

2023年5月17日  
東大本郷キャンパス

# 核データ分野における中性子・陽子入射 原子核反応研究の進展と展望

渡辺 幸信

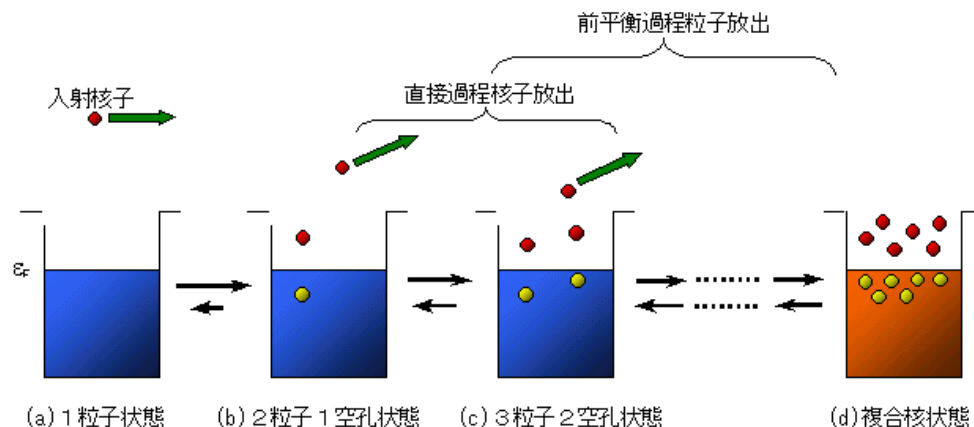
九州大学 大学院総合理工学研究院



九州大学  
KYUSHU UNIVERSITY

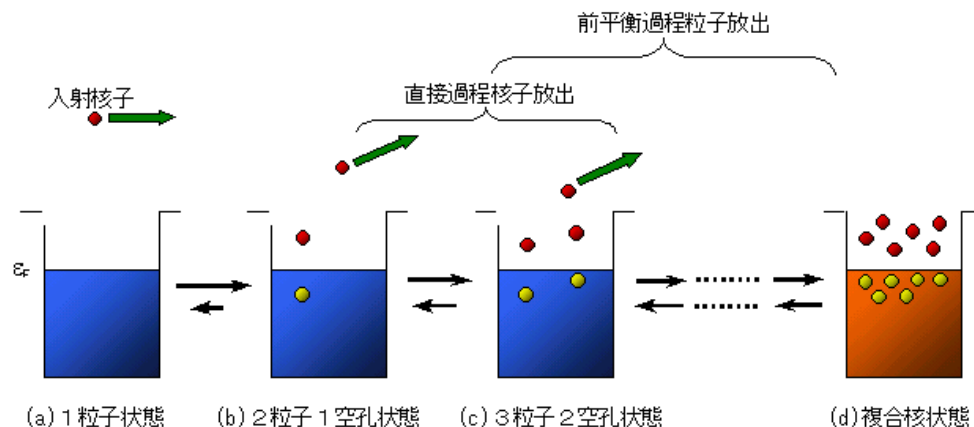
# 講演内容

- 自己紹介(研究分野)
- 「核データ」について
- 核子入射原子核反応の概観
- 代表的な原子核反応模型
  - 光学模型
  - 直接反応模型
  - 複合核模型
  - 前平衡反応模型



# 講演内容

- 自己紹介(研究分野)
- 「核データ」について
- 核子入射原子核反応の概観
- 代表的な原子核反応模型
  - 光学模型
  - 直接反応模型
  - 複合核模型
  - 前平衡反応模型



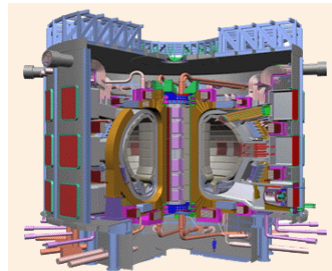
# 研究分野の紹介

サブアトムスケールの物理(原子核・放射線物理)を  
先端科学・技術へ応用する。

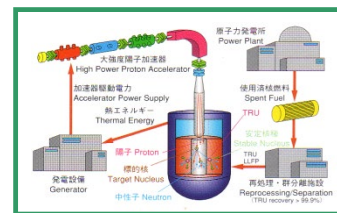
- 原子核工学基礎としての**原子核物理・核データ**に関連した実験・理論研究
- 広義の原子核工学の立場に立って、宇宙空間や地球環境に存在する宇宙線や加速器で発生する**粒子線(中性子やミュオン等)**が物質や人体に与える**影響をミクロな視点で探求し、その成果をエネルギー、情報通信、医療、宇宙開発分野等の応用技術に活かすための基礎研究**(**“応用指向”の基礎研究**)



核分裂エネルギー



核融合炉エネルギー



加速器応用



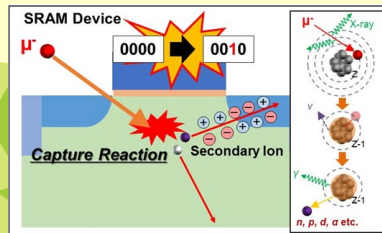
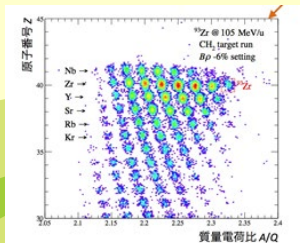
粒子線治療



宇宙開発

# 粒子線物理工学分野

エネルギー、医療、宇宙開発分野等におけるミクロな粒子線の先端的応用を目指し、**現代物理(素粒子・原子核物理)と医・工学の境界領域の研究**を展開しています。



## 医療応用

- ・粒子線治療

## エネルギー

- ・長寿命放射性廃棄物の核変換

## マイクロエレクトロニクス

- ・宇宙線誘起ソフトウェア

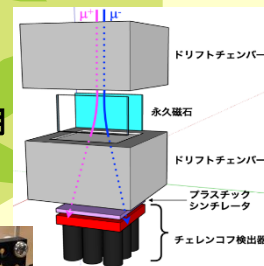
## 加速器開発

- ・レーザー駆動イオン加速
- ・加速器中性子源

## 応用研究

## 粒子線計測応用

- ・宇宙線ミュオン計測と応用
- ・宇宙線中性子計測



## 粒子・イオン輸送

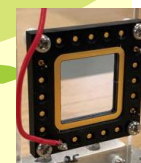
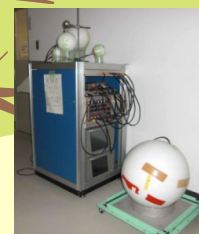
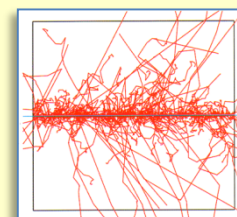
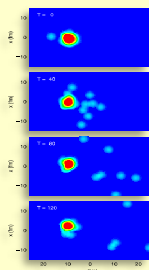
## 基礎研究

## 原子核物理・核データ

- ・核変換反応、負ミュオン捕獲反応
- ・断面積測定
- ・反応モデル解析・計算コード開発

## 原子・放射線物理

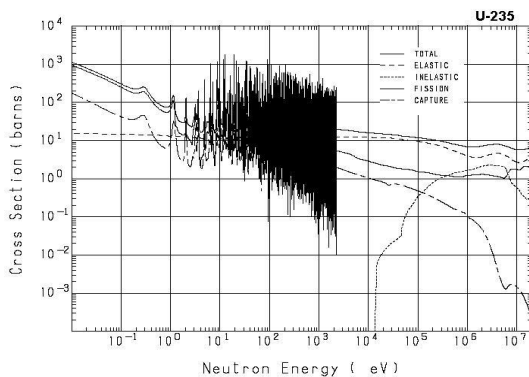
- ・イオンと物質との相互作用
- ・エネルギー・電荷付与



# 核データとその役割

- 工学、理学、医学をはじめとする様々な分野で必要とされる、**原子核の反応、壊変およびその構造に関わるデータの総称** (原子核関連情報の集大成)である。
- 原子炉やDT核融合炉設計では、**中性子の空間的・エネルギー的振舞い** (つまり、中性子束分布)を正しく予測し、**核反応データ**を使って種々の**核反応率**を求め、その**時間的・空間的変化を追跡**することが必要である。

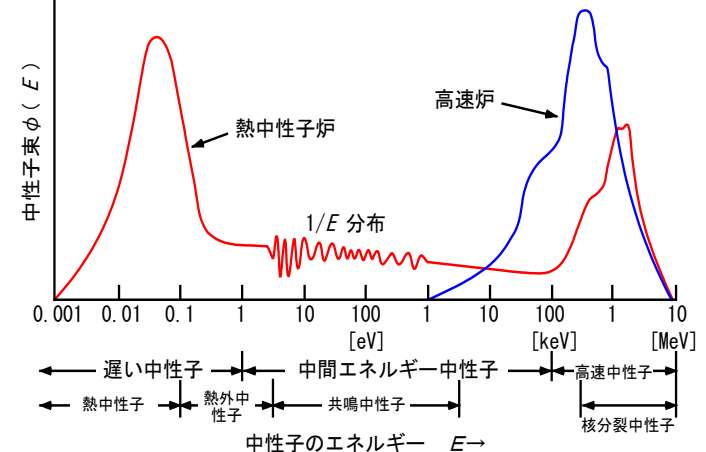
核データ



中性子  
輸送計算  
コード

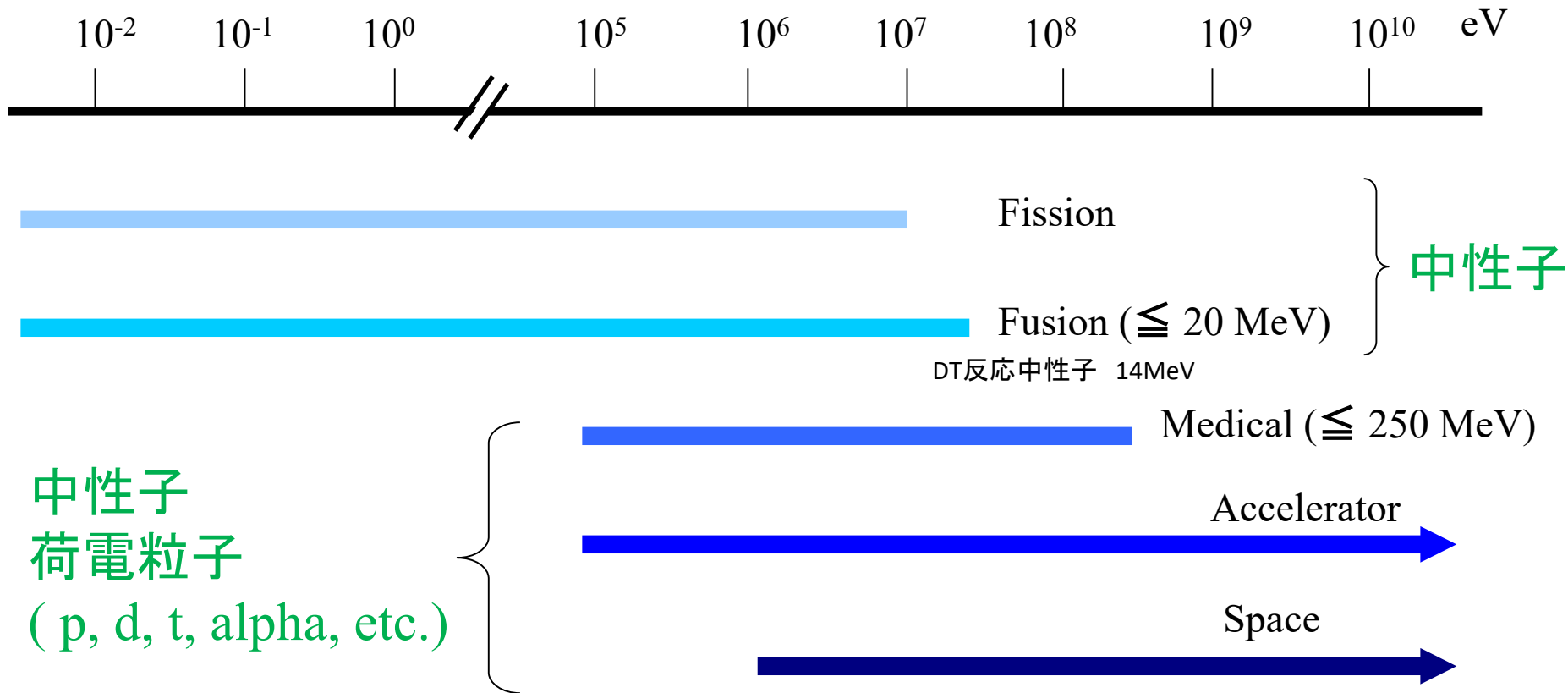
MCNP, PHITS

炉内の中性子エネルギー分布

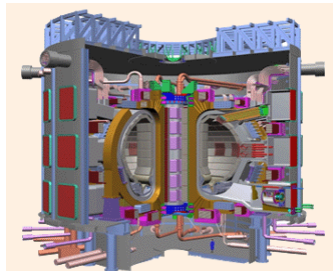


# 原子核エネルギー、放射線応用分野で要求される核データ

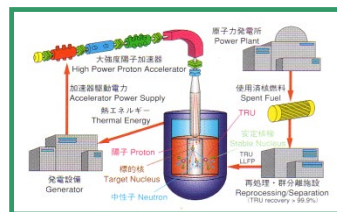
## — 入射粒子・エネルギー範囲 —



核分裂エネルギー



核融合炉エネルギー



加速器応用

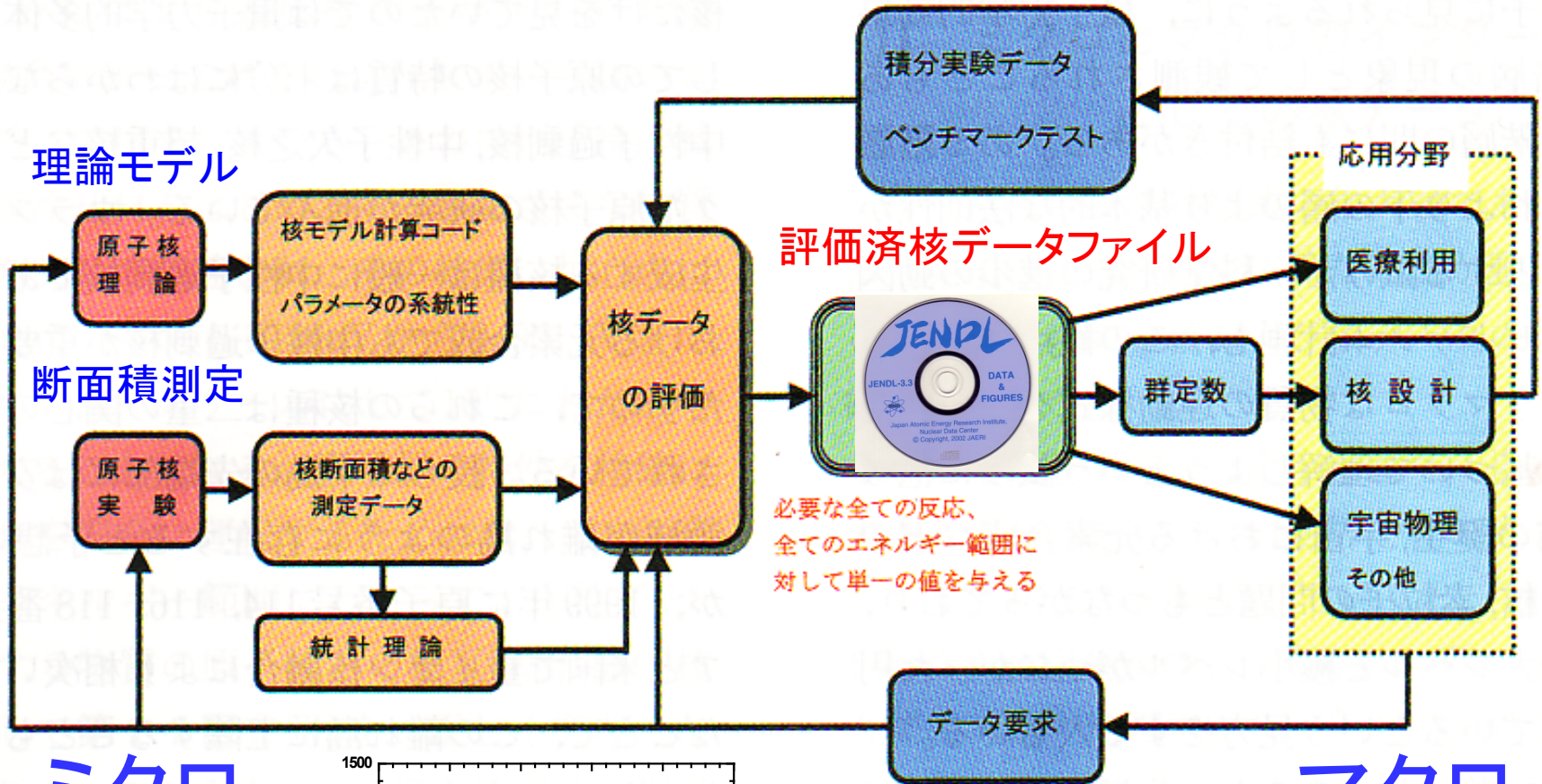


粒子線治療

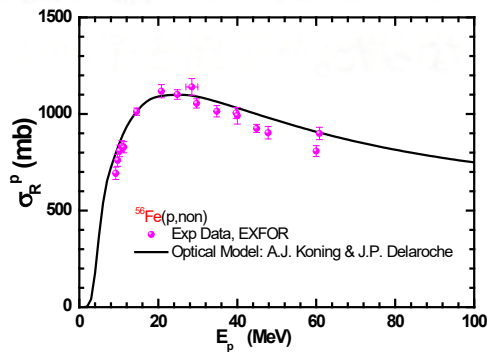
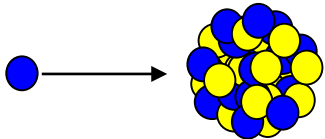


宇宙開発

# 核データファイルの位置づけと役割



ミクロ



核データ評価:

実験データと理論計算を基に確らしい値を推定し、データがない場合は補完する作業

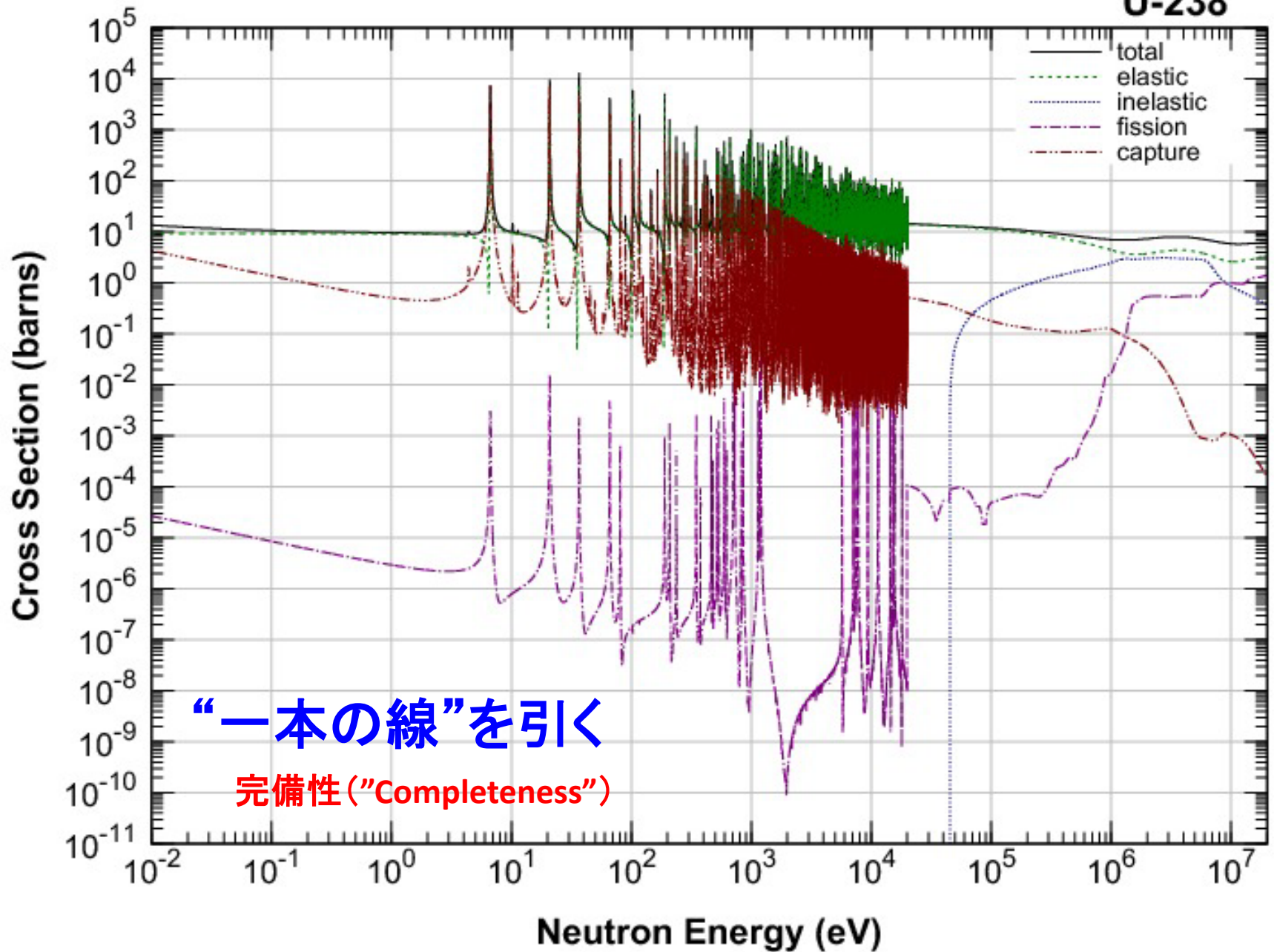
マクロ

- ・粒子輸送計算
- ・放射化量推定
- ・放射線線量評価
- ・材料損傷評価



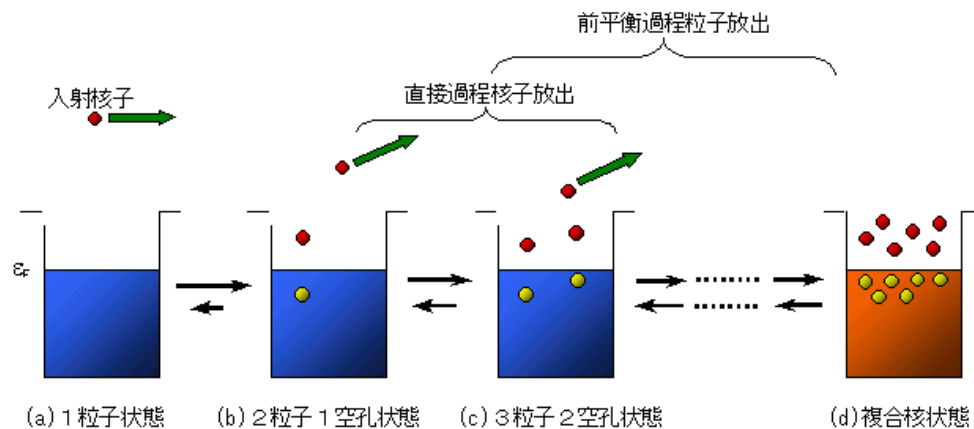
# JENDL-4.0

U-238

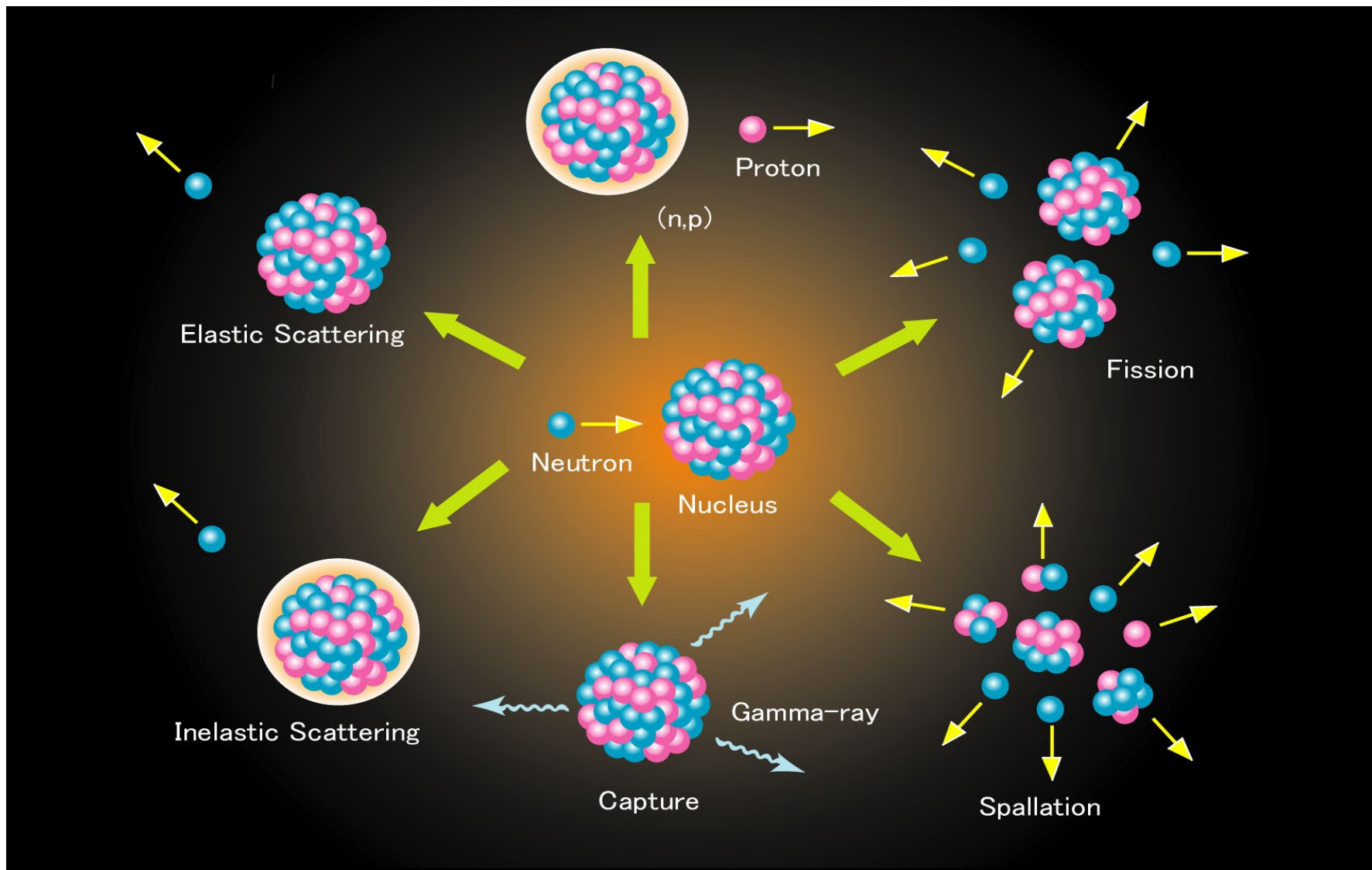


# 講演内容

- 自己紹介(研究分野)
- 「核データ」について
- **核子入射原子核反応の概観**
- 代表的な原子核反応模型
  - 光学模型
  - 直接反応模型
  - 複合核模型
  - 前平衡反応模型



# 中性子入射反応



# 代表的な反応過程の分類

---

## ● **Direct process (直接過程)**

Interaction between a projectile and a few nucleons (degree of freedom) in a nucleus

Short reaction time ( $10^{-22} \sim 10^{-20}$  sec)

## ● **Compound process (複合核過程)**

A projectile is absorbed by a target nucleus and “compound nucleus” (i.e., highly-excited nucleus in thermal equilibrium) is formed. Then particle decay occurs.

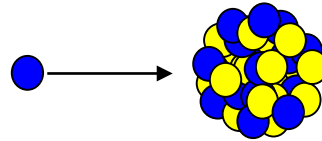
Long reaction time ( $10^{-18} \sim 10^{-16}$  sec)

## ● **Preequilibrium process (前平衡過程)**

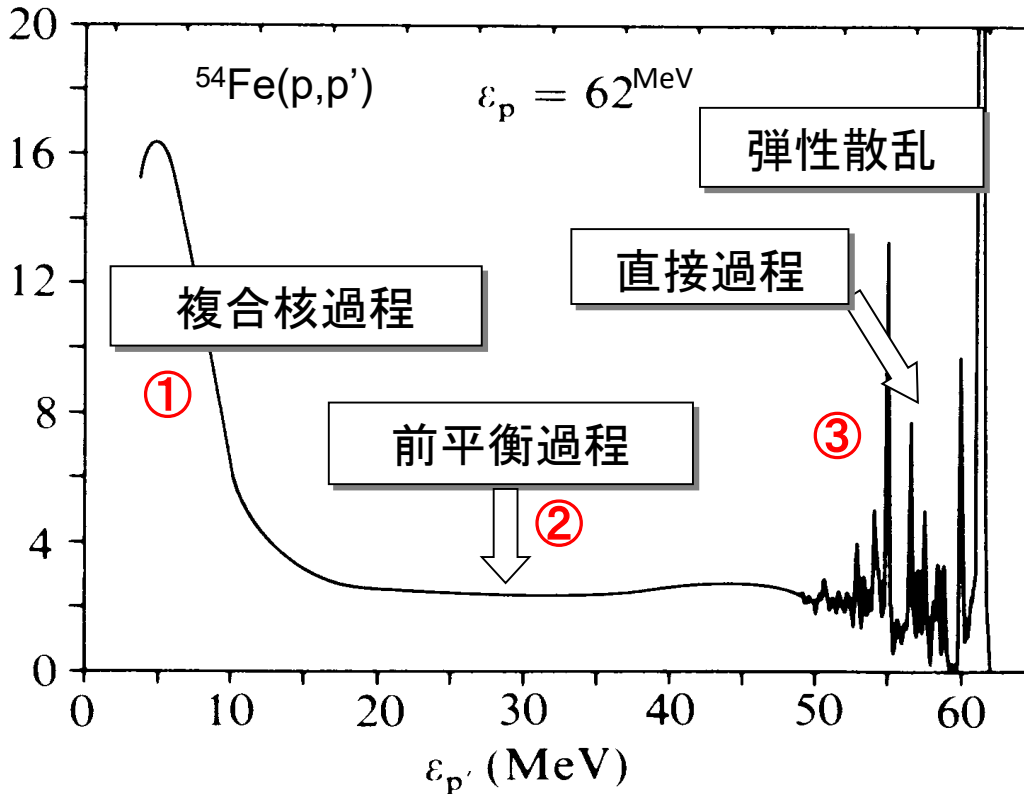
Non-equilibrium process in between the above two processes

# 原子核反応過程の概観

核子入射反応により放出される粒子(核子、 $\alpha$ 粒子等)のエネルギー分布や角度分布

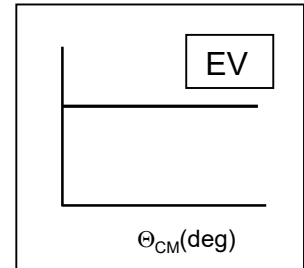


放出粒子エネルギー分布

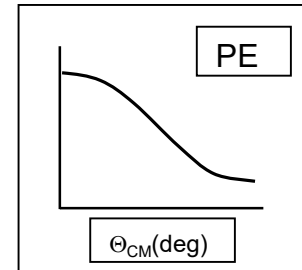


角分布

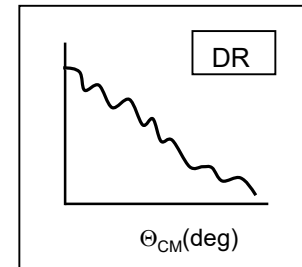
①



②

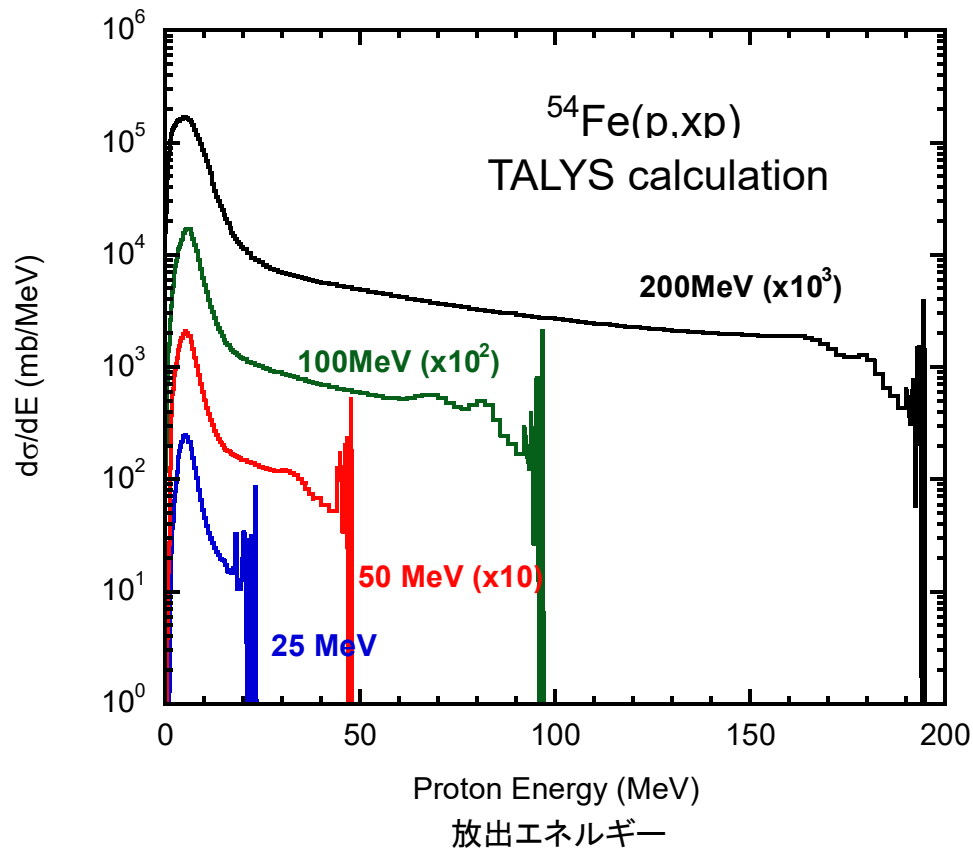


③

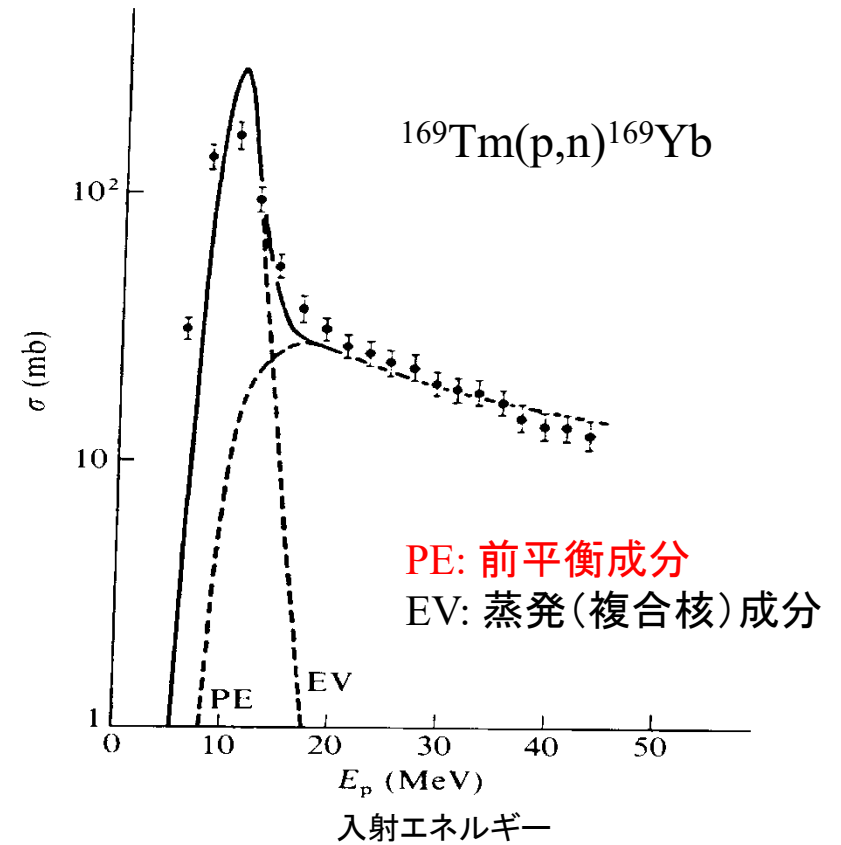


# 入射エネルギー依存性

(1) 放出エネルギー分布



(2) 核種生成の励起関数



# 共同利用実験施設を使用した核データ測定(渡辺Gr)



九大理タンデム  
(10MVタンデム静電加速器)

## 12~18MeV 陽子入射反応 (p, xp), (p, xα), etc.

- C, Zr, Nb, Mo, Ag, Pd etc.
- 前平衡励起子モデル解析 → 14MeV中性子反応
- $^{12}\text{C}$ の分解反応解析



原研タンデム  
(20MVタンデム静電加速器)

## 26MeV 陽子入射反応 (p, xp), (p, xα), etc.

- C, Mo, Pd etc.
- Feshbach-Kerman-Koonin モデル解析
- $^{12}\text{C}$ の分解反応解析



原研TIARA  
(AVFサイクロトロン)

## 40~70MeV 陽子入射軽イオン生成

- C, Al, Ni, Zr, Au, Bi
- 高エネルギー核データ検証と中性子反応との比較



Uppsala大 TSL  
(Gustaf Werner サイクロトロン)

## 175MeV 準単色中性子入射軽イオン生成

- C, O, Si etc.
- 軽クラスターイオン生成のQMDモデル改良
- 宇宙線中性子誘起ソフトエラー研究の基礎データ



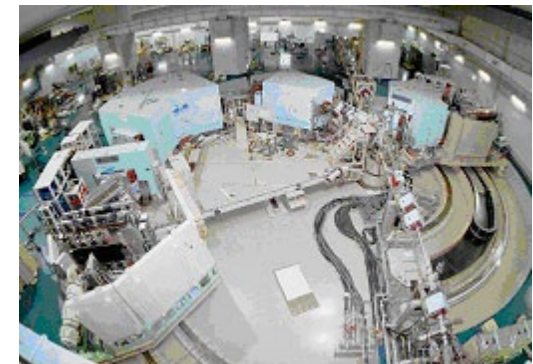
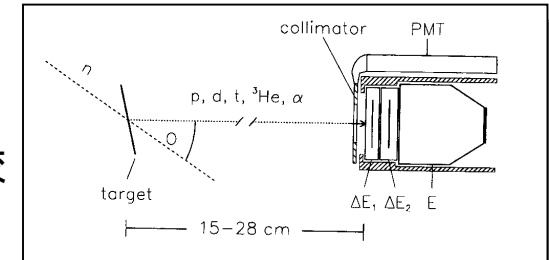
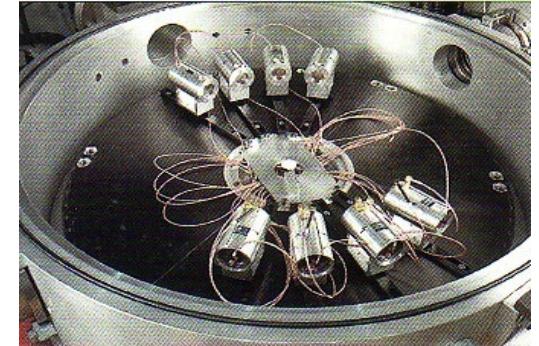
阪大RCNP  
(400MeVリングサイクロトロン)

## 392MeV 陽子入射 (p, xp) 反応

- $^{40}\text{Ca}$
- SCDWモデル解析
- 高エネルギー核データ作成用計算モデルの検証

## 実験装置の例

(1) 粒子弁別機能付 $\Delta E$ -Eカウンターテレスコープ



(2) 磁気スペクトロメータ@阪大RCNP

# 共同利用実験施設を使用した核データ測定 (渡辺Gr)



九大理タンデム  
(8MVタンデム静電加速器)



阪大RCNP  
(400MeVリングサイクロトロン)



理研RIBF  
(400MeV超伝導サイクロトロン)



J-PARC  
(3GeVシンクロトロン)



RCNP  
MuSIC



英国RAL

## 5~14MeV (d,xn)反応

- Li, C, Al, Si, Ni, Mo, Ta等に対するTTNY測定
- 加速器中性子源用データ、重陽子分解反応

## 100, 200MeV (d,xn)反応

- Li, Be, C, Al, Cu, Nb, In, Ta, Au
- 重陽子核データ JENDL/DEU-2020

## LLFPに対する陽子・重陽子入射同位体生成反応

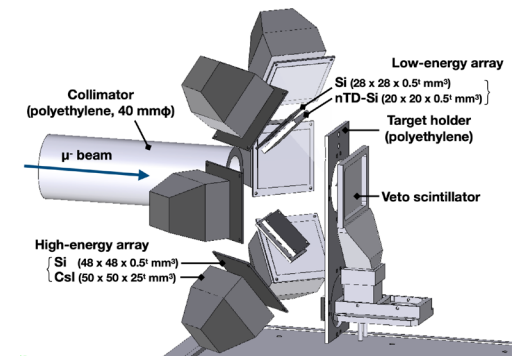
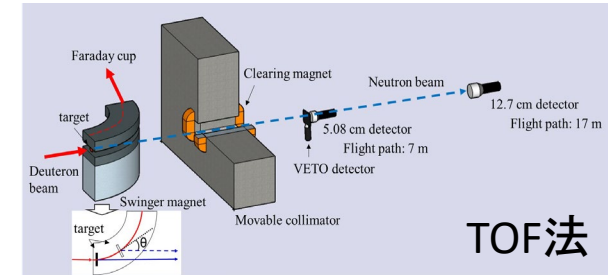
- Zr-93, Se-79 (Y-91,92, Zr-92, Nb-93,94)
- 入射エネルギー 50, 100, 200 MeV/u
- LLFP核変換の基礎データ取得
- 計算モデル検証 → JENDL/ImPACT-2018

## 陽子入射核種生成反応

- Mn, Co, Ni, Zr
- 0.4, 1.3, 2.2, 3.0 GeV陽子、放射化法
- 核破碎計算モデルの検証

## 負ミューオン入射軽イオン生成反応

- Si標的
- 宇宙線ミューオン誘起ソフトエラーの基礎データ

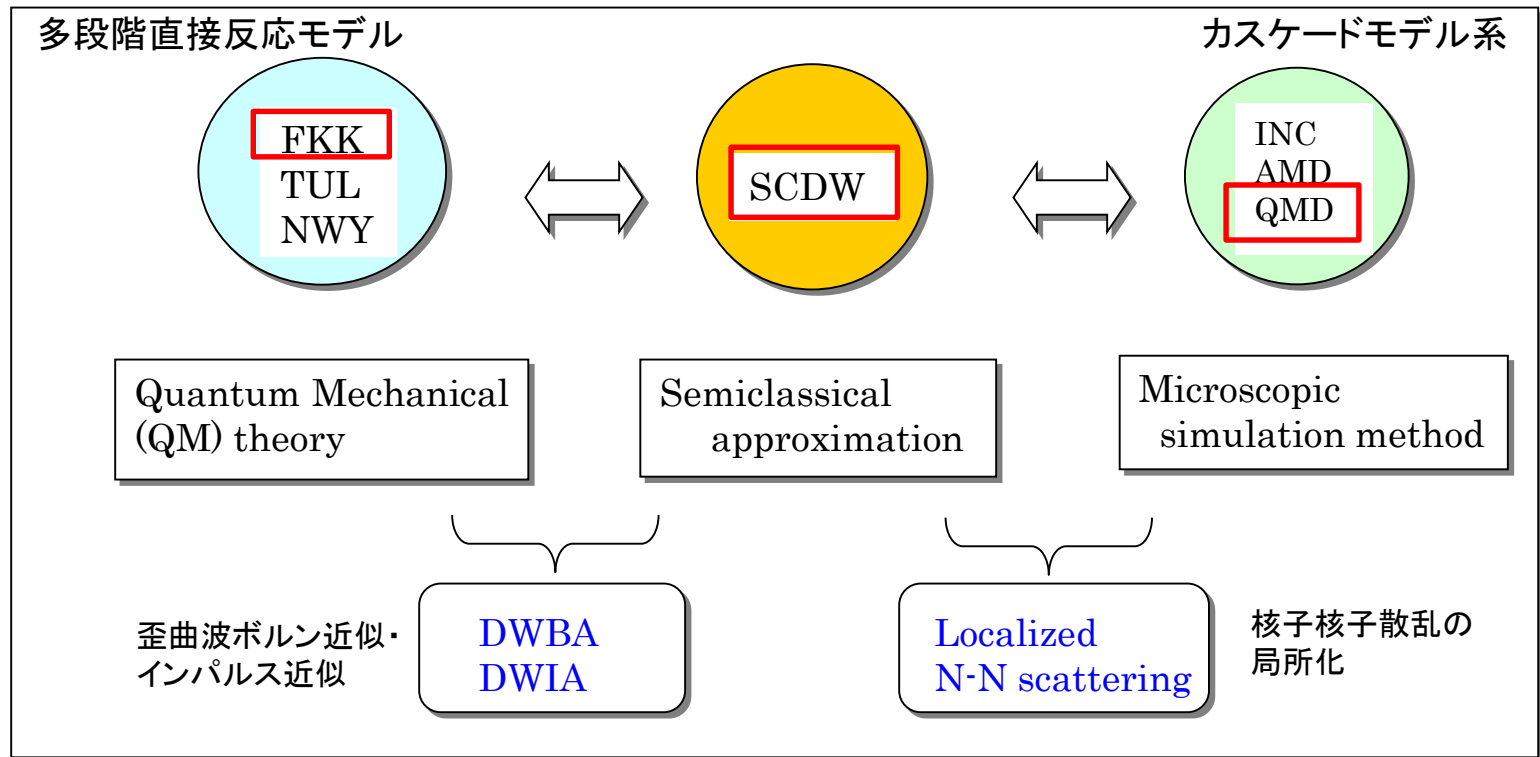




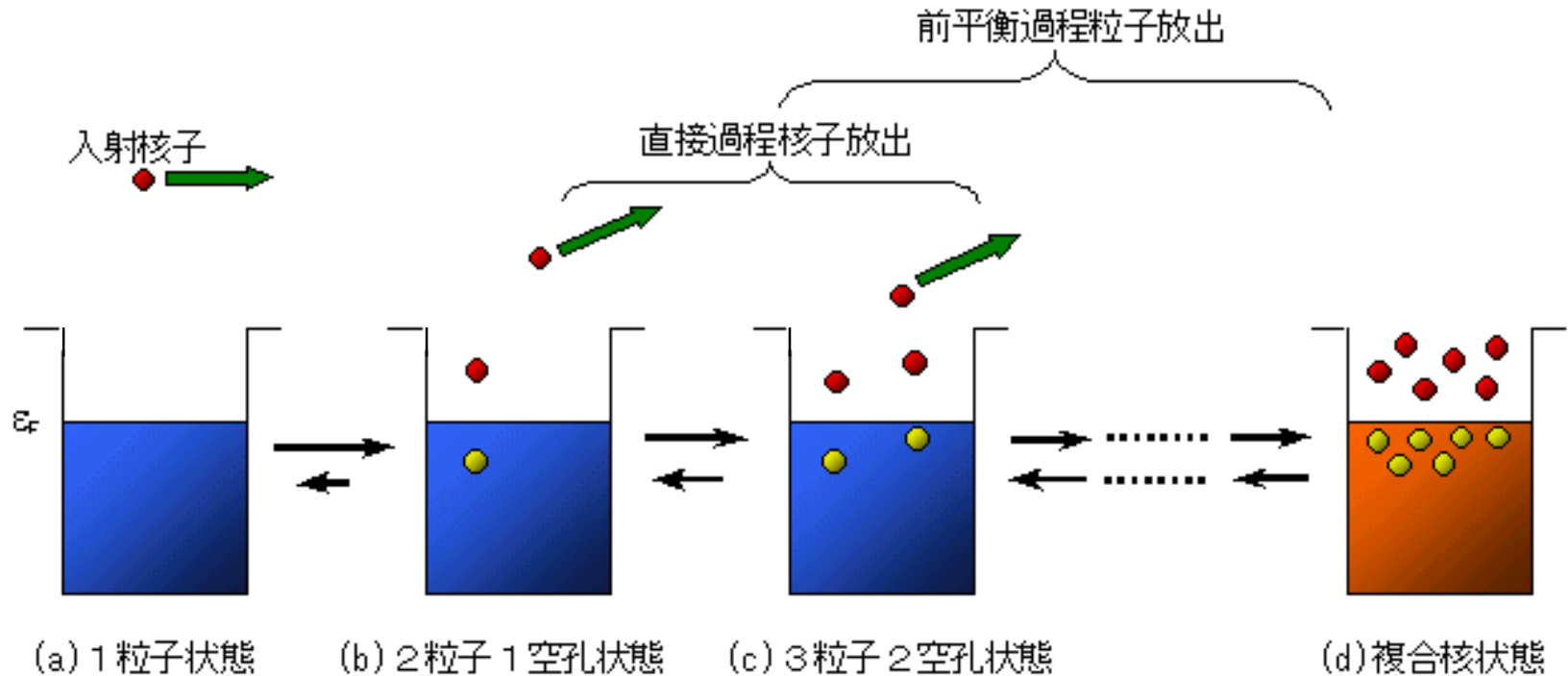
# 前平衡反応理論モデル研究

- 励起子モデル Exciton model (半古典的現象論的)
- 量子力学的モデル Feshbach-Kerman-Kooning model
- 半古典的歪曲波モデル SCDW
- 量子分子動力学 QMD、核内カスケードモデル INCL

研究の  
時間発展



# 励起子モデルが描く原子核反応過程



A. Fukushima, Y. Utsuno, E. Hiyama, Y. Watanabe, S. Chiba, "Seminar on Nuclear Data, Cap.2: Introduction to Nuclear Physics", J. At. Ene. Soc. Jpn., Vol.43, No.6, 33-45 (2001) [in Japanese].

# Reaction Processes and Outgoing Particle Spectrum

光学模型

Shape  
Elastic  
Scattering

projectile

Reaction

Compound

Hauser-  
Feshbach模型  
蒸発模型

Pre-Equilibrium

励起子模型、多段階直接模型など

Direct

歪曲波ボルン近似  
チャンネル結合法

Fission

Compound  
Elastic

Fission

Multiple  
Compound  
Emission

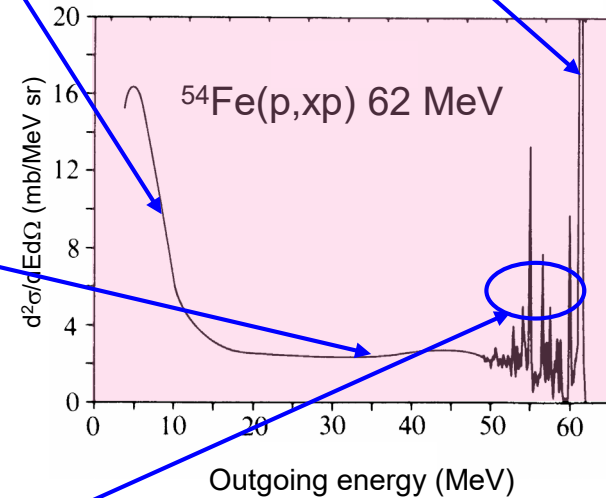
Multiple  
Pre-Eq.  
Emission

elastically  
scattered particles

low-E  
hump

high-E  
tail

discrete  
peaks



Ref. of exp. data:

F.E. Bertrand and R.W. Peele, Phys. Rev. C 8, 1045 (1973).

# 核反応理論模型と断面積計算との関連

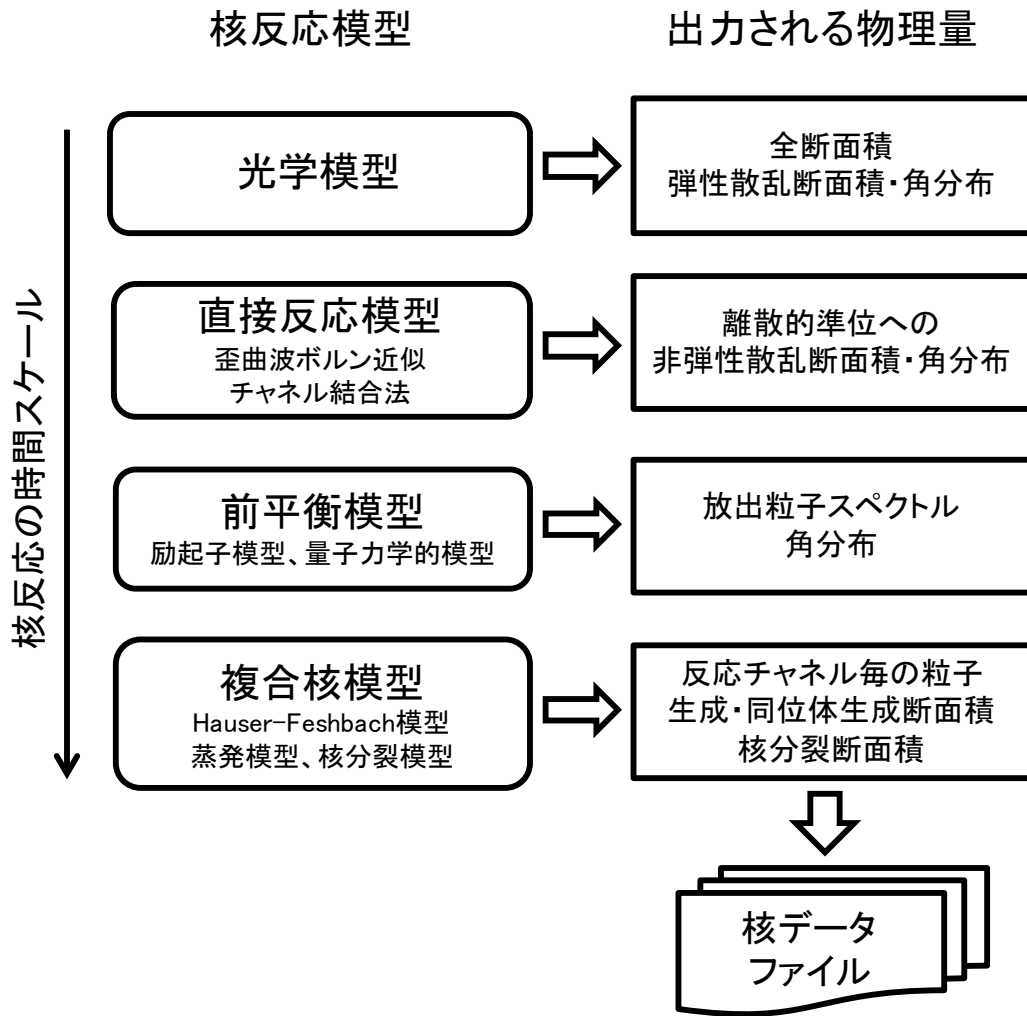


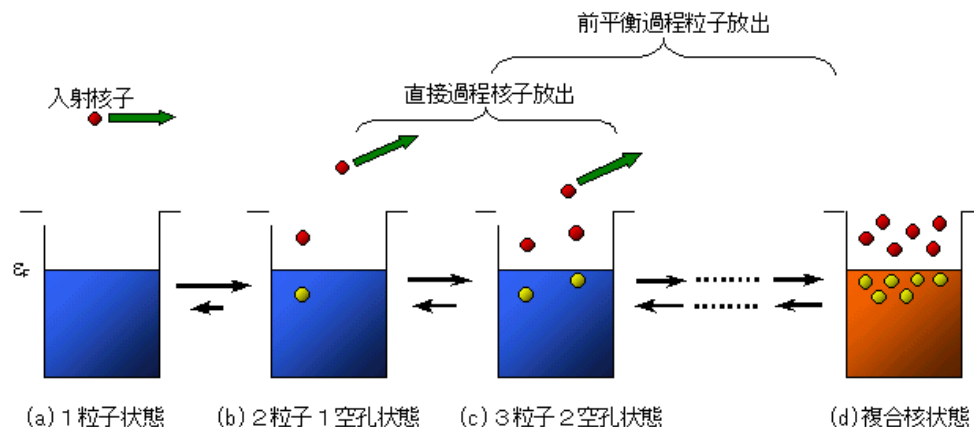
表1 代表的な核データ評価用統合計算コード一覧

コード名	主要な開発者 (国)	引用文献・URL 等
CCONE	O. Iwamoto (日本)	J. Nucl. Sci. Technol. <b>44</b> , 687 (2007)
POD	A. Ichihara (日本)	JAEA-Data/Code 2007-012
TALYS	A. Koning (オランダ)	<a href="http://www.talys.eu/">http://www.talys.eu/</a>
GNASH	P.G. Young (米国)	LA-12343-MS, Los Alamos National Laboratory (1992)
EMPIRE	M. Herman (米国)	<a href="http://www.nndc.bnl.gov/empire219/">http://www.nndc.bnl.gov/empire219/</a>
ALICE	M. Blann (米国)	<a href="http://www.rsicc.ornl.gov/codes/psr/psr5/psr-550.html">http://www.rsicc.ornl.gov/codes/psr/psr5/psr-550.html</a>
UNF	J. Zhang (中国)	Nucl. Sci. Eng. <b>142</b> , 207 (2002)

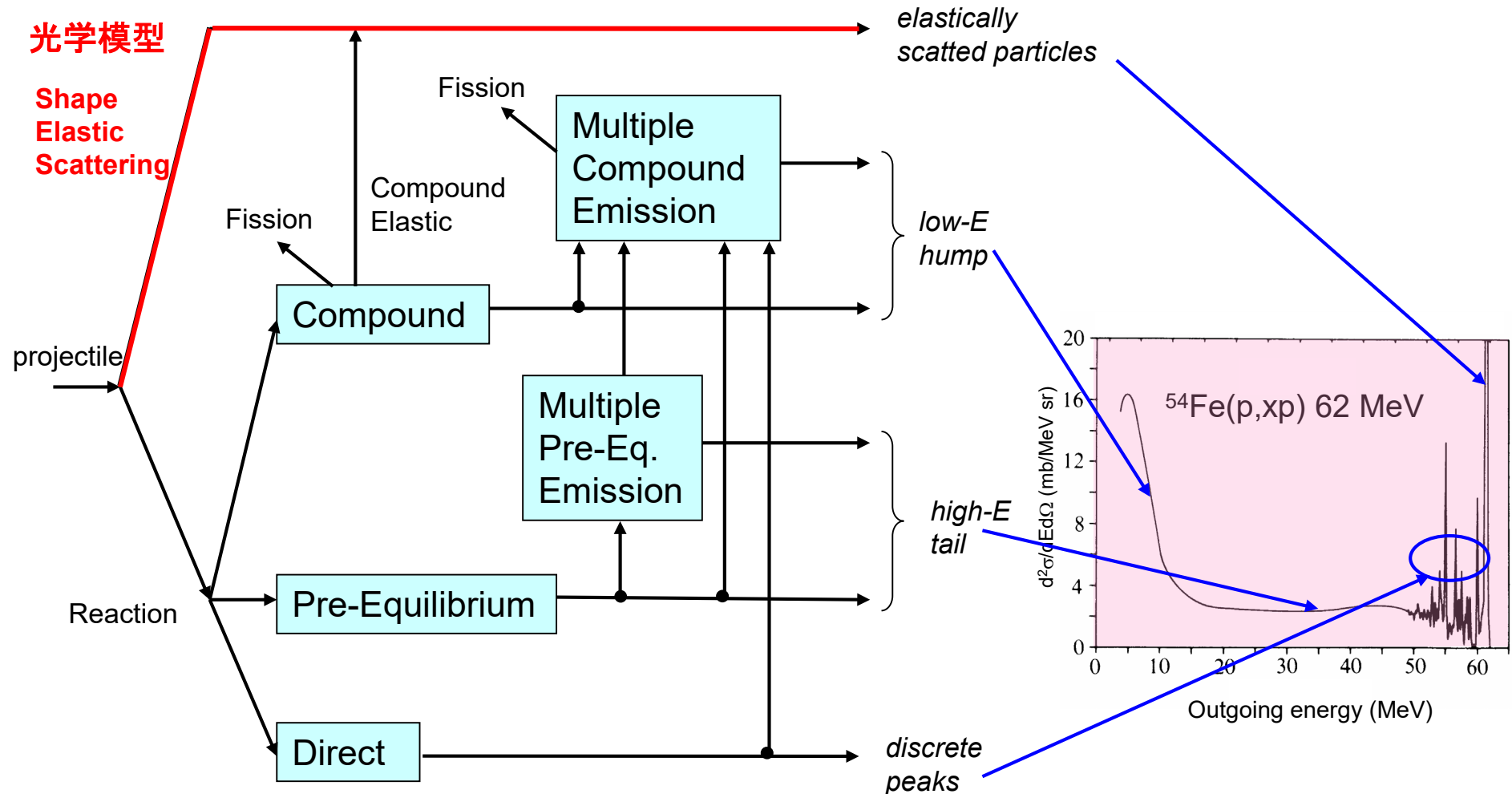
引用: 原子力・量子・核融合事典  
第1分冊 原子核物理とプラズマ物理・核融合  
(丸善出版2017)

# 講演内容

- 自己紹介(研究分野)
- 「核データ」について
- 核子入射原子核反応の概観
- 代表的な原子核反応模型
  - 光学模型
  - 直接反応模型
  - 複合核模型
  - 前平衡反応模型



# Reaction Processes and Outgoing Particle Spectrum



Ref. of exp. data:  
F.E. Bertrand and R.W. Peele, Phys. Rev. **C 8**, 1045 (1973).

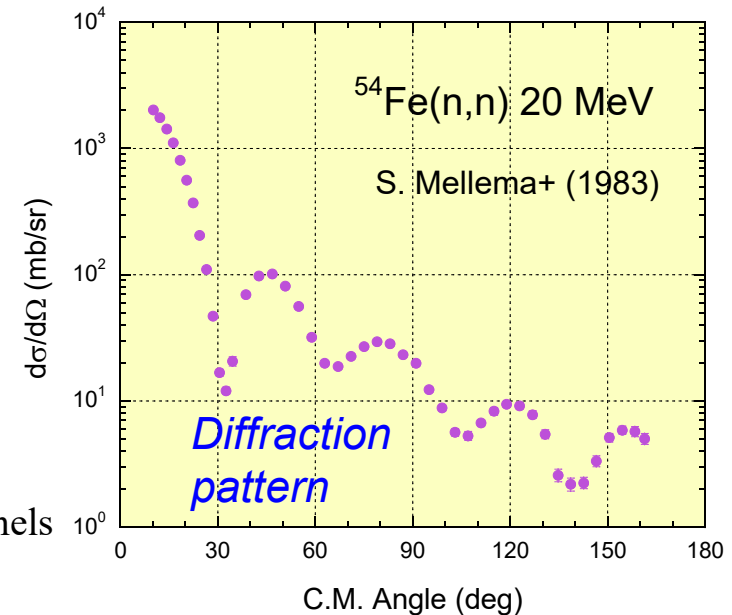
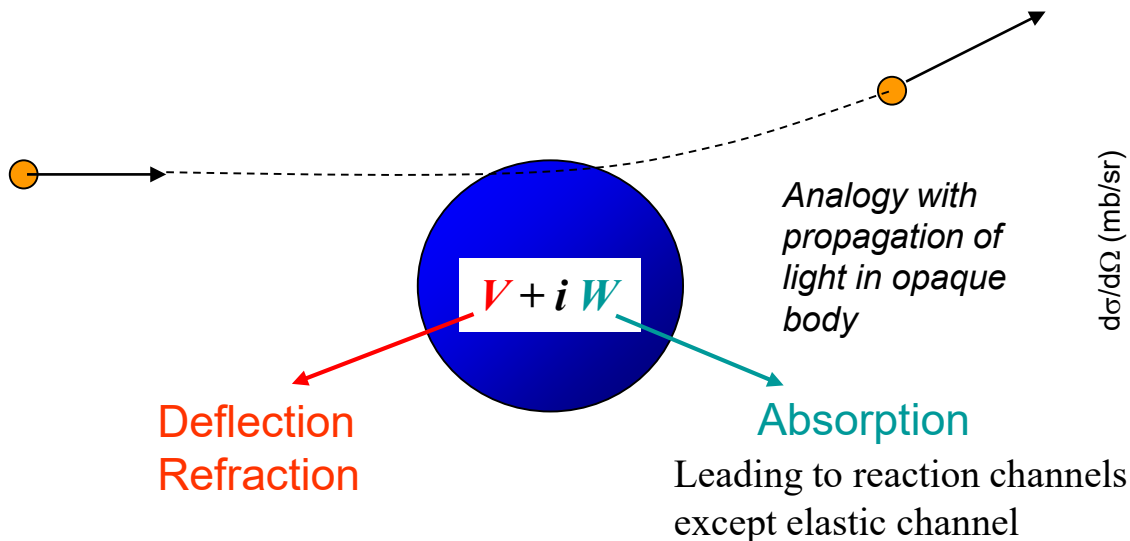
# Optical model for elastic scattering

## Elastic scattering :

Incident particle's direction of motion and state of polarization is changed without loss of energy, by interaction with a target nucleus.

⇒ “Shape elastic scattering” , or potential scattering

The interaction is described by an **optical potential**:  $U(r)=V(r)+iW(r)$  ,  
by analogy with the geometric optics



# Optical Model Potential (OMP)

Optical potential:  $U(r)=V(r)+iW(r)$

$$V(r) = V_C(r) - Vf(x_0) - i \left\{ Wf(x_W) - 4W_D \frac{d}{dx_D} f(x_D) \right\} + \left( \frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 V_{SO} (\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(x_{SO})$$

Coulomb term      Volume term      Imaginary term (Volume+Surface)      Spin-orbit term

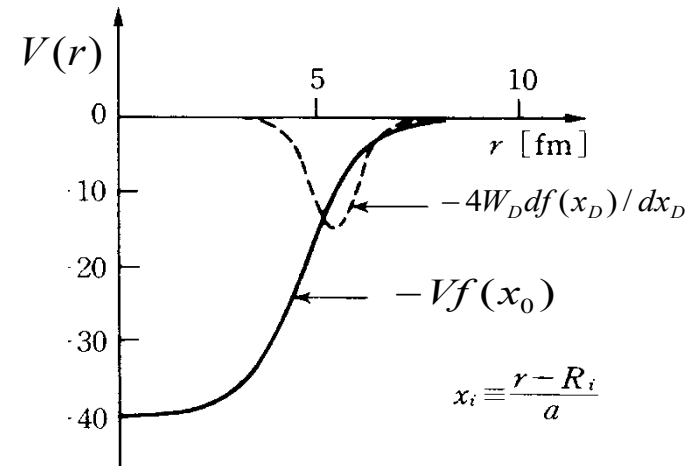
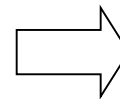
Woods-Saxson form :

$$f(x_i) = \frac{1}{1 + \exp(x_i)} \quad x_i = (r - r_i A^{1/3}) / a_i$$

$A$  : mass number

$r_i$  : nuclear radius parameter

$a_i$  : diffuseness parameter





# Nucleon OMP (1)

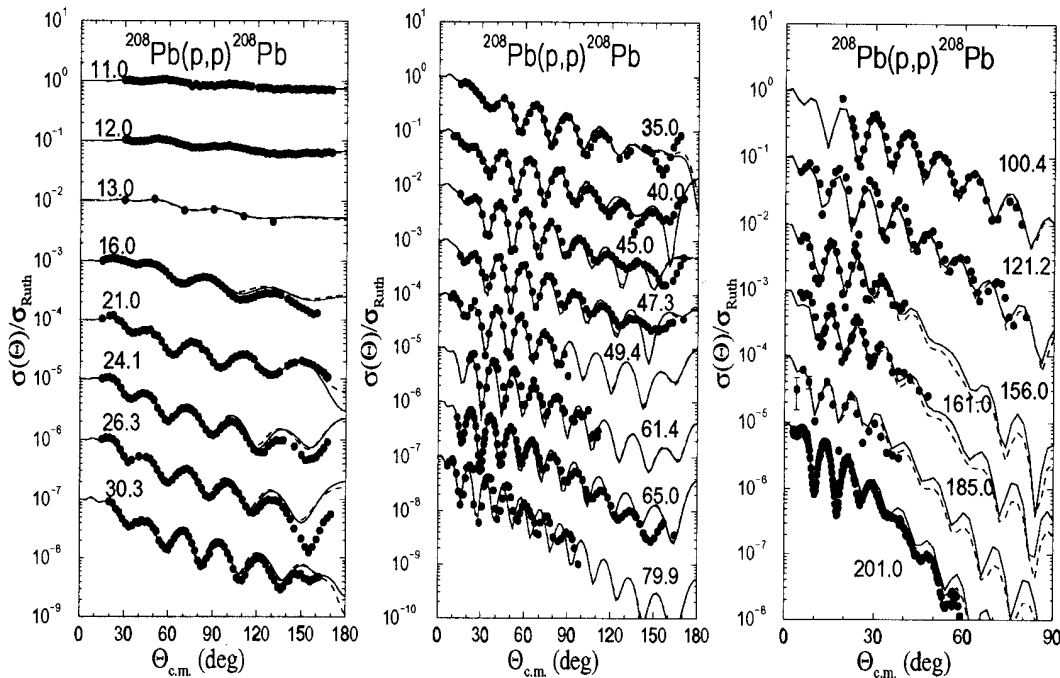
One of the latest parameter sets :

“Local and global nucleon optical potentials for energies **up to 200 MeV**”

A.J. Koning and J.P. Delaroche, *Nucl. Phys. A*713, 231 (2003).

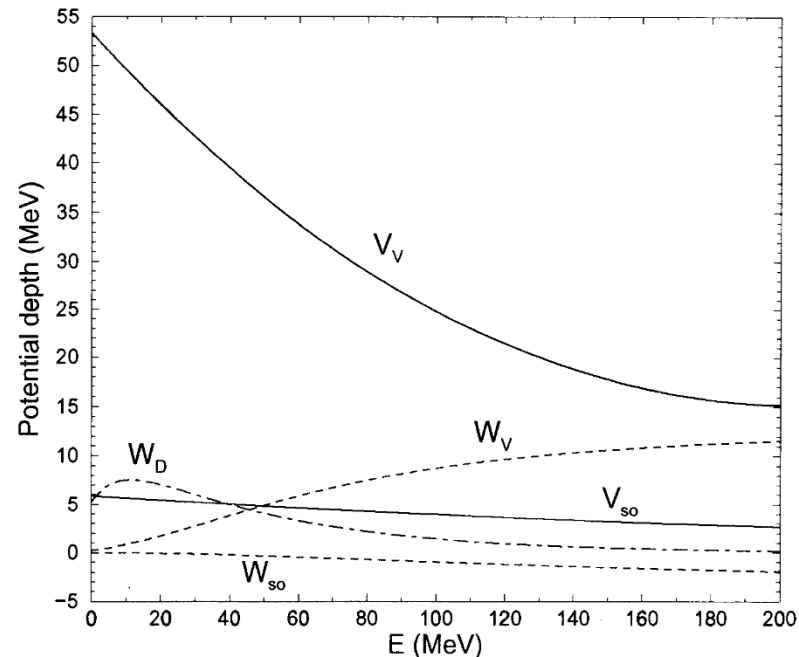
Energy and mass range

$1 \text{ keV} \leq E \leq 200 \text{ MeV}$      $24 \leq A \leq 209$



solid line: local, dashed : global

Energy dependence of potential depth for  $^{56}\text{Fe}$

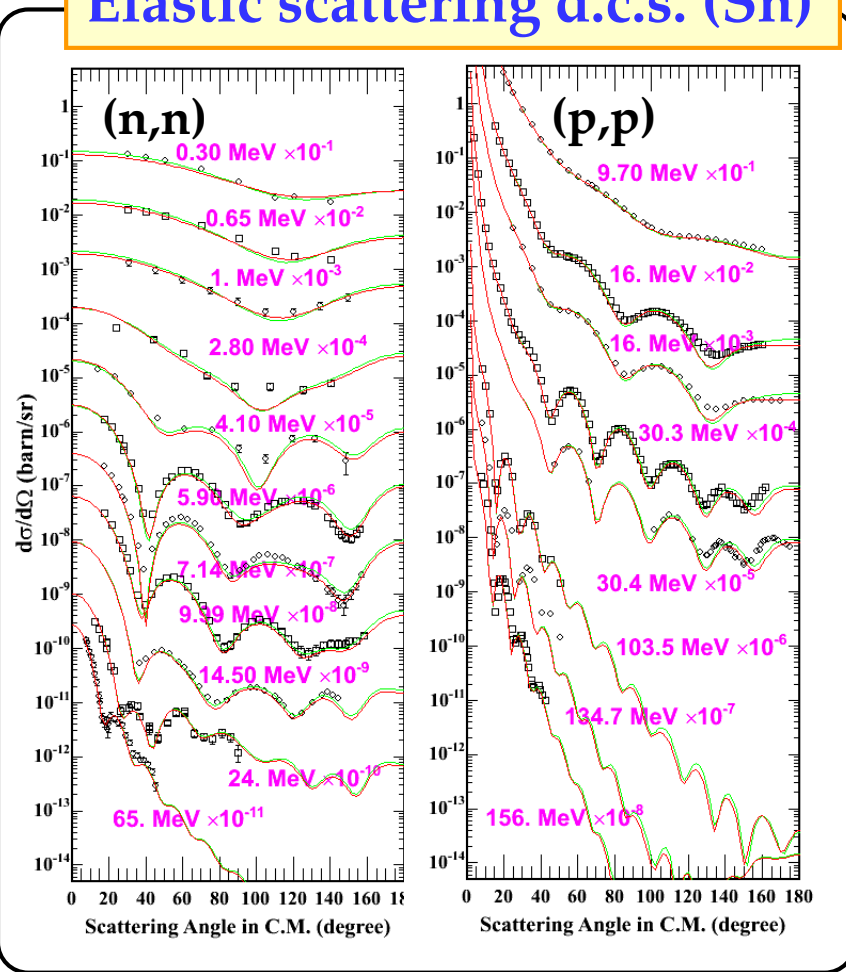
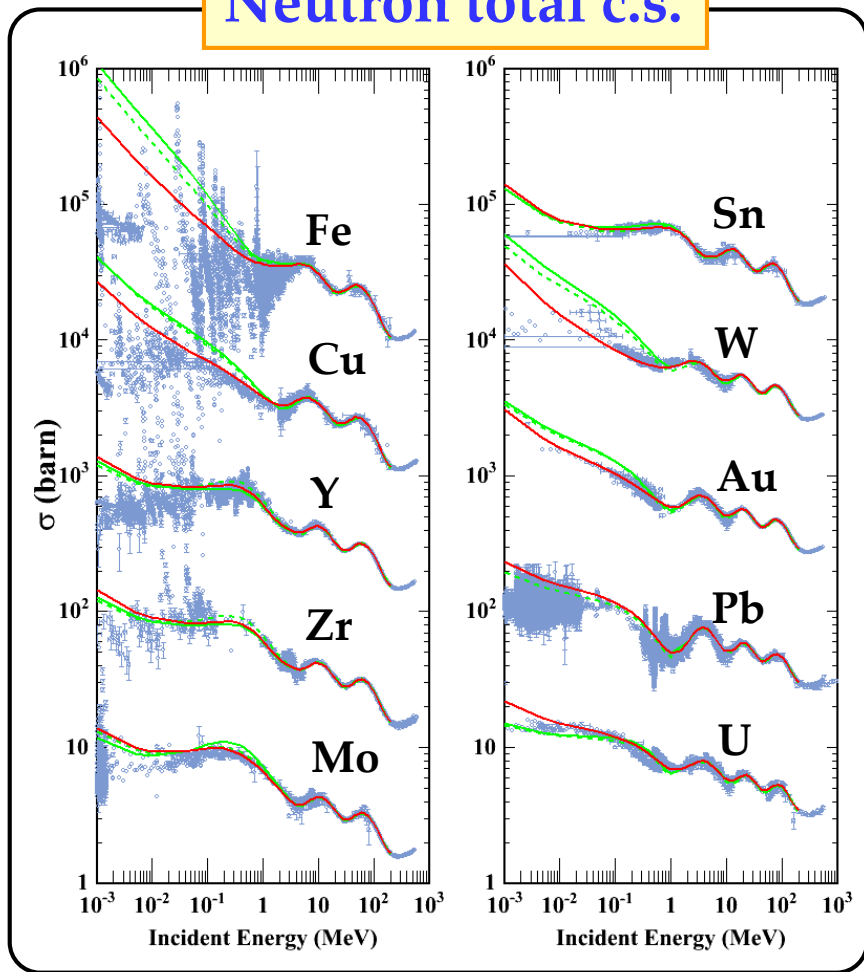


# Nucleon OMP (2)

— Coupled-Channels (OPTMAN)  
 — Spherical Optical Model

## Neutron total c.s.

## Elastic scattering d.c.s. (Sn)

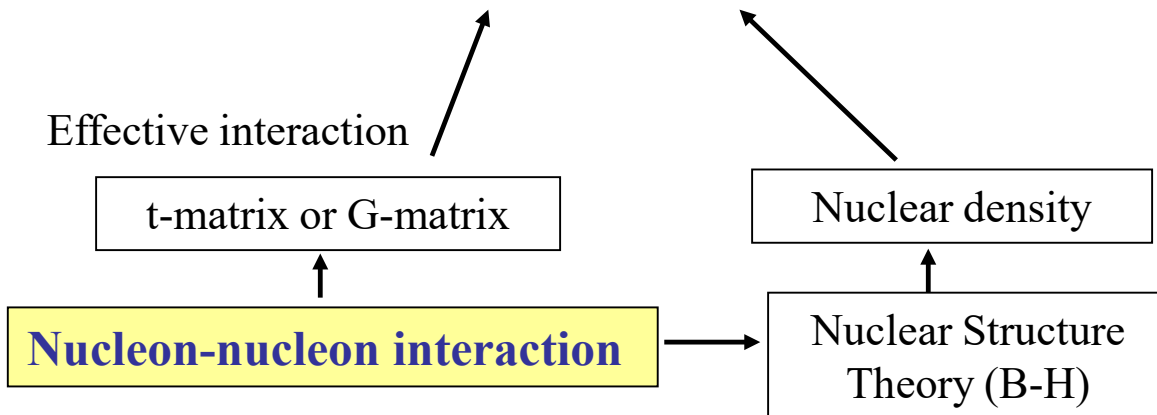


☒ : S. Kunieda (JAEA), private communication (2008).

# Microscopic Optical Potential

Nucleon optical potential based on the folding model

$$U(\mathbf{r}) \approx \int v(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \rho(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

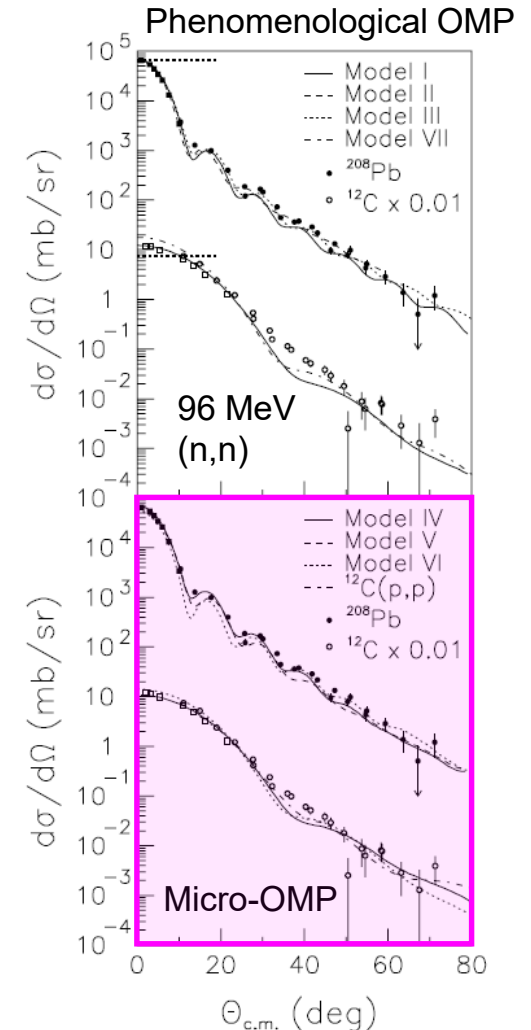


**This method is expected to be effective for unstable nuclei, such as fission products far from stable nuclei regime.**

## References

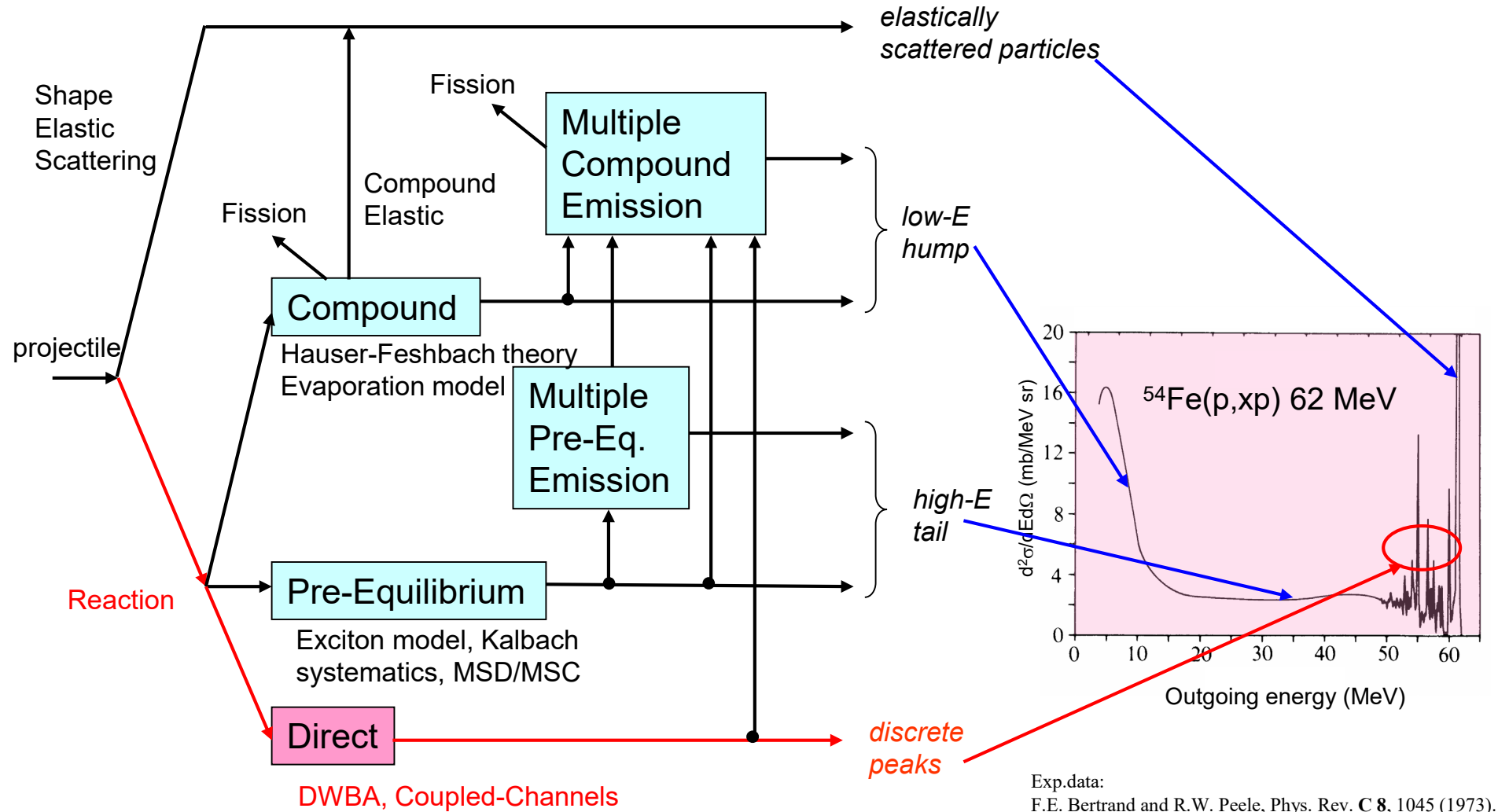
J.P. Jeukenne, A. Lejeune, and C. Mahaux, *Phy. Rev. C* **16**, 80 (1977).

K. Amos et al., *Adv. in Nucl. Phys.* **25**, 275 (2000).



Ref.) J. Klug et al., *PRC67* (2003) 031601(R)

# Reaction Processes and Outgoing Particle Spectrum



Exp.data:  
F.E. Bertrand and R.W. Peele, Phys. Rev. C **8**, 1045 (1973).

# Distorted wave Born approximation: Inelastic scattering

Excitation of **collective states (rotational, vibrational)** by direct inelastic scattering

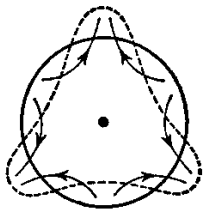
Coupling between those collective states

**Strong**

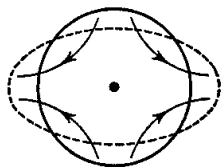
Coupled-channels theory

**Weak**

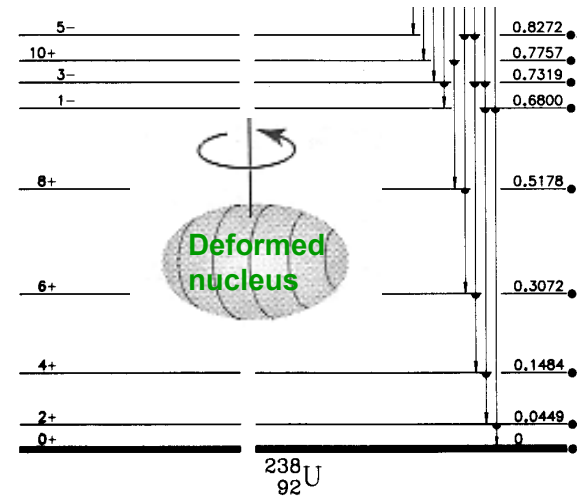
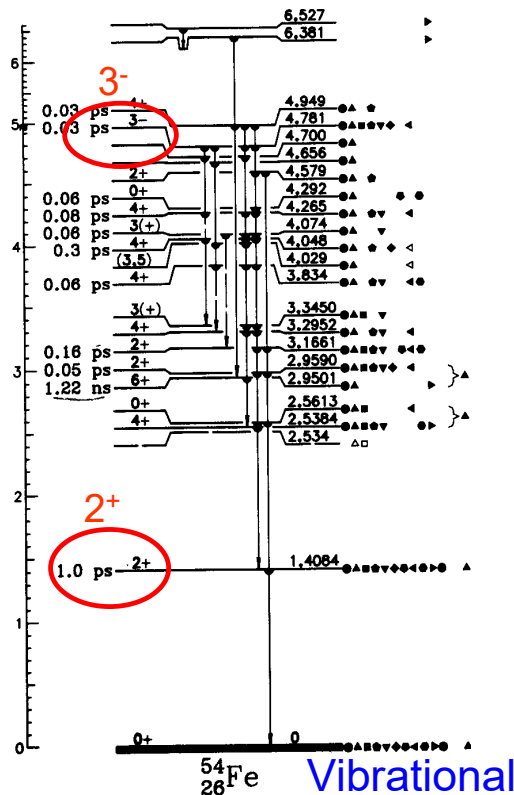
Distorted Wave Born Approximation (DWBA)



L=3:  
Octupole



L=2:  
Quadrupole



# DWBA cross section

Differential cross section

(in the case where the spins of incident particle and target nucleus are zero)

$$\frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} = \frac{\mu_f \mu_i}{(2\pi\hbar^2)^2} \frac{k_f}{k_i} |T_{fi}^{DWBA}|^2$$

$\mu_i, \mu_f$  : reduced mass of  $i$  and  $f$

$k_i, k_f$  : incident and outgoing wave numbers

DWBA T-matrix:

$$|\Phi_i\rangle \xrightarrow{V_i} |\Phi_f\rangle$$

$$T_{fi}^{DWBA} = \langle \chi_f^{(-)} \Phi_f | V_i | \Phi_i \chi_i^{(+)} \rangle$$

Residual interaction

$$\approx \int d\mathbf{r} \chi_f^{(-)*}(\mathbf{r}) I_{fi}(\mathbf{r}) \chi_i^{(+)}(\mathbf{r})$$

Distorted wave

Collective  
Form  
factor:

$$I_{fi}(r) = \beta_L R \frac{dU(r)}{dr}$$

Optical Potential

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U_c(r) \right] \chi_c(r) = E \chi_c(r), \quad c = i \text{ or } f$$

deformation parameter

# Inelastic scattering to collective excitation

Optical potentials between projectile and target



input

**DWUCK4 code :**

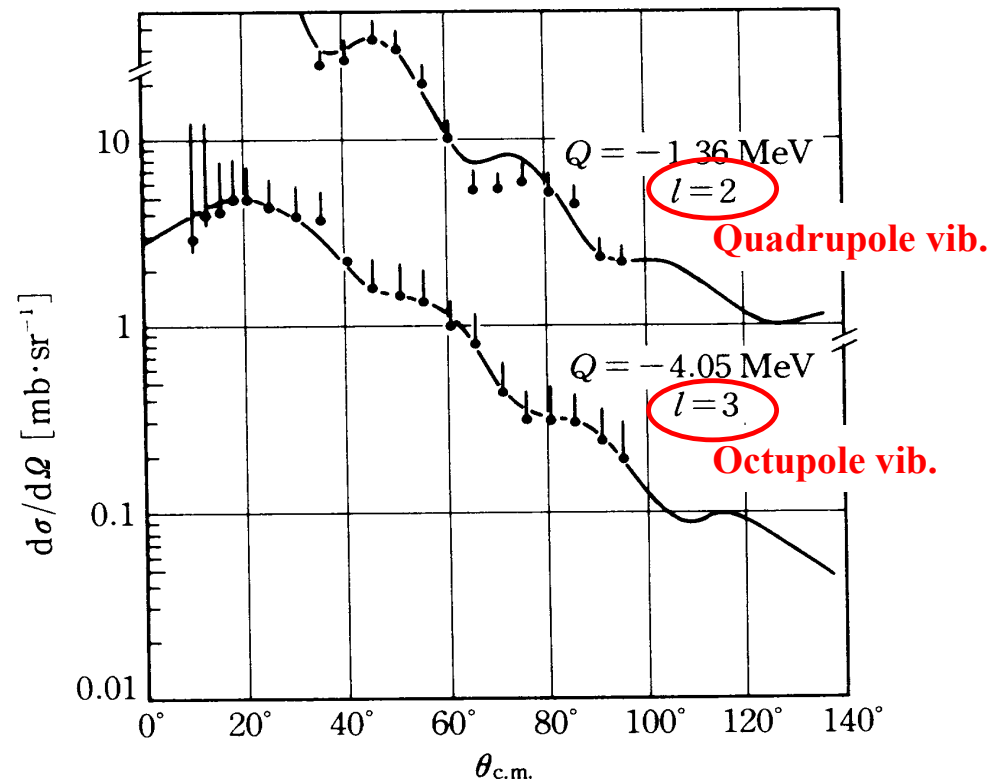
P.D. Kunz, *Computational Nuclear Physics 2* (Springer-Verlag, 1993), p.88

$$\frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} = \beta_L^2 \frac{d\sigma_L^{DW}}{d\Omega}$$

$L$ : multiplicity (transferred angular momentum for even-even nucleus)

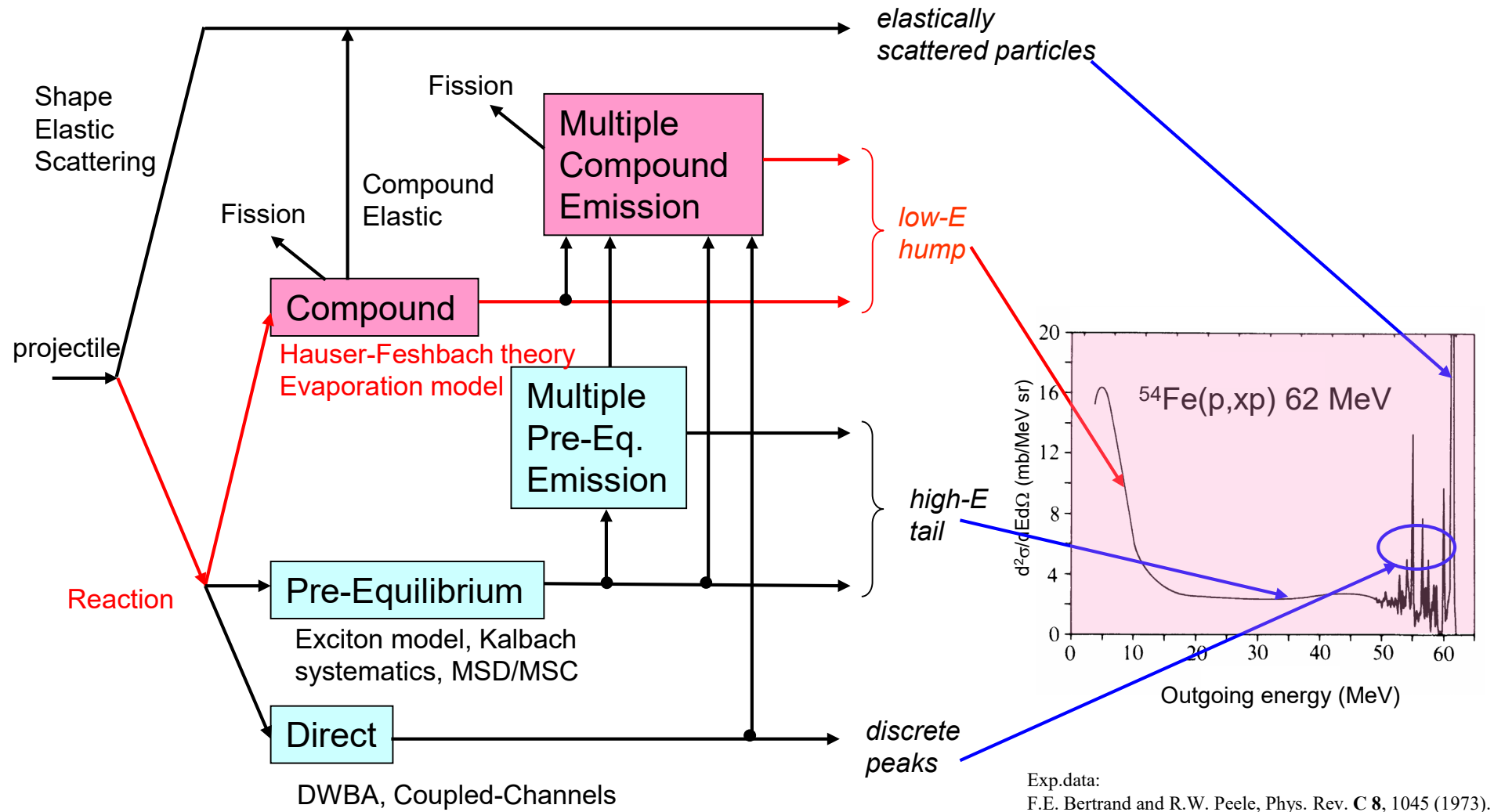
Measured or Nuclear structure calculation

$^{60}\text{Ni}(p,p')@40\text{MeV}$  DWBA calculation



Ref.) M.P. Friche and G.R. Satchler, *Phys. Rev.* **139**, 567 (1965).

# Reaction Processes and Outgoing Particle Spectrum





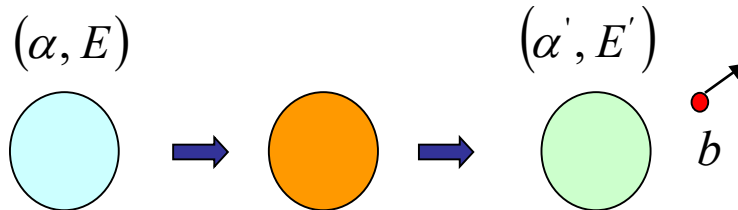
# Statistical model for compound nucleus process

## Compound Nucleus

Reaction



Channel, Energy



Spin

$$i \quad I \quad \ell \quad J \quad \ell' \quad i' \quad I'$$

Channel spin

$$j = i + I \quad j' = i' + I'$$

Orbital angular momentum

Parity

$$\pi_a \cdot \pi_T \cdot (-1)^\ell = P = \pi_b \cdot \pi_R \cdot (-1)^{\ell'}$$

Resonance peaks are overlapped as incident energy increases



Statistical treatment



Hauser-Feshbach theory

$$\sigma_{\alpha\alpha'} = \pi \tilde{\lambda}_\alpha^2 \sum_{PJ\ell j \ell' j'} \frac{2J+1}{(2i+1)(2I+1)} \frac{T_{\alpha\ell}^J T_{\alpha'\ell'j'}^J}{\sum_{\alpha''\ell''j''} T_{\alpha''\ell''j''}^J}$$

de Broglie wavelength of incident channel  $\alpha$

Transmission coefficient calculated by the optical model

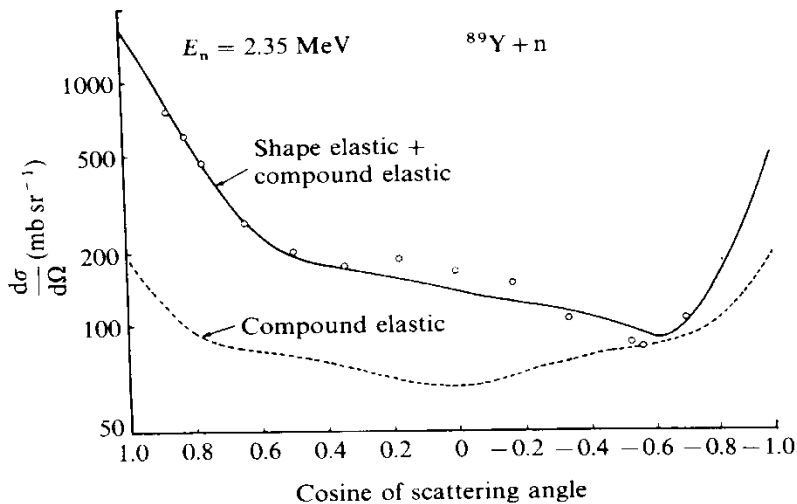
$$T_L = 1 - |S_L|^2$$

Ref.) W. Hauser and H. Feshbach, Phys. Rev. **87**, 366 (1952).

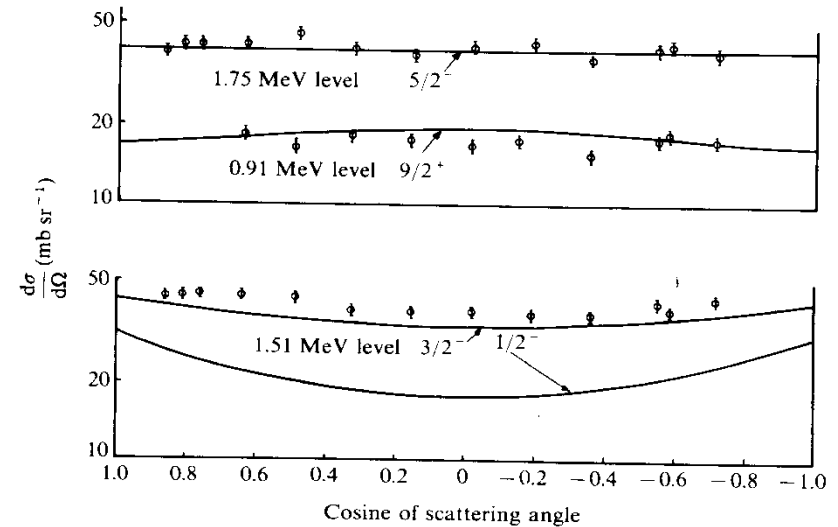
# Results of HF calculations

## $^{89}\text{Y}(n,n) \text{ \& } (n,n') \text{ @ } 2.35 \text{ MeV}$

### Elastic scattering



### Inelastic scattering



**Fig. 3.11** Differential cross-section for the elastic scattering of 2.35 MeV neutrons by  $^{89}\text{Y}$  compared with optical model and Hauser-Feshbach calculations (Towle 1969).

**Fig. 3.13** Differential cross-sections for the inelastic scattering of 2.35 MeV neutrons by  $^{89}\text{Y}$ , compared with Hauser-Feshbach calculations (Towle 1969).



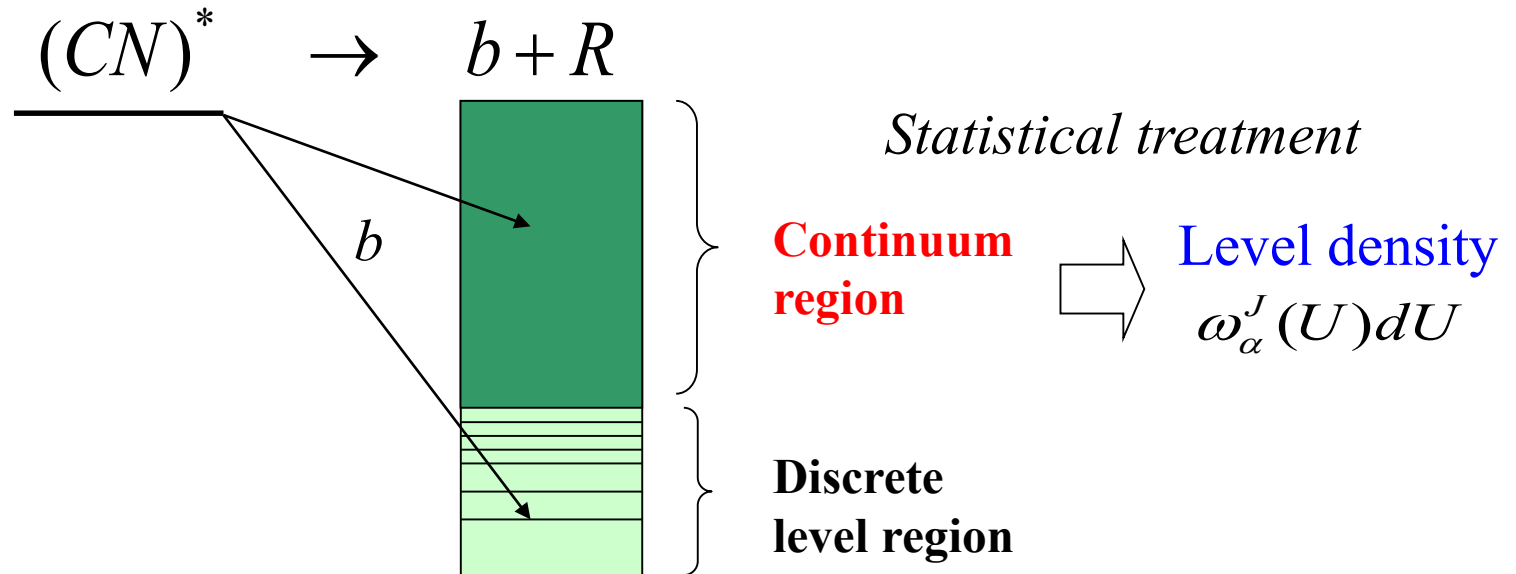
**Effect of compound elastic scattering**



**90° symmetry**

# Transition to continuum final states: H-F theory

Extension to transition to continuum final states



$$\sigma_{\alpha\alpha'}(E, E')dE' = \pi\hat{\kappa}_\alpha^2 \sum_{Pj\ell} \frac{(2J+1)T_{\alpha j \ell}^J \sum_{j'\ell'I'} T_{\alpha' j' \ell'}^J \omega_{\alpha'}^{I'}(U')dE'}{(2i+1)(2I+1) \left\{ \sum_{\alpha''\ell''j''(discrete)} T_{\alpha''\ell''j''}^J + \sum_{\alpha''\ell''j''} \int T_{\alpha''\ell''j''}^J \omega_{\alpha''}^{I''}(U'')dE'' \right\}}$$

# Level density

## Gilbert-Cameron Formula

Ref.) A. Gilbert, A. G. W. Cameron, Canadian J. Phys. 43, 1446 (1965).

$E \geq E_m$  Fermi-gas model

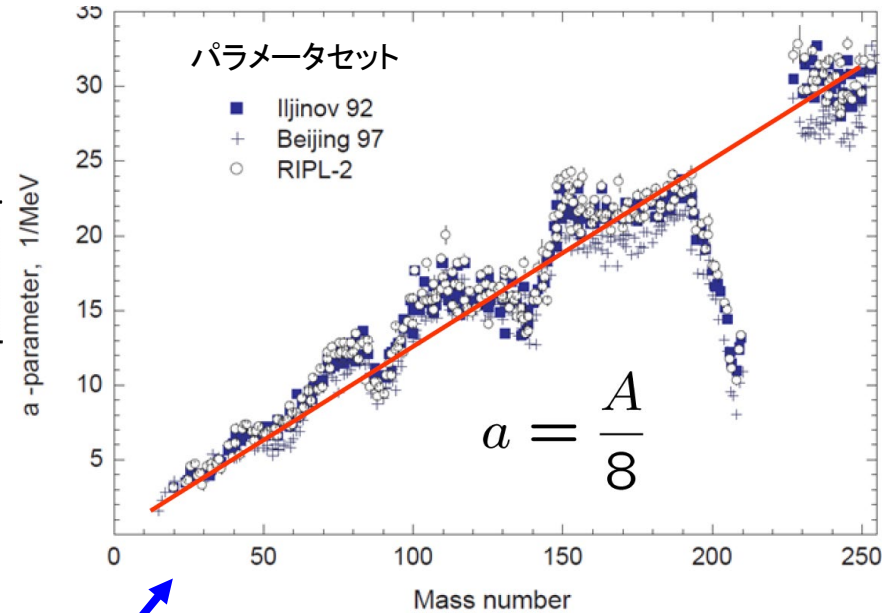
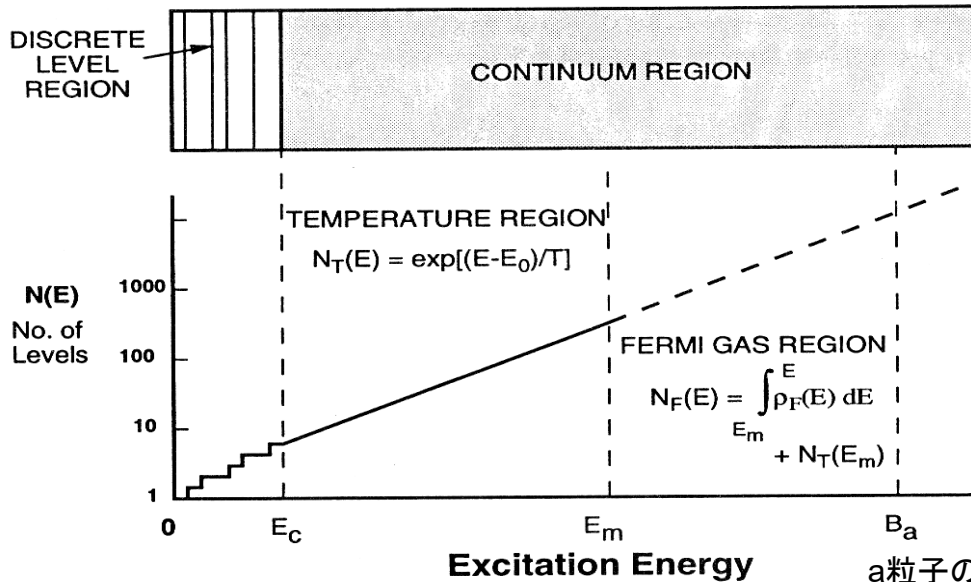
$$\rho(E) = \frac{\pi}{12} \frac{\exp[2\sqrt{a(E-\delta)}]}{a^{1/4} (E-\delta)^{5/4}}$$

$a$  : level density parameter (MeV<sup>-1</sup>)

$\delta$  : pairing energy

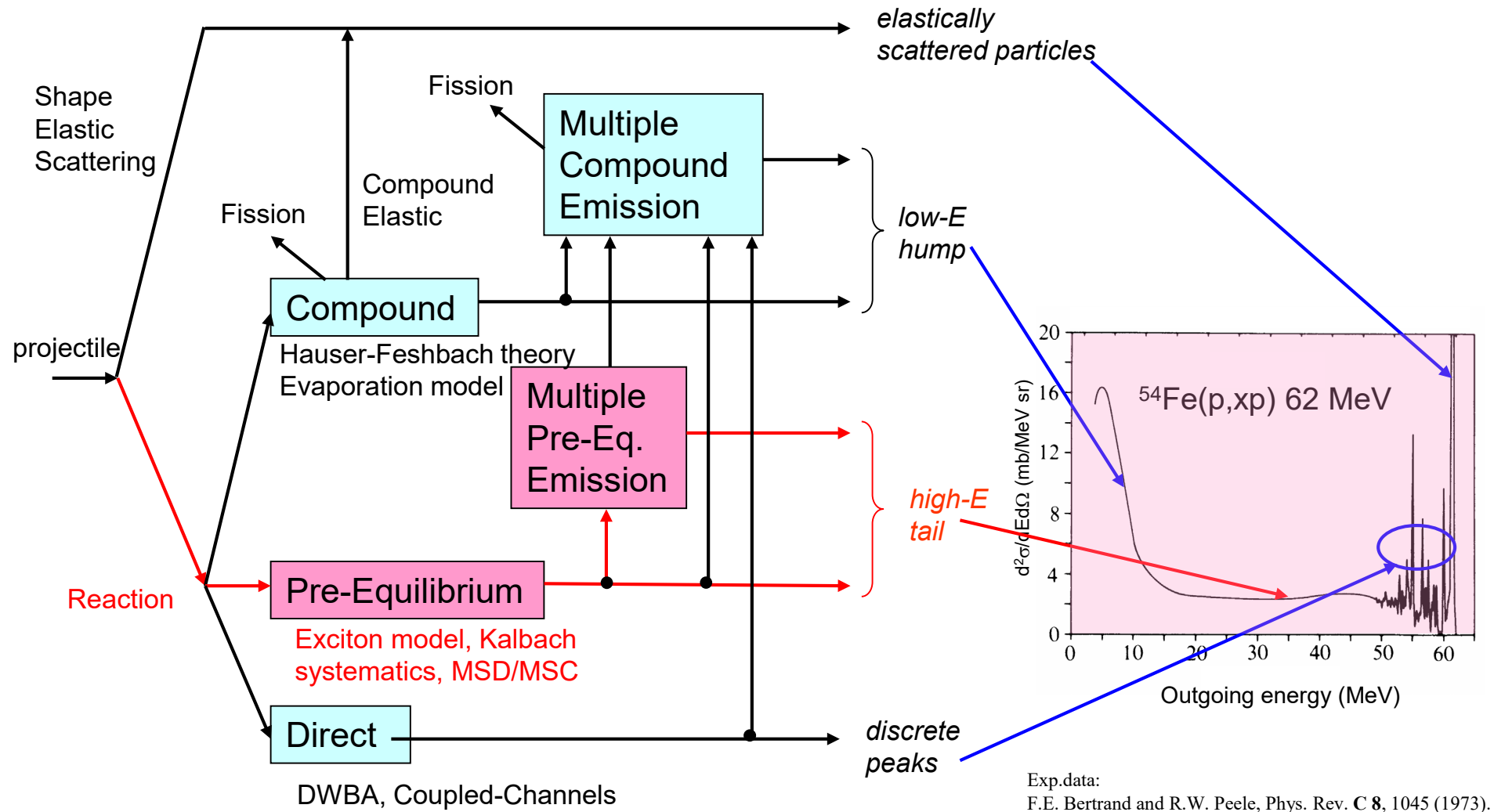
$E < E_m$  Constant temperature model

$$\rho(E) = \frac{\pi}{12} \frac{\exp[(E-E_0)/T]}{T}$$



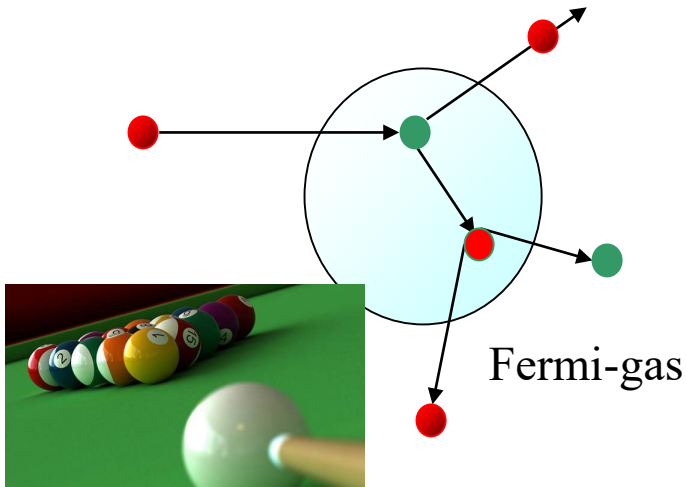
a粒子の結合エネルギー

# Reaction Processes and Outgoing Particle Spectrum



# 前平衡反応過程の描像

## ■ 核内カスケードモデル



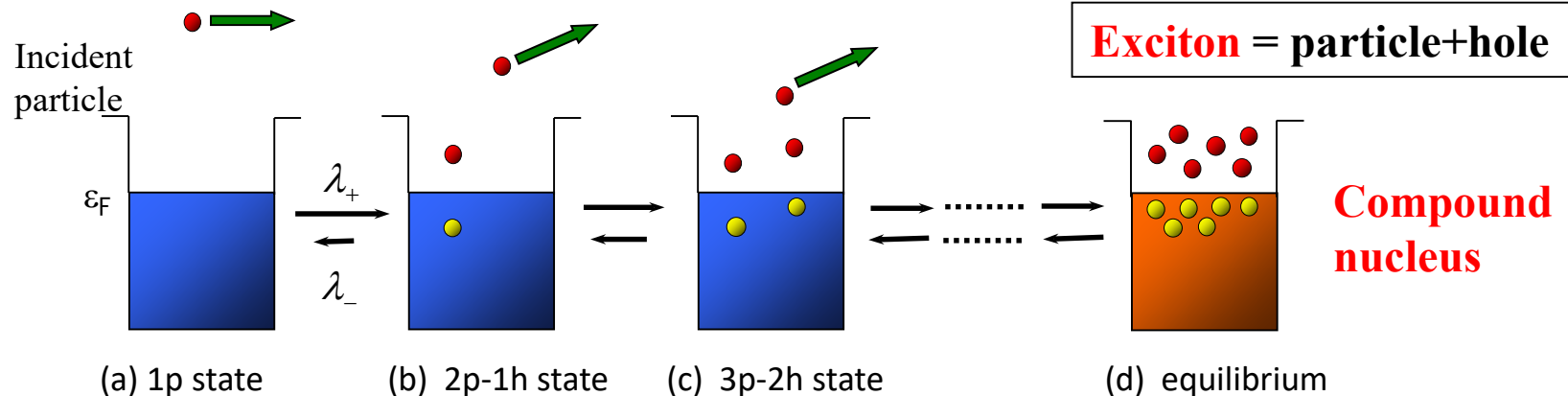
連続した核内2体核子核子衝突として反応を取り扱う。

モンテカルロ法を使って、各核子の飛跡を核外へ放出されるまで追跡する。

この描像は入射波のド・ブROI波長が核内核子間距離より短い場合に成り立つ近似 ( $E_{in} > 100 \text{ MeV}$ )

## ■ 励起子モデル

エネルギー空間上で、励起子の占有確率の時間発展を記述する。  
(非平衡統計力学: マスター方程式)



# Exciton model (励起子モデル)

**Master equation** for the occupation probability :  $P(n, t)$  Non-equilibrium statistical dynamics

$$\frac{d}{dt} P(n, t) = \sum_m \lambda_{m \rightarrow n} P(m, t) - P(n, t) \left\{ \sum_m \lambda_{n \rightarrow m} + W_n \right\}$$

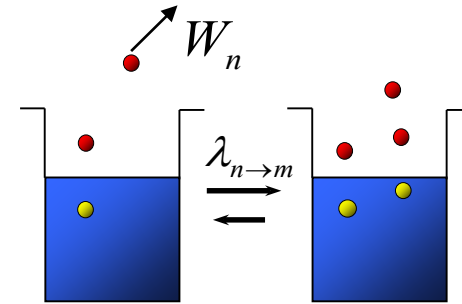
$\lambda_{n \rightarrow m}$  : transition probability from  $n$ -exciton state to  $m$ -exciton state

$W_n$  : particle emission probability from  $n$ -exciton state

$$\lambda_{n \rightarrow m} = \frac{2\pi}{\hbar} \overline{|M|^2} \rho_m \quad \left( \overline{|M|^2} = \boxed{K} A^{-3} E^{-1} \right)$$

Adjustable para.

$$\int_0^{T_{eq}} P(n, t) dt \equiv \tau(n)$$



Cross section for the reaction  $A(a, b)B$  :

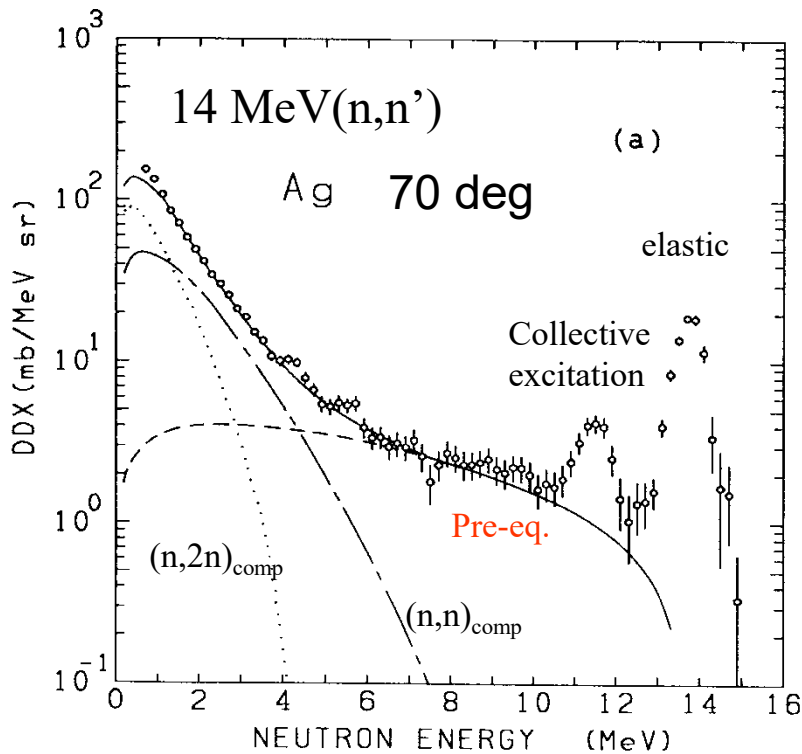
$$\left( \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)^{preeq} = \sigma_{abs} \sum_{\substack{n=n_0 \\ \Delta n=2}} W_b(n, \varepsilon) \tau(n)$$

$\sigma_{abs}$  : formation cross section of a composite nucleus (  $a + A$  system)

$W_b(n, \varepsilon)$  : emission probability of particle  $b$  with  $\varepsilon$  from  $n$ -exciton state

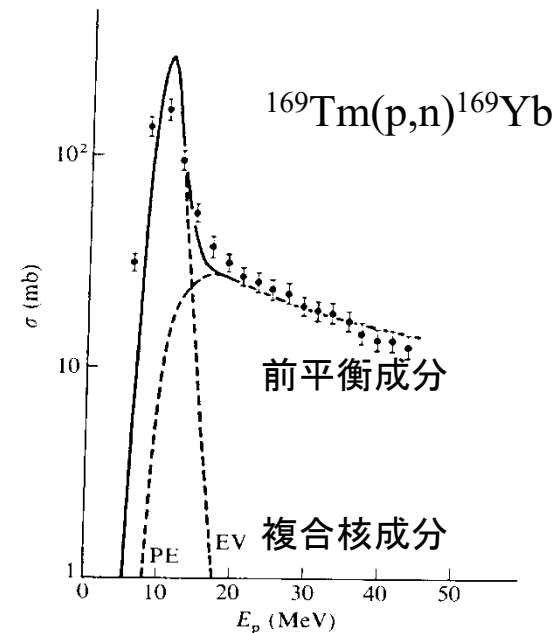
# Results of Exciton model calculations

A great number of calculations have so far demonstrated that the exciton model reproduces accurately **the angle-integrated spectra** of the particles emitted in pre-equilibrium reactions, particularly for nucleon emission.



Ref.) Y. Watanabe et al., *Phys. Rev. C* **37**, 963 (1988).

D論ワーク



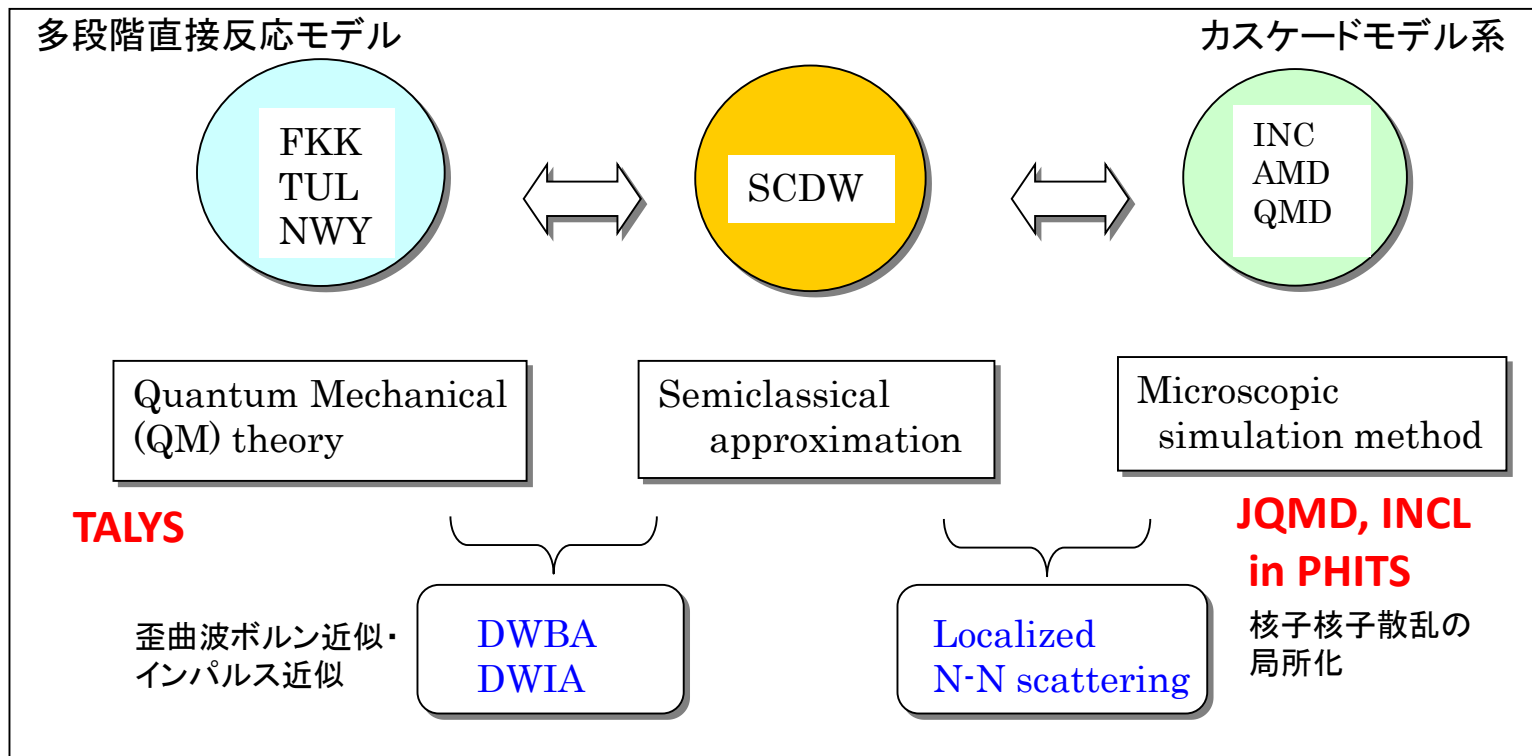
**Fig. 1.7** Excitation function of the reaction  $^{169}\text{Tm}(p,n)^{169}\text{Yb}$ . The curves are the results of a theoretical calculation based on the exciton model (Birattari *et al.* 1973).

Ref.) C. Birattari et al. : *Nucl. Phys.* **A201** (1973) 605.

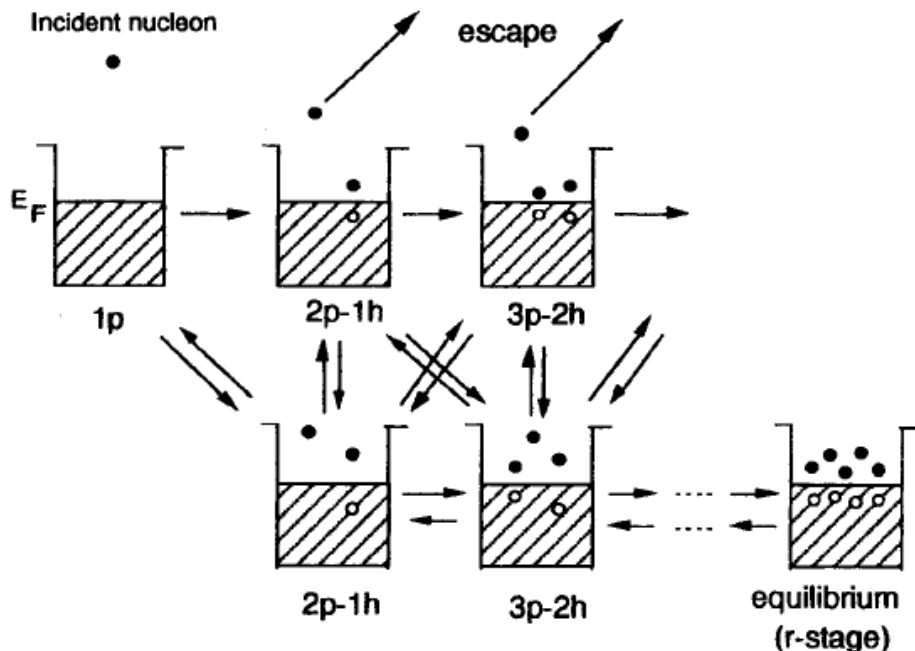


# 前平衡モデル研究

- 励起子モデル Exciton model (半古典的・現象論的)
- **量子力学的モデル Feshbach-Kerman-Kooning model**
- 半古典的歪曲波モデル SCDW
- 量子分子動力学 QMD、核内カスケードモデル INCL



# Feshbach-Kerman-Kooning (FKK) model



## 多段階直接過程(MSD)

MSD

- 少なくとも1粒子は非束縛状態 (P空間)
- 角分布は前方性
- 入射エネルギーが高くなると支配的

## 多段階複合核過程(MSC)

MSC

- すべての粒子が束縛状態 (Q空間)
- 角分布は90° 対称

## MSDのFKK公式

$$1\text{-step} \quad \left( \frac{d^2\sigma}{dUd\Omega} \right)_{1\text{-step}} = \sum_L (2L+1) \omega(U, L) \left\langle \frac{d\sigma_L^{(DW)}}{d\Omega} \right\rangle$$

DWBA断面積

$L$  : 移行角運動量 (終状態スピン)  
 $\omega(U, L)$  : 終状態密度

$$2\text{-step} \quad \left( \frac{d^2\sigma}{dUd\Omega} \right)_{2\text{-step}} = \int \frac{d\mathbf{k}_1}{(2\pi)^3} \left( \frac{d^2W_{21}(\mathbf{k}_f, \mathbf{k}_1)}{dUd\Omega} \right) \left( \frac{d^2\sigma(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_i)}{dUd\Omega} \right)_{1\text{-step}}$$

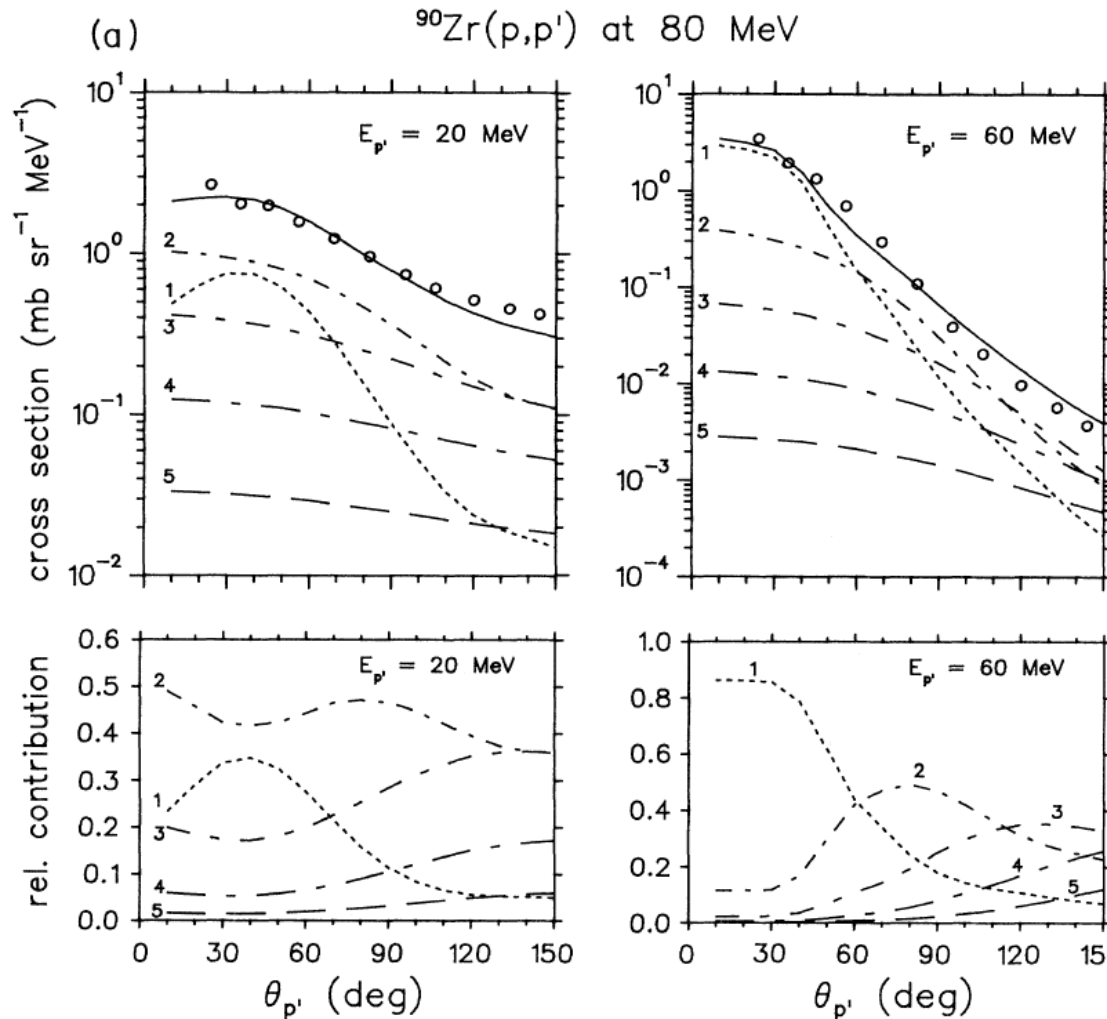
$\mathbf{k}_i \rightarrow \mathbf{k}_1 \rightarrow \mathbf{k}_f$

$$\left( \frac{d^2W_{21}(\mathbf{k}_f, \mathbf{k}_1)}{dUd\Omega} \right) = 2\pi^2 \rho(\mathbf{k}_f) \rho_2(U) \left\langle |v_{2,1}(\mathbf{k}_f, \mathbf{k}_1)|^2 \right\rangle$$

状態密度      状態間遷移行列要素

Ref.) H. Feshbach et al.,  
 Ann. Phys. (N.Y.) 125,  
 429 (1980)

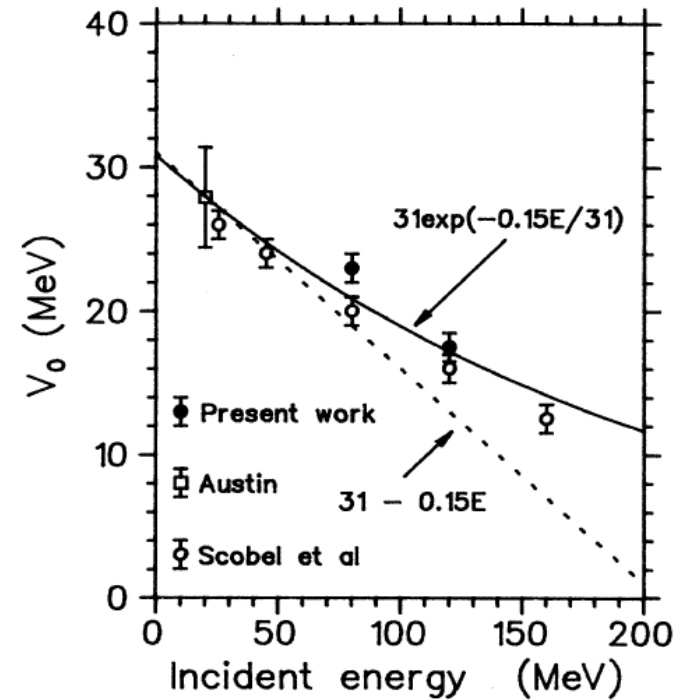
# FKKモデルの適用例



DWBA断面積計算に必要な  
有効NN相互作用のエネルギー  
依存性の調査

$$V(r) = V_0 \exp(-\mu r) / r$$

$$\mu = 1.0 \text{ fm}^{-1}$$

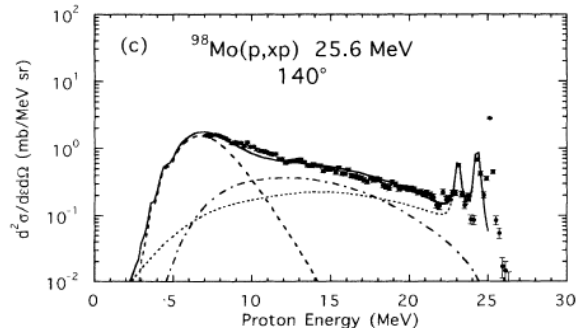
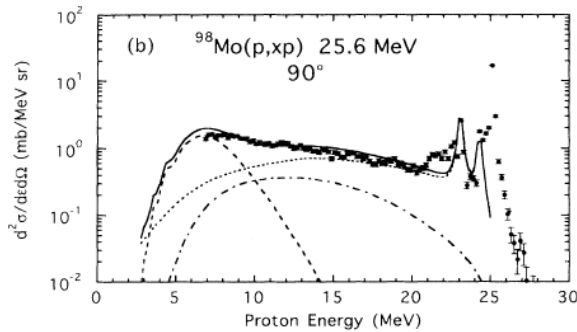
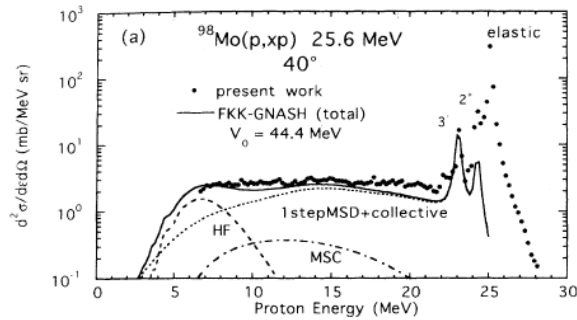


# 九大-JAEA-Oxfordのコラボ



## 26 MeV領域 (p,xp)まで拡張

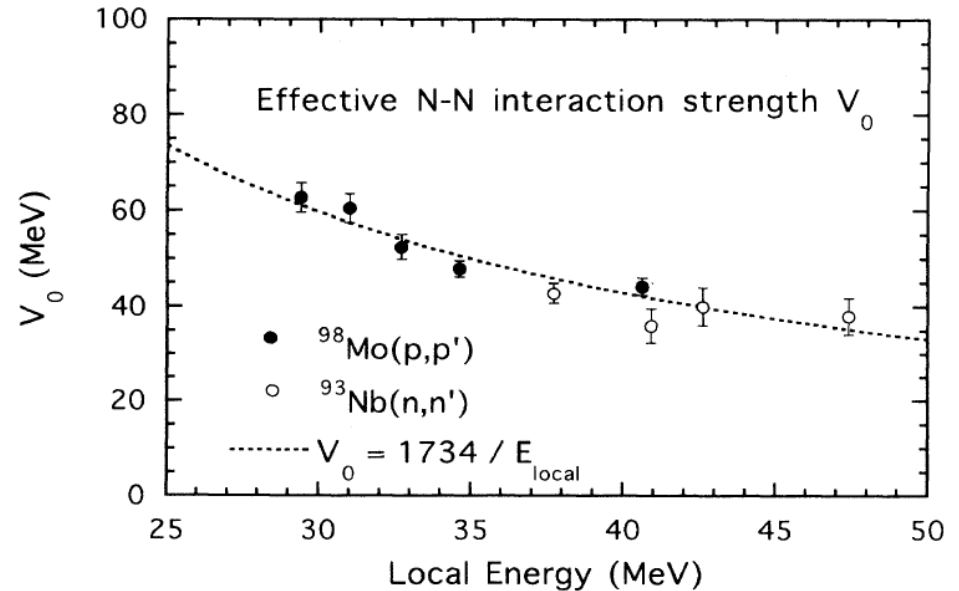
- Feshbach-Kerman-Kooninモデル解析 (量子論的扱い: 1-stepのみ考慮)  
In collaboration with P.E. Hodgson @Oxford大



DWBA断面積計算に必要な  
有効NN相互作用のエネルギー依存性の決定

$$V(r) = V_0 \exp(-\mu r) / r$$

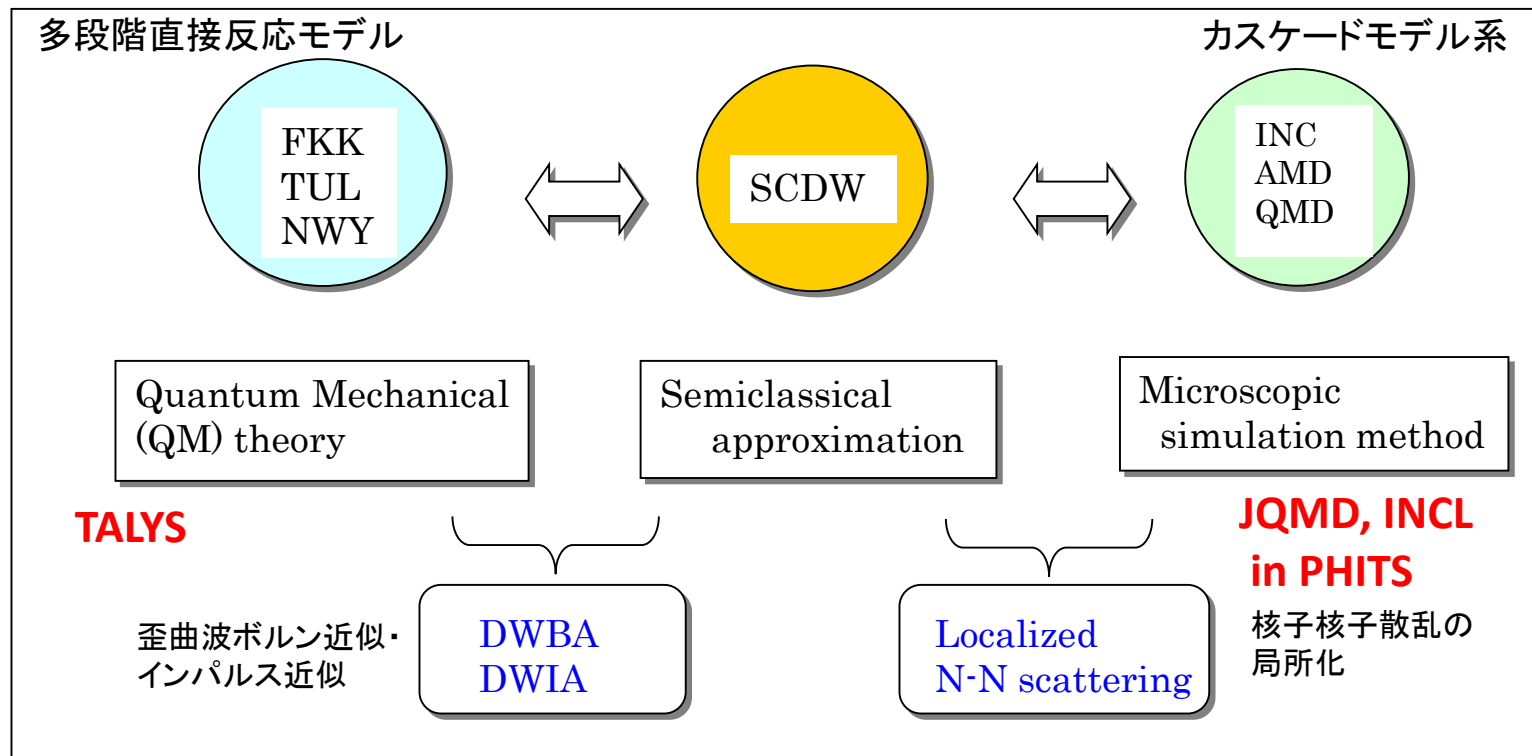
$$\mu = 1.0 \text{ fm}^{-1}$$



Ref.) Y. Watanabe et al., Phys. Rev. C 51, 1891 (1995).

# 前平衡モデル研究

- 励起子モデル Exciton model (半古典的・現象論的)
- 量子力学的モデル Feshbach-Kerman-Kooning model
- 半古典的歪曲波モデル SCDW
- 量子分子動力学 QMD、核内カスケードモデル INCL

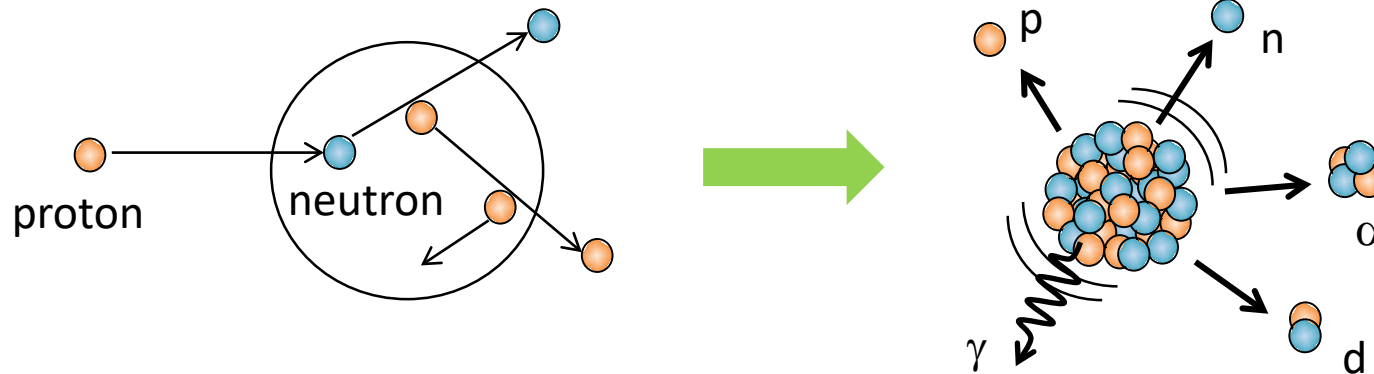


# Theoretical model analysis using PHITS code

## Intra-nuclear cascade + evaporation processes

Successive binary NN collision

De-excitation from highly-excited pre-fragments



Computer code: Particle and Heavy Ion Transport code System (**PHITS**)

*T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol., vol. 55, 684–690 (2018).*

Reaction model: Intra-nuclear cascade or QMD + Evaporation model

1) Cascade → **Liege Intranuclear Cascade model (INCL 4.6)**

*A. Boudard et al., Phys. Rec. C 87 (2013) 014606.*

**JQMD**

*K. Niita et al., Phys. Rev. C 52 (1995) 2620.*

2) Evaporation → **Generalized Evaporation Model (GEM)**

*S. Furihara, Nucl. Instrum. and Meth. B 171 (2000) 251.*

# Quantum Molecular Dynamics (QMD)

Semiclassical simulation method to describe **the time evolution of nucleon many-body system in a microscopic way.**

- Each nucleon state is represented by the Gaussian wave packet :

$$\phi_i(\mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi L)^{3/4}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{R}_i)^2}{4L} + \frac{i}{\hbar} \mathbf{r} \cdot \mathbf{P}_i\right]$$

- Total wave function : direct product of these wave functions
- The time evolution of  $\mathbf{R}_i$  and  $\mathbf{P}_i$  is described by Newtonian equation :

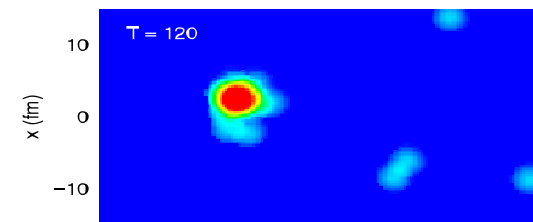
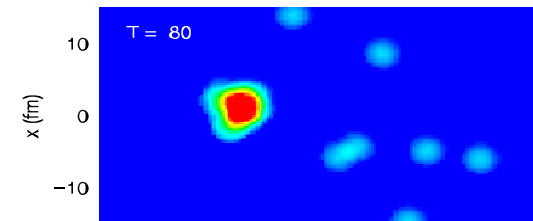
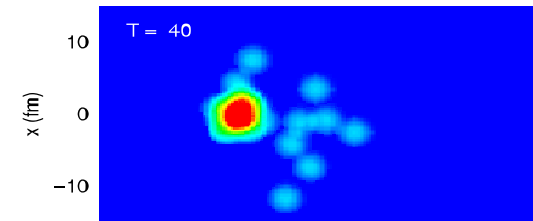
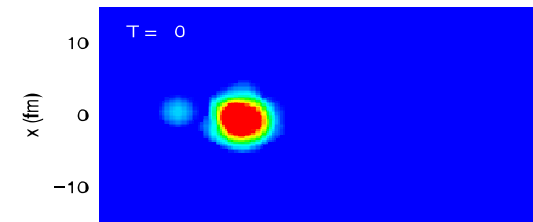
$$\dot{\mathbf{R}}_i = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{P}_i}, \quad \dot{\mathbf{P}}_i = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{R}_i}$$

$H$  :  
Hamiltonian

and the stochastic two-body collision.

JQMD code by  
Niita et al.

$n + {}^{28}\text{Si}$  @ 1000MeV

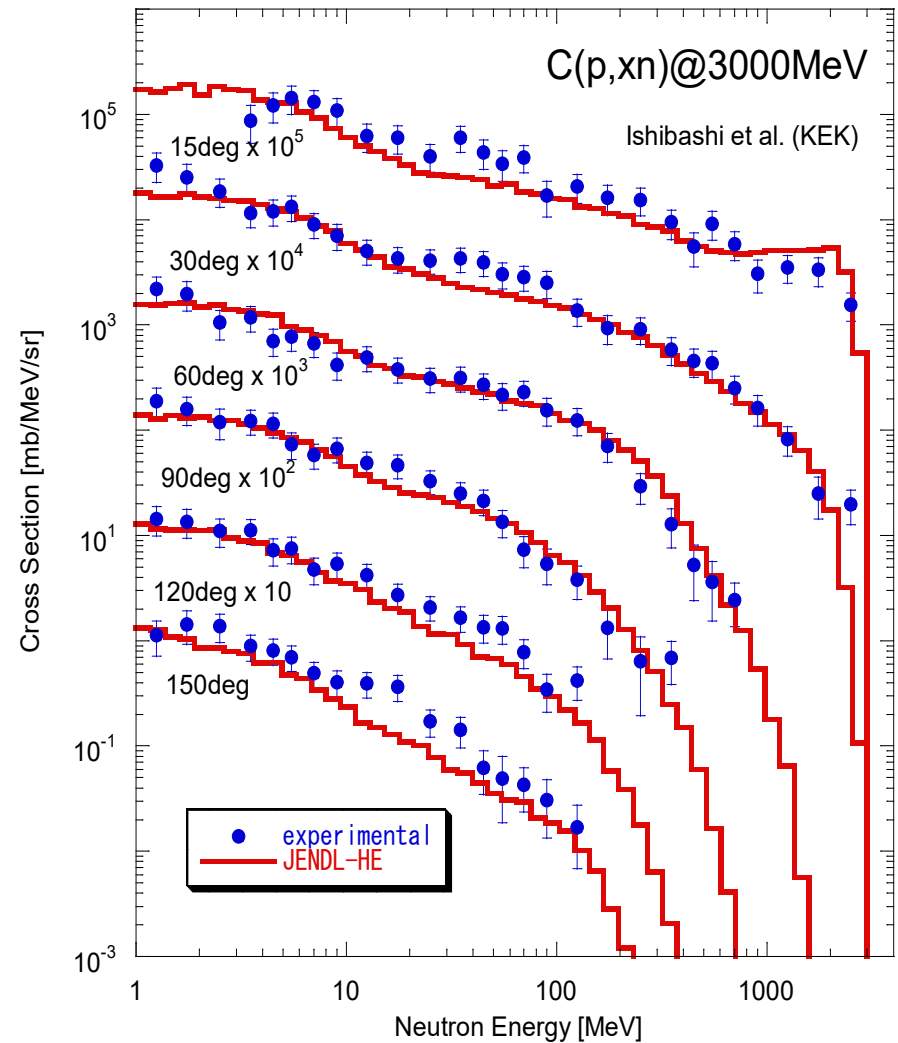
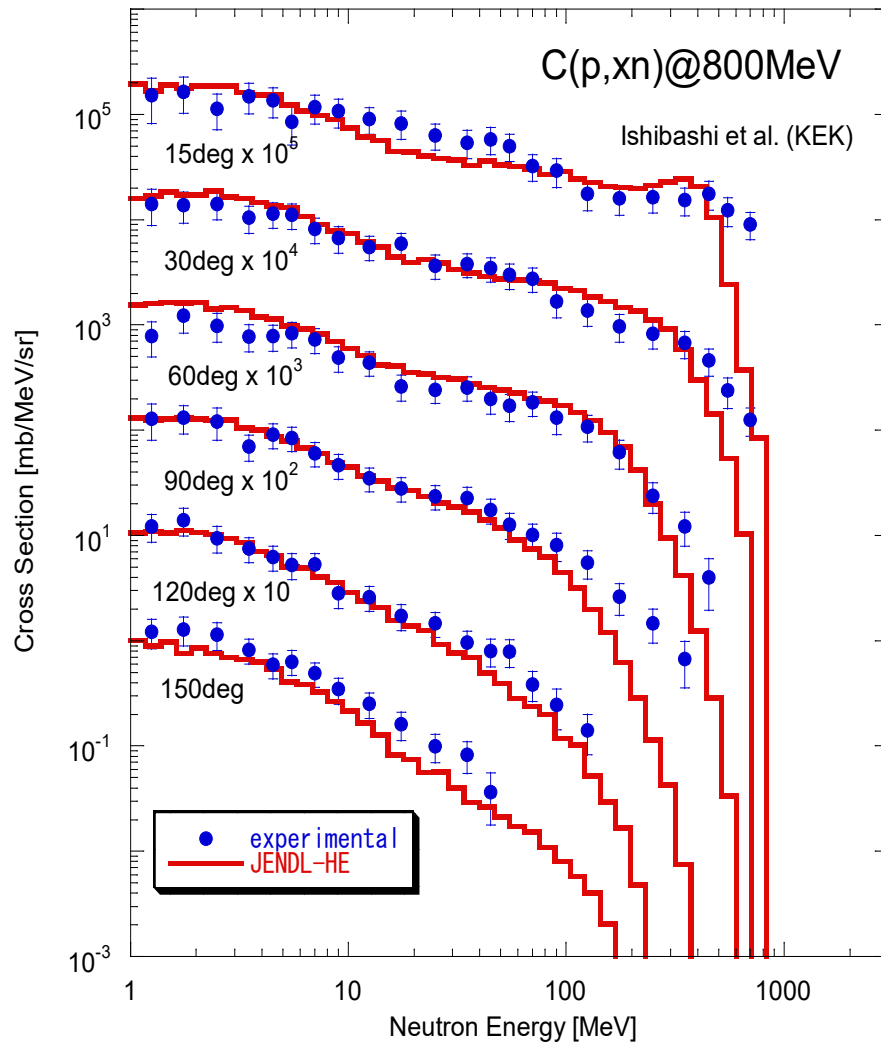


Time unit :  $3 \times 10^{-24}$  sec (=fm/c)

# DDX : $^{12}\text{C}(p,xn)$ @ 0.8 and 3 GeV

## JENDL/HE-2007 : Use of QMD + GEM above 150 MeV

国産高エネルギー核データファイル( ~3GeV)





# 量子分子動力学 (QMD) の改良 (2005~)

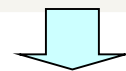
核反応の動的・非平衡過程を記述する量子分子動力学 (QMD) の計算で軽イオンクラスタ生成の実験値を過小評価



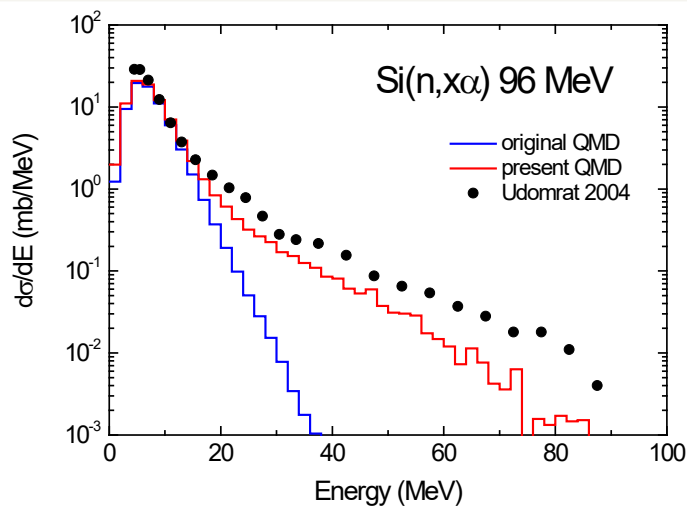
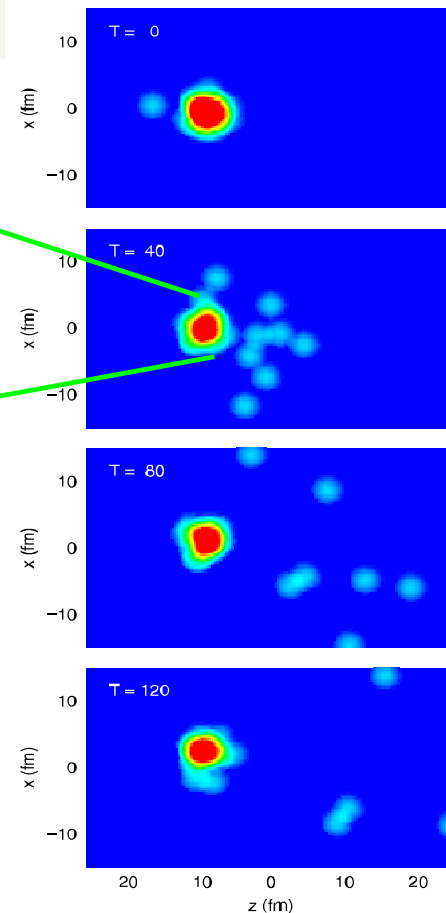
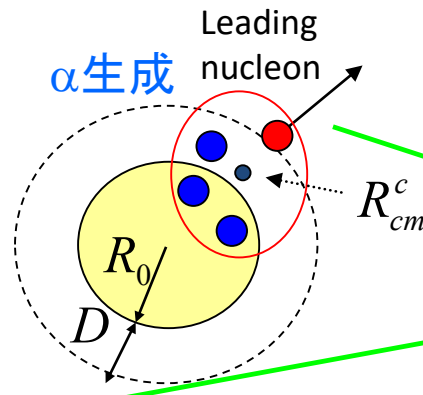
現象論的 coalescence (合体) 模型を導入し、 $\alpha$  までの軽イオンクラスタ生成を考慮



高エネルギー領域での実験値の一致を改善



高エネルギー中性子による半導体デバイス誤動作現象の初期素過程を記述する核反応モデルに応用 (2008~)



Yukinobu Watanabe and Dimitre N. Kadrev, Proceedings of Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007, Nice, France, EDP Sciences (2008), pp.1121-1124.

# 核変換研究 in ImPACT project

---

ImPACT・藤田プロジェクト(2014-2018年度)

核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化

<https://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>

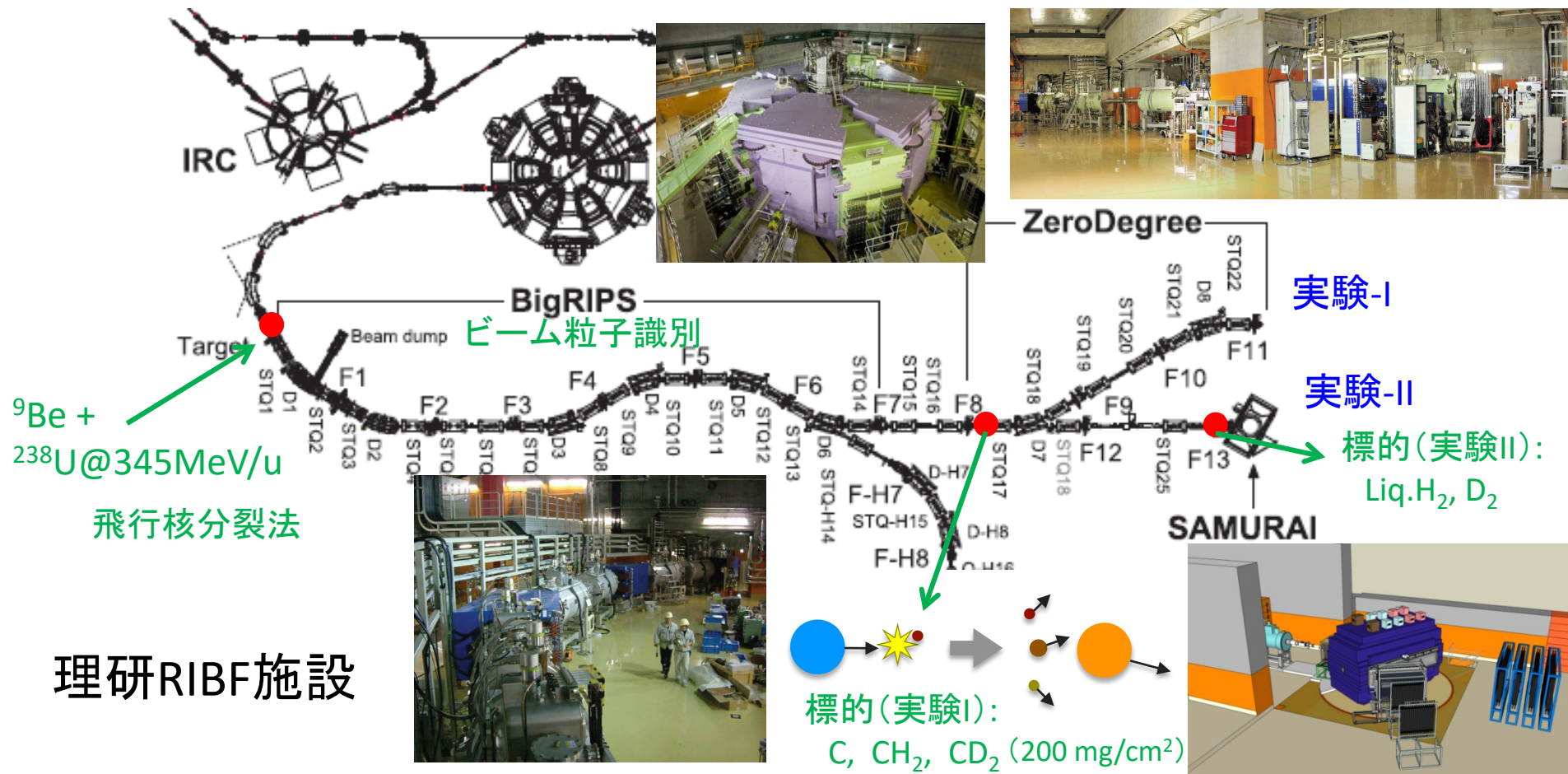
PJ-2研究課題(核反応データ取得及び新核反応制御法)

長寿命核分裂生成核種(LLFP)に対する陽子・重陽子入射核破砕  
の新規データ取得 @理研RIBF

逆運動学手法を用いて、LLFPビームと陽子及び重陽子標的との核破砕反応による同位体生成断面積、及び放出中性子のエネルギー分布(中性子・残留核の相関データ含)を測定する。

- LLFP対象核種:  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{135}\text{Cs}$
- 入射エネルギー: 200, 100, 50 MeV/u

# 理研RIBF実験概要

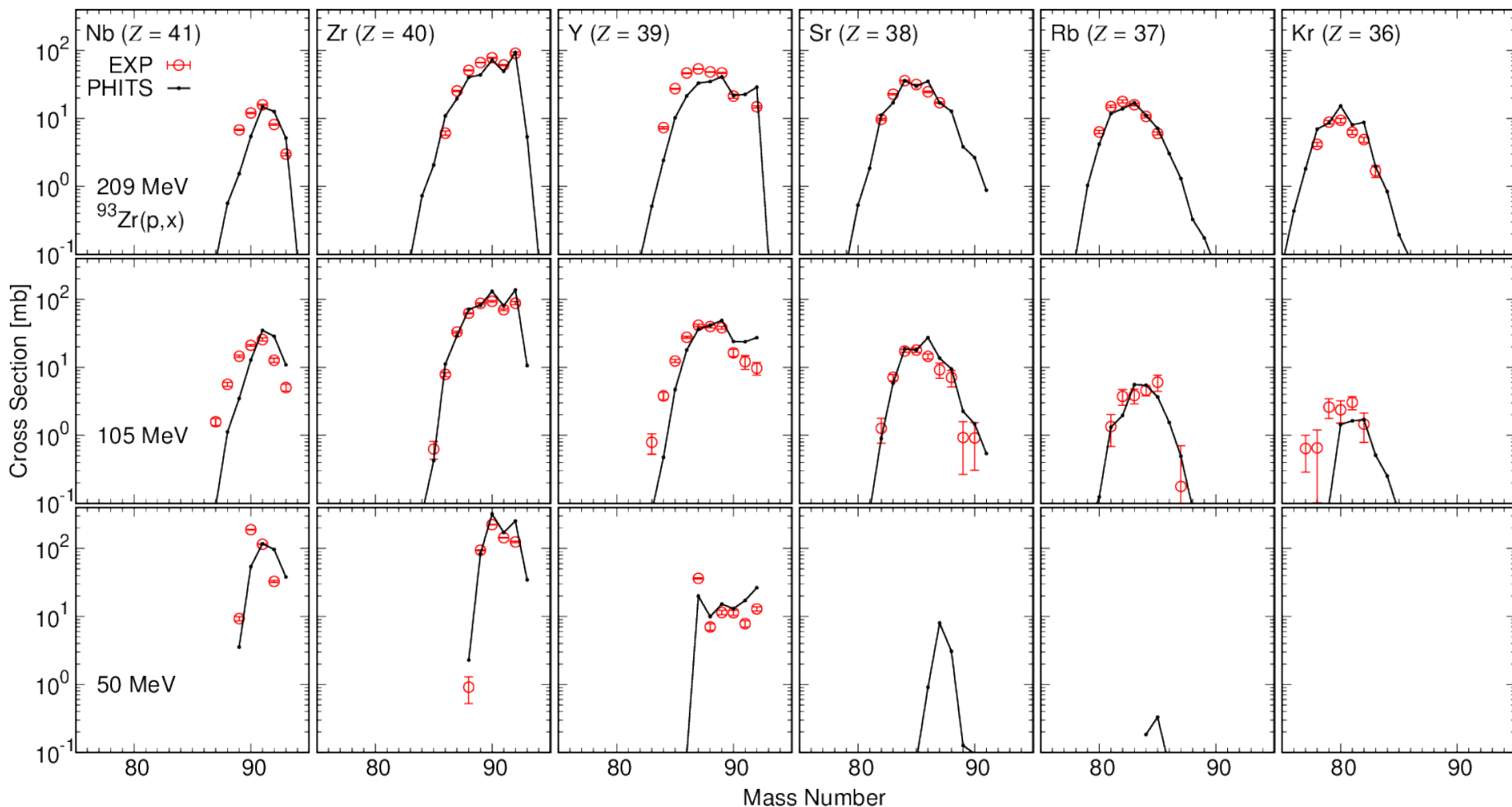


**実験-I** (2015/3/26-4/6) with ZeroDegree  
 ${}^{107}\text{Pd}$  (100, 200MeV/u) on H and D  
 ${}^{135}\text{Cs}$ ,  ${}^{93}\text{Zr} (+ {}^{90}\text{Sr})$  (100MeV/u) on H and D  
 ${}^{93}\text{Nb}$  (100MeV/u) on H and D

**実験-II** (2015/10/20 -11/1) with SAMURAI  
 生成Fragmentsと中性子との相関測定  
 ${}^{79}\text{Se}$ ,  ${}^{93}\text{Zr}$  (110, 200MeV/u) on H and D

# Proton + $^{93}\text{Zr}$

計算モデル: INCL + GEM

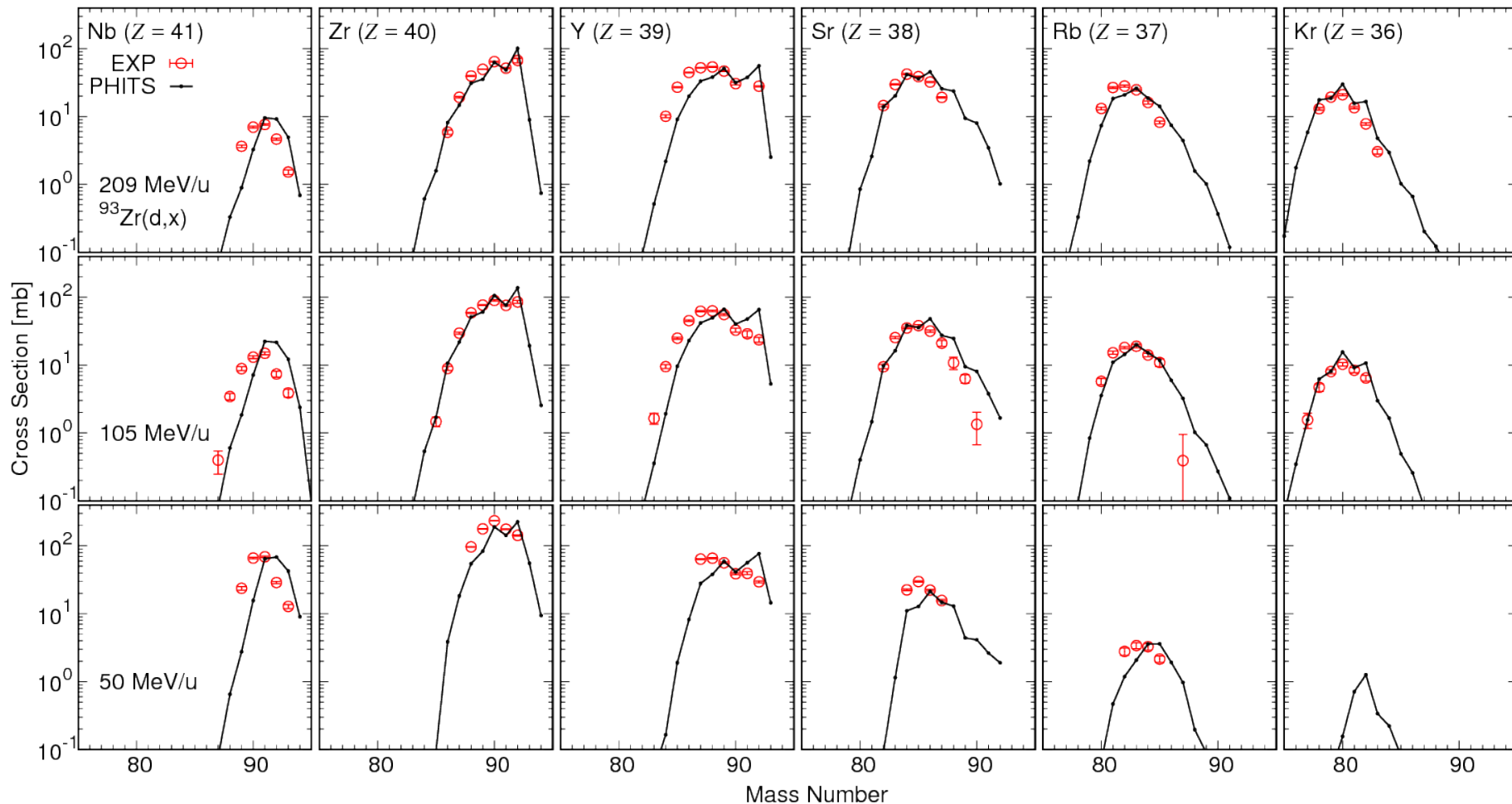


## References

- 200 MeV: S. Kawase et al., JAEA-Conf, 2018-001, pp.111-114 (2018).
- 100 MeV: S. Kawase et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 093D03 (2017).
- 50 MeV: K. Nakano et al., EPJ Web of Conferences 239, 20006 (2020) & PhD Thesis (2020).

# Deuteron + $^{93}\text{Zr}$

計算モデル: INCL + GEM

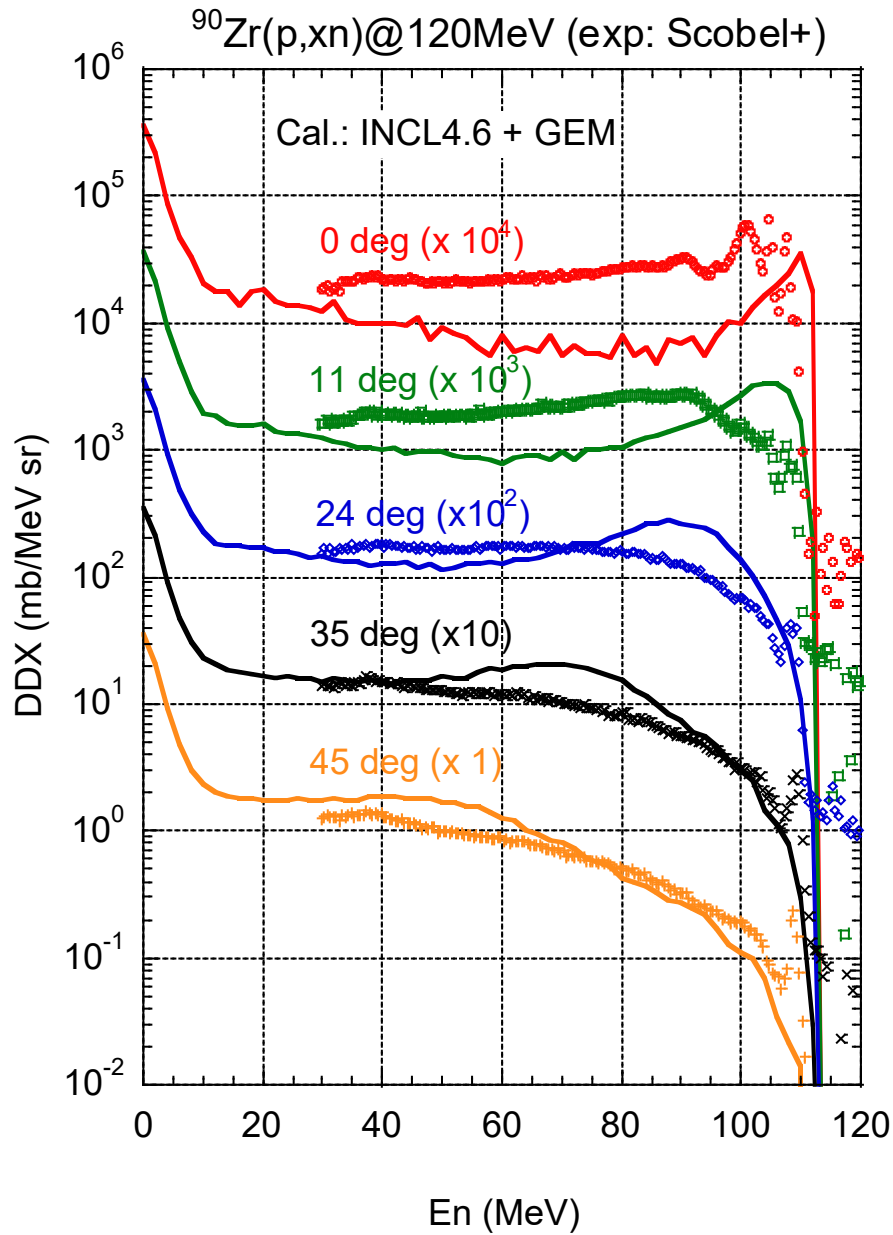


## References

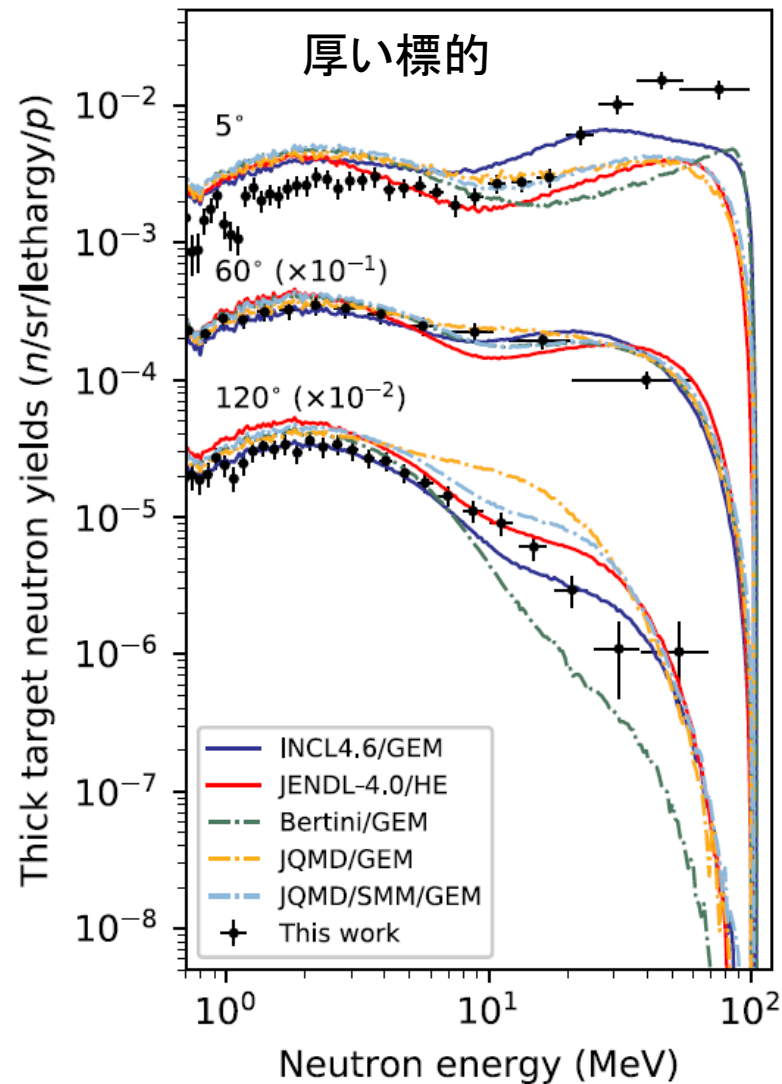
- 200 MeV: S. Kawase et al., JAEA-Conf, 2018-001, pp.111-114 (2018).
- 100 MeV: S. Kawase et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 093D03 (2017).
- 50 MeV: K. Nakano et al., EPJ Web of Conferences 239, 20006 (2020) & PhD Thesis (2020).

# 中性子生成反応

( $^{93}\text{Zr}$ のデータはないので安定核 $^{90}\text{Zr}$ で比較)



109-MeV proton incidence  
Fe TTNY

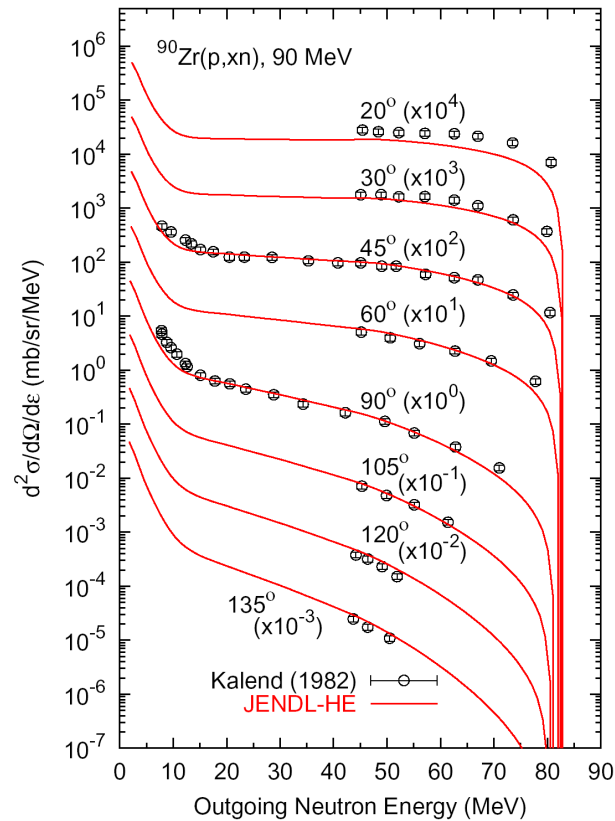


H. Iwamoto et al., JNST 60, 435-449 (2023).

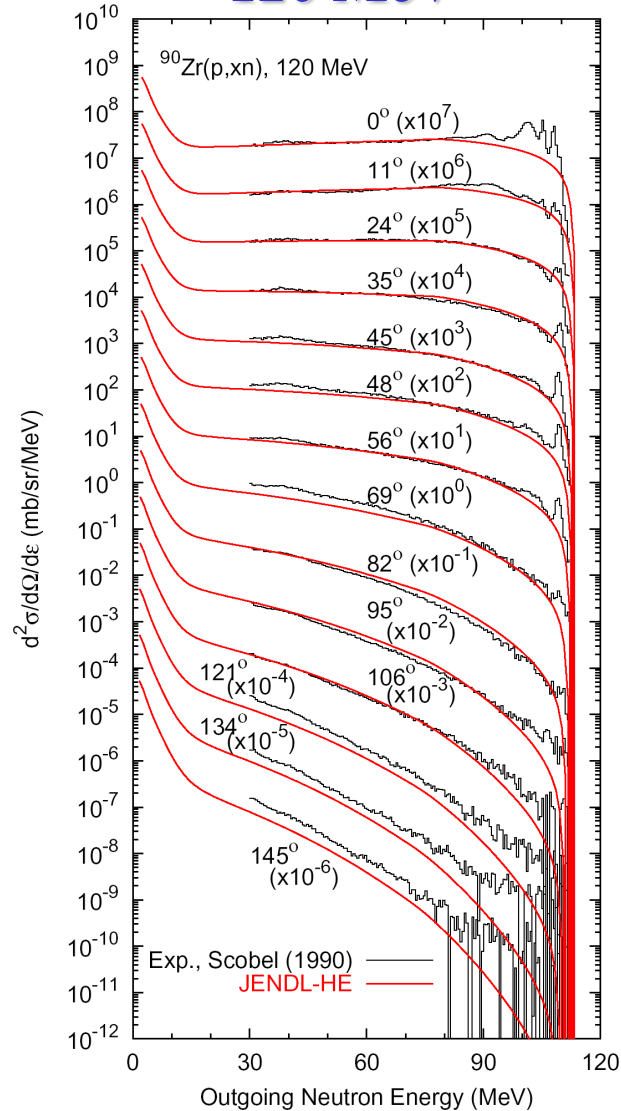
# DDXs of $^{90}\text{Zr}(p,xn)$

励起子モデル計算

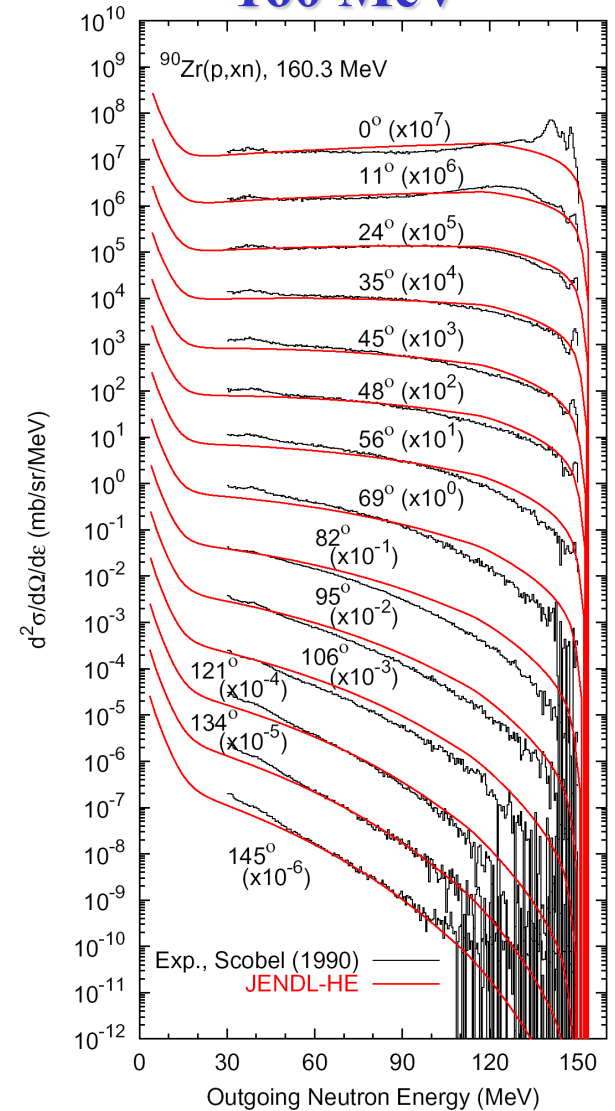
90 MeV



120 MeV

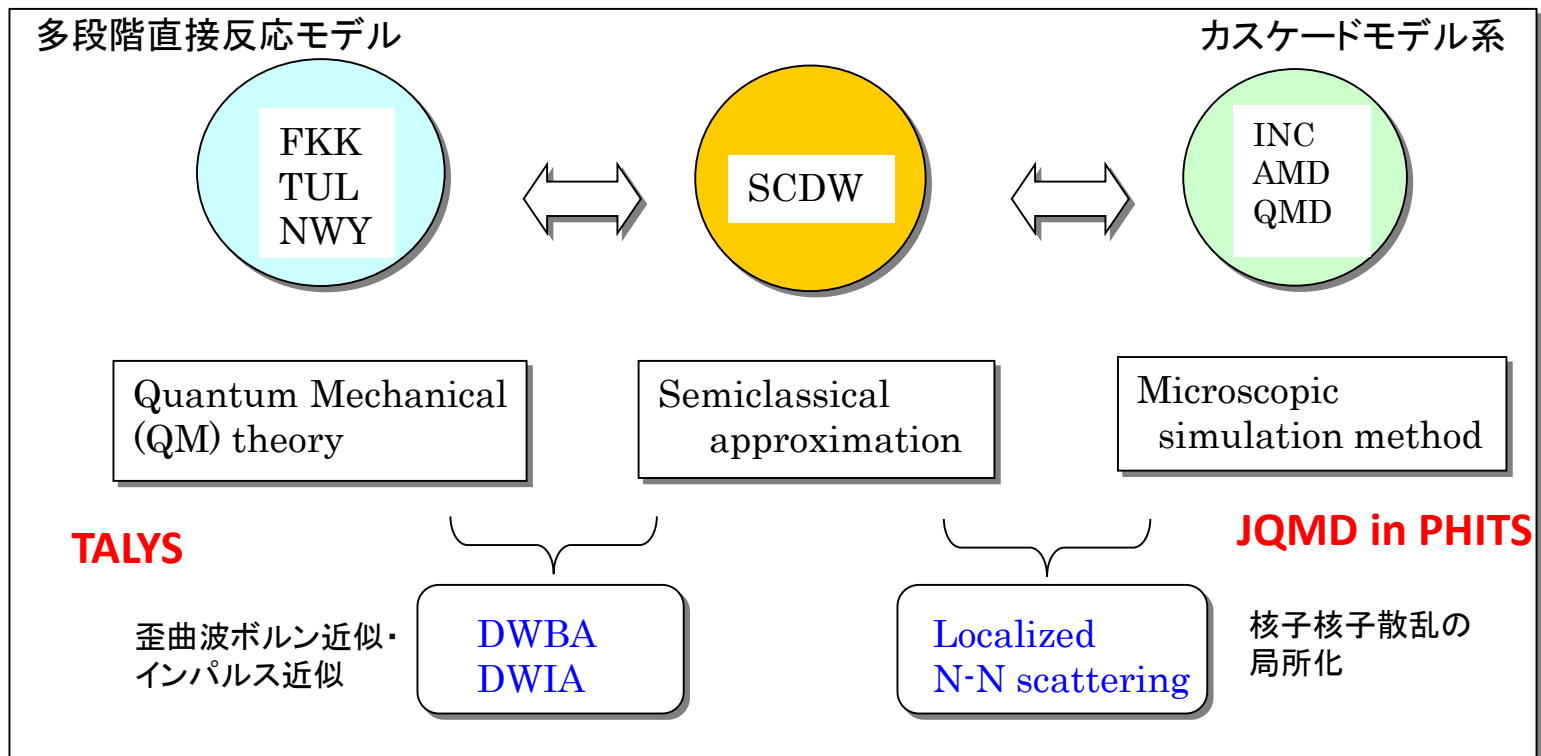


160 MeV



# 前平衡モデル研究

- 励起子モデル Exciton model (半古典的・現象論的)
- 量子力学的モデル Feshbach-Kerman-Kooning model
- **半古典的歪曲波モデル SCDW**
- 量子分子動力学 QMD、核内カスケードモデル INCL





# Two-step cross section by SCDW

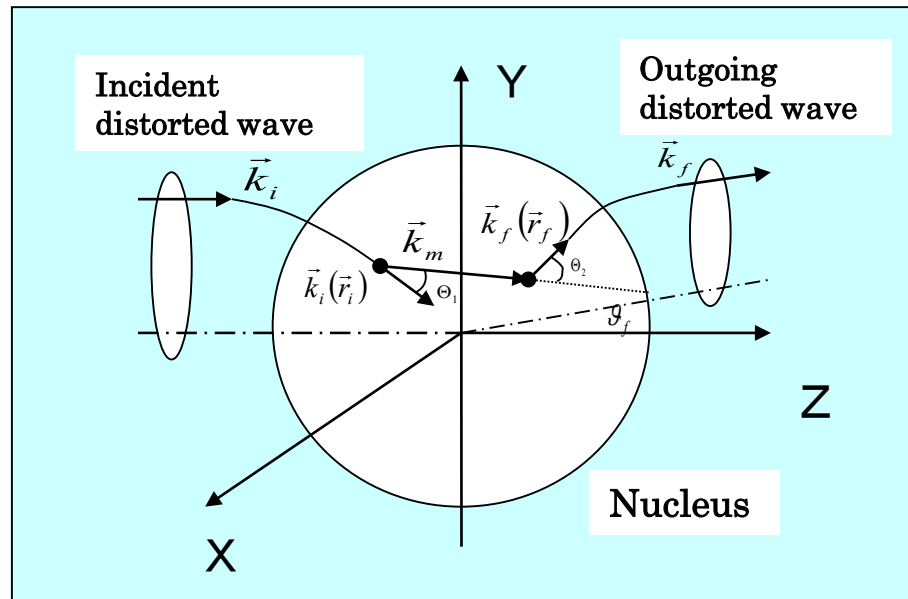
**Incident DW**

**Outgoing DW**

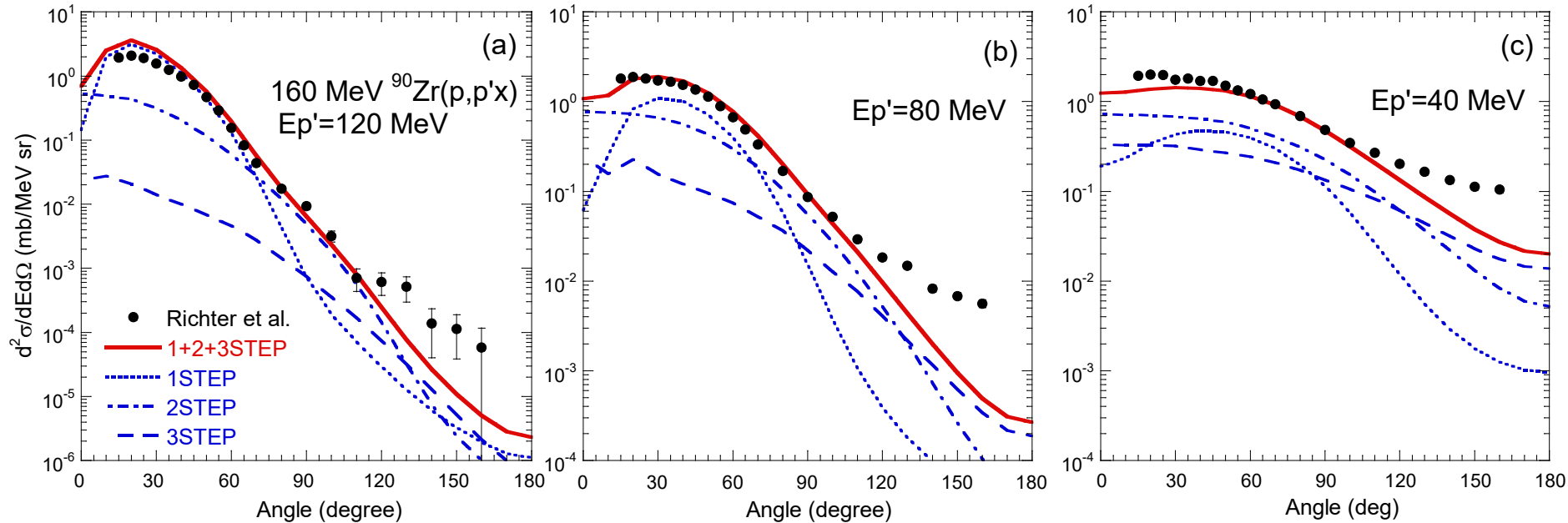
$$\frac{\partial^2 \sigma^{(2)}}{\partial E_f \partial \Omega_f} = \left( \frac{A}{A+1} \right)^4 \int dE_m \int d\mathbf{r}_1 \int d\mathbf{r}_2 |\chi_i^{(+)}(\mathbf{r}_1)|^2 |\chi_f^{(-)}(\mathbf{r}_2)|^2$$

Imaginary part of local wave number in the intermediate state

$$\times \frac{k_f / k_f(\mathbf{r}_2)}{k_i / k_i(\mathbf{r}_1)} \underbrace{\left( \frac{\partial^2 \sigma}{\partial E_m(\mathbf{r}_1) \partial \Omega_m(\mathbf{r}_1)} \right)_{\mathbf{r}_1}}_{\text{First collision}} \underbrace{\frac{e^{-2\gamma_m |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}}{|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|^2}}_{\text{Propagation}} \underbrace{\left( \frac{\partial^2 \sigma}{\partial E_f(\mathbf{r}_2) \partial \Omega_f(\mathbf{r}_2)} \right)_{\mathbf{r}_2} \rho(\mathbf{r}_2)}_{\text{Second collision}}$$

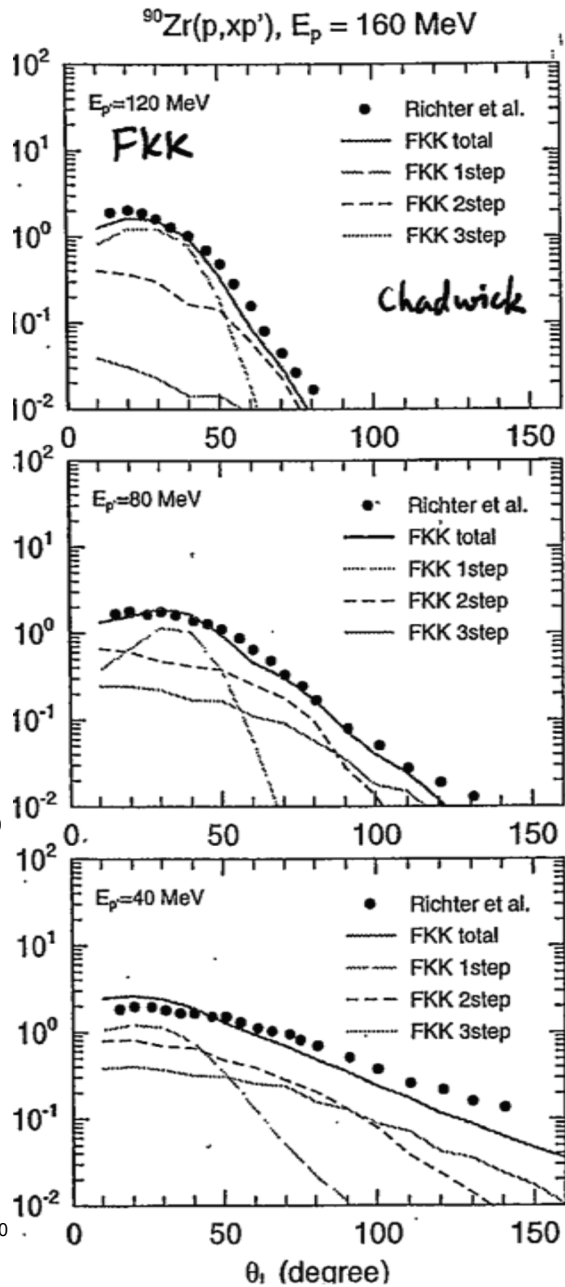
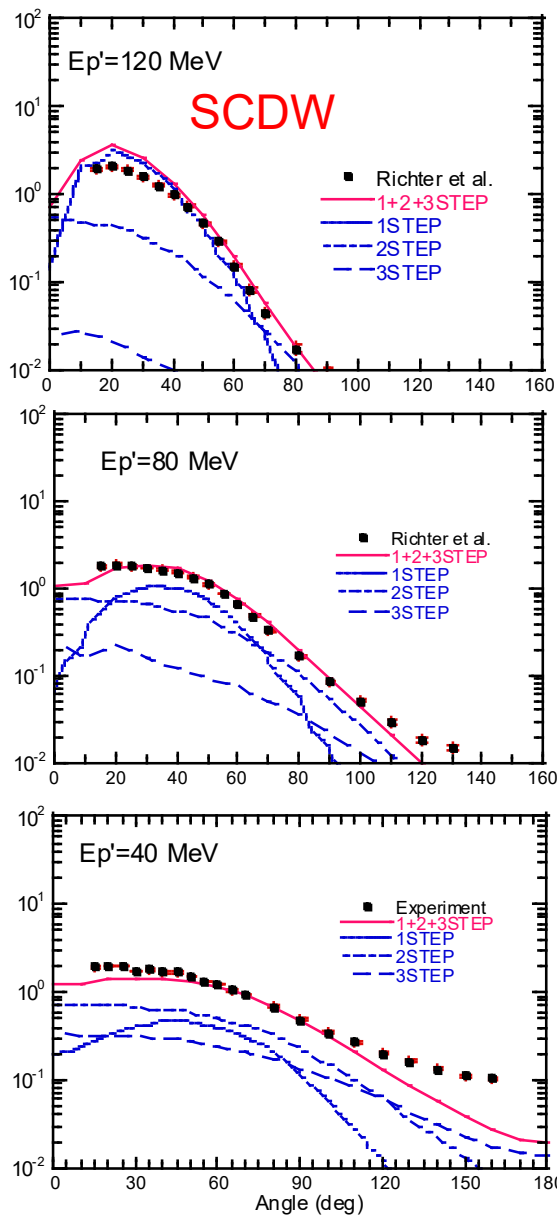
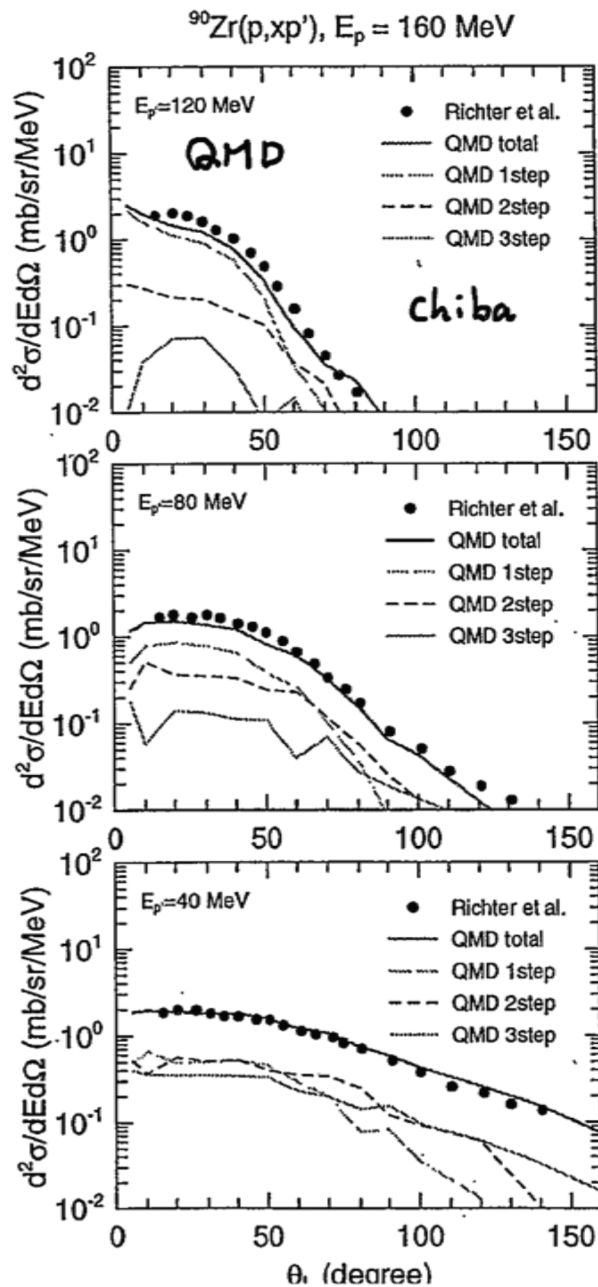


# SCDW: $^{90}\text{Zr}$ (p,p'x) at 160 MeV



## SCDW関連References

- 1) Y. Watanabe, R. Kuwata, Sun Weili, M. Higashi, H. Shinohara, M. Kohno, K. Ogata, M. Kawai, Phys. Rev. C, Vol. 59, pp.2136-2151 (1999).
- 2) Sun Weili, Y. Watanabe, M. Kohno, K. Ogata, M. Kawai, Phys. Rev. C, Vol. 60, 064605(12 pages) (1999).
- 3) K. Ogata, M. Kawai, Y. Watanabe, Sun Weili, and M. Kohno, Phys. Rev. C, Vol. 60, 054605(11 pages) (1999).
- 4) Y. WATANABE, Weili SUN, K. OGATA, M. KOHNO, M. KAWAI, J. of Nucl. Sci. and Technol., Suppl. 2, pp. 750-753 ; Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Oct. 7-12, 2001, Tsukuba, Japan (2002).



# 核内核子の運動量分布依存性

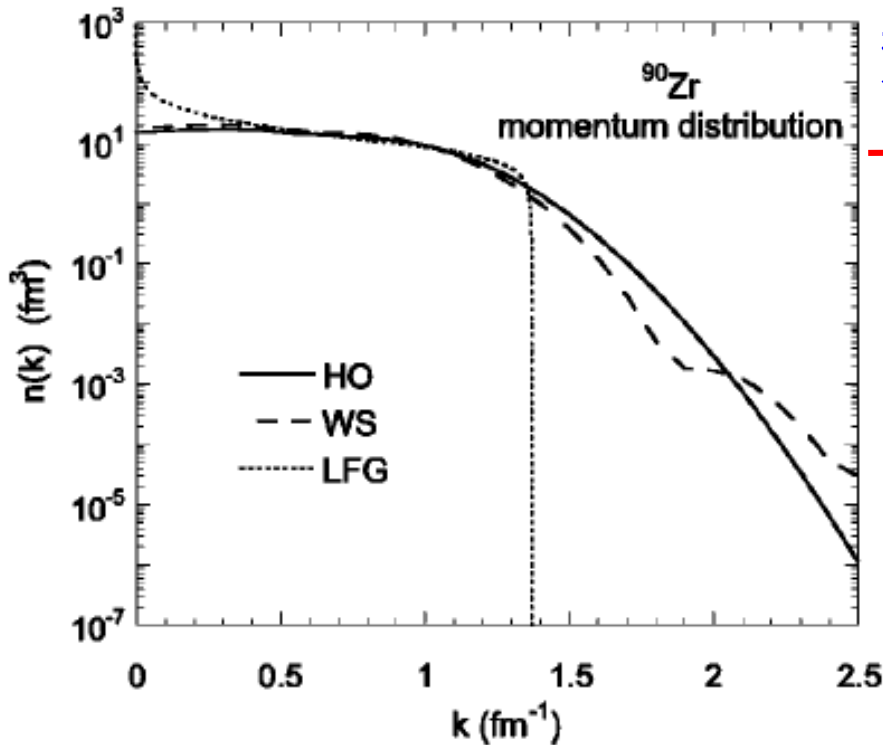
Wigner transform of one-body density matrix for the hole state

$$f_h^\tau(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \sum_{nlj} \frac{2j+1}{2\ell+1} \int_0^\infty ds e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{s}} \sum_m \phi_{nlmj}^\tau(\mathbf{r} + \mathbf{s}/2) \phi_{nlmj}^{\tau*}(\mathbf{r} - \mathbf{s}/2)$$

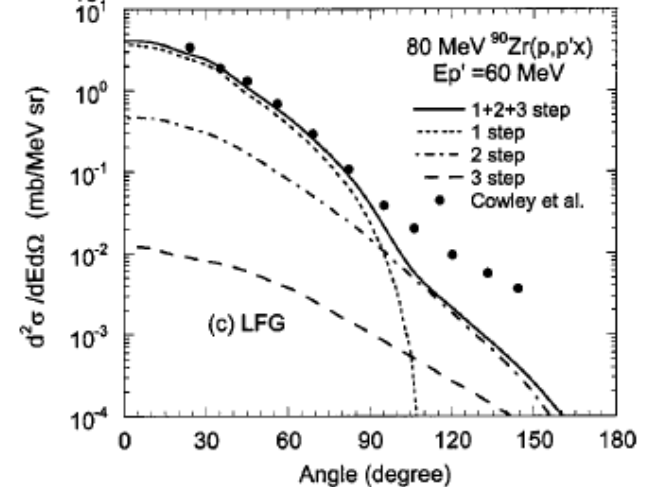
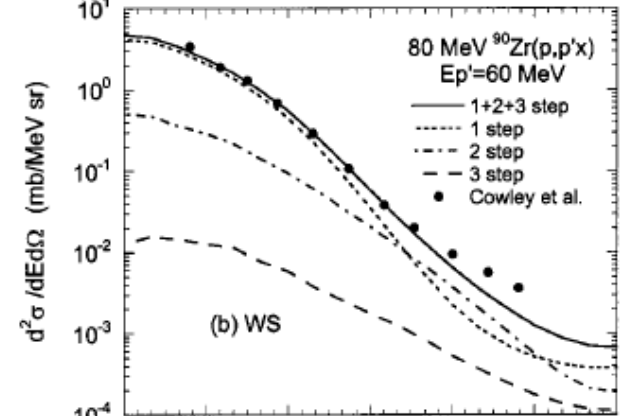
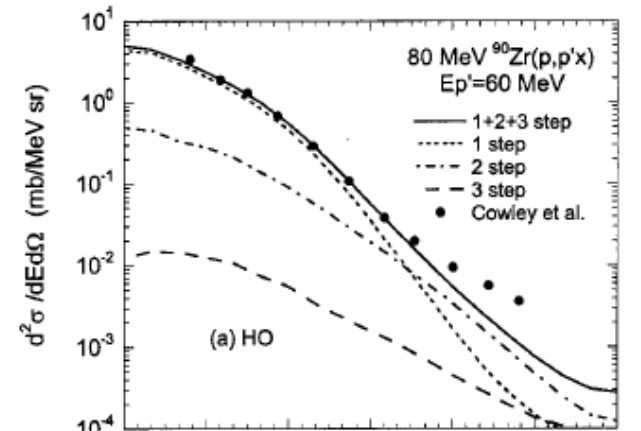
HO: Harmonic Oscillator

WS: Woods-Saxon

LFG: Local Fermi Gas model



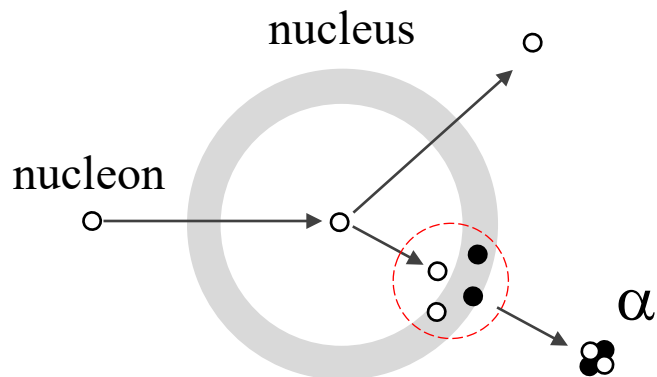
核内核子の運動量分布が与える影響



# 前平衡反応研究の今後の課題

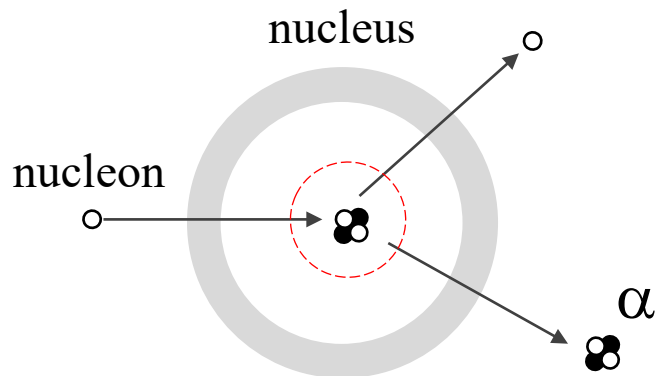
## クラスター放出過程

1) 核表面でのcoalescence (or pick-up)

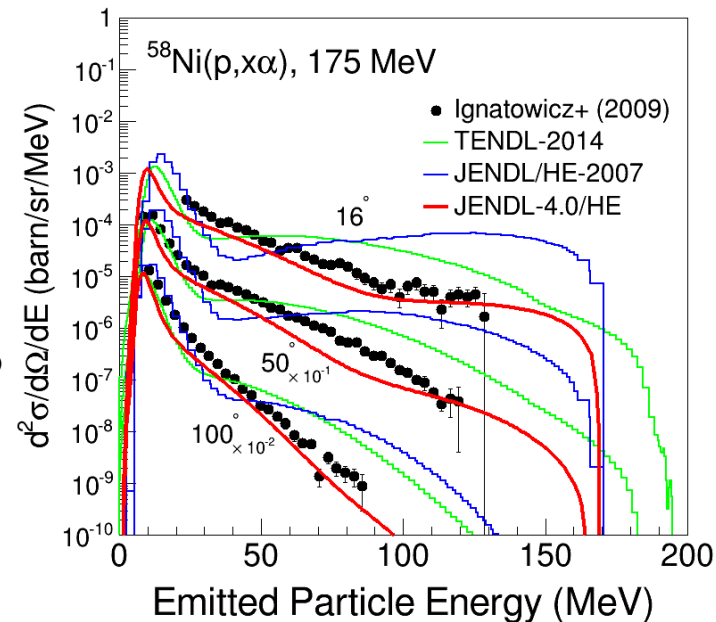


Exciton  
モデル  
+  
Iwamoto-  
Harada-Sato  
モデル

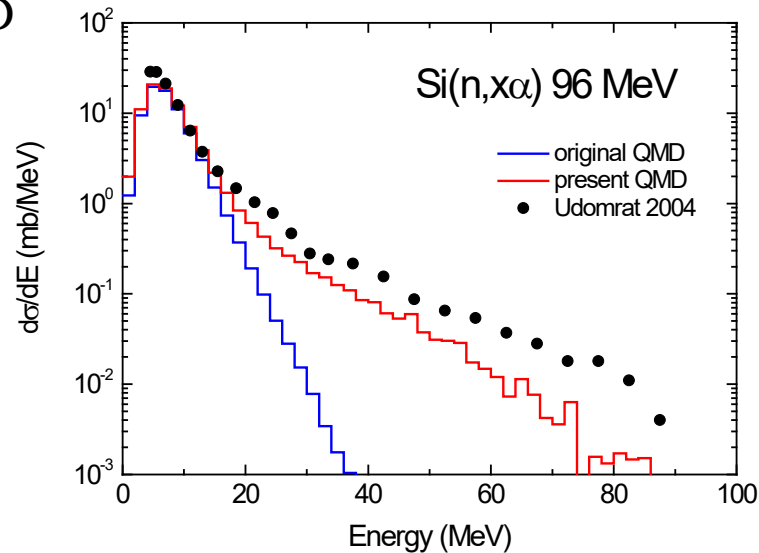
2) Pre-formed clusterのknock-out



QMD



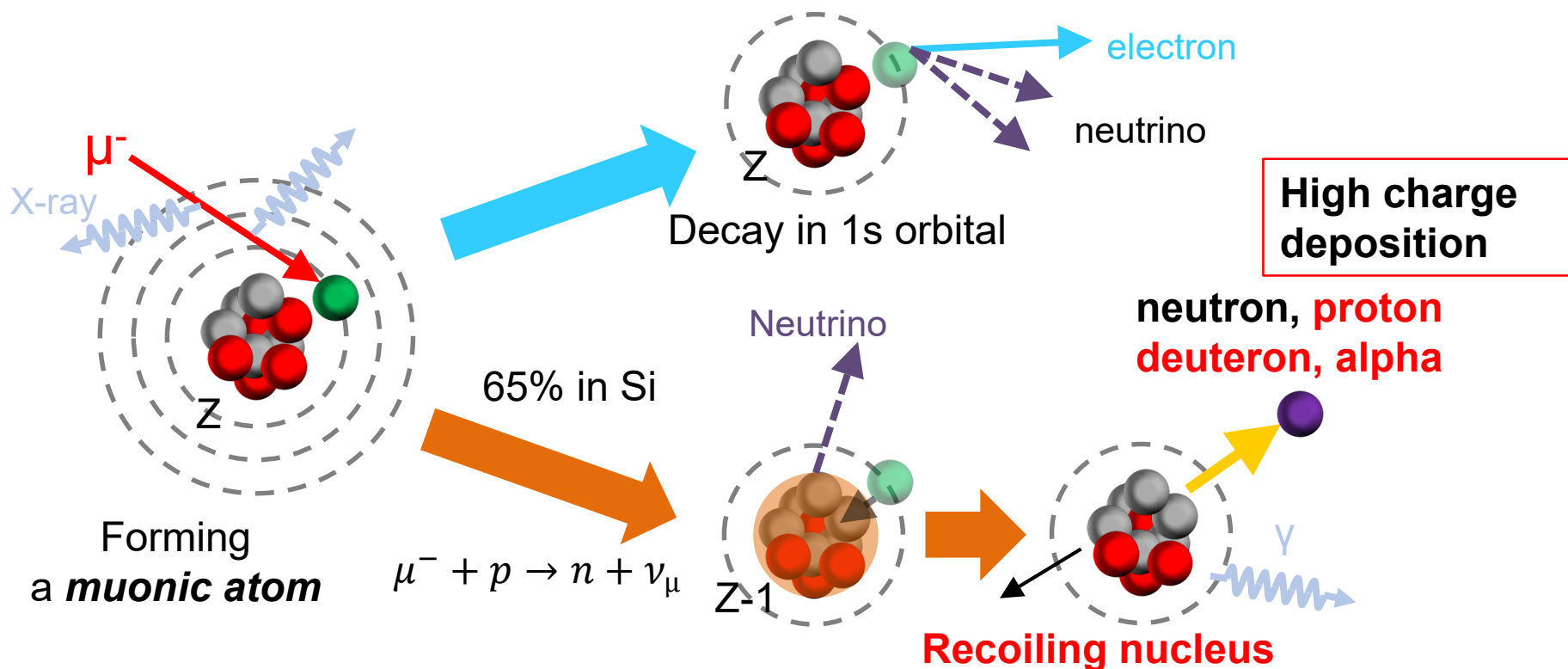
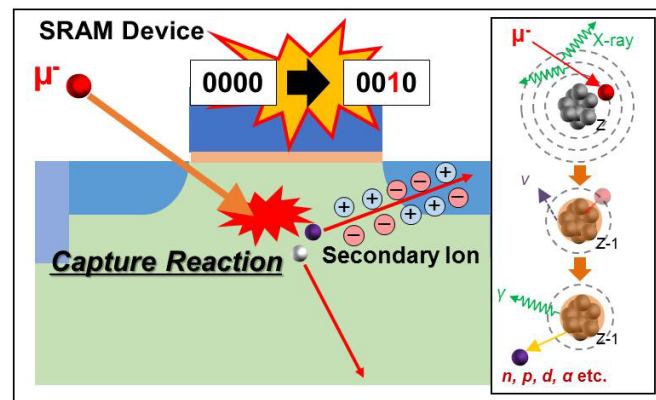
Ref.) Kunieda et al., PRC85,054602 (2012)



Ref.) Y. Watanabe and D. N. Kadrev, Proc. of ND2007, EDP Sciences (2008), pp.1121-1124.

# 負ミューオン原子核捕獲反応

- 宇宙線による半導体ソフトエラー研究  
 負ミューオン原子核捕獲反応による2次イオン生成  
 → 局所的電荷付与 → 過渡電流発生  
 → メモリ情報の反転発生 → 誤動作



Ref.)

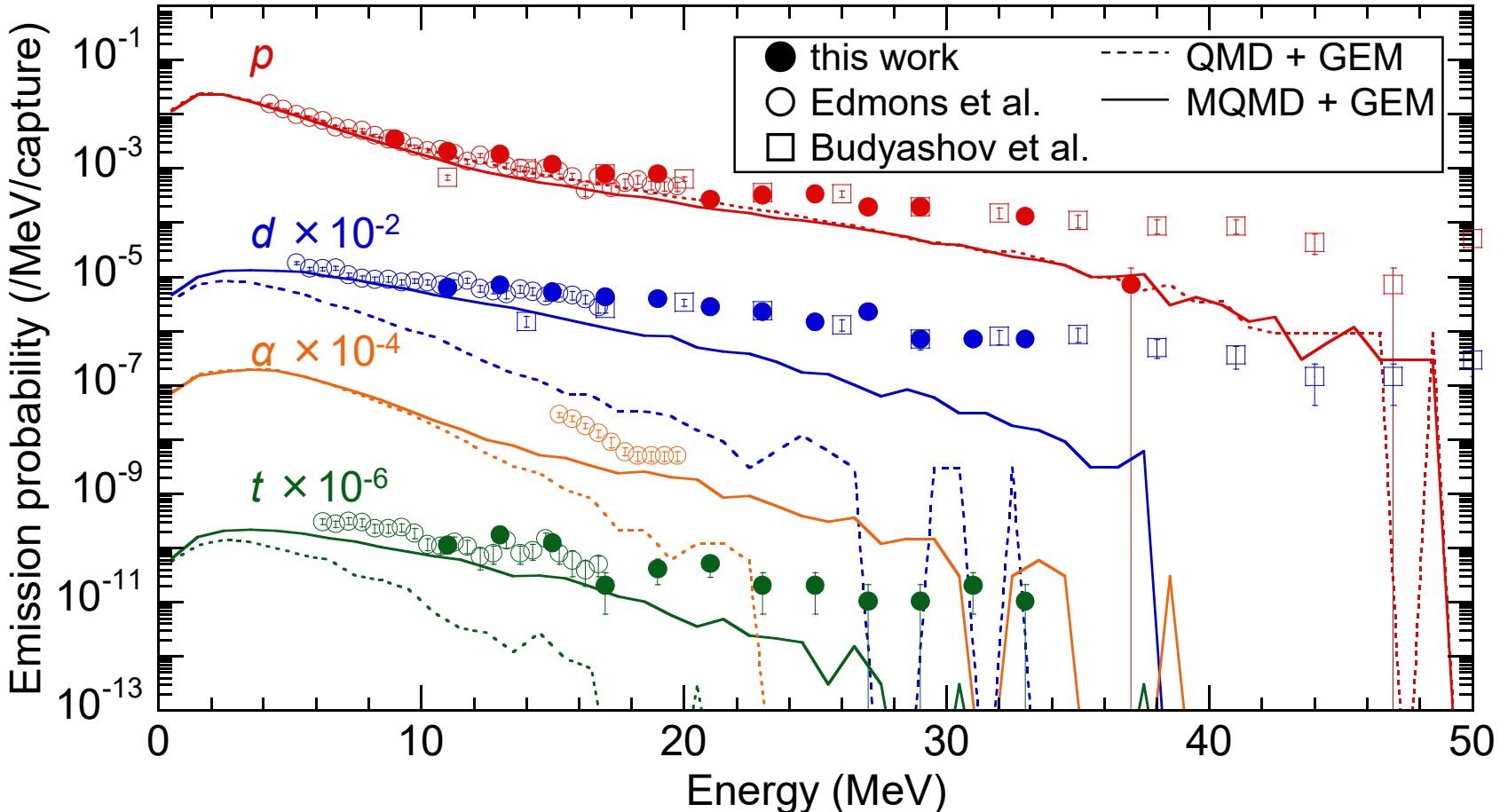
S. Manabe et al., IEEE TNS 65 (8), 1742 (2018).

W. Liao et al., IEEE TNS 65(8), 1734 (2018).

# Result | Comparison with model calculation

Experiment @RCNP-MuSIC

Y. Budyashov et al., *J. Exp. Theor. Phys.*, **33**, 11-15 (1971)  
A. Edmons et al., *Phys. Rev. C*, **105**, 035501, (2022)

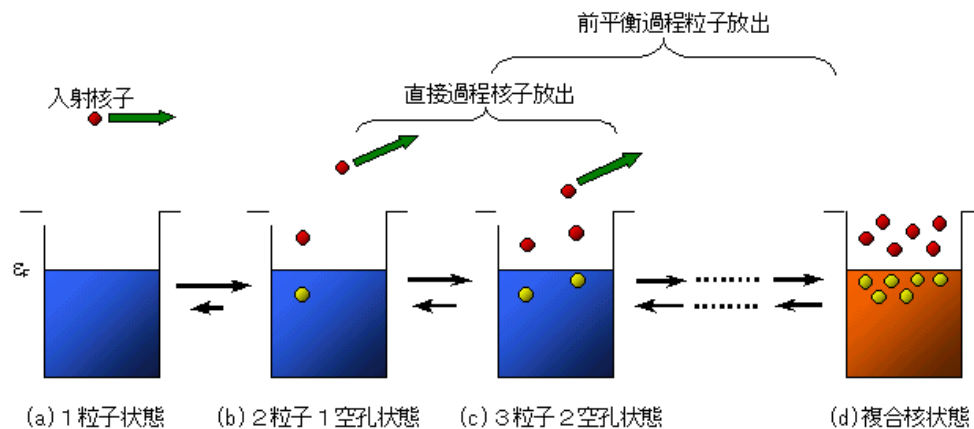


**Comparison of measured and simulated spectra of  $p$ ,  $d$ ,  $t$  and  $\alpha$**

Ref.) S. Manabe et al., Proc. of Int. Conf.on Nuclear Data for Science and Technology (2022).

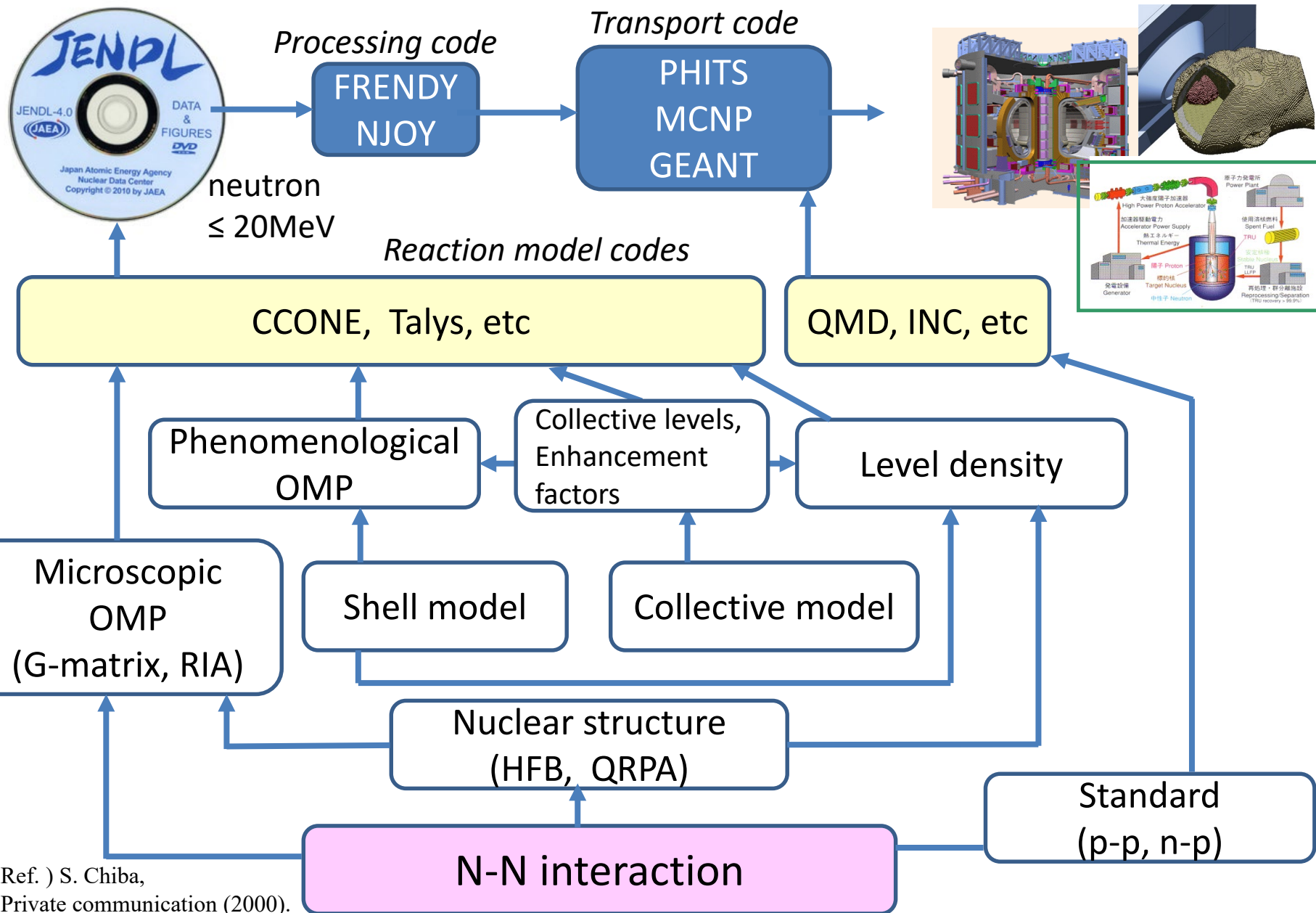
# 講演内容

- 自己紹介(研究分野)
- 「核データ」について
- 核子入射原子核反応の概観
- 代表的な原子核反応模型
  - 光学模型
  - 直接反応模型
  - 複合核模型
  - 前平衡反応模型





# Nuclear Theories and Calculation Codes in Nuclear Data Evaluation



Ref.) S. Chiba,  
Private communication (2000).