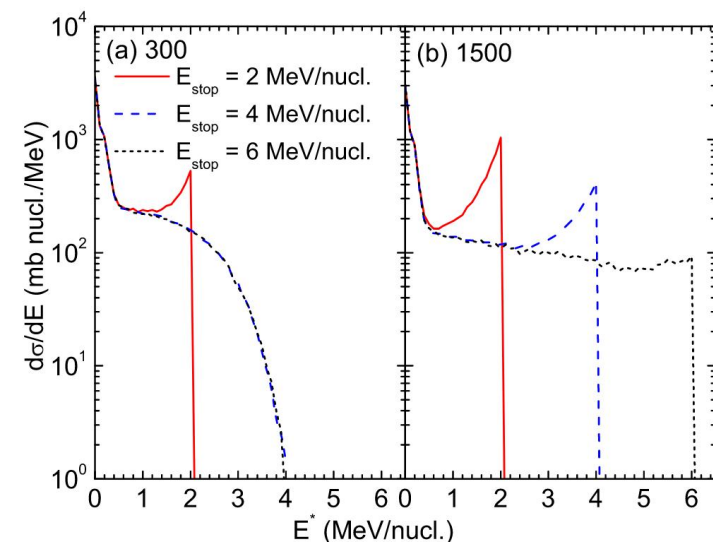
未来

TDHF+QRx
量子图像
结构与反应耦合

未来



- 最小生成树 (MST) 算法动态跟踪碎片的形成
 - 最大预碎片激发能 $E < E_{\text{stop}}$ 则关闭动力学模型，输出预碎片
- 不同于传统方法：所有模拟事件都使用同一模拟事件

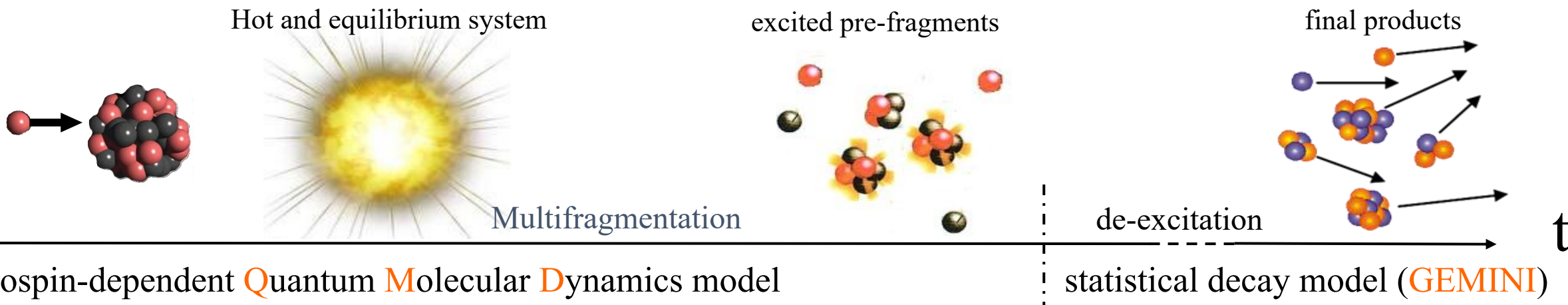


J. Su *et al.*, PRC **100**, 014602 (2019)

Describe the emission of IMFs dynamically
(PSDC is significant)

Switching time depends on the excitation energy.
lower than $E_{\text{stop}} \sim 3 \text{ MeV/u}$

Secondary decay of IMFs statistically





运输模型评估项目(Transport Model Evaluation Project)

PRC93(2016)044609,被引117次, 2023年9月数据

PRC97(2018)034625,被引90次

PRC100(2019)044617,被引52次

PPNP125 (2022)103962,被引32次

Transport model comparison studies of intermediate-energy heavy-ion collisions

✓ **国际地位：** 输运模型评估项目 (TMEP)五次基准计算，四十多家单位，上百位输运模型专家参加

✓ **模型权威：**多篇输运理论综述文章均评述。Prog. Part. Nucl. Phys. 105 (2019) 139; Prog. Part. Nucl. Phys. 106 (2019) 312; Frontiers of Physics 15 (2020) 54301

✓ **领域贡献：** 评估论文与综述论文
[Prog. Part. Nucl. Phys. 121 (2021)
103911; 125 (2022) 103962]。

✓ **学术交流:** 为实验组提供理论支持

QMD Type	Code	Correspondents	Energy Range [AGeV]	Relativity	Comparisons
AMD	A.	Ono	0.01–0.3	non-rel	2
AMD+JAM	N.	Ikeno, A. Ono	0.01–0.3	non-rel+rel	6
BQMD/IQMD	A.	Le Fèvre, J. Aichelin, C. Hartnack, R. Kumar	0.05–2	rel	1,2,6
CoMD	M.	Papa	0.01–0.3	non-rel	2,4
ImQMD	Y.X.	Zhang, N. Wang, Z.X. Li	0.02–0.4	rel	2,3,4
IQMD-BNU	J.	Su, F.S. Zhang	0.05–2	rel	2,3,4,5,6
IQMD-SINAP	G.Q.	Zhang	0.05–2	rel	2
JAM	A.	Ono, N. Ikeno, Y. Nara, A. Ohnishi	1–158	rel	4,5
JQMD 2.0	T.	Ogawa, K. Niita, S. Hashimoto, T. Sato	0.01–3	rel	4,5
LQMD(IQMD-IMP)	Z.Q.	Feng, H.G. Cheng	0.01–10	rel	2,3,4,5
TuQMD/dcQMD	D.	Cozma	0.1–2	rel	1,2,3,4,5,6
UrQMD	Y. J.	Wang, Q. F. Li, Y. X. Zhang	0.05–200	rel	1,2,3,4,6

03

PART

结果与讨论

从反应机制理解到核数据预测，再延伸到核数据检验

机制研究

数据预测

数据检验

3.1

PART

反应机制研究

退激过程如何改变电荷改变与单核子移除等实验观测量？

电荷改变

单核子移除

反应机制

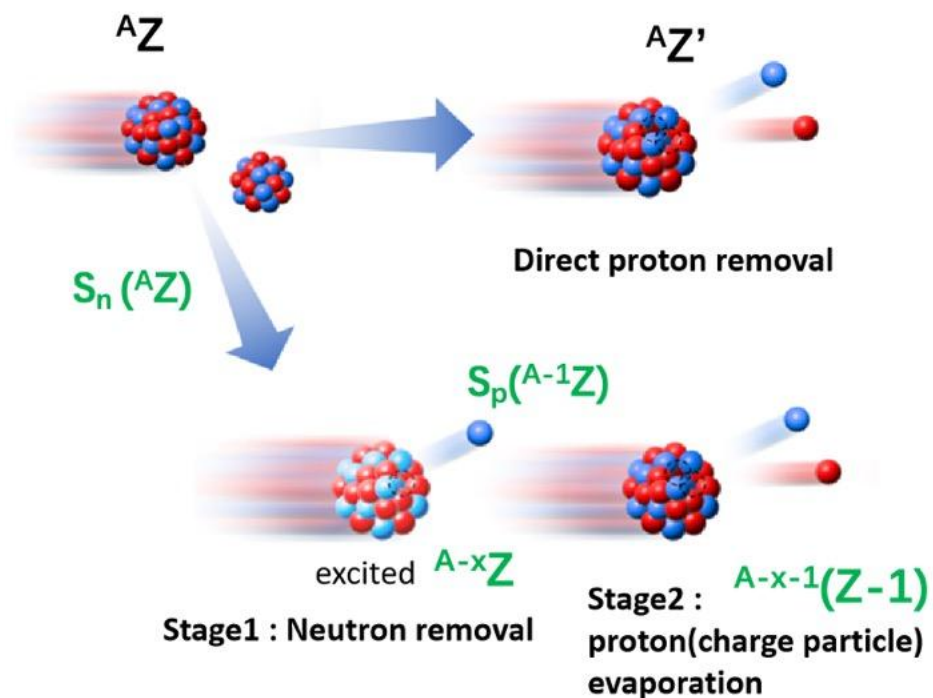
→ 输运模型发展
IQMD+GEMINI

→ 高能中子/质
子反应核数据



退激过程可使电荷改变截面发生约10%的系统变化

- 两个反应道对电荷改变有贡献
- 直接质子移除“摸”到了电荷范围
- 中子移除+质子蒸发导致“摸”得不准
- 扣除后者，使电荷半径提取更准确



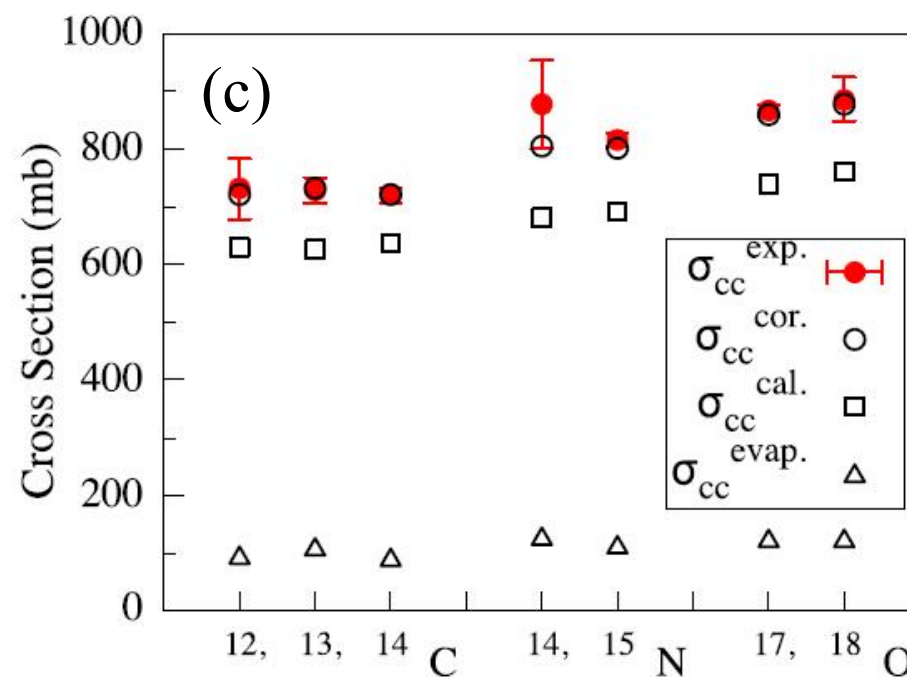
Evaporation effect

$$\sigma_{cc} = 2\pi \int b[1 - T^P(b)]\mathcal{E}(E)db,$$

$$T^P(b) = \exp\left[-\left(\sigma_{pp} \int \rho_p^{\text{targ}} \rho_p^{\text{proj}} + \sigma_{np} \int \rho_n^{\text{targ}} \rho_p^{\text{proj}}\right)\right]$$

M. Tanaka, et al., PRC 106 (2022) 014617

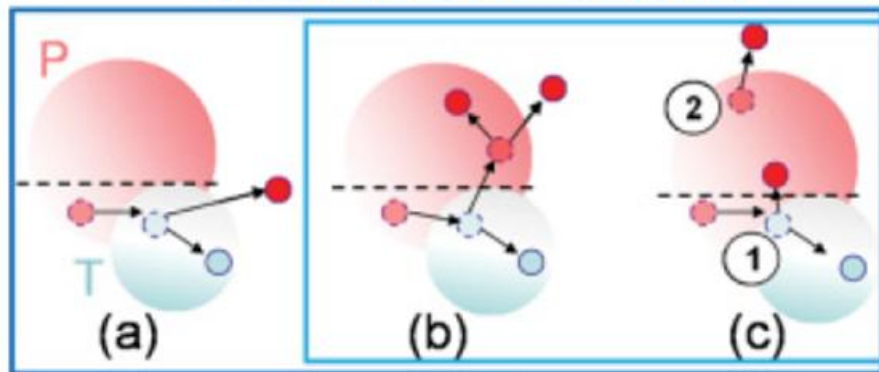
J.W. Zhao, et al., PLB 847 (2023) 138269



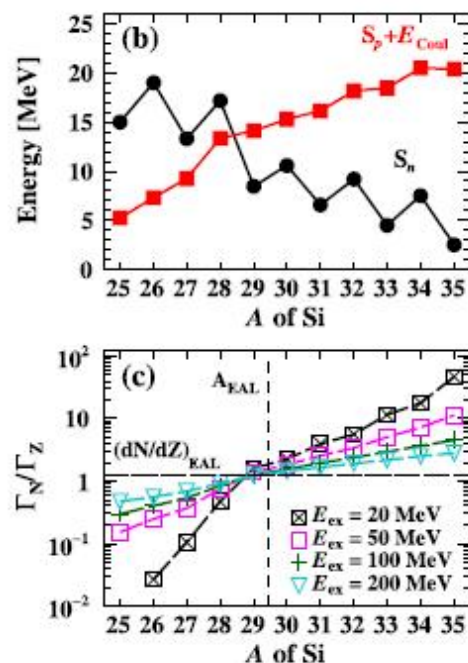
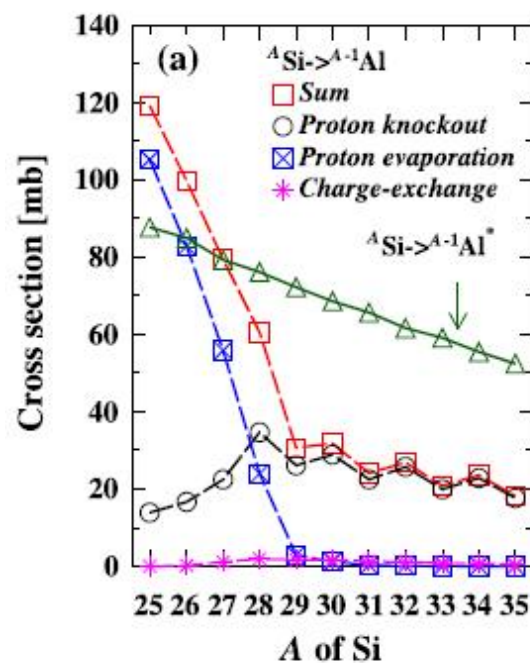


单核子移除需要考虑非核心冻结的反应图像

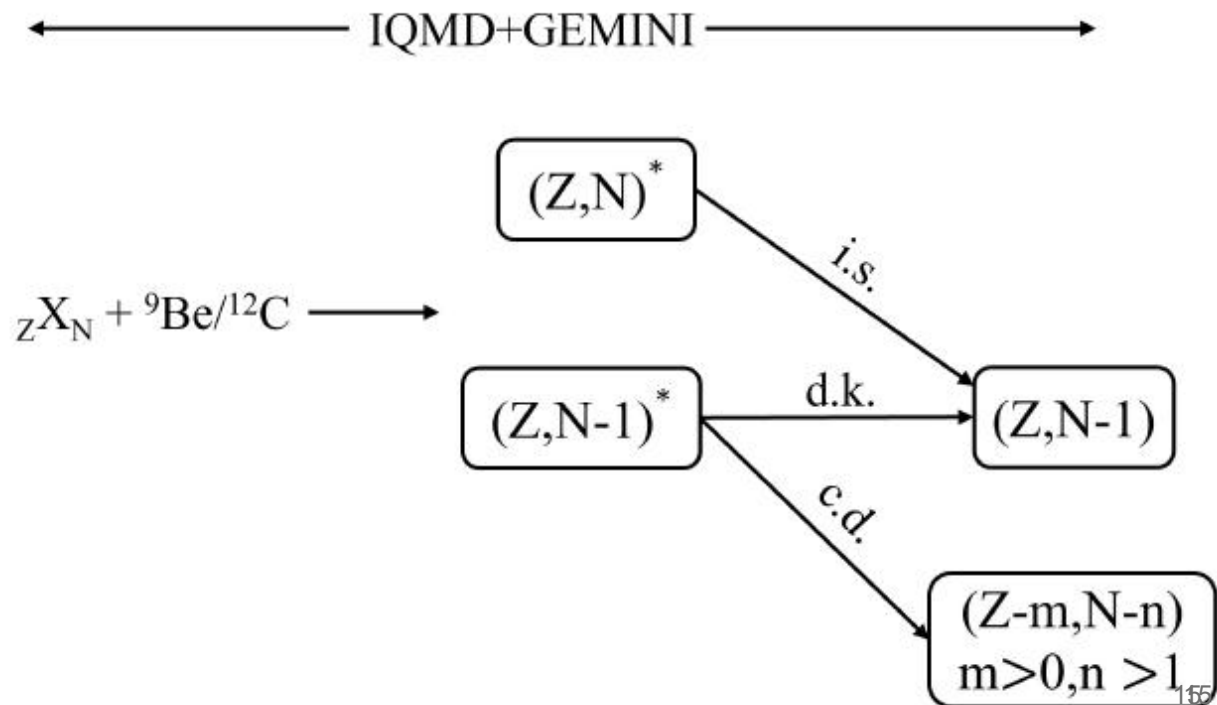
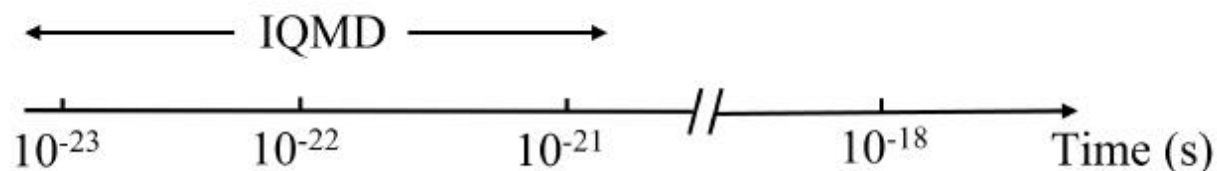
one-nucleon removal

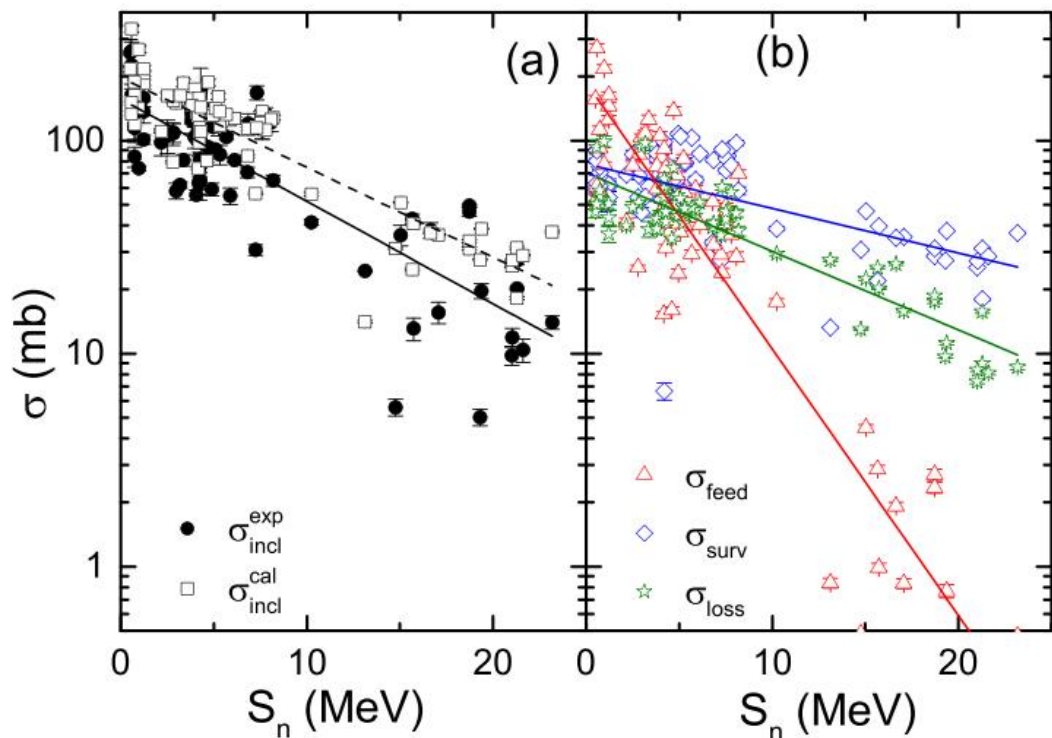


Eikonal近似: 核芯内部相对运动“冻结”?



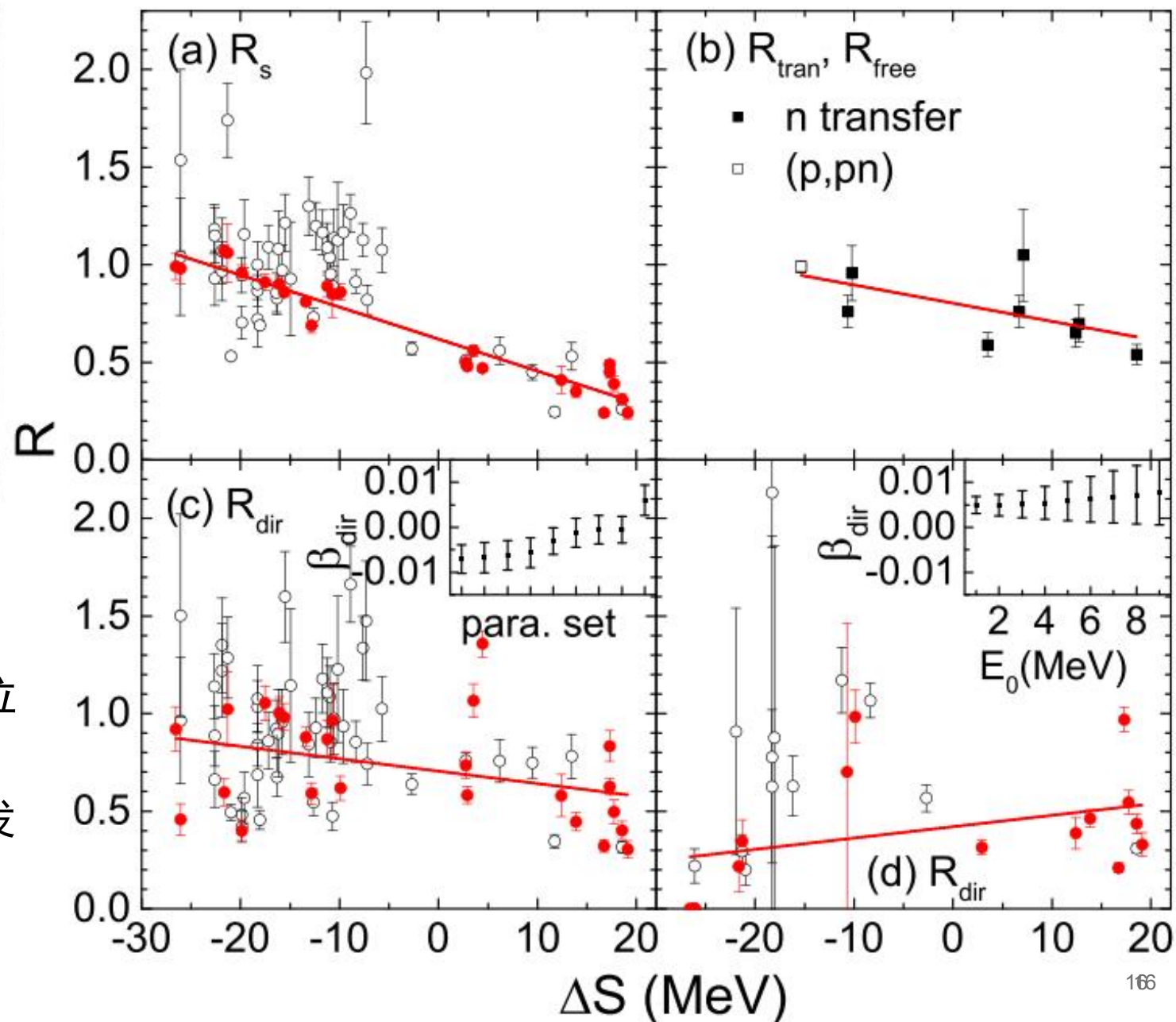
- 传统方法: 谱因子+Eikonal模型
- 直接反应的假设: 核心冻结
- 提出并证实了非核心冻结的核反应图像
[Li, Sun, Su, PLB 859 (2024) 139143]





- 单核子移除反应提取的淬熄因子异常同位旋依赖
- 73组单中子移除截面的系统学证明，蒸发损失与蒸发馈入同样重要

[Xiao, Su, Sun, submitting]



3.2

PART

核数据预测

用多观测量联合检验约束模型，并向缺数据区域外推

总截面

残余核产额

双微分谱



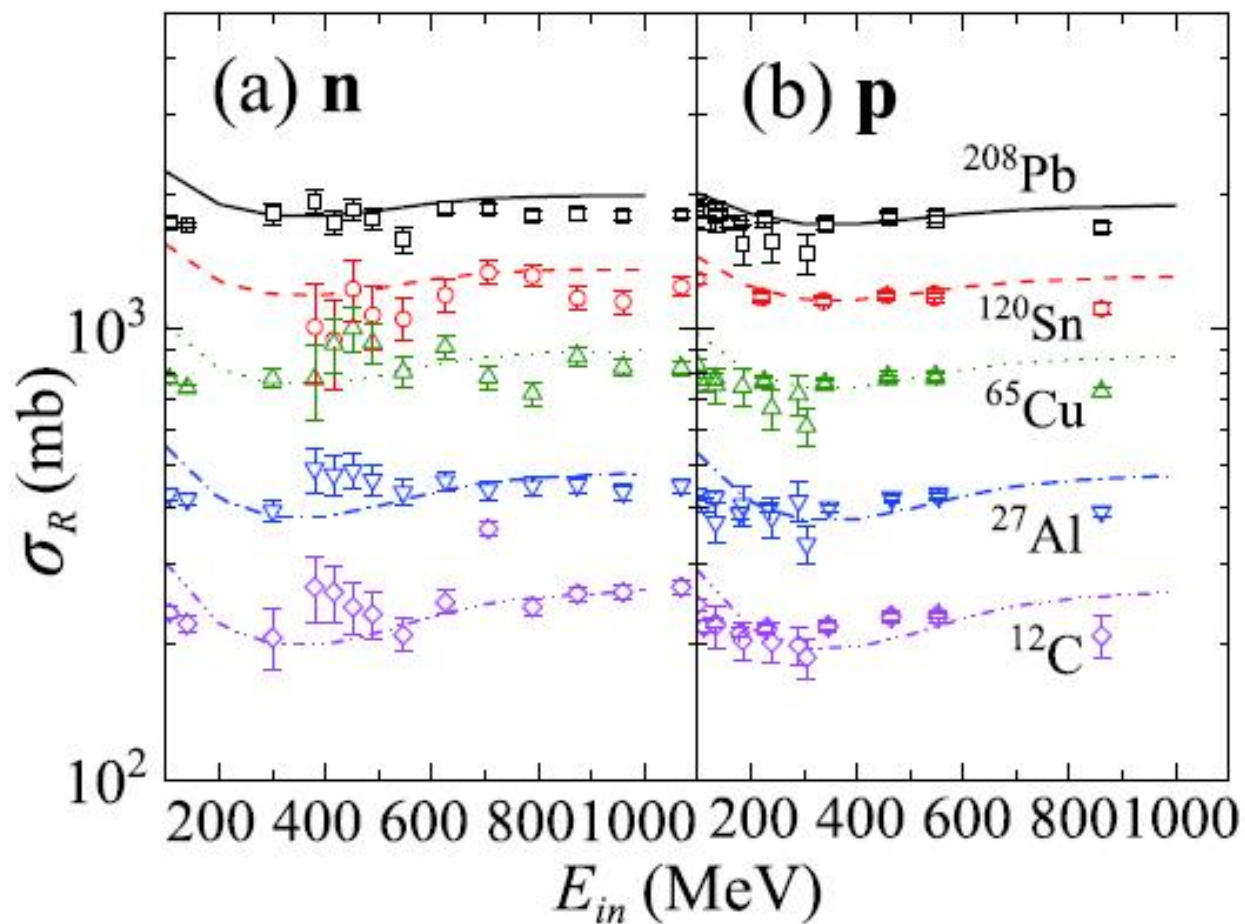
观测量	主要约束	代表性覆盖
总反应截面	核子—核子碰撞与介质效应	n/p + C—Pb; 100—1000 MeV
电荷/质量/同位素分布	预碎片形成、激发能与退激过程	Ne—U; 多种入射粒子与能量
中子双微分截面	快速动力学发射与蒸发发射	0.75°—150°; 0.5—1000 MeV
电荷改变与单核子移除	反应机制与后期核结构重构	RIBLL及中能碎裂反应数据

截面 + 产额 + 能谱 + 动量分布 → 联合检验，降低模型外推的不确定性



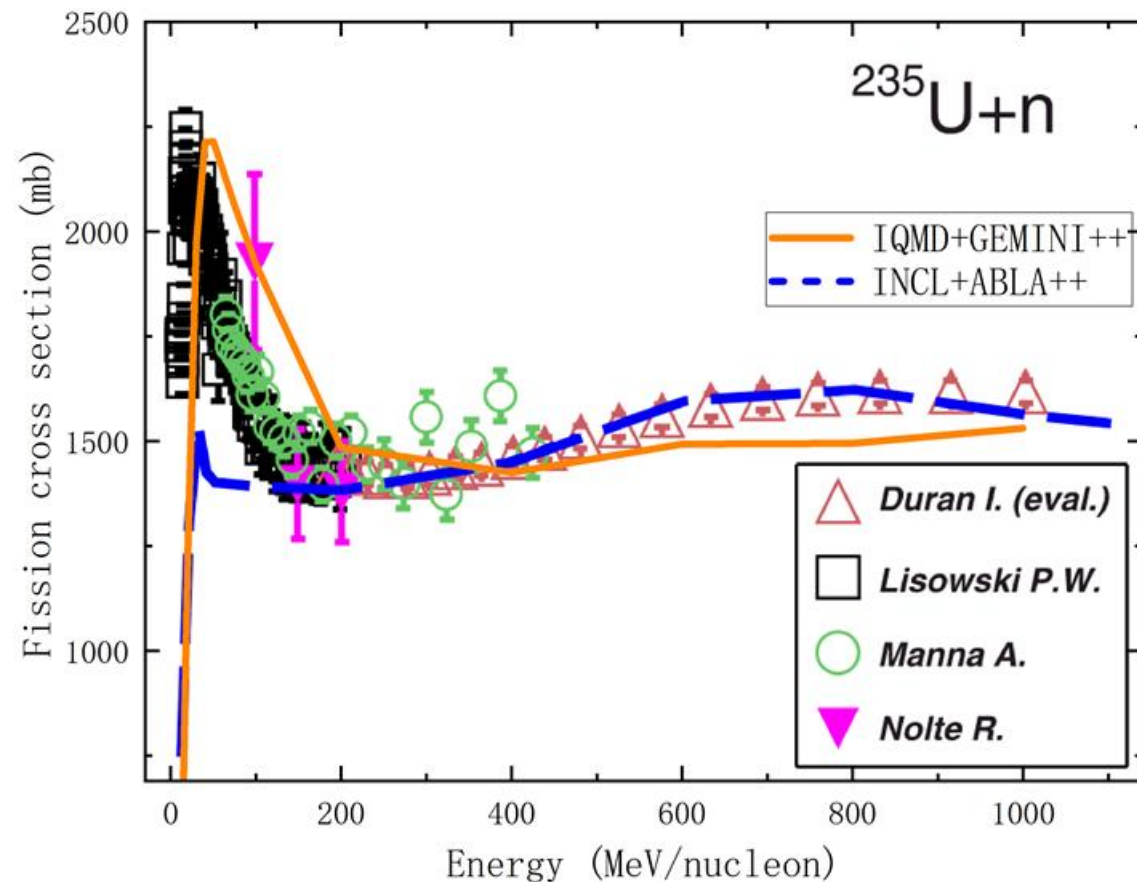
Jun Su et al., -2021-Song-Chinese_Phys._C_45_044101

总反应截面激发曲线



- 总反应截面敏感于核子-核子散射截面的介质效应
- 总反应截面是原子核半径的探针，电荷改变截面是电荷半径的探针，两者结合可探测晕核

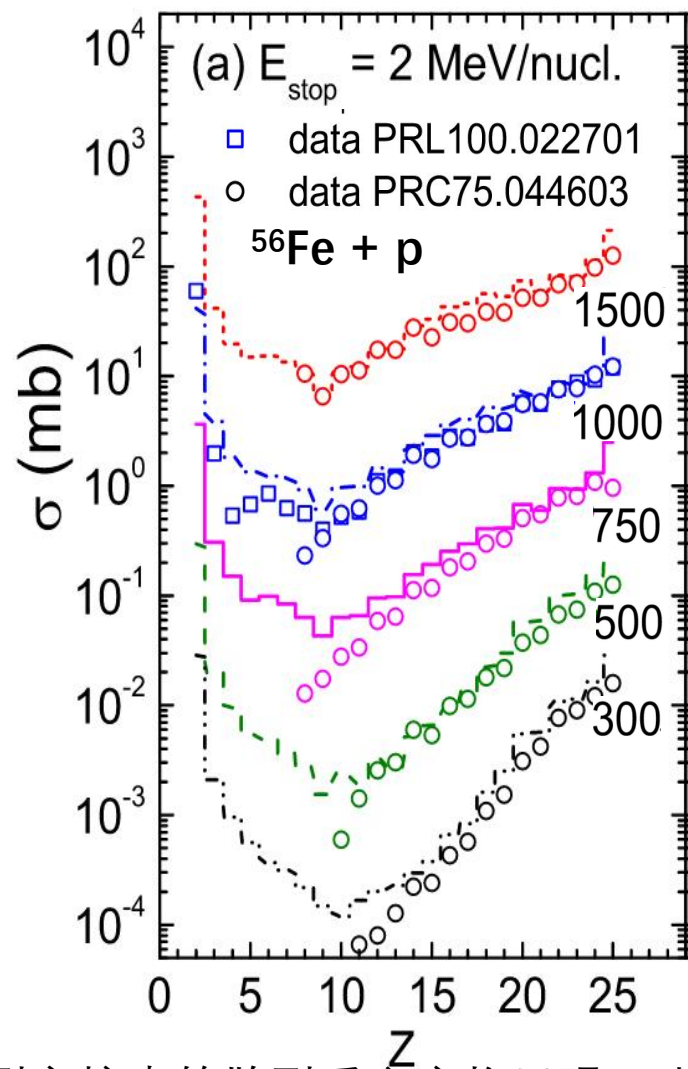
裂变截面激发曲线



- 高能中子诱发裂变，改变反应堆燃耗，是CiADS反应堆计算首先需要的核数据

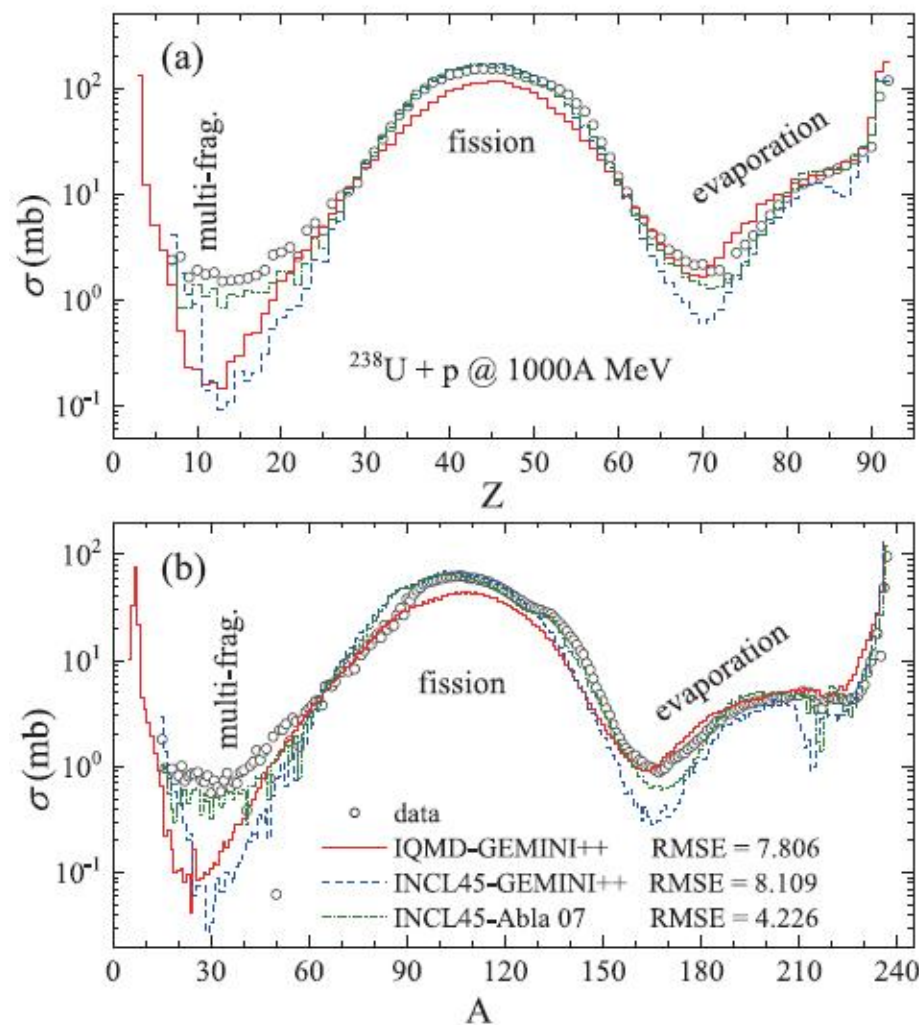


Jun Su, et al., PhysRevC.97(2018)054604



- 非裂变核素的散裂反应产物呈现U型分布
- 随能量增加中等质量碎片增加

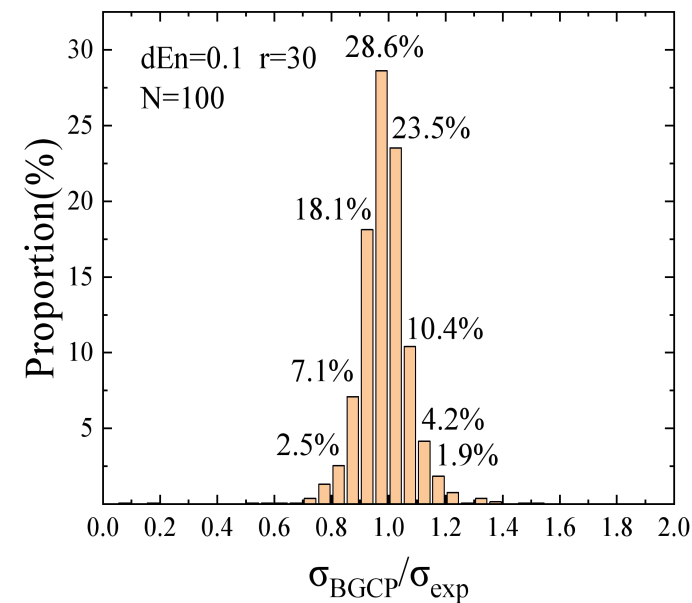
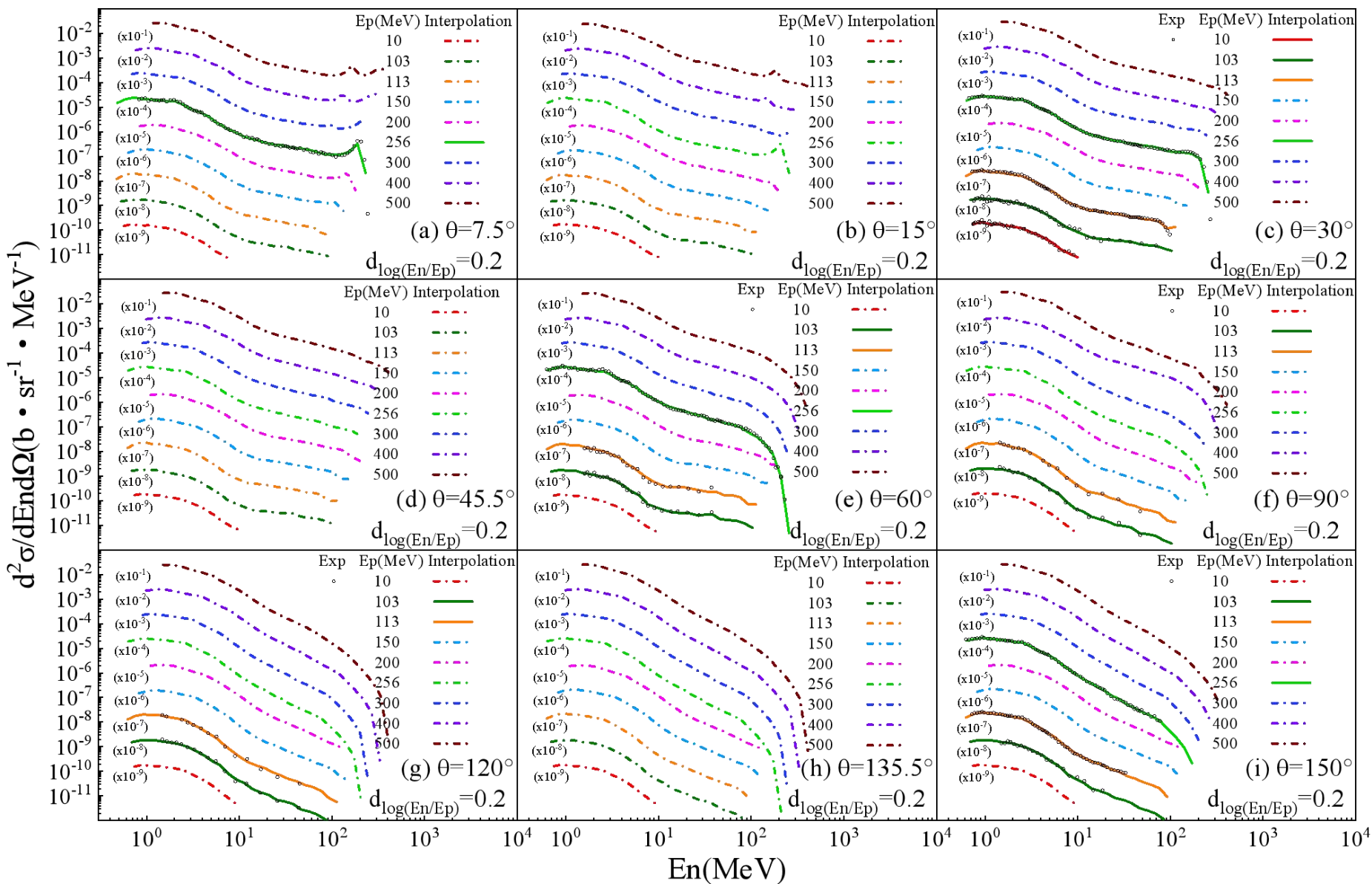
输运—退激耦合描述散裂产物的宽质量分布



- 从电荷分布、质量分布中明显看出裂变的贡献，对燃料贡献
- Z~45的裂变产物增加，潜在中子毒素



中子双微分谱同时检验快过程与蒸发过程



- 发展张量模型，预测散裂反应中子双微分截面
- 角度： 0.75° - 150°
- 中子能量：0.5 -1000 MeV
- 入射能：50-3000 MeV



✓ 总反应截面激发曲线:

$n/p+^{12}\text{C}/^{27}\text{Al}/^{65}\text{Cu}/^{120}\text{Sn}/^{208}\text{Pb}@100-1000 \text{ MeV/u}$

Chinese Phys. C **45**, 044101 (2021)

✓ 电荷/质量分布:

$^{20}\text{Ne}, ^{35}\text{Cl}, ^{36}\text{Ar}, ^{37}\text{K}, ^{38}\text{Ca}, ^{40}\text{Ar}, ^{48}\text{Ti}, ^{56}\text{Fe}+^{27}\text{Al}@400-1050 \text{ MeV/n}$

$^{56}\text{Fe}+p@300-1500\text{MeV/u}; ^{238}\text{U}+p/d/^{9}\text{Be}@1000\text{MeV/u}$

Phys. Rev. C **83**, 014608 (2011); *Phys. Rev. C* **97**, 054604 (2018)

Chinese Phys. C **46**, 074108 (2022)

✓ 同位素产生截面:

$^{238}\text{U}+p/d/^{9}\text{Be}@1000\text{MeV/u}$ (约3000个同位素截面);

$^{136}\text{Xe}+p@500\text{MeV/u}; ^{137}\text{Cs}+d, n@500\text{MeV/u}; ^{90}\text{Sr}, ^{93}\text{Zr}, ^{107}\text{Pd}, ^{137}\text{Cs}+d@200-1000 \text{ MeV/u}$

$p+^{237}\text{Np}, ^{239}\text{Pu}, ^{241}\text{Am}, ^{244}\text{Cm}@1000 \text{ MeV/u}$ (约200个同位素截面)

Chinese Phys. C **43**, 104101 (2019); *Phys. Rev. C* **101**, 024609 (2020)

Chinese Phys. C **46**, 074108 (2022); *Chinese Phys. C* **47**, 014102 (2023)

✓ 中子双微分截面

$p+^{56}\text{Fe}, ^{115}\text{In}@800, 1500\text{MeV/u}; p+^{208}\text{Pb}, ^{12}\text{C}@100-800\text{MeV/u}$

Phys. Rev. C **101**, 024609 (2020); *Appl. Radiat. Isot.* **174**, 109752 (2021)

3.3

PART

核数据检验

把薄靶核数据误差传播到厚靶产额和反应堆后端物理量

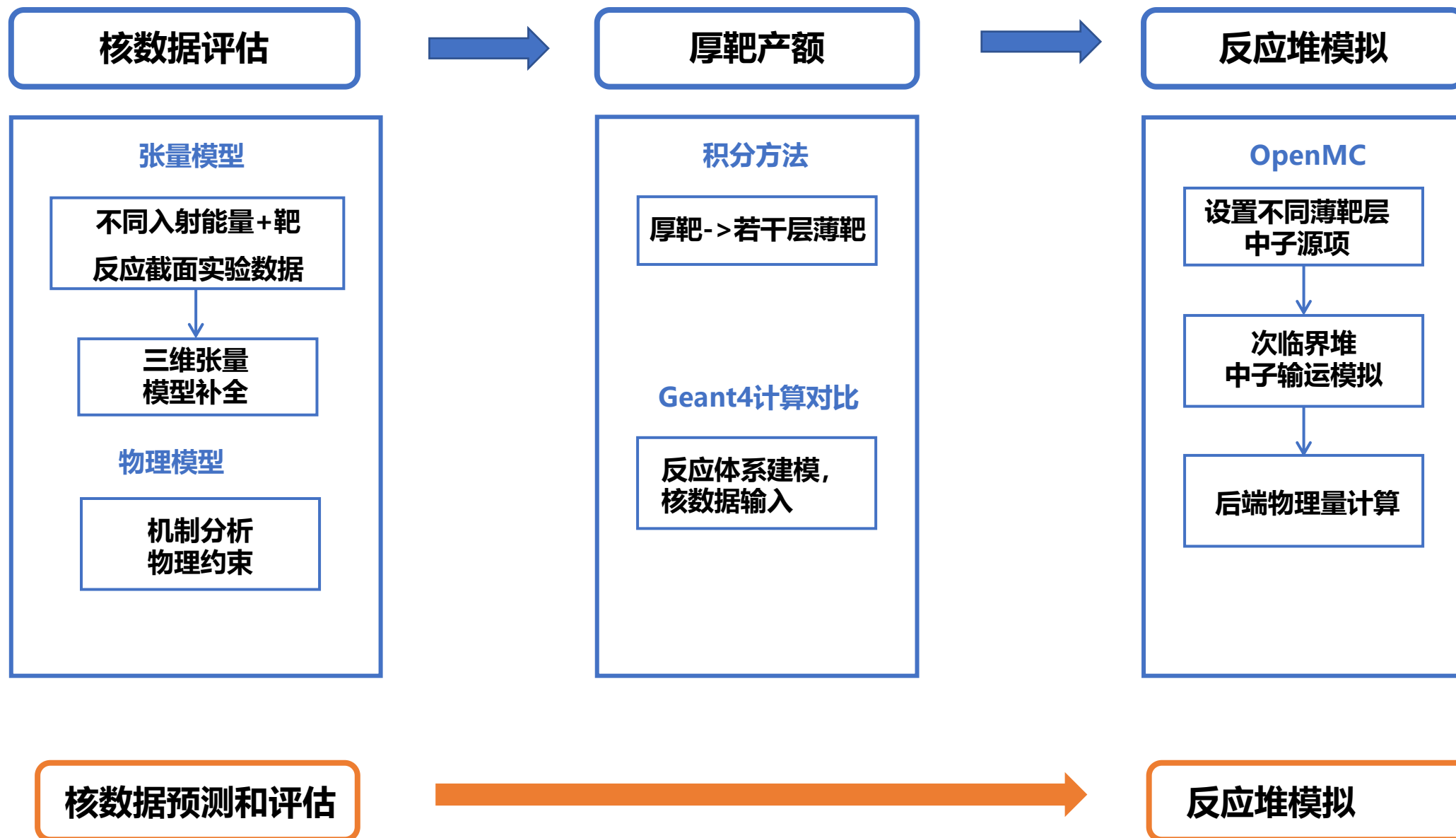
薄靶数据

厚靶积分

反应堆模拟



构建从核数据评价到反应堆模拟的检验平台





✓ 主要方法

IQMD+GEMINI++模型提供的全能区数据集

射线能损

次级粒子效应

✓ 已发表成果

500MeV质子与核废料

500MeV质子与铅靶

200MeV质子与碳靶

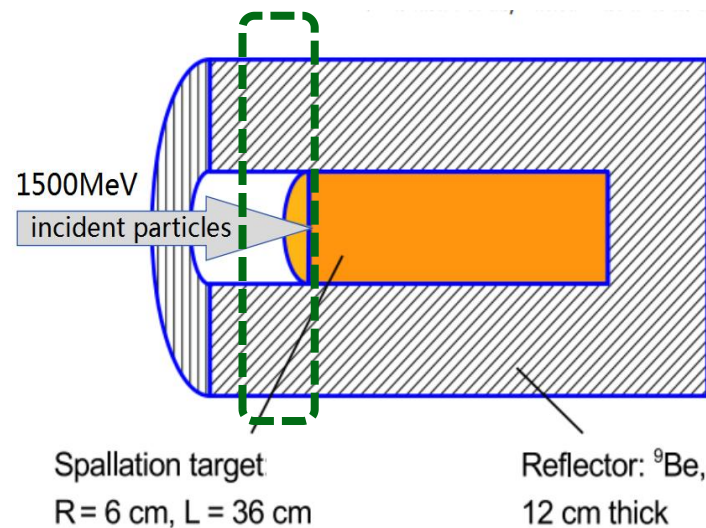
✓ Geant4验证

NUCL SCI TECH (2021) 3296

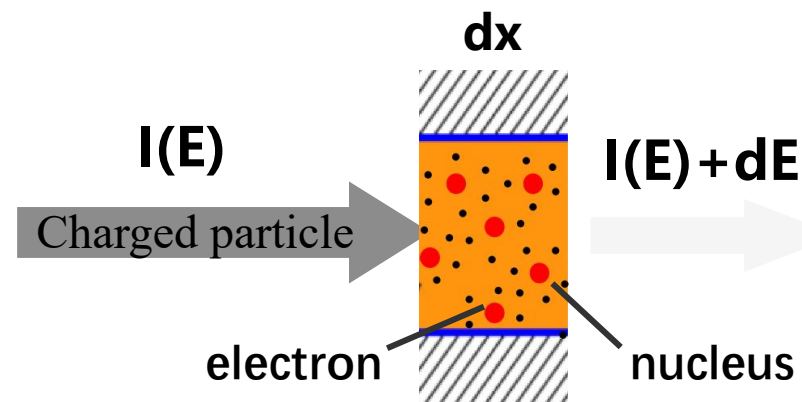
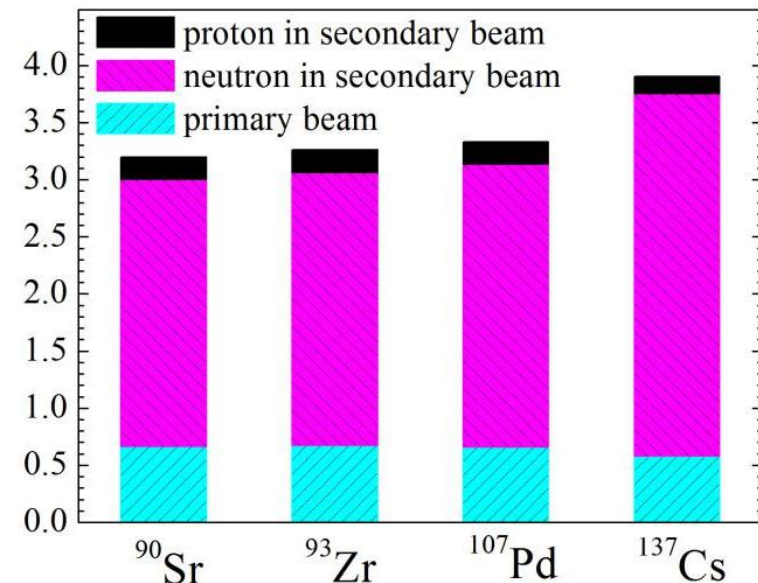
NUCL SCI TECH (2021) 3294

Applied Radiation and Isotopes 174 109752

Chinese Physics C Vol. 47, No. 1 (2023) 014102



为程序开发奠定坚实基础

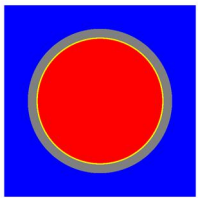
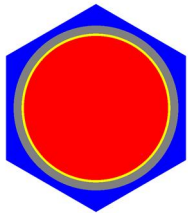
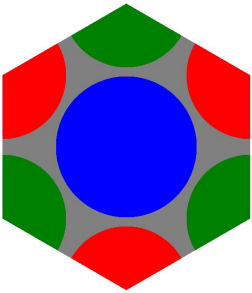


Electrons-nucleus
Coulomb Force
Stopping power
Bethe formula

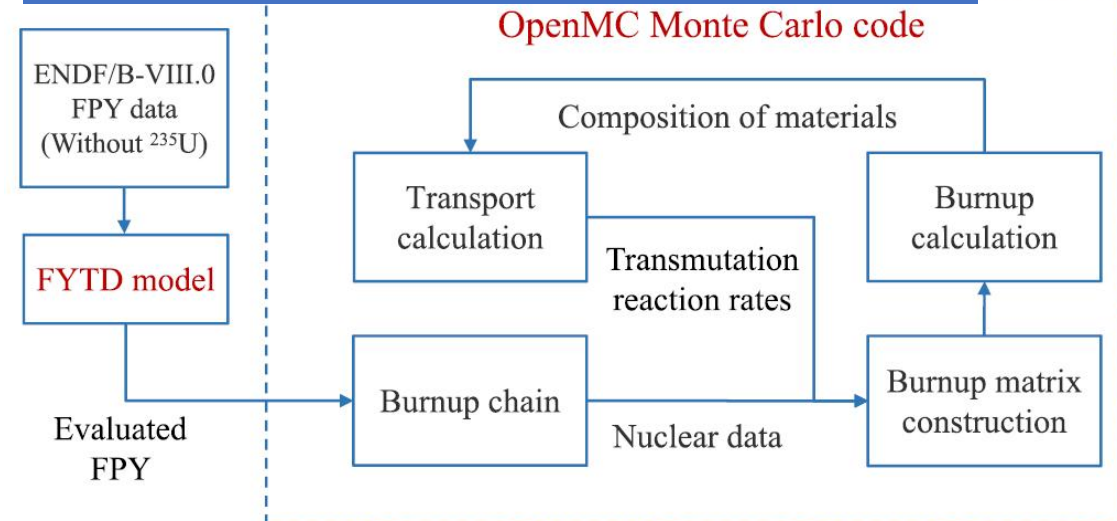
Nucleus-nucleus
Nuclear reaction
Cross section
 $dI = I\sigma Ndt$



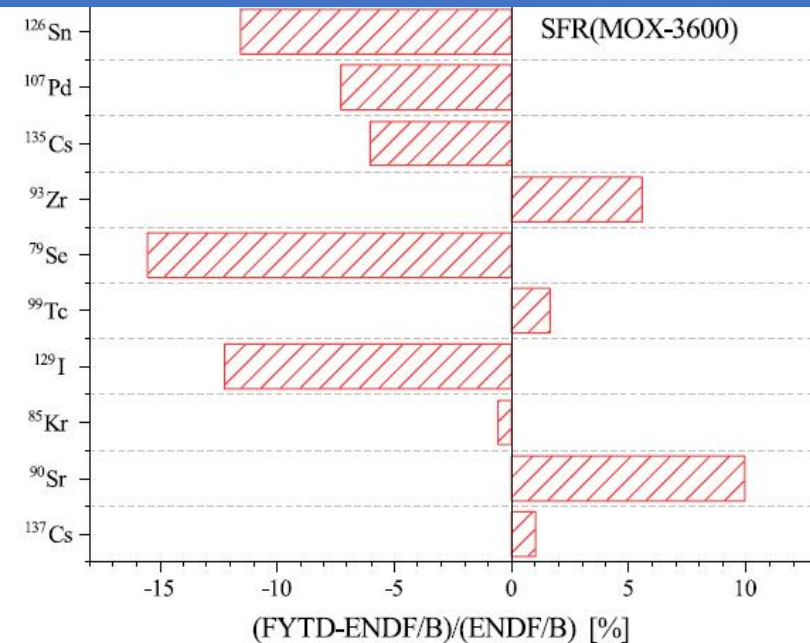
快堆中若干长寿命裂变产物的浓度对裂变产额数据极其敏感

	PWR (AP1000)	SFR (MOX-3600)	HPR(mod)
几何结构			
线功率密度	187.7 W/cm	291.6 W/cm	31.6 W/cm
运行时间 (燃耗深度)	540*3 EFPD 62 GWd/tHN	410*5 EFPD 97 GWd/tHN	4000 EFPD 9 GWd/tHN
计算步长	54 EFPD	205 EFPD	200 EFPD
燃料截面积	0.527 cm ²	0.706 cm ²	1.595 cm ²

反应堆后端物理量放大关键核数据差异



SFR乏燃料贮存3年后累积浓度对²³⁹Pu裂变产额明显





1

新型核技术和白光中子实验对中高能核反应数据提出新的数量与精度需求

2

IQMD+GEMINI逐事件连接动力学和统计退激，可同时计算截面、产额和粒子谱

3

退激过程显著改变电荷改变和单核子移除等实验观测量



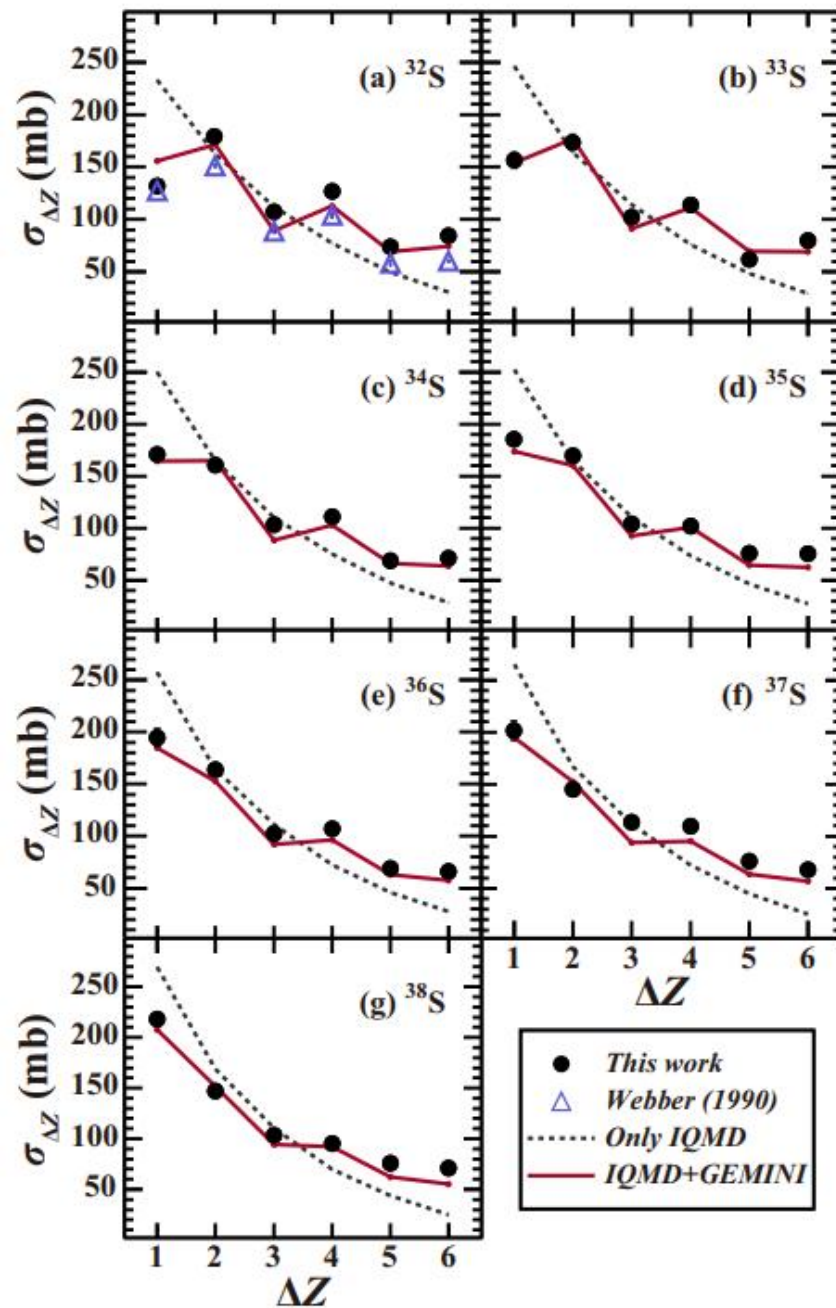
期待依托高能质子束与白光中子实验数据，发展机制约束的中高能核反应数据库



数据库	能区覆盖	具体摘录原文	参考论文
FENDL-3.2c 1990-今 IAEA	$E_n \leq 150$ MeV $E_p \leq 3$ GeV	“current data extended up to 150 MeV (neutron)… proton sublibrary often to 3 GeV… deuteron sublibrary to 200 MeV”	FENDL官网 www-nds.iaea.org/fendl/?utm_source=chatgpt.com
TENDL 2008-今 Europe	$E_n \leq 200$ MeV $E_p \leq 200$ MeV	“The TENDL libraries are complete nuclear data sets for incident neutrons, protons, deuterons, tritons, ^3He and alpha particles up to 200 MeV.”	TENDL官网 tendl.web.psi.ch
JENDL/HE 2007-今 Japan	$E_n \leq 3$ GeV $E_p \leq 3$ GeV	“JENDL High Energy File 2007… contains evaluated nuclear data of neutron and proton induced reactions up to 3 GeV for 107 and 79 nuclides, respectively.”	T Fukahori - Preprint INDC (JPN)-0210. Technical Report
LA-150 2000–2002 USA	$E_n \leq 150$ MeV $E_p \leq 150$ MeV	“A program is underway at Los Alamos National Laboratory to develop nuclear data libraries for incident neutrons and protons up to 150 MeV for elements with $Z \leq 100$.”	Young, PG and Chadwick, MB, LANL, 2007



备用：碎裂产物奇偶效应约束预碎片激发能



$^{32-38}\text{S} + ^{12}\text{C} @ \sim 230 \text{ AMeV}$

Phys. Rev. C 112, 064604

