

核データ処理: 評価済み核データから断面積ライブラリへ

第45回炉物理夏期セミナー

2013年8月1日

琵琶湖 白浜荘

長家 康展

炉物理研究グループ
原子力基礎工学研究部門
日本原子力研究開発機構

本講義の狙い

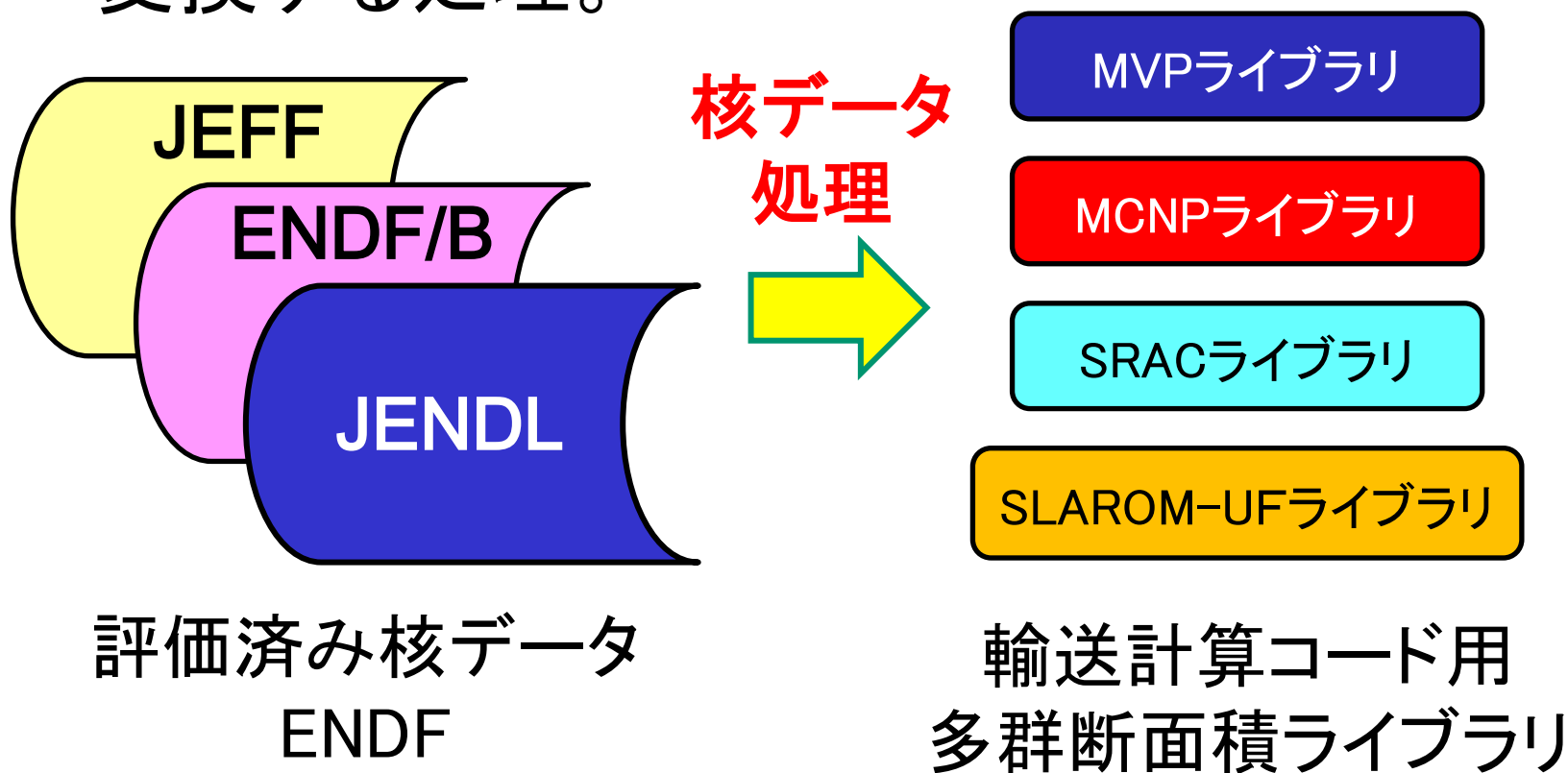
- ・ 評価済み核データを理解すること
 - 評価済み核データはどのような形式で与えられるのか？
- ・ 核データ処理を理解すること
 - 核計算コード用の断面積ライブラリはどのようにして作成されるのか？

アウトライン

- ・ 核データ処理について
- ・ 評価済み核データのフォーマット (ENDF-6)
- ・ ポイントワイズ断面積データの作成
 - 断面積の線形化
 - 共鳴断面積の再構成
 - ドップラー広がり
- ・ 断面積ライブラリの作成
 - 連続エネルギーモンテカルロ用
 - 多群輸送計算コード用
- ・ 最近の核データ処理に関する話題
 - 一般化核データ (GND)
 - 核データ処理コードシステム
 - 国産核データ処理コードシステムの開発

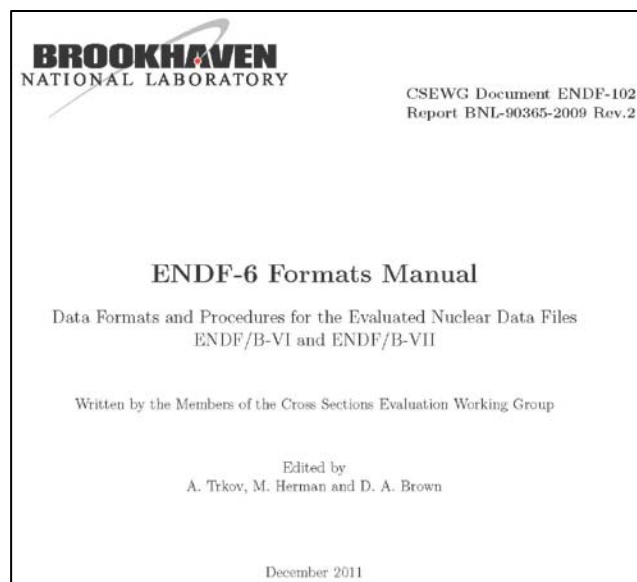
核データ処理とは？

汎用目的の評価済み核データを、限定目的の核データセット（ライブラリ、データベース）へ変換する処理。



評価済み核データのフォーマット

- ENDF-6フォーマット
- 元々、米国の評価済み核データENDF/Bのために開発されたフォーマット
- ENDF/B-VI(バージョン) ⇔ ENDF-6 (フォーマット)
- 米国断面積評価ワーキンググループ (CSEWG)によって管理
- マニュアル ⇒ ENDF-102
 - <http://www.nndc.bnl.gov/endl>
 - ENDF-102, BNL-90365-2009 Rev.2
 - 最新版 ⇒ 2011 Dec



ENDF-6フォーマットのデータ構造

- **tape** : 1つまたは複数の**material**。計算機上の1つのファイル。
- **material** : 1つの核種もしくはcompound。
MAT番号で区別。
- **file** : 断面積、角度分布、エネルギー分布等の種類を表す。**MF番号**で区別。
- **section** : 反応を表す。**MT番号**で区別。
- **MAT番号のルール**
 - 安定核種で最も軽い同位体を**Z25**。**Z**=原子番号。
 - 質量数が1増えるごとに3プラス。
 - 例: H-1 $\Rightarrow$ 125, H-2 $\Rightarrow$ 128, U-235 $\Rightarrow$ 9228

代表的なMF番号

- MF=1: コメント、 ν 値
- MF=2: 共鳴パラメータ
- MF=3: 反応断面積
- MF=4: 二次粒子の角度分布
- MF=5: 二次粒子のエネルギー分布
- MF=6: 二次粒子エネルギー角度分布
- MF=7: 熱中性子散乱データ
- MF=8: 放射性崩壊&FP収率データ
- MF=9: 放射性崩壊の生成多重度
- MF=10: 放射性崩壊の生成断面積
- MF=11: 光子生成データコメント
- MF=12-15: 光子生成データ
- MF=29: 共分散コメント
- MF=30-36: 共分散データ

代表的なMT番号

- **MT=1**: 全断面積
- **MT=2**: 弾性散乱
- **MT=16**: (n,2n)反応
- **MT=18**: 核分裂
- **MT=51-90**: 離散レベル非弾性散乱
- **MT=91**: 連続レベル非弾性散乱
- **MT=102**: 放射捕獲
- **MT=151**: 共鳴パラメータ
- **MT=452**: 核分裂当りの平均全中性子数(ν 値)

ENDF-6フォーマットの基本データ構造

	tape id	MAT	MF	MT	line
			0	0	
ファイル1	Start of MF1, MT451 (コメント)開始	1111	14	51	1
	...				
	SEND record	1111	1	0	
	FEND record	1111	1	099999	
ファイル2	Start of MF2, MT151 (共鳴パラメータ)	1111	21	51	1
	...				
	SEND record	1111	2	0	
	FEND record	1111	2	099999	
ファイル3	Start of MF3, MT1 (全断面積)	1111	3	1	1
	...				
	SEND record	1111	3	0	
	Start of MF3, MT2 (弾性散乱断面積)	1111	3	2	
	...				
	FEND record	1111	3	099999	
	MEND record	0	0	0	
	TEND record	-1	0	0	
		66カラム			5カラム
		4	2	3	

ENDF-6フォーマット断面積の具体例

JENDL-4.0, Fe-56の(n,2n)断面積

						MF		MT	
						MAT	↓		
2. 605600+4	5. 545440+1	0	0	0		02631	3	16	1
-1. 120270+7	-1. 120270+7	0	0	1		112631	3	16	2
11	2	0	0	0		02631	3	16	3
1. 140470+7	0. 000000+0	1. 170000+7	1. 622410-2	1. 200000+7	4. 800450-2	2631	3	16	4
1. 300000+7	2. 138200-1	1. 400000+7	3. 891650-1	1. 500000+7	5. 134000-1	2631	3	16	5
1. 600000+7	5. 817500-1	1. 700000+7	6. 107500-1	1. 800000+7	6. 118000-1	2631	3	16	6
1. 900000+7	5. 977000-1	2. 000000+7	5. 759000-1			2631	3	16	7
						2631	3	099999	
11カラム		11カラム		11カラム					

11カラム実数表現

- $\pm 1.234567 \pm n$
- $\pm 1.23456 \pm nn$ ($nn \leq 38$)
- ± 1.23456789

単精度
(32ビット精度)

ENDF-6フォーマットのデータ表現形式

- ・ テーブル形式

- 離散化点を与える形式 $(E_1, \sigma_1), (E_2, \sigma_2), \dots$
- 汎用的、関数形に依存しない。

- ・ 関数形式

- 関数形を決めて、パラメータを与える形式
- 例: ブライト・ウィーグナー—準位公式
- パラメータが別のパラメータ(例えば、エネルギー)に依存する場合、そのパラメータはテーブル形式で与えられる。

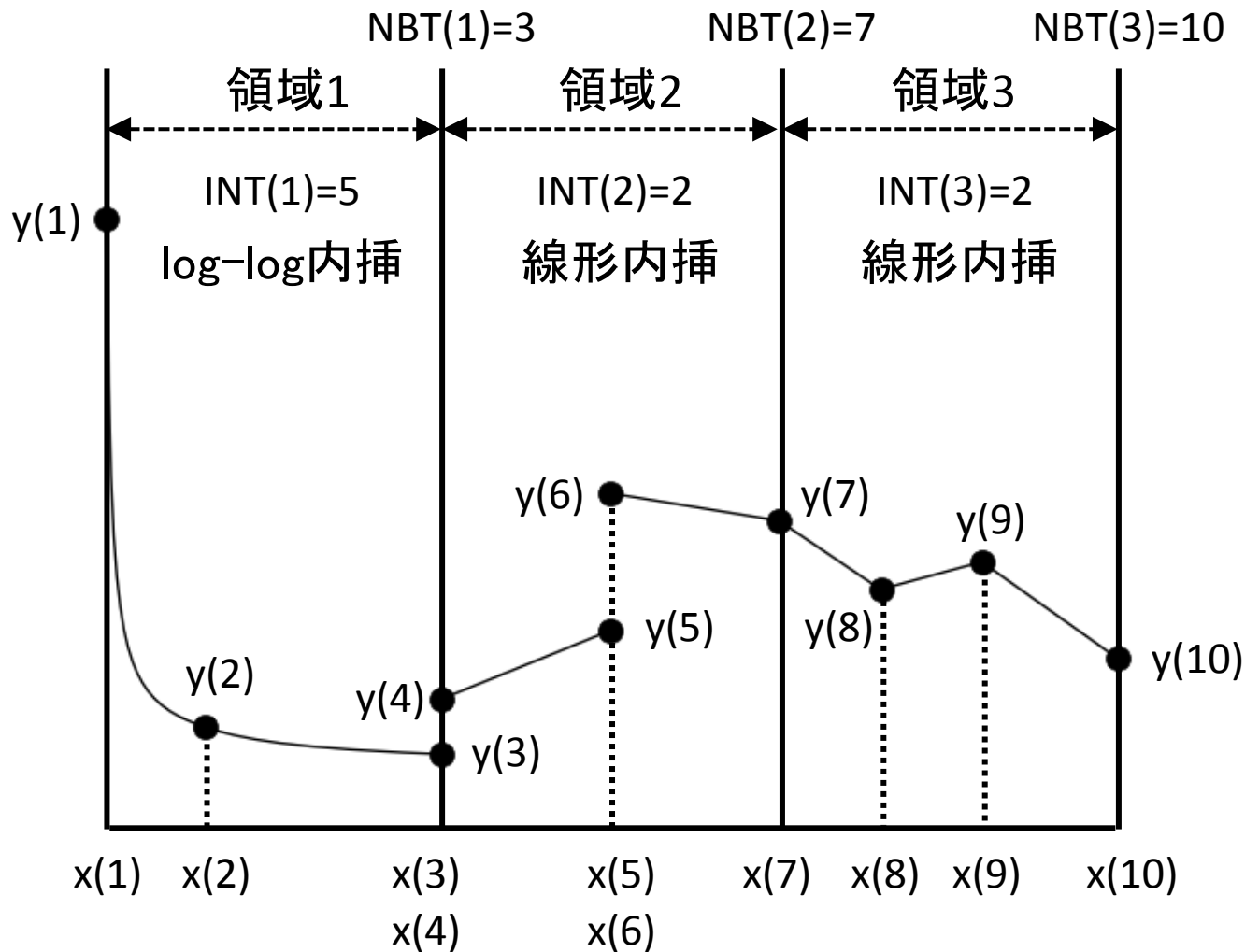
テーブル形式のデータ表現

NP = 10
(ポイント数)

NR = 3
(領域数)



ENDFに与え
られている

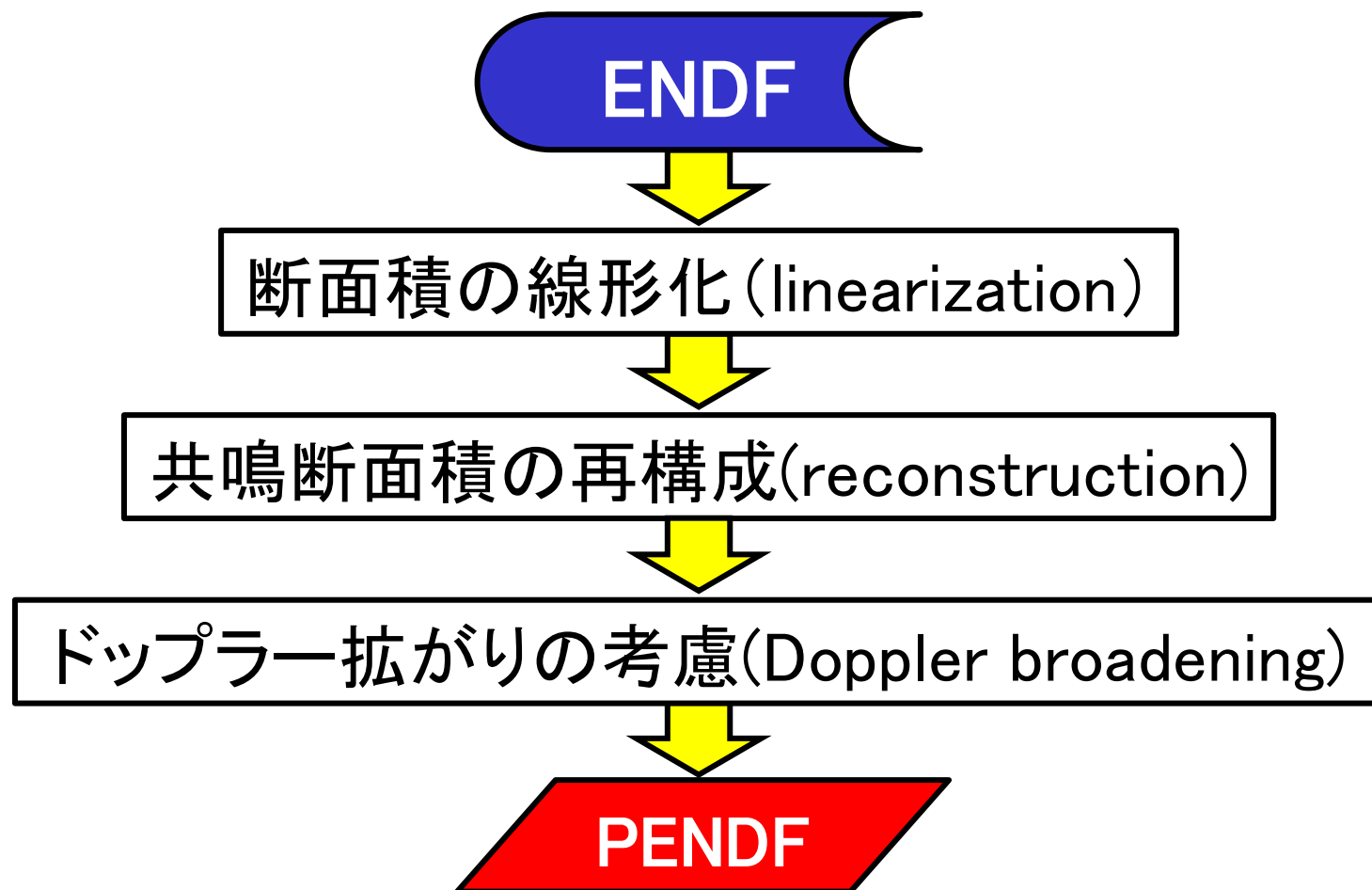


◆点を与えて、線でつなぐ(内挿法を指定)

ENDF-6で用いられる内挿法

- **INT=1**: ヒストグラム(一定)
- **INT=2**: 線形内挿(linear-linear)
- **INT=3**: $y - \ln(x)$ 線形内挿(linear-log)
- **INT=4**: $\ln(y) - x$ 線形内挿(log-linear)
- **INT=5**: $\ln(y) - \ln(x)$ 線形内挿(log-log)
- **INT=6**: 荷電粒子断面積のための特別内挿法
- **INT=11-15**: method of corresponding points
(2次元関数内挿)
- **INT=21-25**: ユニットベース内挿
(2次元関数内挿)

ポイントワイズ断面積データの作成



- 連続エネルギー用MCライブラリ作成
- 多群輸送コード用ライブラリ作成

共通の核データ処理

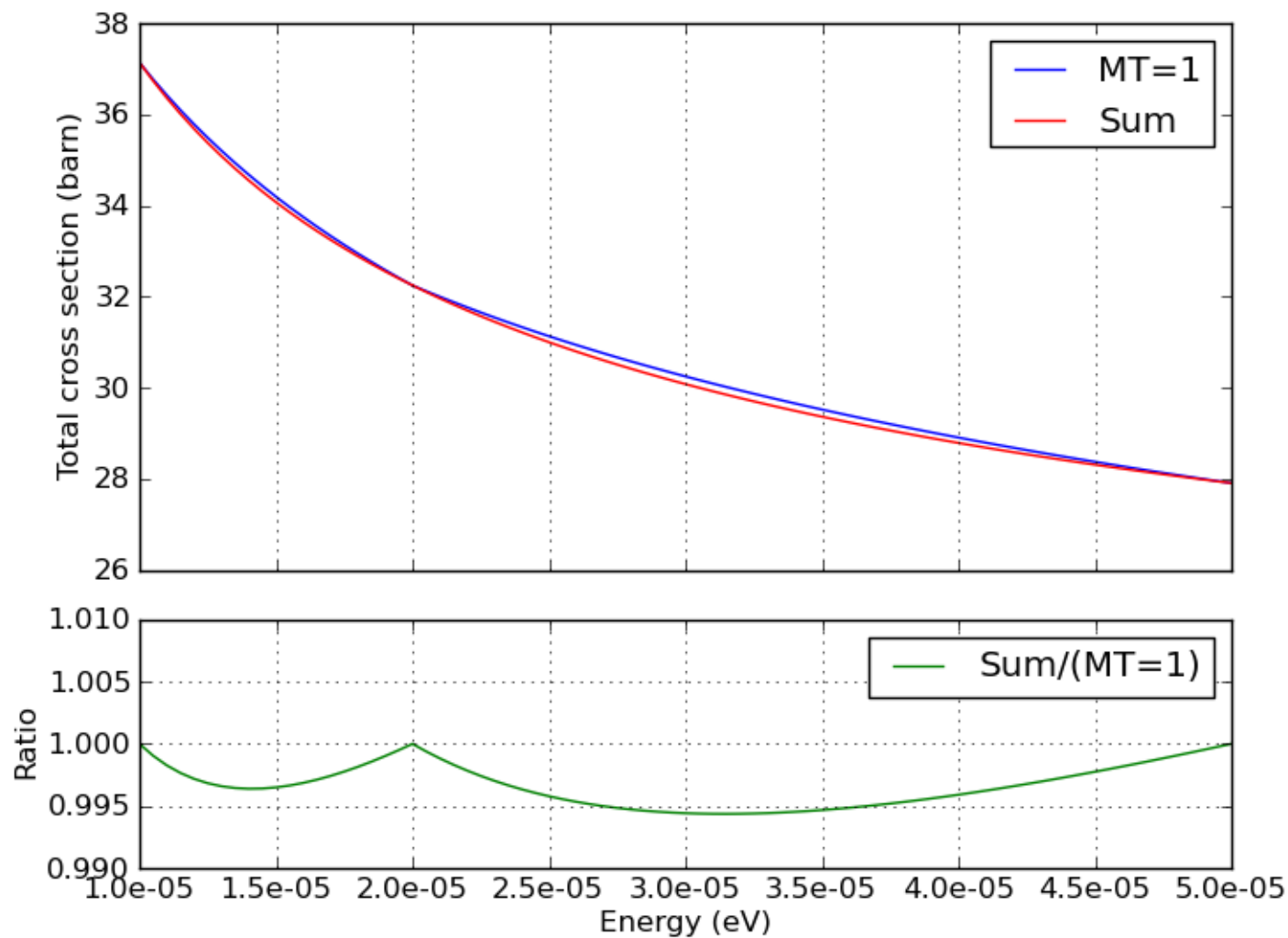
断面積データの線形化

		Total		JENDL-4.0, H-1, File 3			
ZA	AWR						
1. 001000+3	9. 991673-1	0	0	0	0	125	3 1
0. 000000+0	0. 000000+0	0	0	NR= 2	NP= 96	125	3 1
NBT(1)= 30	INT(1)= 5	NBT(2)= 96	INT(2)= 2	0	0	125	3 1
1. 000000-5	3. 713628+1	2. 000000-5	3. 224498+1	5. 000000-5	2. 790478+1	125	3 1
E1	σ_1	E2	σ_2	E3	σ_3		

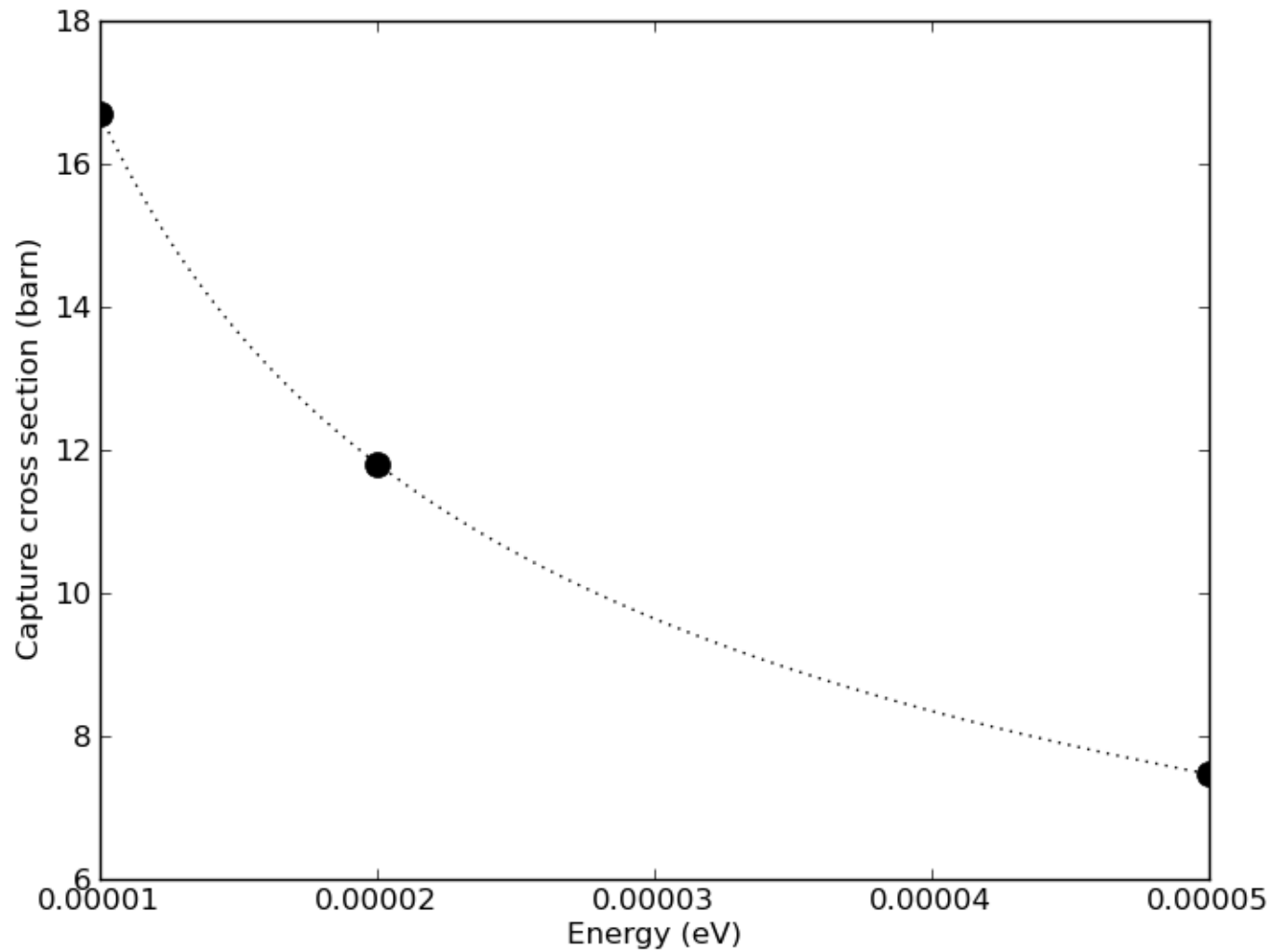
		Elastic					
ZA	AWR						
1. 001000+3	9. 991673-1	0	0	0	0	125	3 2
0. 000000+0	0. 000000+0	0	0	NR= 1	NP= 96	125	3 2
NBT(1)= 96	INT(1)= 2	NBT(2)= 0	INT(2)= 0	0	0	125	3 2
1. 000000-5	2. 043634+1	2. 000000-5	2. 043634+1	5. 000000-5	2. 043634+1	125	3 2
E1	σ_1	E2	σ_2	E3	σ_3		

		Capture					
ZA	AWR						
1. 001000+3	9. 991673-1	0	0	0	0	125	3102
2. 224631+6	2. 224631+6	0	0	NR= 2	NP= 96	125	3102
NBT(1)= 30	INT(1)= 5	NBT(2)= 96	INT(2)= 2	0	0	125	3102
1. 000000-5	1. 669994+1	2. 000000-5	1. 180864+1	5. 000000-5	7. 468441+0	125	3102
E1	σ_1	E2	σ_2	E3	σ_3		

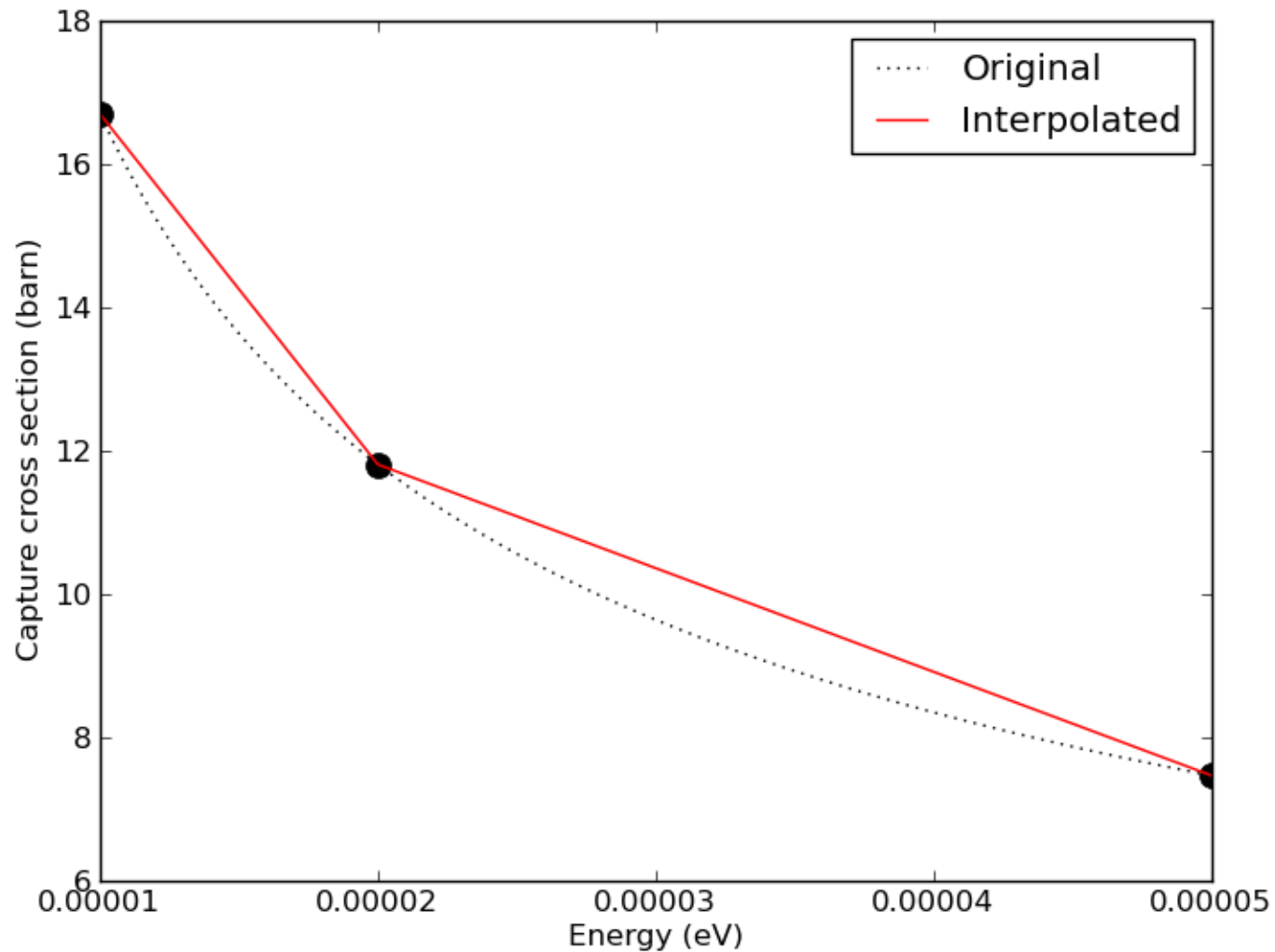
線形化の必要性



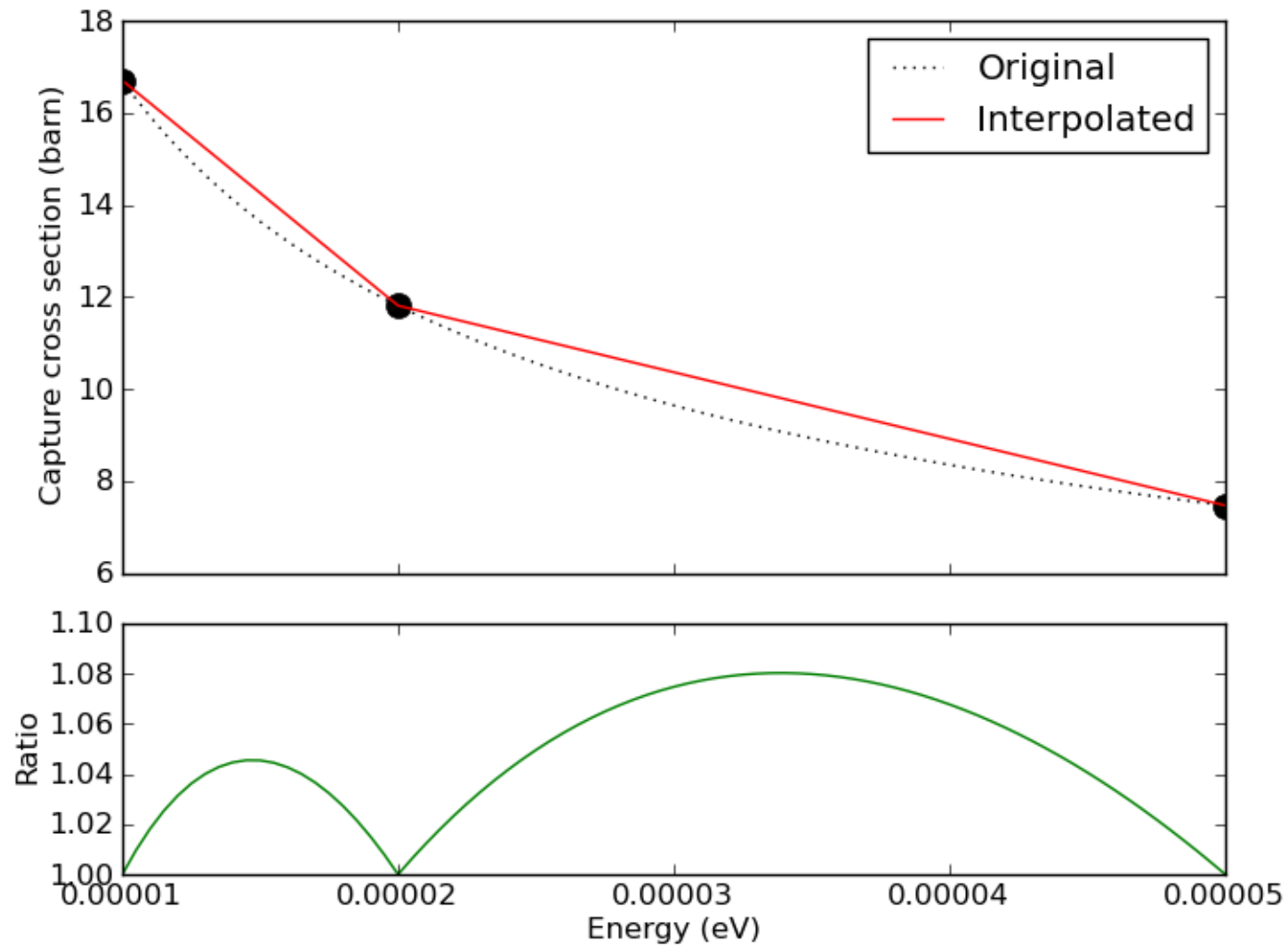
区間二分法(interval halving)



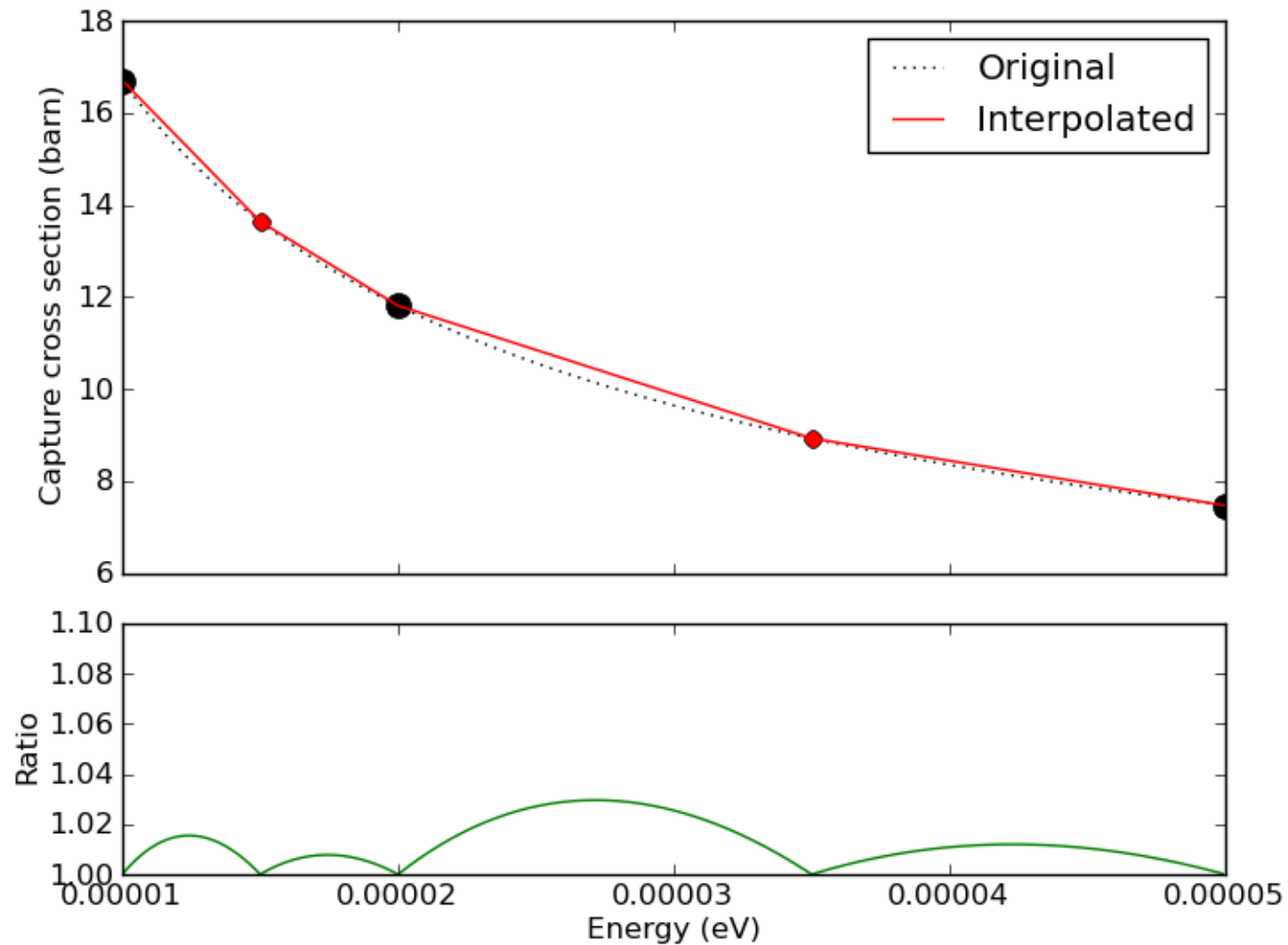
区間二分法(interval halving)



区間二分法(interval halving)



区間二分法(interval halving)



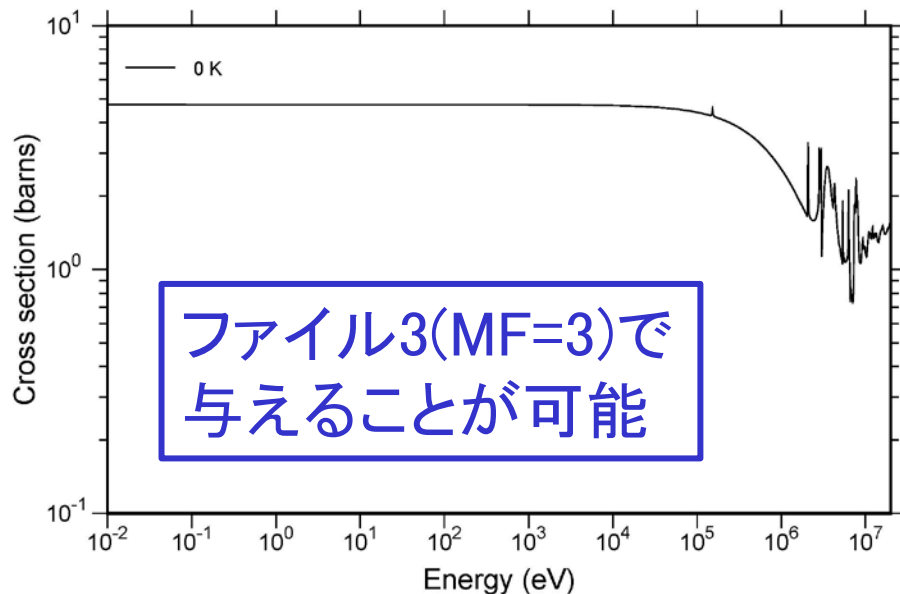
断面積データの線形化(利点)

- ・ ドップラー拡がり断面積をカーネル拡張法(kernel broadening)により精度よく計算できる。
- ・ コード内での処理を線形内挿だけの処理に特化することができる。
- ・ プロットが簡単。

共鳴断面積の再構成

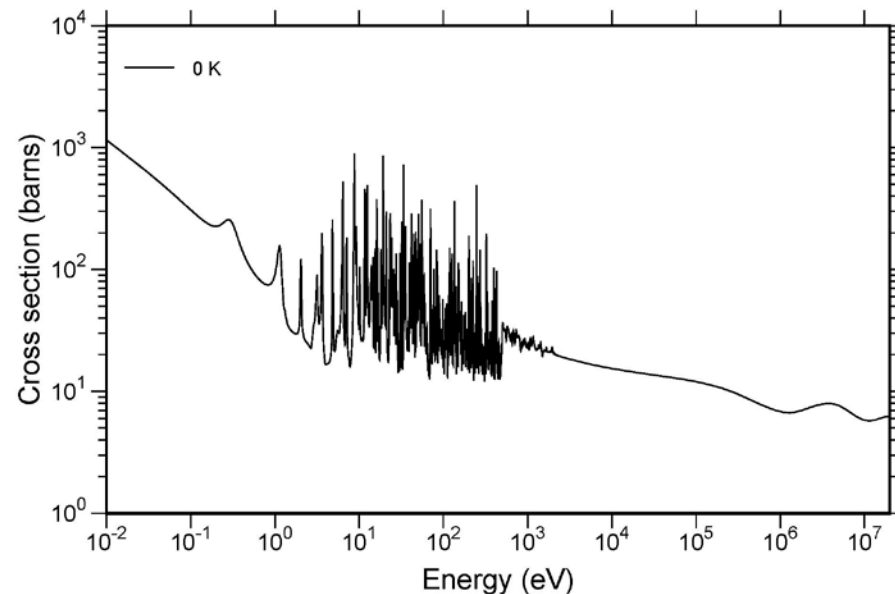
JENDL-4.0 C-000
Total Cross Section

軽核

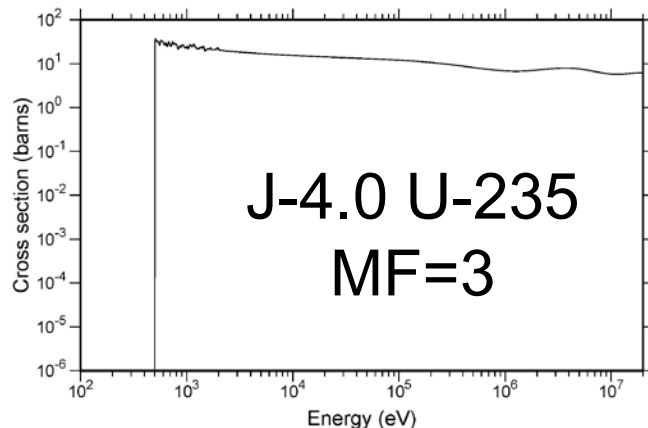


JENDL-4.0 U-235
Total Cross Section

重核



JENDL-4.0 U-235
Total Cross Section



断面積は、共鳴パラメータ
(MF=2, MT=151)で与えられる

◆ 共鳴の再構成が必要

ENDF-6で用いられる共鳴公式

- ・ ブライト・ウィーグナー準位公式
 - 表現が簡単、解析的に($\psi\chi$ 法で)ドップラー広がりを考慮可。負の断面積を与えることがある。
- ・ ブライト・ウィーグナー多準位公式
 - 表現が複雑。負の断面積を与えない。多チャンネル効果は無視。
- ・ ライヒ・ムーア(Reich-Moore)
 - 2つの核分裂チャンネルをもつ多準位公式。
- ・ 限定R行列(R-Matrix Limited)
 - 現在のところ、ENDF/B-VII.1のF-19でのみ使用されている。

ブライト・ウィーグナー—準位公式

ENDF-102における放射捕獲反応に対する定義式

$$\sigma_{n,\gamma}(E) = \sum_{\ell=0}^{\text{NLS}-1} \sigma_{n,\gamma}^{\ell}(E),$$

$$\sigma_{n,\gamma}^{\ell}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_J g_J \sum_{r=1}^{\text{NR}_J} \frac{\Gamma_{\text{nr}}(E) \Gamma_{\gamma r}}{(E - E'_r)^2 + \Gamma_r^2 / 4},$$

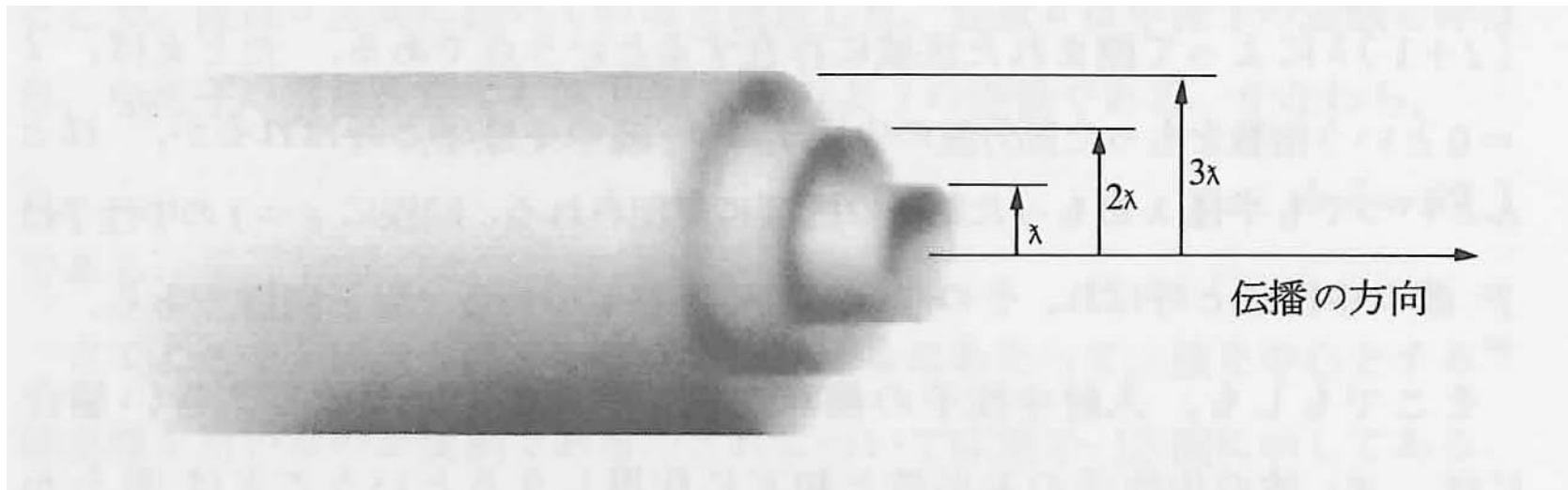
$$\Gamma_{\text{nr}}(E) = \frac{P_{\ell}(E) \Gamma_{\text{nr}}(|E_r|)}{P_{\ell}(|E_r|)}, \quad k = \frac{\sqrt{2m_n}}{\hbar} \frac{A}{A+1} \sqrt{E}$$

$$E'_r = E_r + \frac{S_{\ell}(|E_r|) - S_{\ell}(E)}{2P_{\ell}(|E_r|)} \Gamma_{\text{nr}}(|E_r|), \quad g_J = \frac{2J+1}{2(2I+1)}$$

部分波展開

入射中性子 $\Rightarrow$ 平面波、部分波で展開

$$\psi_{\text{in}} = e^{ikz} = \sum_{\ell=0}^{\infty} (2\ell+1) i^{\ell} j_{\ell}(kr) P_{\ell}(\cos \theta)$$



ラマーシュ,「原子炉の初等理論」(上), p.58, 第2-14図より引用

ブライト・ウィーグナーー準位公式

簡略化 $\Rightarrow$ s波($\ell = 0$)のみ、孤立共鳴

$$\sigma_{\gamma}(E) = \sigma_r \frac{\overset{\text{GG}_r \downarrow}{\Gamma_{\gamma}}}{\underset{\text{GT}_r \uparrow}{\Gamma_r}} \sqrt{\frac{|E_r|}{E}} \frac{1}{1 + x_r^2}, \quad x_r = \frac{2}{\Gamma_r} (E - \overset{\text{ER}_r \downarrow}{E_r})$$

共鳴パラメータ

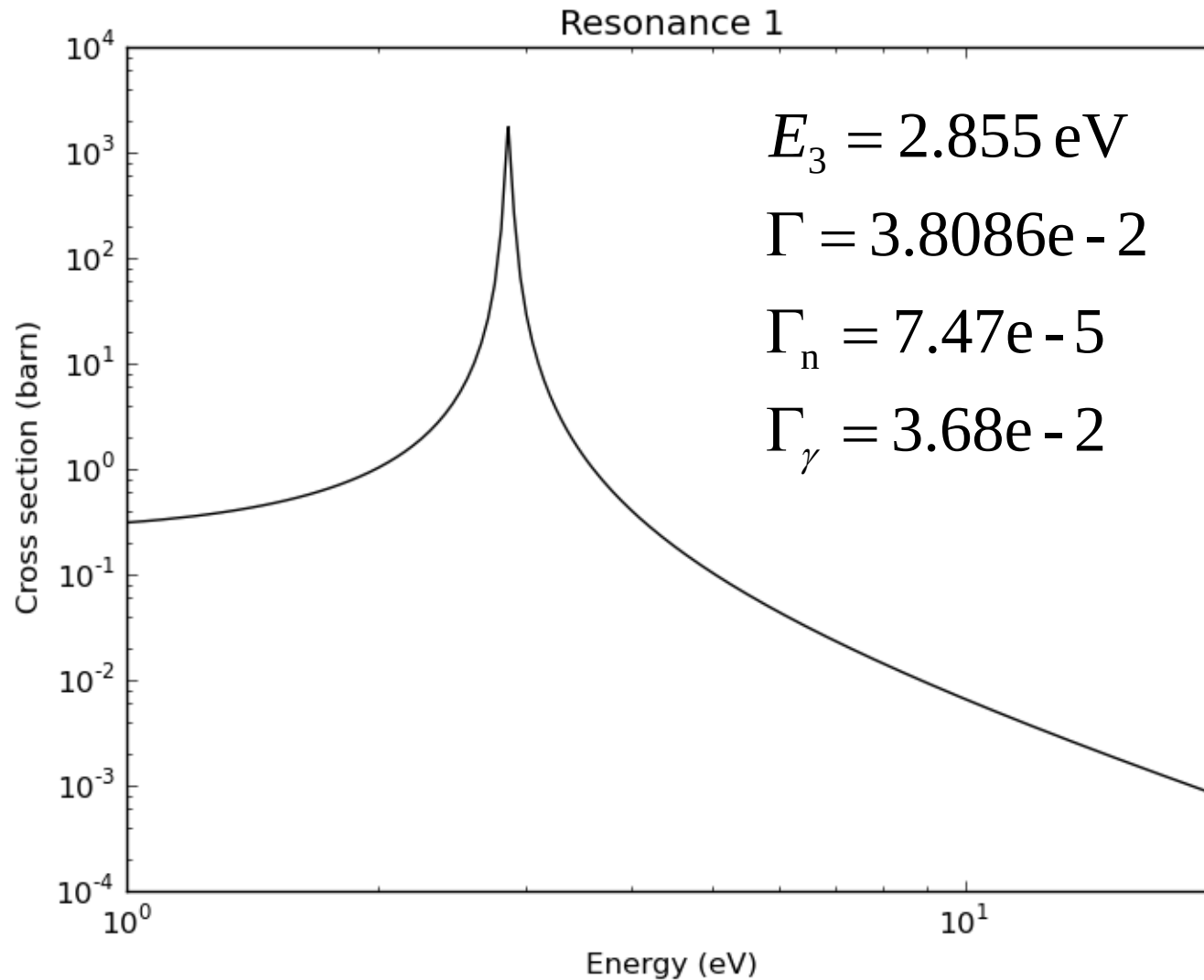
$$\sigma_r = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n |E_r|} \left(\frac{\overset{\text{AWR} \downarrow}{A+1}}{A} \right)^2 \frac{\overset{\text{GN}_r \downarrow}{\Gamma_{nr}}}{\Gamma_r} \frac{\overset{\text{AJ} \downarrow}{2J+1}}{2(\underset{\text{SPI} \uparrow}{2I+1})}$$

ブライト・ウィーグナーー準位公式

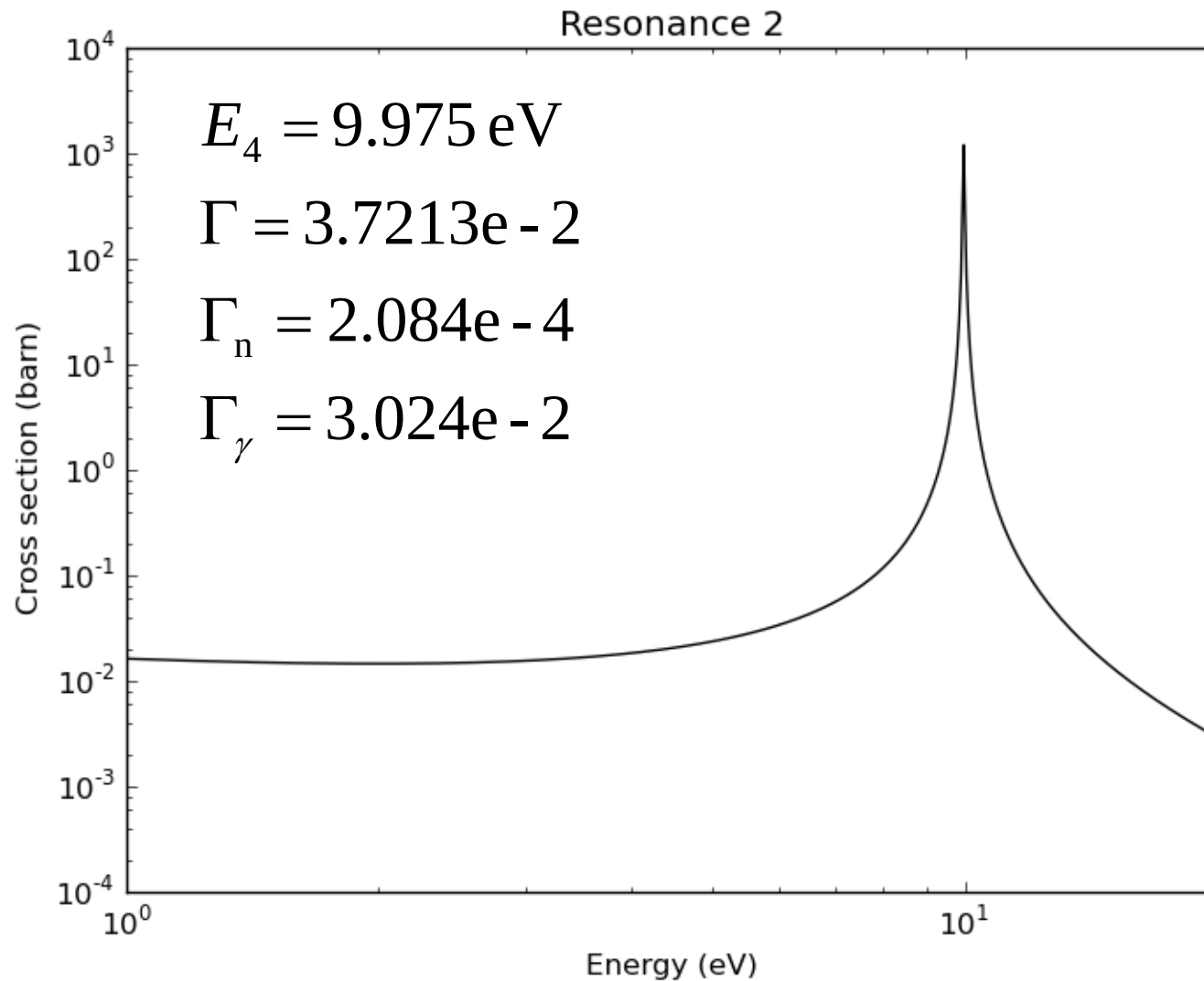
ENDF/B-VII.0のPu-238

ZA		AWR		分離共鳴		SLBW					
9. 423800+4	2. 360045+2			0	0			NIS= 1	09434	2151	
ZAI= 9. 423800+4	1. 000000+0=ABN			0	0	LFW= 1		NER= 2	09434	2151	
EL= 1. 000000-5	2. 000000+2=EH	LRU= 1				LRF= 1		NRO= 0	NAPS= 09434	2151	
Subsection for 1st energy range											
SPI= 0. 000000+0	9. 309000-1=AP			0	0			NLS= 1	09434	2151	
AWRI= 2. 360045+2	0. 000000+0=QX	L= 0				LRX= 0	6*NRS= 96	NRS= 16	9434	2151	
-1. 000000+1	5. 000000-1	6. 217000-2	1. 581000-2	4. 500000-2	1. 360000-3	9434	2151				
ER ₁	AJ ₁	GT ₁	GN ₁	GG ₁	GF ₁						
-4. 000000-1	5. 000000-1	4. 670000-2	3. 400000-4	4. 500000-2	1. 360000-3	9434	2151				
2. 855000+0	5. 000000-1	3. 808600-2	7. 470000-5	3. 680000-2	1. 211000-3	9434	2151				
ER ₃	AJ ₃	GT ₃	GN ₃	GG ₃	GF ₃						
共鳴	J値	Γ	Γ _n	Γ _γ	Γ _f						
エネルギー											
			⋮								

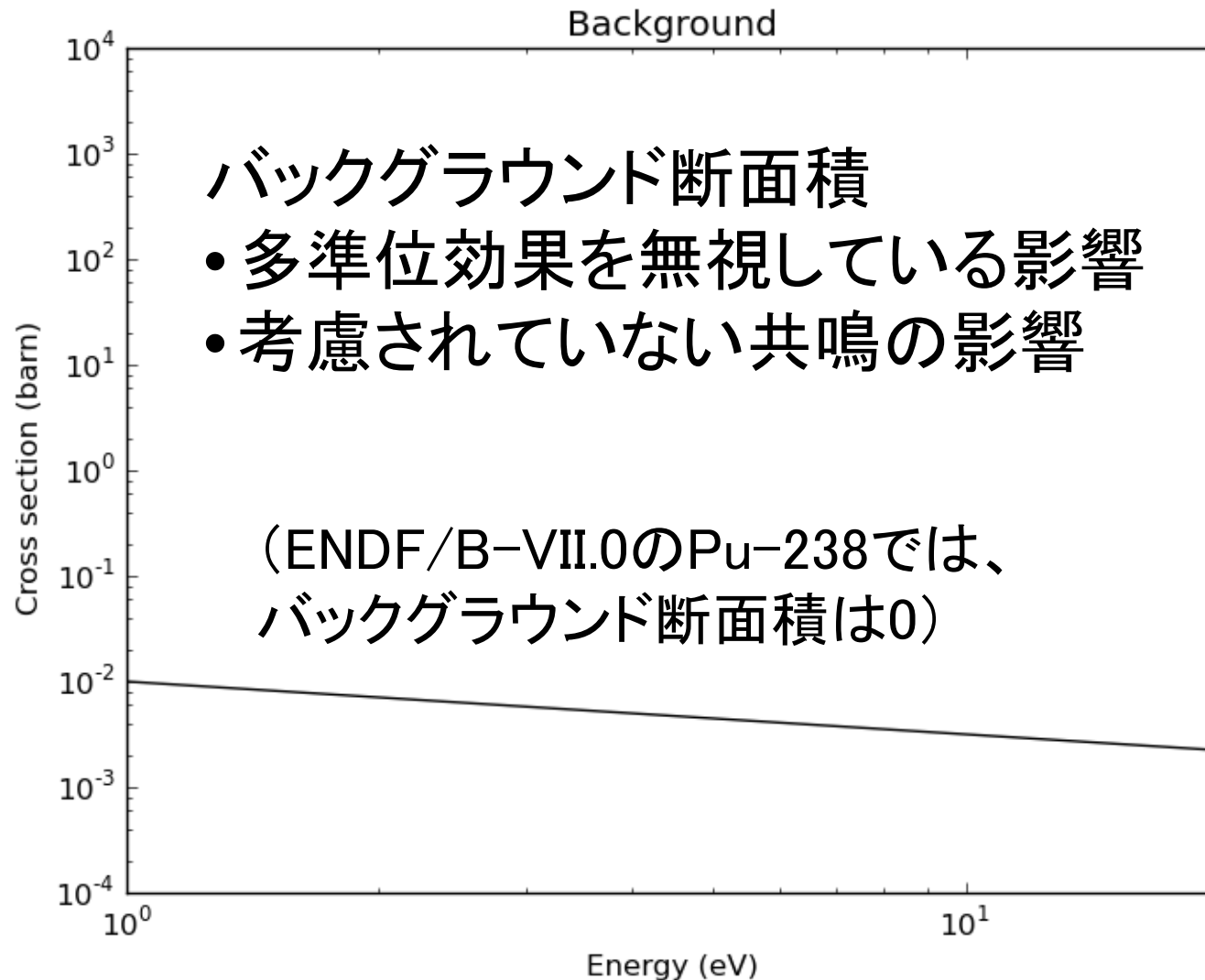
共鳴断面積の再構成



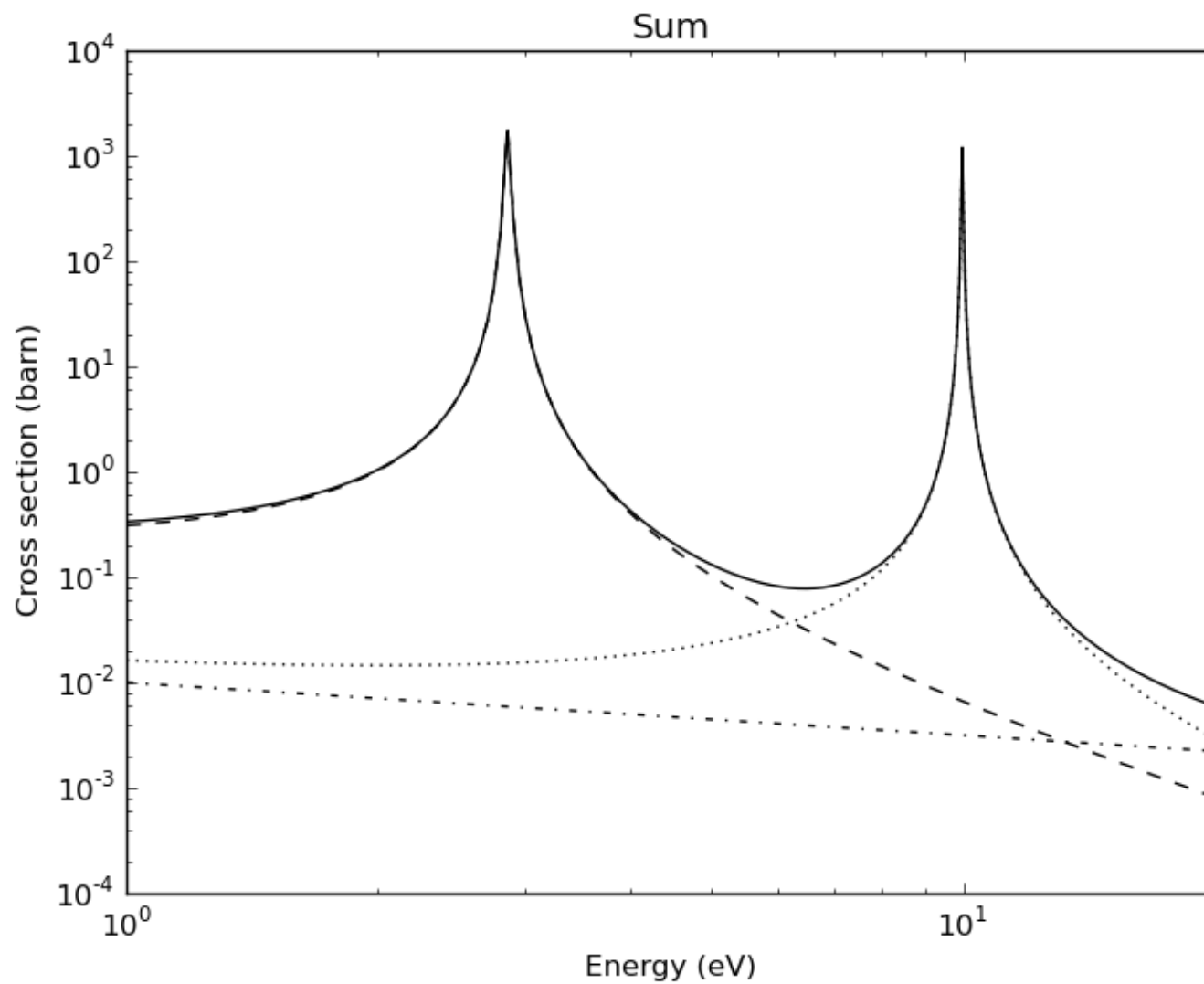
共鳴断面積の再構成



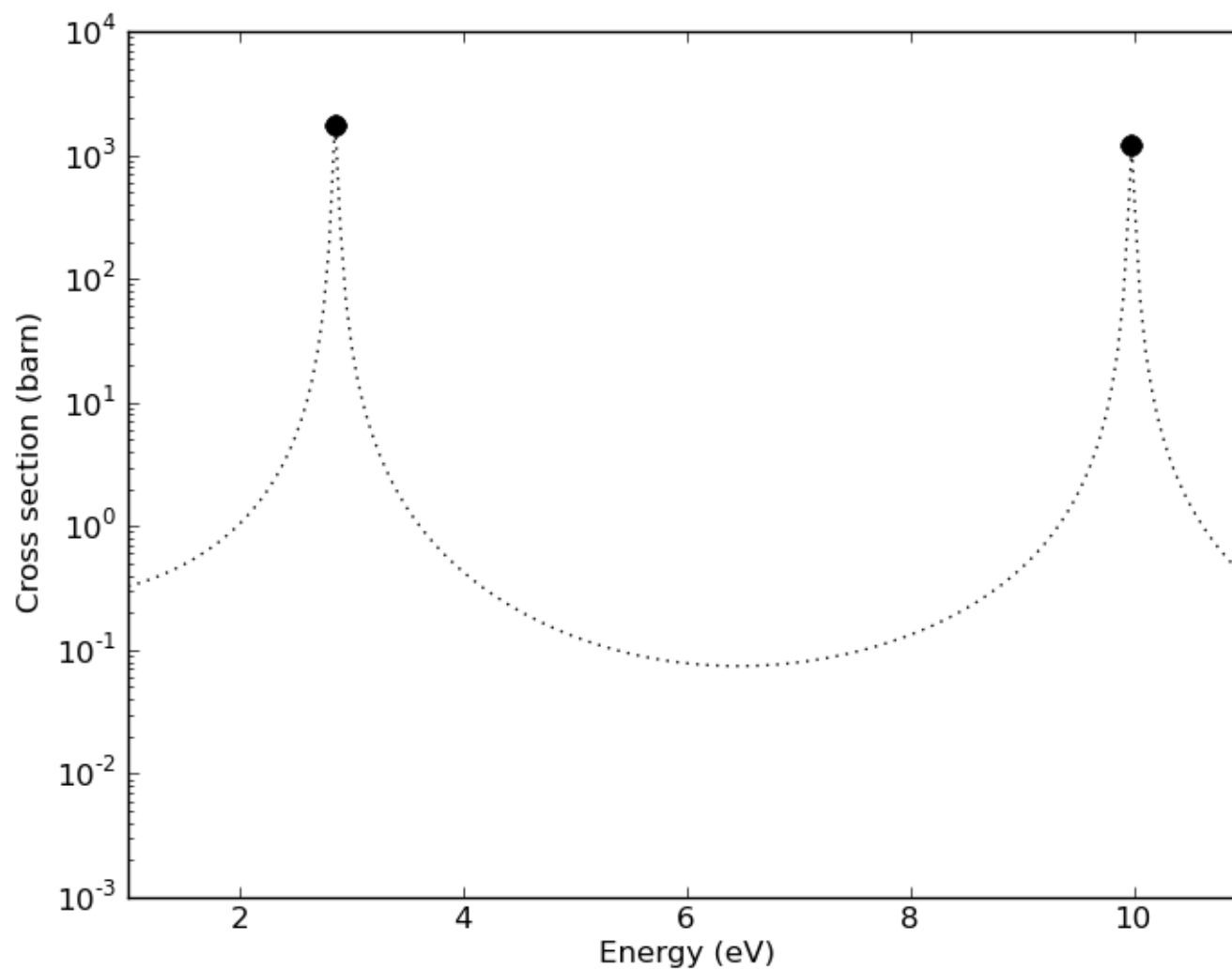
共鳴断面積の再構成



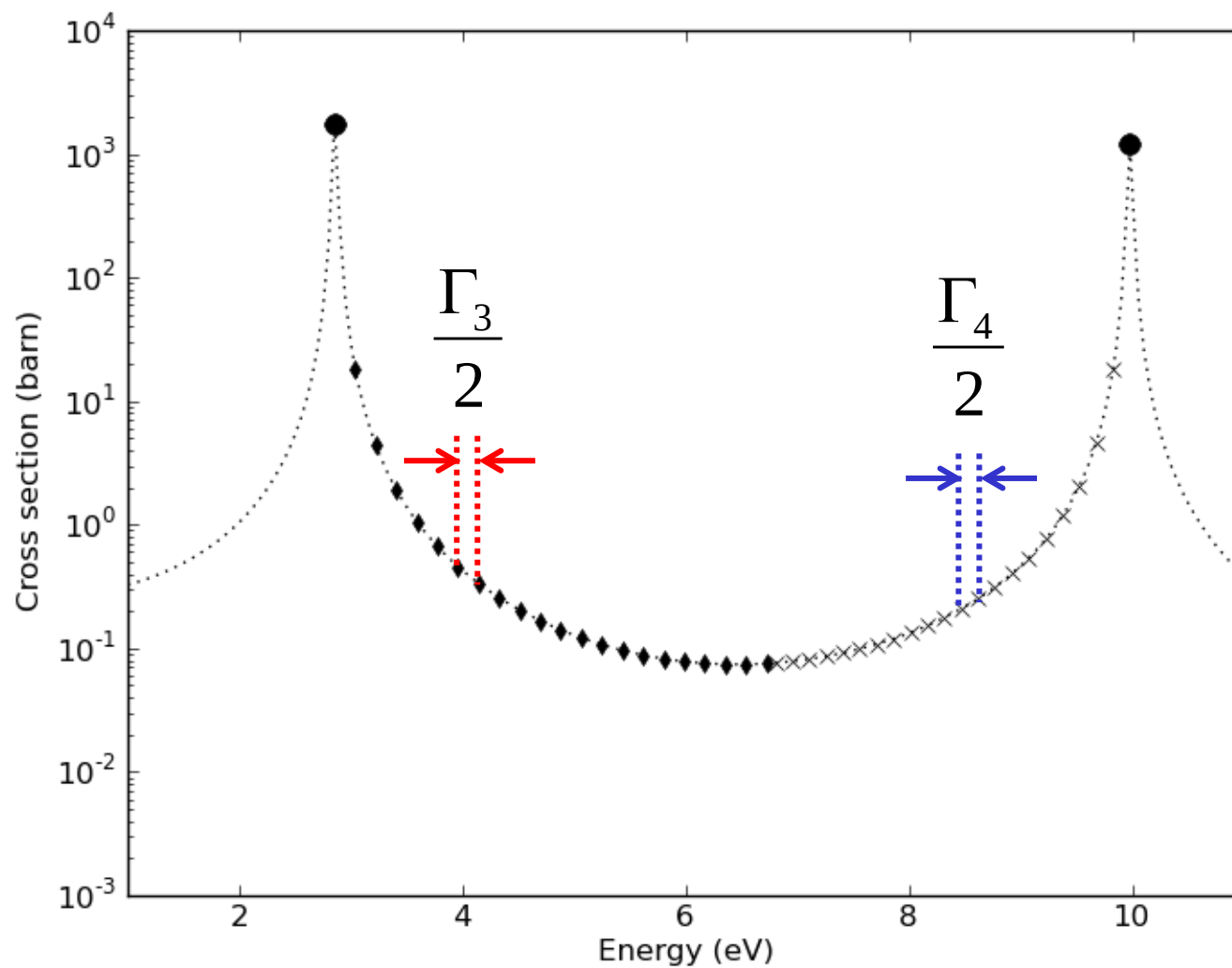
共鳴断面積の再構成



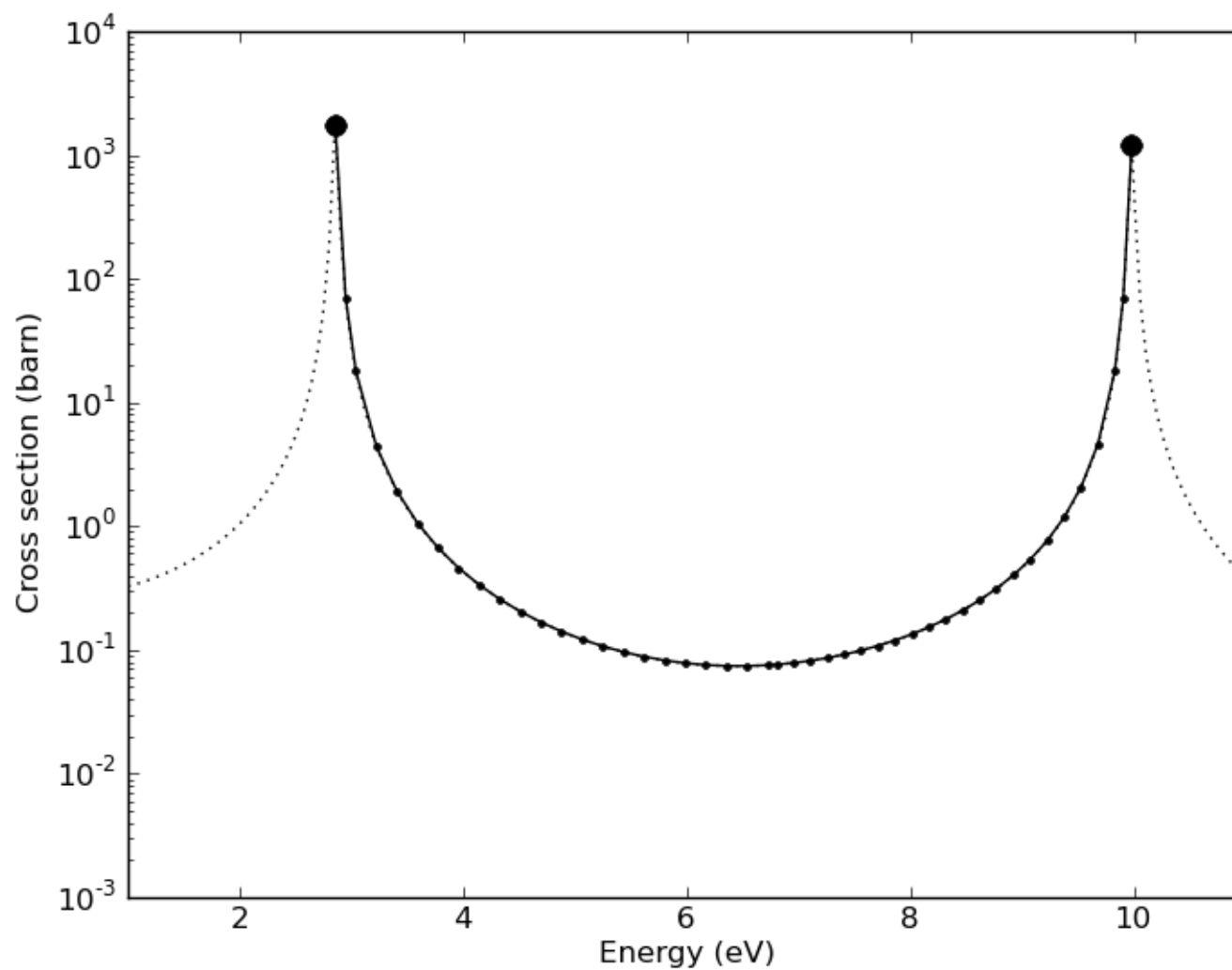
共鳴断面積の再構成



共鳴断面積の再構成



共鳴断面積の再構成



非分離共鳴データの処理

- ENDF-6フォーマットの非分離共鳴領域
⇒ 平均の共鳴幅、平均の共鳴間隔、
共鳴幅の分布(ある自由度の χ^2 分布)
- 放射捕獲反応に対する断面積公式

$$\sigma_{n,\gamma}(E) = \sum_{\ell=0}^{\text{NLS}-1} \sigma_{n,\gamma}^{\ell}(E),$$

$$\sigma_{n,\gamma}^{\ell}(E) = \frac{2\pi^2}{k^2} \sum_J \frac{g_J}{D_{\ell,J}} \left\langle \frac{\Gamma_n \Gamma_{\gamma}}{\Gamma} \right\rangle_{\ell,J}$$

無限希釈断面積

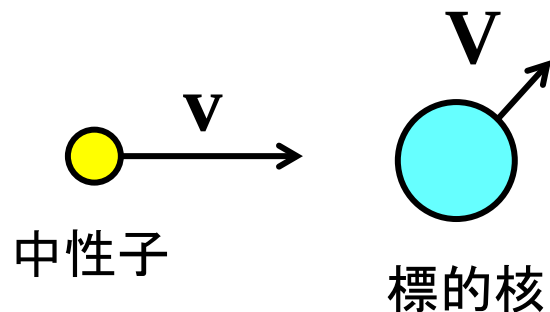
$$= \frac{2\pi^2}{k^2} \sum_J \frac{g_J}{D_{\ell,J}} \frac{\bar{\Gamma}_{n,\ell,J} \bar{\Gamma}_{\gamma,\ell,J}}{\bar{\Gamma}_{\ell,J}} R_{\gamma,\ell,J} \leftarrow \begin{array}{l} \text{揺らぎ因子} \\ (\chi^2 \text{分布の平均}) \end{array}$$

- 自己遮へい因子、確率テーブルは別モジュールで計算

ドップラー広がり

基礎式 $\Rightarrow$ 反応率保存

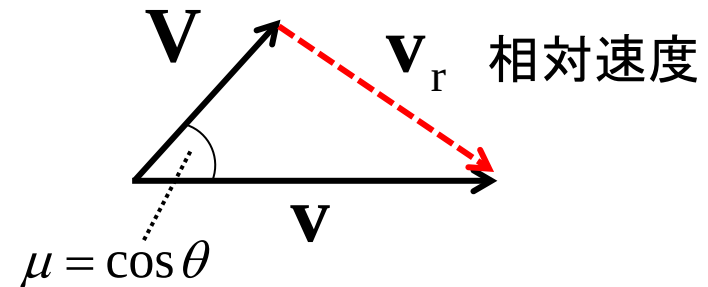
$$v\sigma(v, T) = \int v_r \sigma(v_r, 0) P(\mathbf{V}) d\mathbf{V}$$



マクスウェル・ガスモデル

$$P(\mathbf{V})d\mathbf{V} = \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^{3/2} e^{-\beta V^2} V^2 d\phi d\mu dV,$$

$$\beta = \frac{M}{2kT}$$



$$v_r = \sqrt{v^2 + V^2 - 2vV\mu}$$

SIGMA1 kernel broadening

ドップラー広がり基礎式を変形

$$\sigma(v, T) = \frac{1}{v^2} \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \int_0^\infty dv_r v_r^2 \sigma(v_r, 0) \left[e^{-\beta(v-v_r)^2} - e^{-\beta(v+v_r)^2} \right]$$

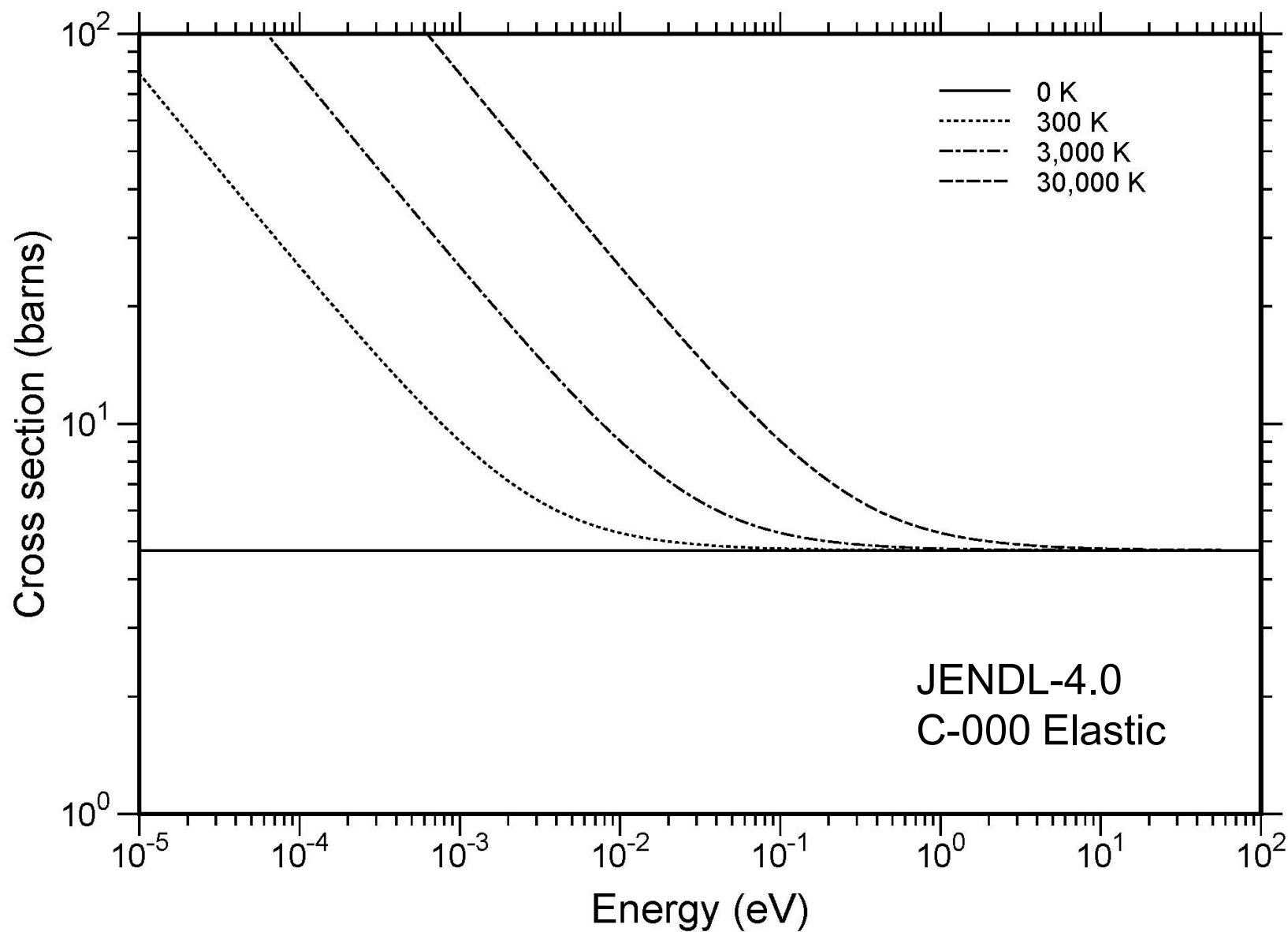
線形化

$$\sigma(E, 0) = \frac{E - E_k}{E_{k+1} - E_k} \sigma_{k+1} + \frac{E_{k+1} - E}{E_{k+1} - E_k} \sigma_k, \quad E_r = \frac{1}{2} m v_r^2$$

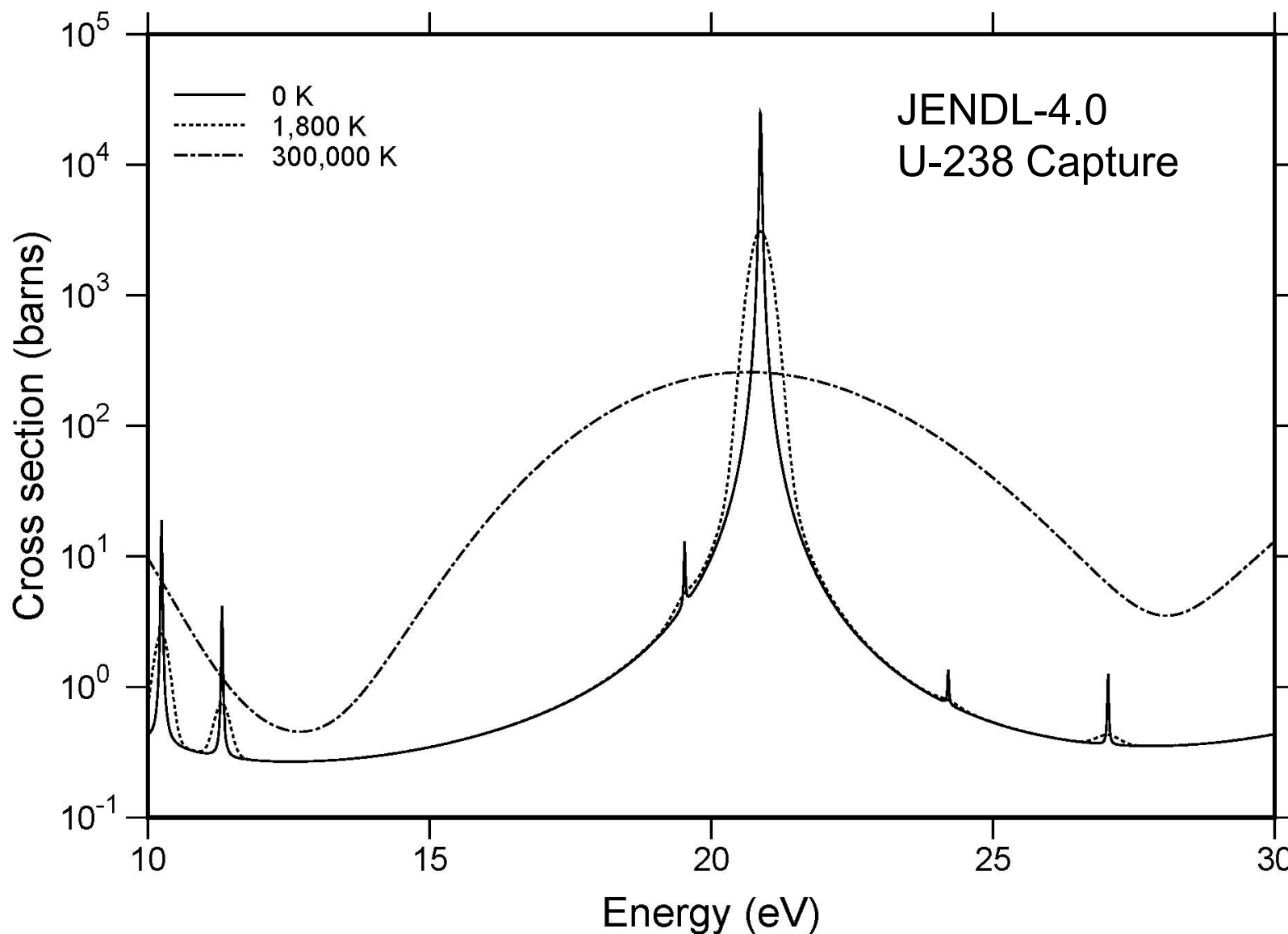
$$F^n(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a z^n e^{-z^2} dz$$

この積分値が計算できれば
近似なく、 $\sigma(v, T)$ が求まる。

ドップラー広がり考慮した断面積



ドップラー広がりを考慮した断面積



ドップラー拡がり(その他)

- ・ 実際のコード (SIGMA1, BROADR) では、断面積のドップラー拡がりに応じて、点を増やしたり、減らしたりして、内挿精度が悪くならないようにしている。
- ・ 既にドップラー拡がりを考慮した温度 (T_1) から、更に別の温度 (T_2) へドップラー拡がりを考慮することができる。

連続エネルギーMC用断面積ライブラリ

- ・ 共通エネルギーグリッドの作成
 - 任意のエネルギー一点における反応確率 (σ_x/σ_t) が必要。
 - エネルギー領域の検索が一度で済む。
 - 断面積の線形化と共鳴の再構成と同時に行われる。
- ・ NJOYコード
 - 室温における中性子エネルギー 0.0253 eV
 - 1オーダー毎にその1倍、2倍、5倍のエネルギー点を追加する。

遷移確率データの作成

粒子輸送計算に必要なデータ  {

- 断面積
- 散乱後の粒子の飛行方向
- 散乱後の粒子エネルギー

ENDFのファイル4, 5, 6をMC用のデータに変換

ENDF-6の微分断面積の形式

$$\sigma_i(\mu, E \rightarrow E') = \sigma(E) y_i(E) f_i(\mu, E \rightarrow E') / 2\pi,$$

$$\int dE' \int d\mu f_i(\mu, E \rightarrow E') = 1 \quad \leftarrow \text{確率密度関数}$$

i はある生成物のインデックス

角度分布とエネルギー分布のタイプ

- ・ 角度分布のみ
 - ファイル4のみ $f(\mu, E)$
 - E' は運動学(kinematics)から計算
 - 弾性散乱(MT=2), 離散レベル非弾性散乱(MT=51-90)
- ・ 角度分布とエネルギー分布の積
 - ファイル4とファイル5 $f(\mu, E) \times g(E \rightarrow E')$
 - (n,2n)反応(MT=16), 核分裂反応(MT=18), 連続レベル非弾性散乱(MT=91)
- ・ エネルギー角度分布
 - エネルギーと角度に相関
 - ファイル6 $f(\mu, E \rightarrow E')$

ファイル4(角度分布)

- ・ ENDF-6フォーマットのフラグ(LTT番号)
 - LTT=0 : 等方
 - LTT=1 : ルジャンドル展開形式
 - LTT=2 : テーブル形式
 - LTT=3 : ルジャンドルとテーブルの混合形式

ファイル5(エネルギー分布)

- ・ ENDF-6フォーマットのフラグ(LF番号)
 - LF=1: 任意テーブル形式
 - LF=5: 一般蒸発形式
 - LF=7: マクスウェル核分裂スペクトル
 - LF=9: 蒸発スペクトル
 - LF=11: エネルギー依存ワットスペクトル
 - LF=12: エネルギー依存核分裂スペクトル
(Madland and Nix fission spectrum)

ファイル6(エネルギー角度分布)

- ・ ENDF-6フォーマットのフラグ(LAW番号)
 - LAW=1: 未知の分布
 - LAW=1: 連続エネルギー角度形式
 - LAW=2: 離散二体散乱
 - LAW=3: 等方離散放出
 - LAW=4: 離散二体反応反跳分布
 - LAW=5: 荷電粒子弾性散乱
 - LAW=6: N体位相空間分布
 - LAW=7: 実験室系角度エネルギー則

モンテカルロ計算に必要なデータ

- サンプルング $\Rightarrow$ 乱数を使って、分布から具体的な値を決定する。

確率密度関数
(PDF)

$$p(x) \xrightarrow{\text{乱数 } \xi} x \quad (\text{サンプル値})$$

積算密度関数
(CDF)

$$C(x) = \int_a^x p(t) dt, \quad (a \leq x < b)$$

$$x = C^{-1}(\xi)$$

- ENDF-6で用いられている分布形式
 - 関数形式 $\Rightarrow$ 近似を用いることなく直接サンプルング
 - テーブル形式

関数形式からのサンプリング

- ・ マクスウェル分布(ファイル5, **LF=5**)

$$p(E') = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{T^{3/2}} \sqrt{E'} e^{-E'/T}$$



$$E' = T \left[-\ln \xi_2 - (\ln \xi_3) \cos^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \xi_1 \right) \right]$$

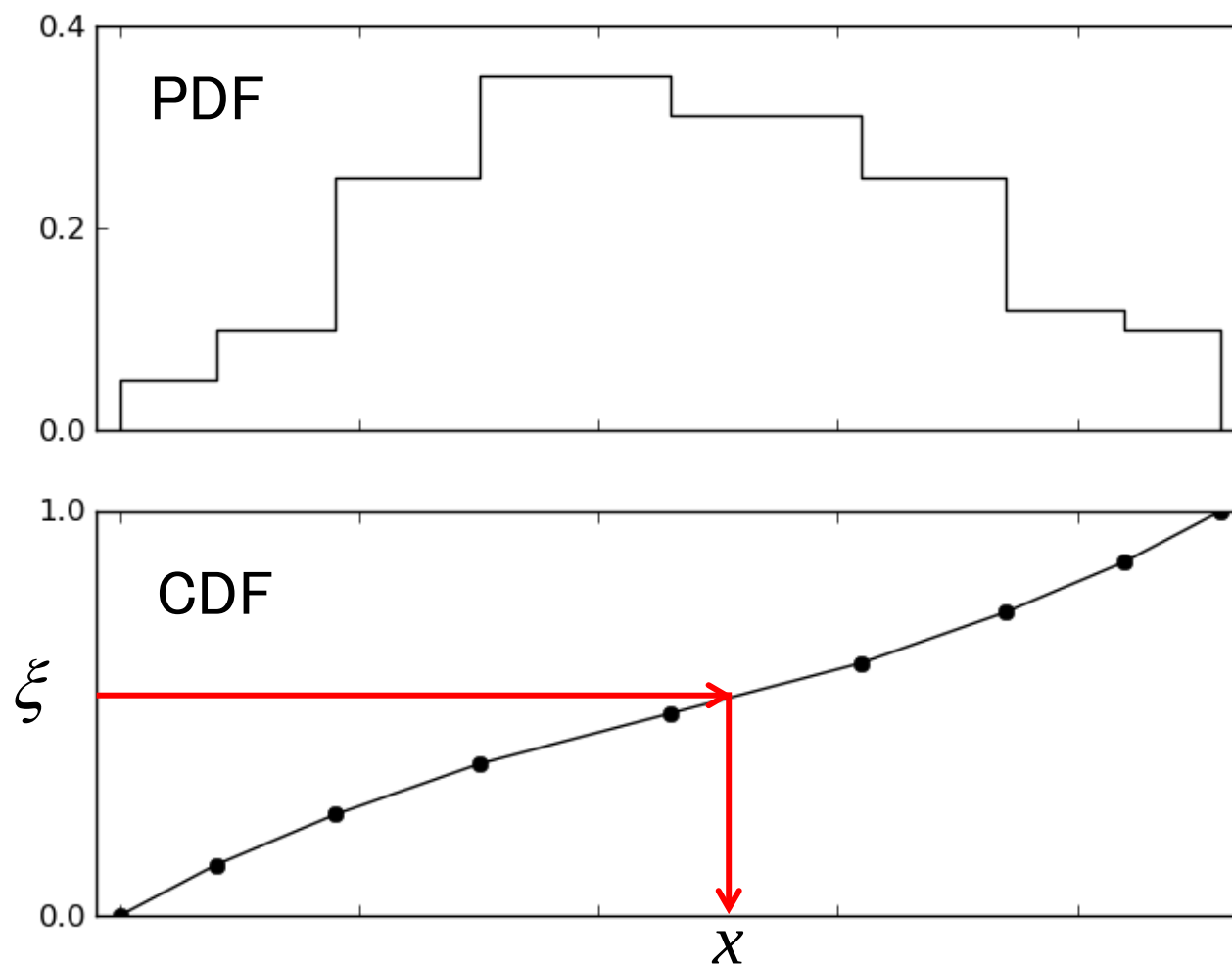
- ・ Kalbach系統式(ファイル6, **LAW=1, LANG=2**)

$$f(\mu) = \frac{a}{2 \sinh(a)} [\cosh(a\mu) + r \sinh(a\mu)]$$

近似を用いることなく、 μ のサンプリング可能

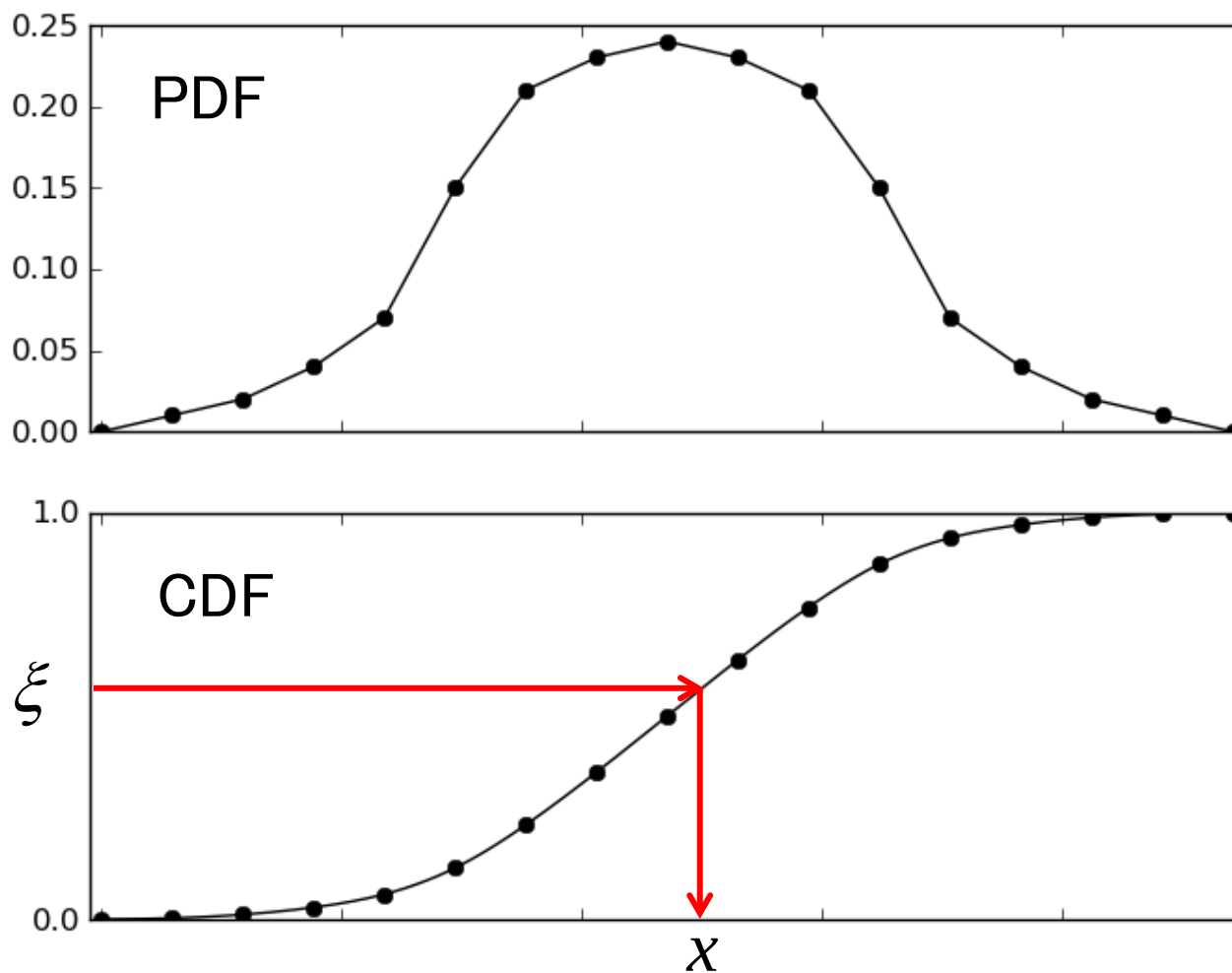
テーブル形式からのサンプリング

ヒストグラム



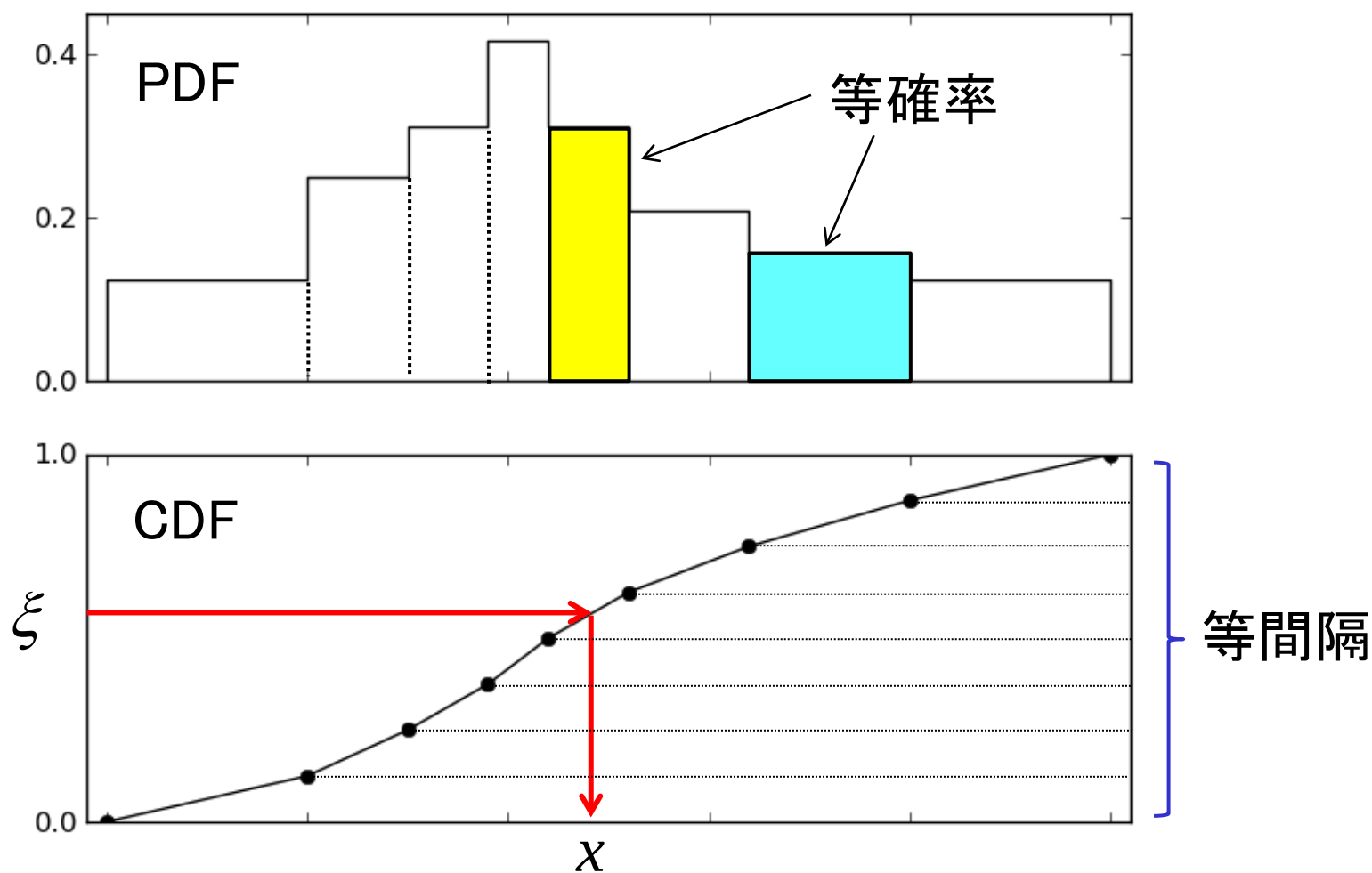
テーブル形式からのサンプリング

線形内挿



テーブル形式からのサンプリング

等確率ビン



遷移確率データの作成(まとめ)

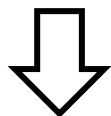
- ENDF-6フォーマットにおける元データ
 - ファイル4(角度分布), ファイル5(エネルギー分布)、ファイル6 (エネルギー角度分布)
 - 分布 $\Rightarrow$ 確率密度関数
- MC計算用のデータに変換
 - 関数形式 $\Rightarrow$ 直接サンプリング
 - テーブル形式 $\Rightarrow$ グリッド点、確率密度関数、積算密度関数のデータに変換

確率テーブルの作成

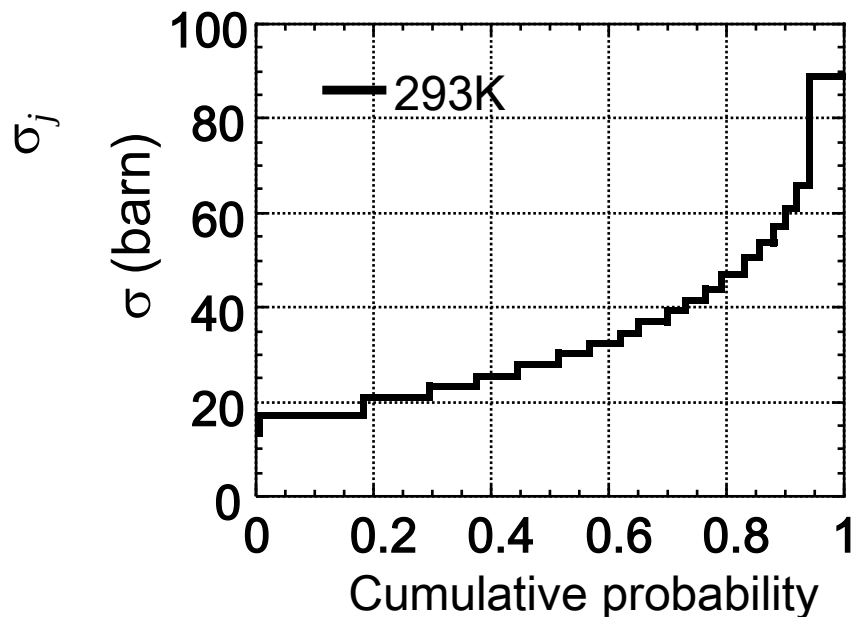
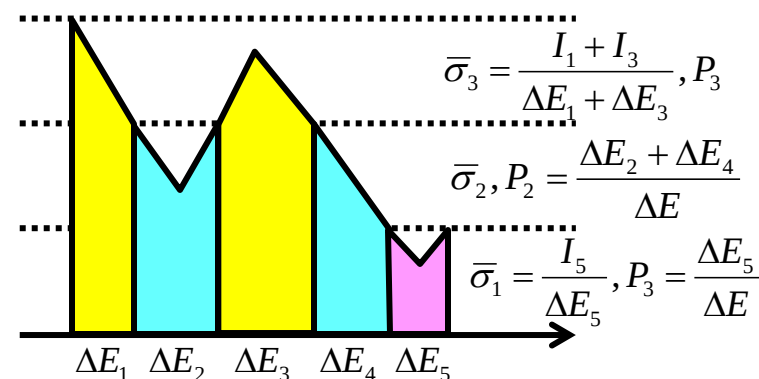
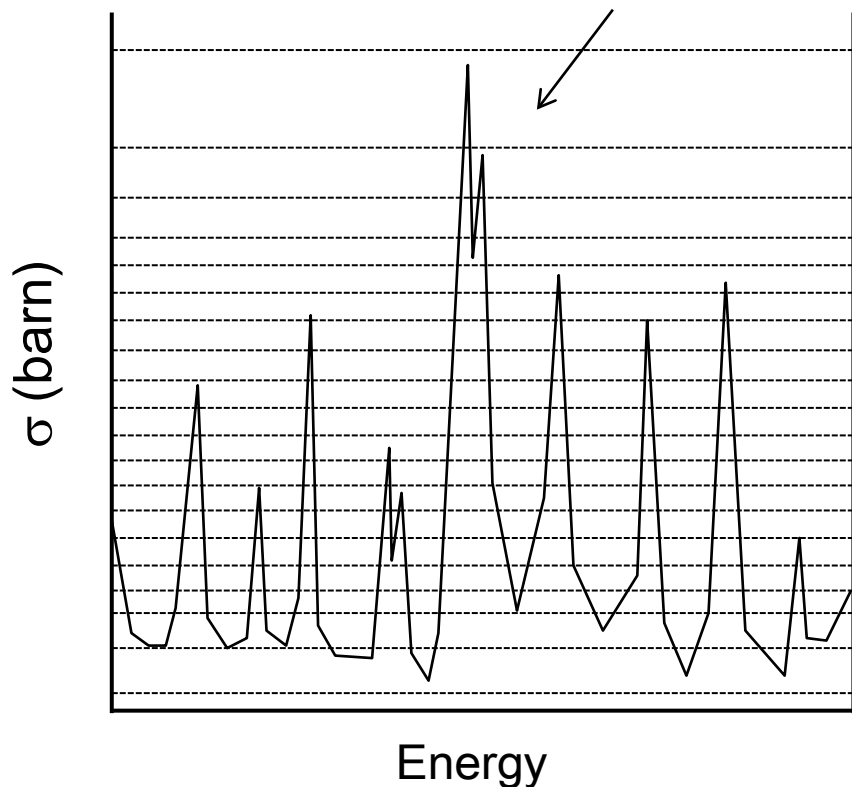
- ・ 非分離共鳴領域における自己遮へい効果
- ・ 確率テーブル法
 - 非均質効果、異核種間の共鳴干渉効果
 - MC法の計算過程において直接考慮
- ・ 確率テーブル法の仮定
 - 中性子は、どのエネルギーにも等確率入射
 - 共鳴は接近、多数の共鳴を飛び越して減速
 - 散乱後のエネルギーの断面積は統計的に取扱可能

確率テーブルの作成

平均共鳴パラメータと分布則



ラダー



その他のデータ

- ・ 熱中性子散乱データ
 - ファイル7 $\Rightarrow$ 熱中性子散乱則 $S(\alpha, \beta)$
 - 遷移確率データ(PDF, CDF)へ変換
- ・ 反応率計算データ
 - 核発熱データ(Kerma), はじき出し断面積(DPA)
- ・ 光子生成データ
 - ファイル12(生成収率), ファイル13(光子断面積), 14(光子角度分布), 15(光子エネルギー分布)
 - ファイル3, 6でも表現

多群断面積ライブラリの作成

多群断面積

$$\sigma_{\ell,g}^i = \frac{\int_g \sigma^i(E) \phi_\ell(E) dE}{\int_g \phi_\ell(E) dE}, \quad \int_g dE \equiv \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE$$

$$\sigma_{\ell,g \rightarrow g'}^i = \frac{\int_g \sigma^i(E) \phi_\ell(E) dE \int_{g'} dE' \int d\mu f(E \rightarrow E', \mu) P_\ell(\mu)}{\int_g \phi_\ell(E) dE}$$

一般形

$$\sigma_{\ell,g} = \frac{\int_g \overset{\text{feed関数}}{\downarrow} F(E) \sigma(E) \phi_\ell(E) dE}{\int_g \phi_\ell(E) dE}$$

ポイントワイズ断面積
を数値積分

多群断面積ライブラリの作成

- ・ 初期中性子束
 - 重み関数(スペクトル)をユーザ入力
 - マクスウェル + $1/E$ + 核分裂スペクトル
- ・ 自己遮へい因子

$$\text{– Bondarenkoモデル} \Rightarrow \phi_\ell(E) \propto \frac{W_\ell(E)}{[\Sigma_t(E)]^{\ell+1}}$$

$$\Rightarrow \phi_\ell(E) \propto \frac{W_\ell(E)}{[\sigma_t^i(E) + \sigma_0^i]^{\ell+1}} \Rightarrow \sigma_{\ell,g}^i = \frac{\int_g \sigma^i(E) \phi_\ell(E) dE}{\int_g \phi_\ell(E) dE}$$

$$f = \frac{\sigma_{\ell,g}^i(\sigma_0, T)}{\sigma_{\ell,g}^i(\sigma_0 = \infty, T)}$$

バックグラウンド断面積と温度に
対してテーブル化

最近の核データ処理に関する話題

- 一般化核データ
 - GND = Generalized Nuclear Data
- 最近の核データ処理コード
 - NJOY2012
 - PREPRO2012
 - その他の核データ処理コード
 - 国産核データ処理コード

一般化核データ (GND)

- ENDF-6フォーマット
 - Fortran向き、テキストフォーマット
 - 1960年代に設計、長い実績
 - フォーマットの制限(例、離散レベル非弾性散乱)、冗長なデータ、一貫性の欠如
- GNDフォーマット
 - XML言語
 - CSEWG, LLNLが中心に作成
 - OECD/NEAのWPEC SG38で検討中
 - 核データ管理パッケージfudge

GNDに関する論文



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect

Nuclear Data Sheets 113 (2012) 3145–3171

**Nuclear Data
Sheets**

www.elsevier.com/locate/nds

Generalized Nuclear Data: a New Structure (with Supporting Infrastructure) for Handling Nuclear Data

C.M. Mattoon*, B.R. Beck, N.R. Patel, N.C. Summers, G.W. Hedstrom

Lawrence Livermore National Laboratory, 7000 East Avenue, Livermore CA, United States

D.A. Brown

National Nuclear Data Center, Upton NY, United States

(Received 9 July 2012; revised received 13 September 2012; accepted 21 September 2012)

The Evaluated Nuclear Data File (ENDF) format was designed in the 1960s to accommodate neutron reaction data to support nuclear engineering applications in power, national security and criticality safety. Over the years, the scope of the format has been extended to handle many other kinds of data including charged particle, decay, atomic, photo-nuclear and thermal neutron scattering. Although ENDF has wide acceptance and support for many data types, its limited support for correlated particle emission, limited numeric precision, and general lack of extensibility mean that the nuclear data community cannot take advantage of many emerging opportunities. More generally, the ENDF format provides an unfriendly environment that makes it difficult for new data evaluators and users to create and access nuclear data.

XML形式で表現された断面積例

JENDL-4.0, Fe-56の(n,2n)断面積

(n,2n)反応

反応の定義 `<reaction label="29" outputChannel="n[multiplicity:'2']
+ Fe55 + gamma" date="1987-03-01" ENDF_MT="16">`

断面積の定義 `<crossSection nativeData="linear">`

`<linear xData="XYs" length="11" accuracy="0.001">`

`<axes>`

内挿法の定義 `<axis index="0" label="energy_in" unit="eV"`

`interpolation="linear,linear" frame="lab"/>`

`<axis index="1" label="crossSection" unit="b"`

`frame="lab"/></axes>`

断面積
数値
データ

<code><data></code>	11404700	0	1.17e7	0.0162241	1.2e7	0.0480045	1.3e7	0.21382	1.4e7	0.389165	1.5e7	0.5134	1.6e7	0.58175	1.7e7	0.61075	1.8e7	0.6118	1.9e7	0.5977	2e7	0.5759
---------------------------	----------	---	--------	-----------	-------	-----------	-------	---------	-------	----------	-------	--------	-------	---------	-------	---------	-------	--------	-------	--------	-----	--------

`</data></linear></crossSection>`

二次中性子 `<outputChannel genre="NBody" Q="-11202700 eV">`

エネルギー `<product name="n" label="n" multiplicity="2"`

角度分布 `ENDFconversionFlag="MF6">`

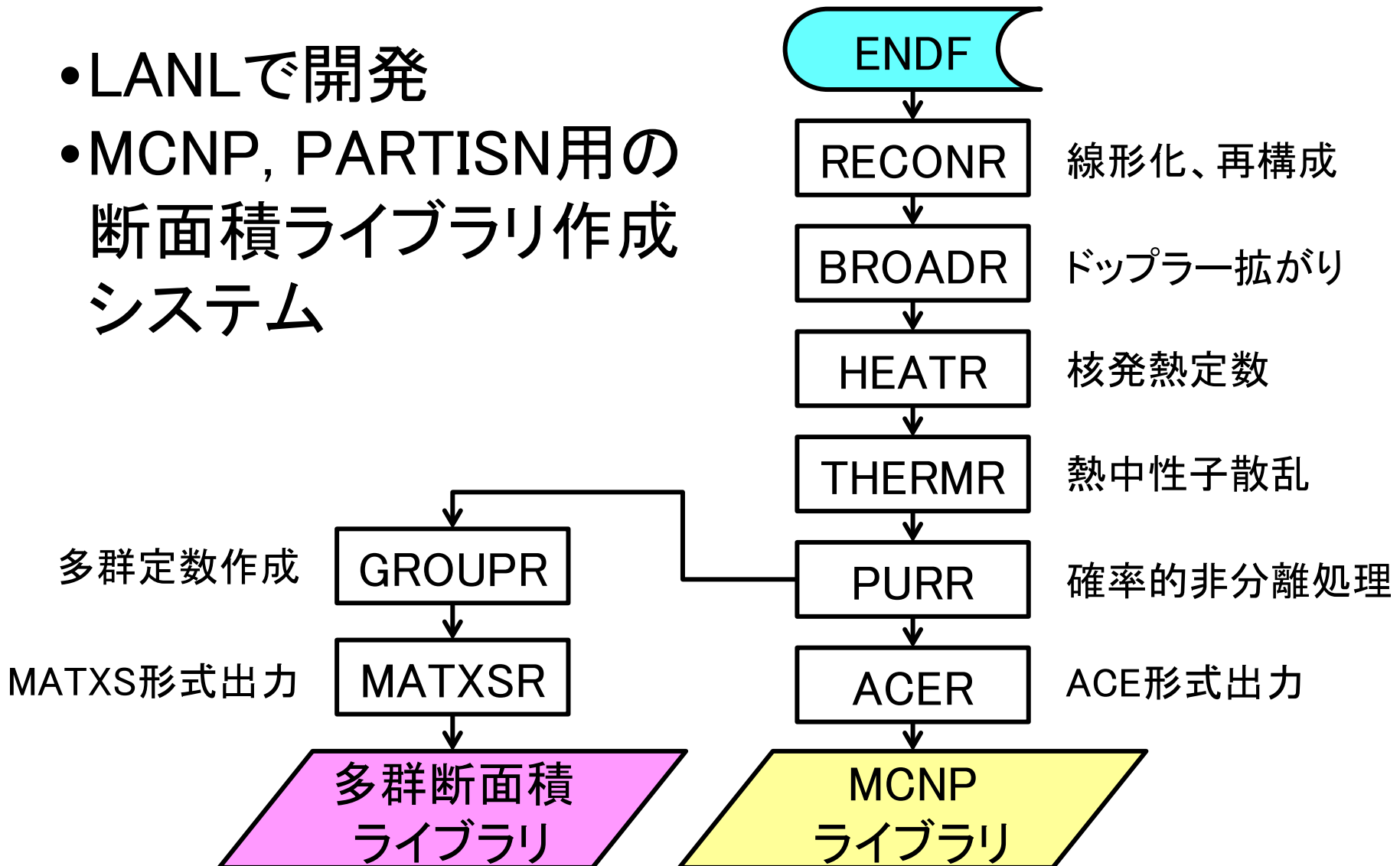
の定義

`<distributions nativeData="Legendre">`

`<Legendre nativeData="LegendrePointwise">`

NJOY

- LANLで開発
- MCNP, PARTISN用の
断面積ライブラリ作成
システム



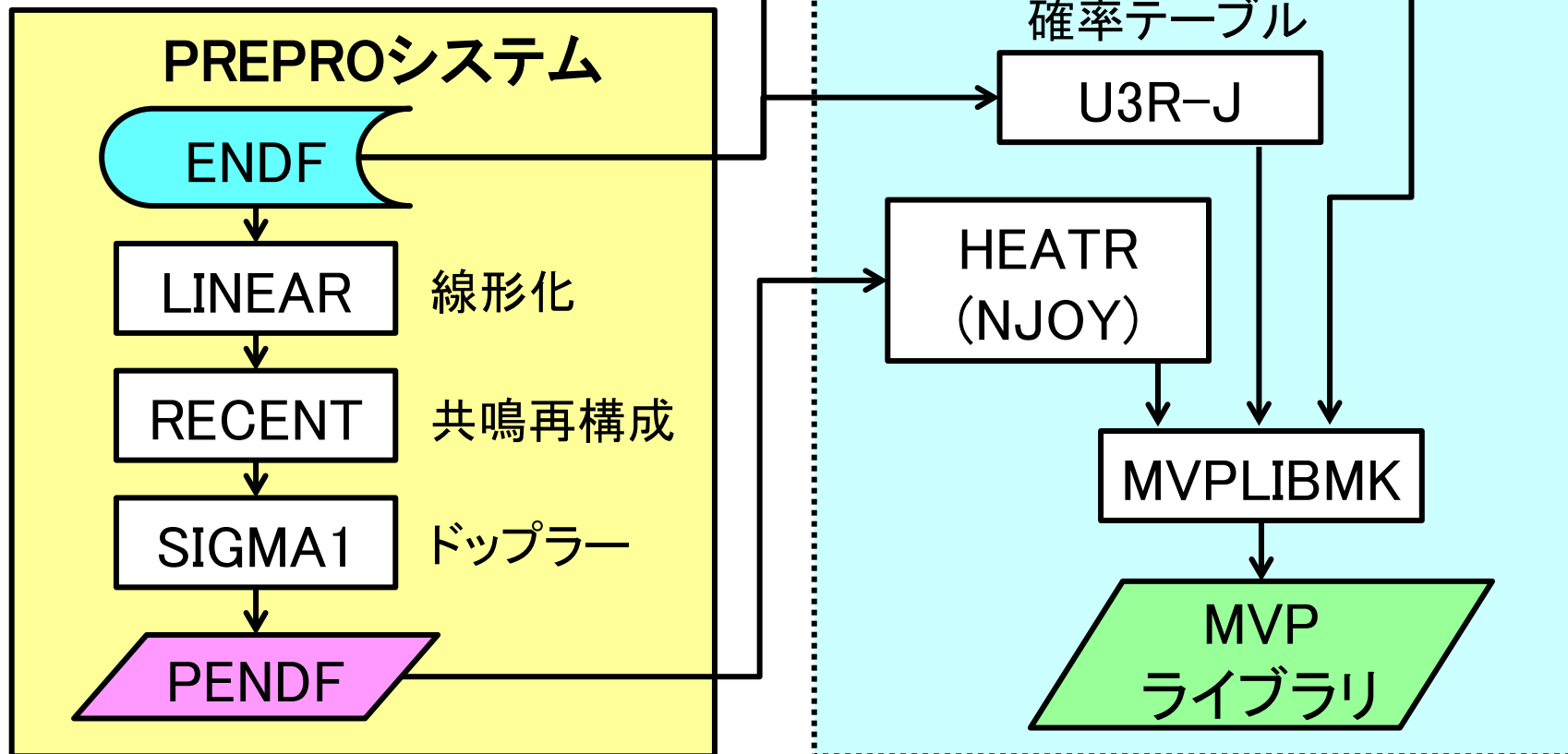
NJOY

- NJOY99 (99. 393) : 2013年1月リリース
 - Fortran77
 - RSICC, NEA Data Bank, RISTから入手可
- 最新版NJOY2012: 2013年2月リリース
 - Fortran90/95
 - R Matrix Limitedを処理可
 - LANLより直接入手, ソースも入手可

	Issue Fee	Per Additional User (≥2)
Foreign Academic	\$750	N/A
Foreign Government	\$750	N/A
Foreign Commercial	\$2,000 (includes 1 user)	\$500

PREPRO

- D. E. Cullen氏により開発
- IAEA核データ部で公開
- 最新版PREPRO2012
ENDF/B-7.1が処理可



その他の核データ処理コード

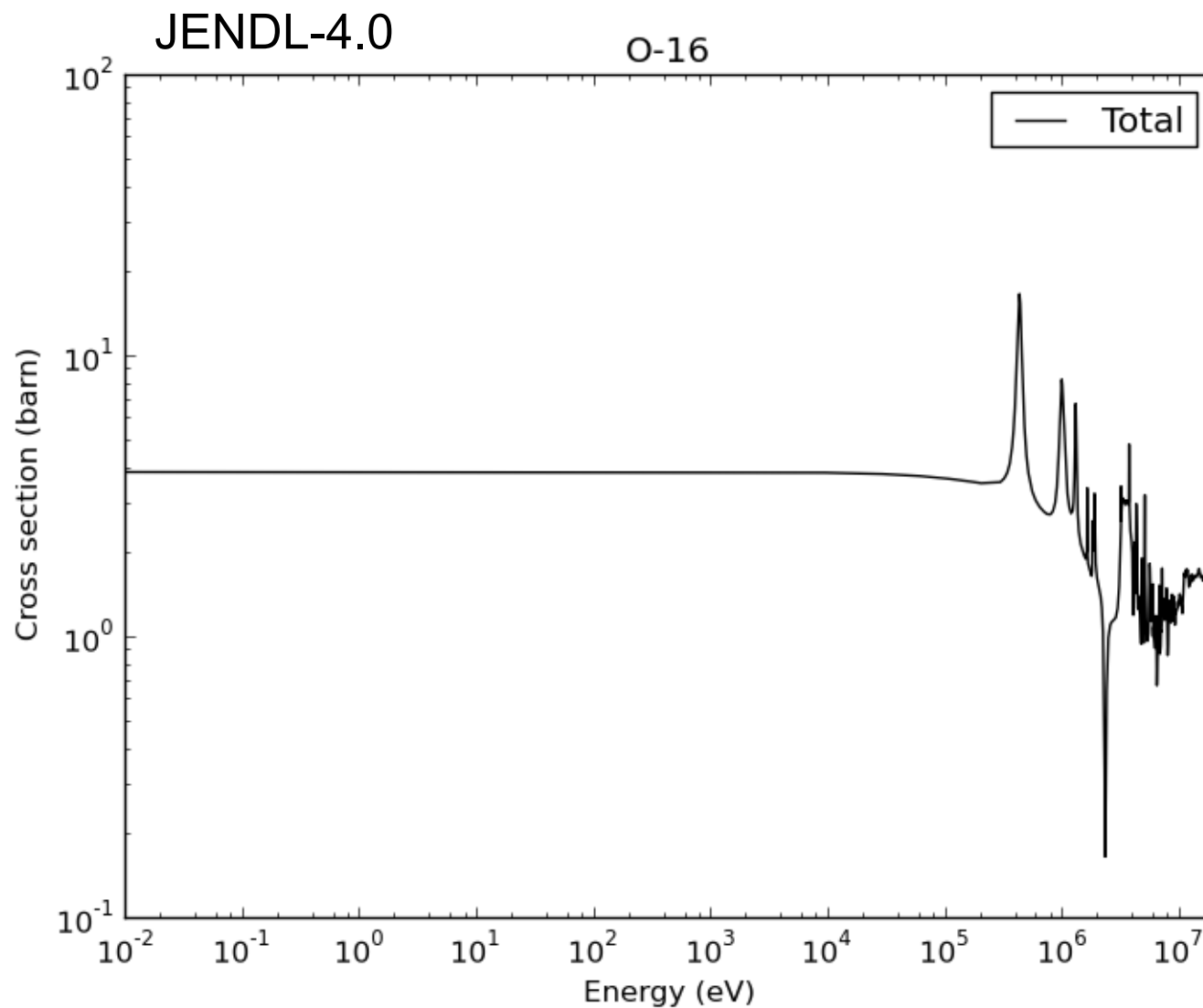
- AMPX - ORNL
 - SCALE用の核データ処理コードシステム
- GALILEE - CEA
 - V1計画で自作の処理コードシステムを開発
- CALENDF - Culham Center for Fusion Energy, UK
 - J.-C. Sublet氏が開発
- TNudy - 成均館大学校, South Korea
 - Rootシステム上の核データ処理システム

国産核データ処理コードシステムの開発

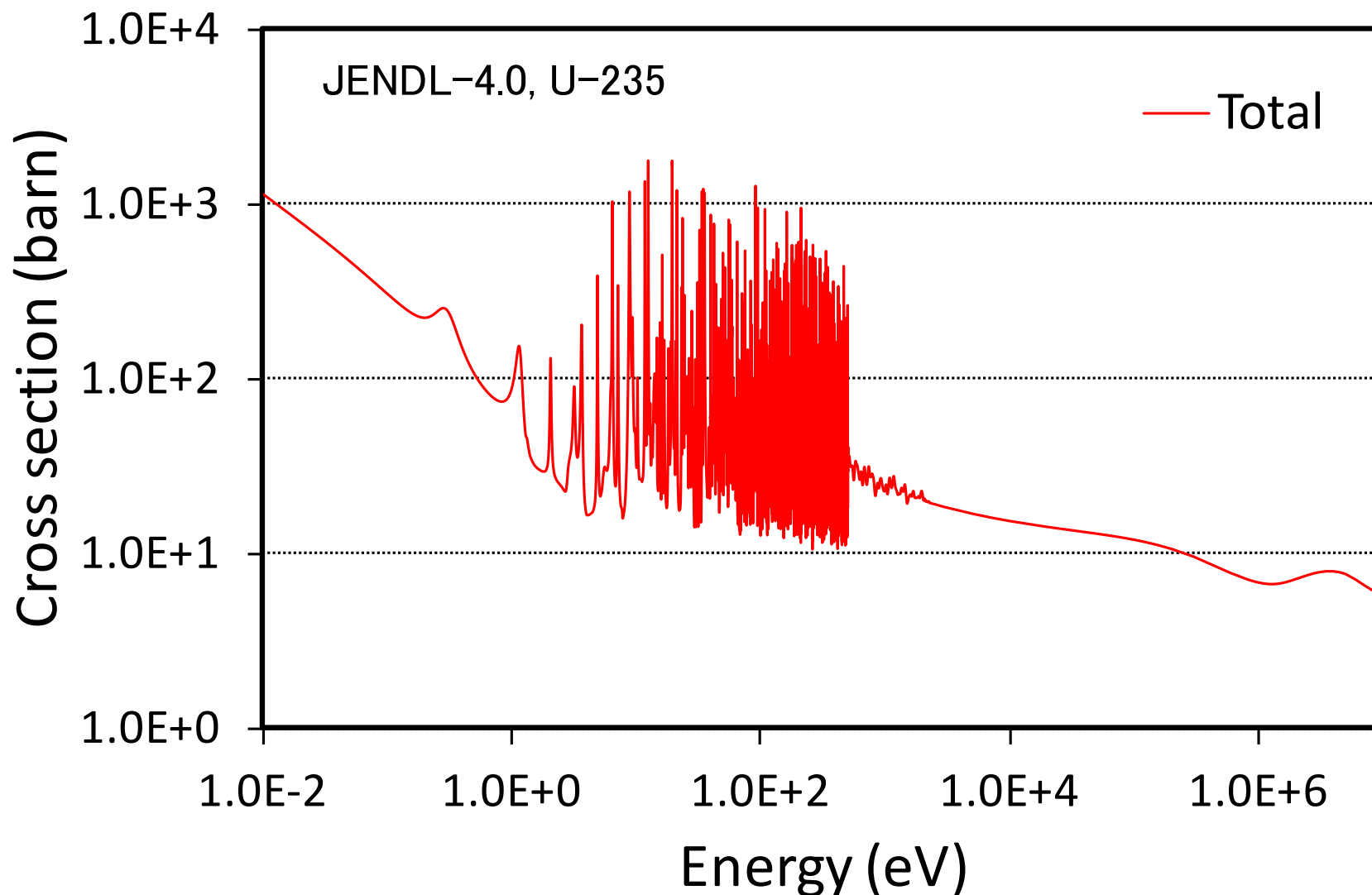
- FRENDY計画

- FRENDY = FRom Evaluated Nuclear Data librarY (to any code/application)
- NJOYの代替となる国産の核データ処理コードシステムの開発。
- 2013年よりJAEAにおいて開始。
- オブジェクト指向、C++言語
- 今年度は、ACEフォーマットのライブラリを作成できることを目指す。(部分的に既存コードを再利用)

FRENDY Endf6Parserクラスの利用例



FRENDYによる共鳴の再構成



まとめ

- ・ 核データ処理について解説
 - ENDF-6フォーマット、PENDFの作成、断面積ライブラリ作成
- ・ 共分散データ処理(今回割愛)
 - 原子炉の設計精度評価に有用
 - ERRORJの開発、ORNLのTSUNAMIシステム
- ・ 核データ処理システムの現状
 - NJOY, PREPRO, etc.
 - 国産核データ処理システムFRENDY

テキスト正誤表

- 2.2節、第1段落
 - (誤)「与えられる異なる」→ (正)「与えられることになる」
- 5節、(37)式
 - (誤) $C_z \rightarrow C_k$ (4ヶ所)
- 6.3節、第2段落
 - (誤) $\sigma_I \rightarrow \sigma_1$ (下付き添え字を”I(アイ)”から”1(数字)”に変える。)
- 7節、(66)式上
 - (誤) 中世子束 → 中性子束

関連図書

- ENDF-6 Formats Manual, CSEWG Document ENDF-102, BNL-90365-2009 Rev. 2 (2011).
- D. E. Cullen, “Nuclear Data Preparation,” Chap. 4, in Handbook of Nuclear Engineering, Springer (2010).
- R. E. MacFarlane, “The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2012,” LA-UR-12-27079 (2012).
- R. E. MacFarlane, A. C. Kahler, “Methods for Processing ENDF/B-VII with NJOY,” Nucl. Data Sheets, **111**, 2739–2890 (2010).
- “Understanding NJOY,” LA-UR-00-1538 (2000).
<http://t2.lanl.gov/nis/njoy/>
- “Introduction to ENDF format,” LA-UR-98-1779 (1998).
<http://t2.lanl.gov/nis/endf/>

終わり