



Tokyo Tech

RCNP研究会「研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学」
2022.5.30-31

核分裂に関するトピックス

Topics on nuclear fission

目次

1. 原子核理工学の基礎としての核分裂の概観
2. 核分裂の時間発展
3. 東工大の取り組み
 - a. ランジュバン方程式
 - b. 反対称化分子動力学
 - c. FPベータ崩壊総和計算
4. (多中性子核研究に関連して) 3体核分裂
5. 原子炉ニュートリノ
6. まとめ

1. 原子核理工学の基礎としての核分裂

1. 核分裂は**原子力における最も基礎的な物理過程**であり、その様相は原子炉の発熱量や特性、放射性廃棄物の生成量や核種組成、原子炉構造材の損傷など、原子力エネルギー利用にとって重要な影響を与える。最近では保障措置や核セキュリティの新たな手法での利用が検討されている。
2. 核分裂は**宇宙における元素合成**、特に重力波が観測された中性子星やブラックホールの合体時に生起する**r過程元素合成**の際に**核分裂リサイクル**として発生し、宇宙における中重核の起源を理解する上で重要な役割を果たしている。
3. **超重原子核の合成**において、核分裂は融合の主要な阻害因子として作用するため、超重原子核の領域における核分裂の様相を理解することは $Z=119$ 以上の原子核を合成する実験を計画する際に重要な情報となる。
4. 原子力利用において、核分裂に関しては膨大な実験データが蓄積し、それを集めて原子核理論や統計解析を施してデータベースとしてまとめた「**核データライブラリー**」が先進各国で作成され利用されている(日本では**JENDLライブラリー**)

原子炉におけるアクチノイド核種の燃焼プロセス

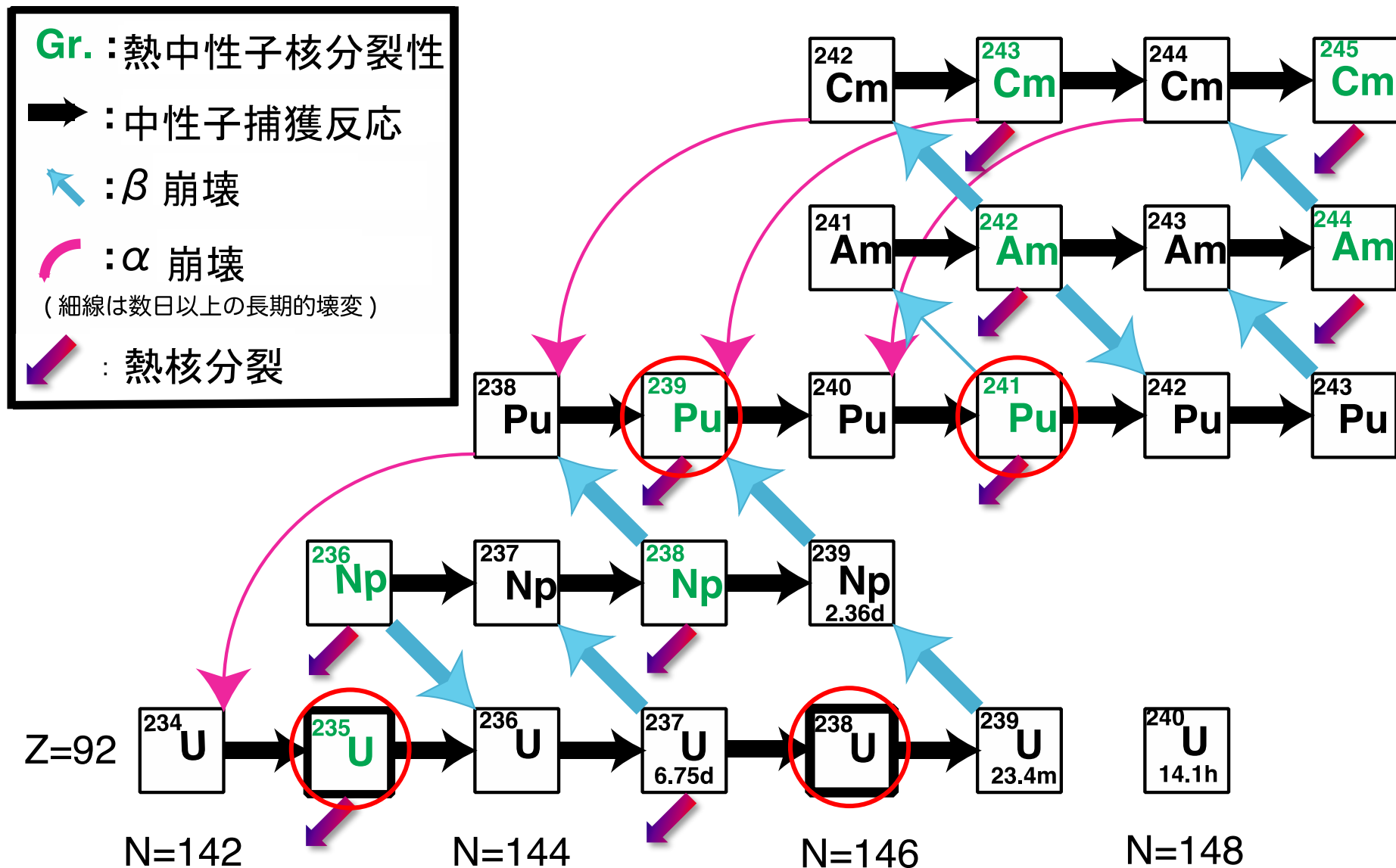
Gr. : 熱中性子核分裂性

 : 熱核分裂

Z=92



原子炉におけるアクチノイド核種の燃焼プロセス



原子炉におけるアクチノイド核種の燃焼プロセス

- 赤丸 ($^{235,238}\text{U}$, $^{239,241}\text{Pu}$) はILL (Bill検出器、グルノーブル) で原子炉内で照射された試料で生成された核分裂生成物が発生する β 線スペクトルの総和が測定され、反ニュートリノスペクトル (右下) に変換されている核分裂核種

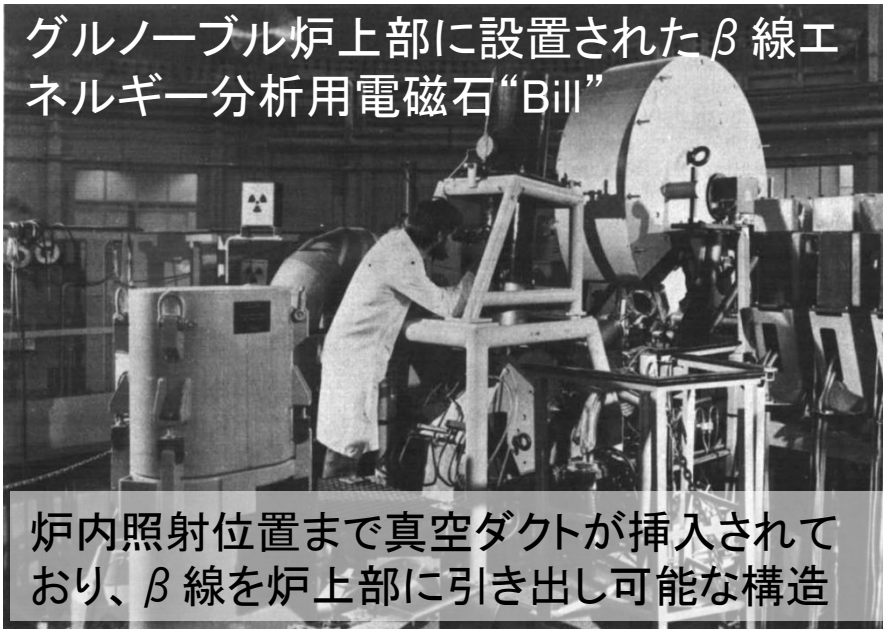
THE DOUBLE FOCUSING IRON-CORE ELECTRON-SPECTROMETER "BILL"
FOR HIGH RESOLUTION (n, e^-) MEASUREMENTS
AT THE HIGH FLUX REACTOR IN GRENOBLE

W. MAMPE, K. SCHRECKENBACH, P. JEUCH, B. P. K. MAIER, F. BRAUMANDL,
J. LARYSZ and T. von EGIDY*

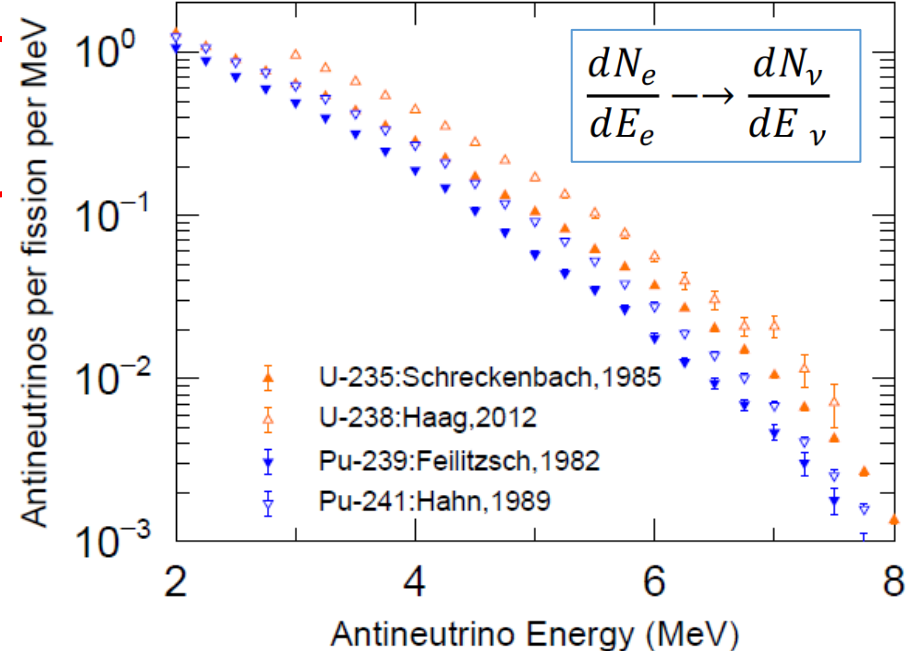
Institut Laue-Langevin, 38042 Grenoble Cédex, France

Received 16 December 1977

グルノーブル炉上部に設置された β 線エネルギー分析用電磁石"Bill"



炉内照射位置まで真空ダクトが挿入されており、 β 線を炉上部に引き出し可能な構造



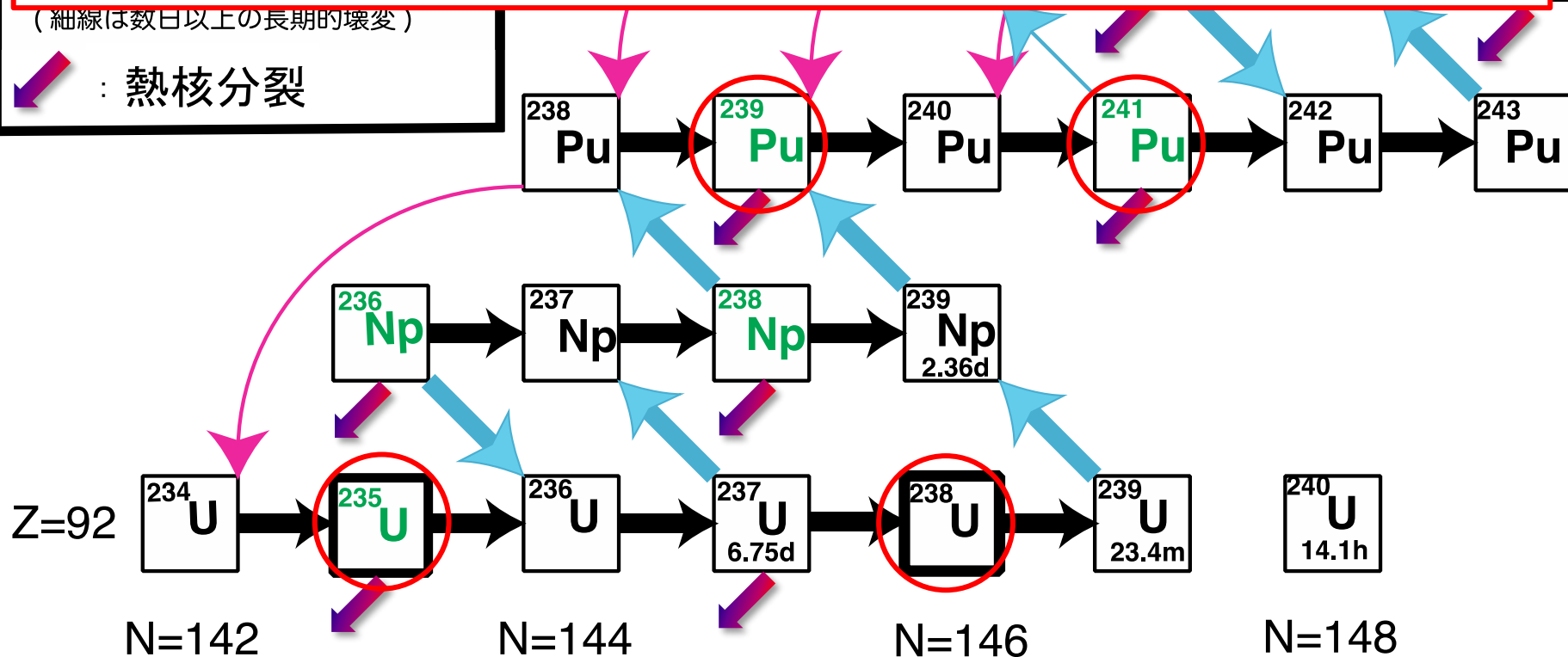
ILLで測定された β 線スペクトルから変換法 (HM法)で求められた反ニュートリノスペクトル

原子炉におけるアクチノイド核種の燃焼プロセス

- Daya-bayなど（燃焼の進んだ）発電炉のデータ解析には、これらの核種を含み、原子炉で生成される核分裂性の核種全てに対して正確な核データを整備することが必要。また、炉形や利用形態、適用対象が変われば、新たな核種に対する新たな種類の核データが要求される

（細線は数日以上の長期的壊変）

： 熱核分裂



1. 原子核理工学の基礎としての核分裂

6. 核分裂は一つの原子核が二つに断裂する「大振幅集団運動」であり、実はそのメカニズムは良く理解されていない。また、その時間発展も複雑であり、非常に速い原子核の反応過程(10^{-20} 秒程度)から1,000万年を超える β 崩壊など、様々な時間スケールの物理プロセスが内包されている。
7. 核分裂においては多様な粒子が生成されるため、それぞれの生成確率やエネルギースペクトルなどの理解に加え、それらの相関を正しく理解することが核分裂現象の解明に取って必要である。
8. このような相関を測定可能とする実験装置の開発と理論・計算技術の進展によって、核分裂研究はルネッサンス的な状況にあり、世界各国で研究が势力的に進められている。
9. 東工大でも核分裂の応用と基礎の両方を見据えて、様々なアプローチにより核分裂の全過程に対する研究を進めている:ランジュバン動力学法、反対称化分子動力学(AMD)、ハートリーフォックBCS、相対論的平均場理論、統計崩壊模型、 β 崩壊の大局的理論、総和計算等。
10. 本日は全体像に加え、福井炉で計画されている実験に関する話題(3体核分裂、原子炉からのニュートリノ放出)を中心に議論する

2.核分裂の時間発展

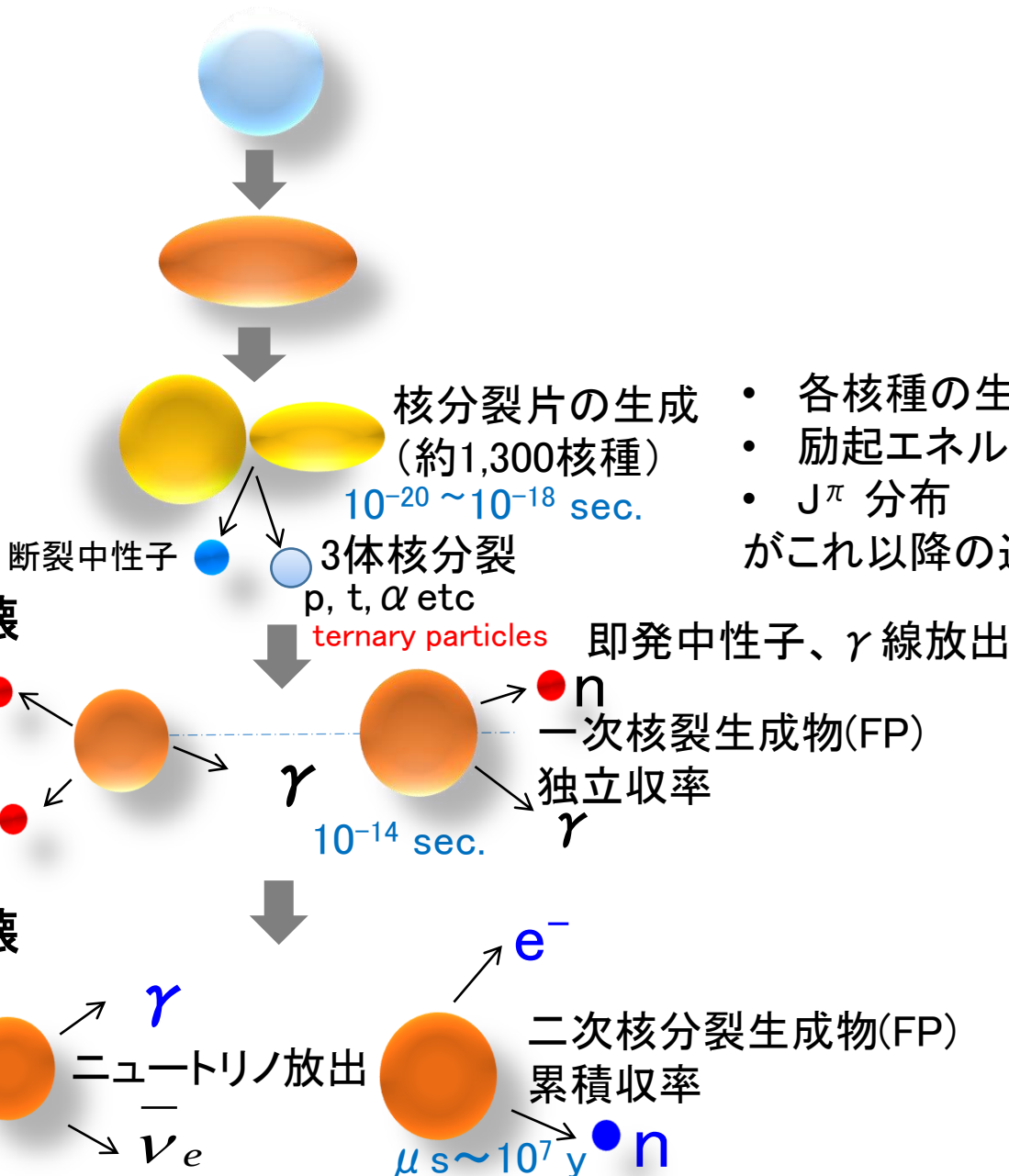
複合核

サドル点

断裂点

統計崩壊

β^- -崩壊



- 各核種の生成確率(核分裂収率)
 - 励起エネルギー分布
 - J^π 分布
- がこれ以降の過程を決定する

3.東工大の取り組み

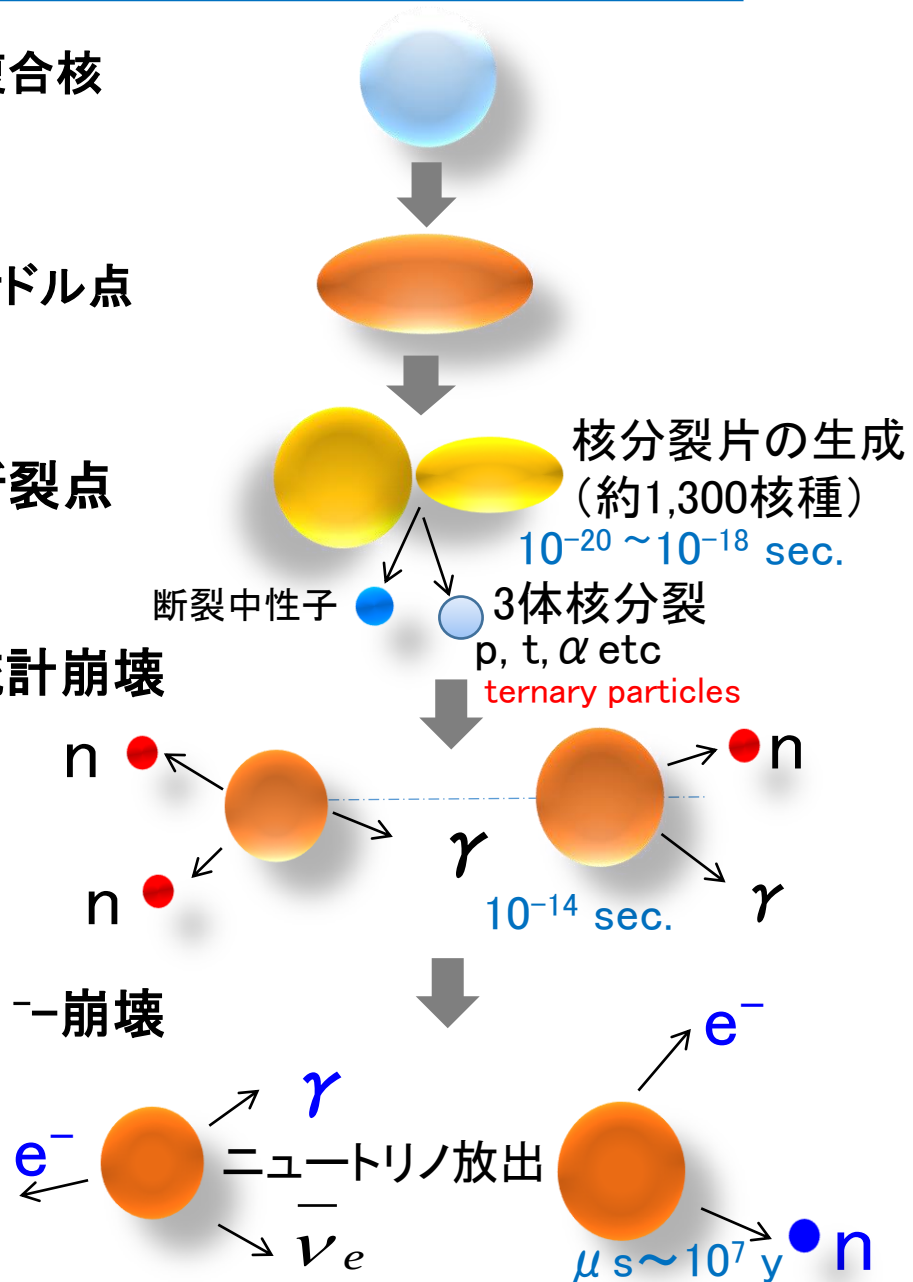
複合核

サドル点

断裂点

統計崩壊

β^- -崩壊



複合核生成:チャンネル結合法+統計模型

ランジュバン動力学模型
 反対称化分子動力学(AMD)
 量子分子動力学(QMD)
 時間依存密度汎関数法
 Hartree-Fock-Bogoliubov理論
 相対論的平均場+BCS模型

Hauser-Feshbach統計崩壊
 総和計算

β 崩壊の大局的理論
 総和計算

3. 東工大の取り組み

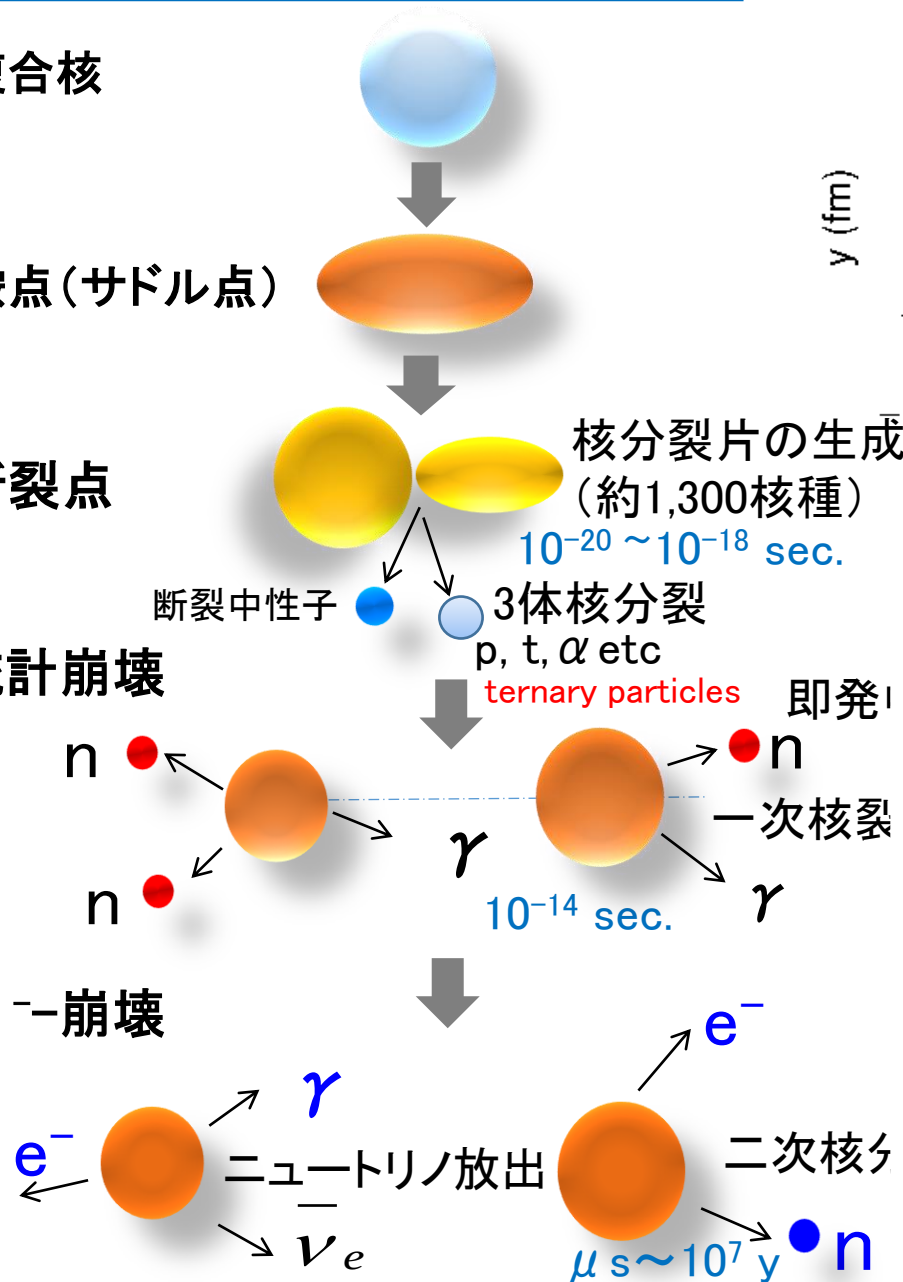
複合核

鞍点 (サドル点)

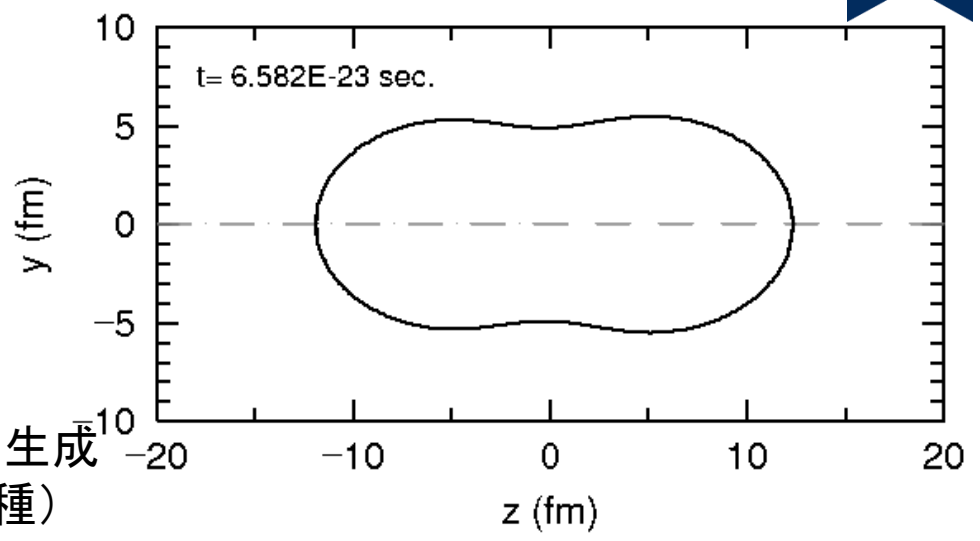
断裂点

統計崩壊

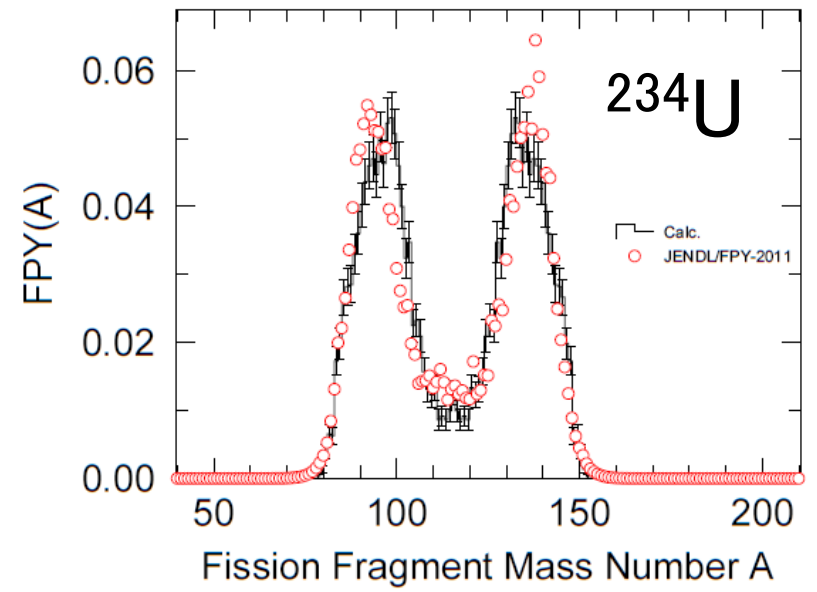
β^- -崩壊



ランジュバン動力学模型



核分裂生成物の質量数分布



3. 東工大の取り組み

反対称化分子動力学法

複合核

鞍点(サドル点)

断裂点

核分裂片の生成
(約1,300核種)

$10^{-20} \sim 10^{-18}$ sec.

断裂中性子

3体核分裂

p, t, α etc

ternary particles

即発中性子、 γ 線等

統計崩壊

n

n

n

一次核裂生成物

γ

γ

10^{-14} sec.

β^- -崩壊

e^-

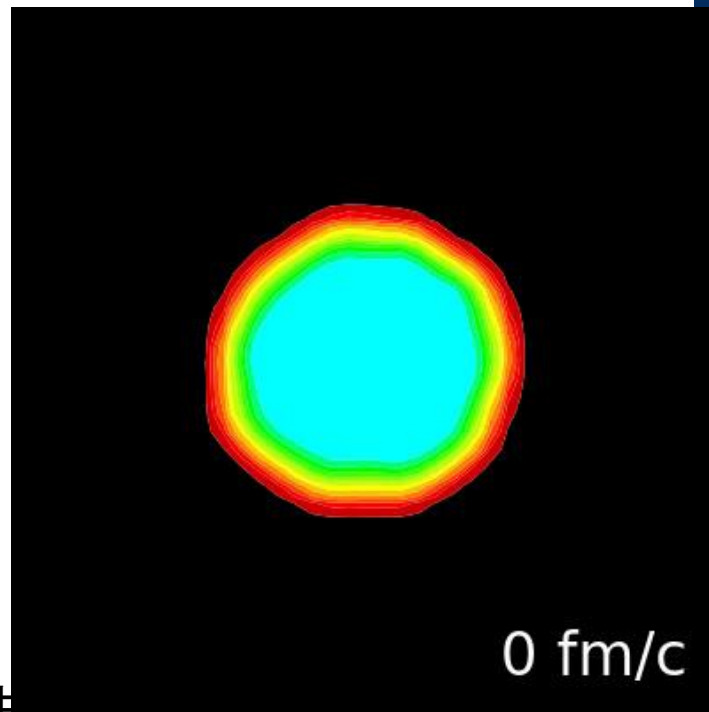
ニュートリノ放出

$\bar{\nu}_e$

二次核分裂生成物

$\mu s \sim 10^7 y$

n

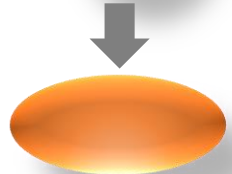


3. 東工大の取り組み

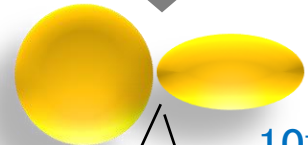
複合核



鞍点 (サドル点)



断裂点



核分裂片の生成
(約1,300核種)

$10^{-20} \sim 10^{-18}$ sec.

断裂中性子



3体核分裂
p, t, α etc

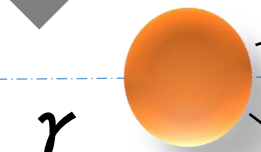
tertnary particles

即発中性子

統計崩壊

n

n



γ

一次核裂生成

γ

10^{-14} sec.

β^- 崩壊

e^-

ニュートリノ放出

$\bar{\nu}_e$

γ



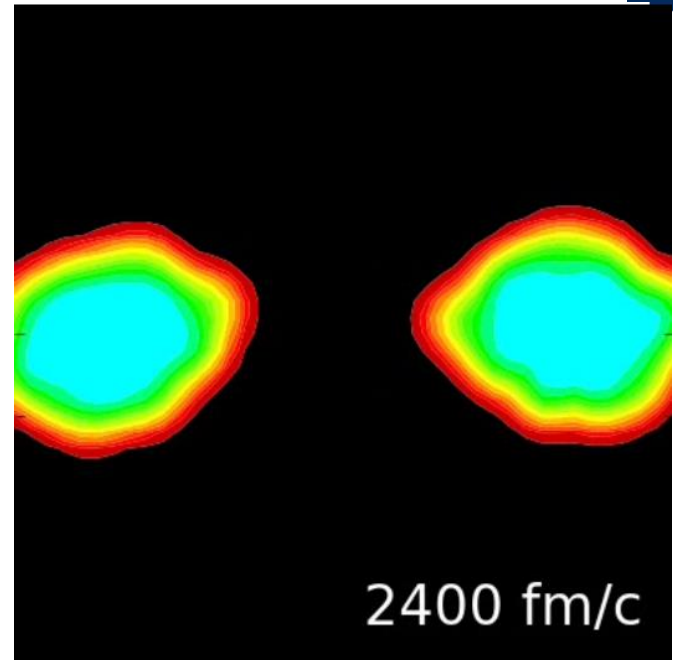
二次核分裂生

e^-

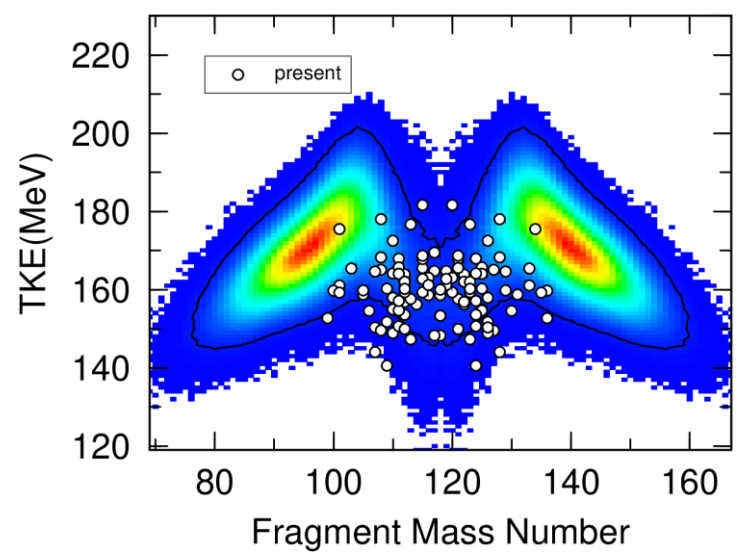
$\mu s \sim 10^7$ y

n

断裂後の配置



核分裂片の全運動エネルギー



3.東工大の取り組み

複合核

鞍点(サドル点)

断裂点

統計崩壊

β^- 崩壊

核分裂片の生成
(約1,300核種)

$10^{-20} \sim 10^{-18}$ sec.

断裂中性子

3体核分裂
p, t, α etc
ternary particles

即発中性子

一次核裂生成

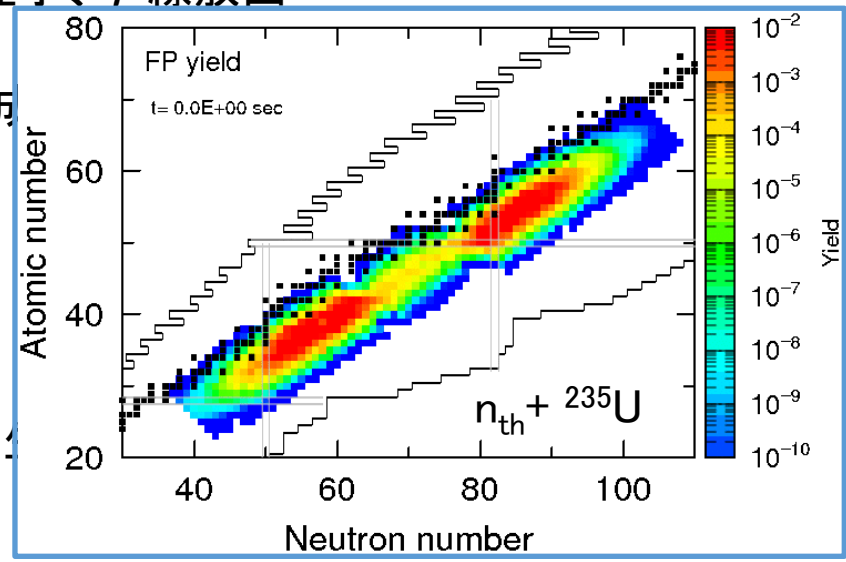
10^{-14} sec.

ニュートリノ放出

二次核分裂

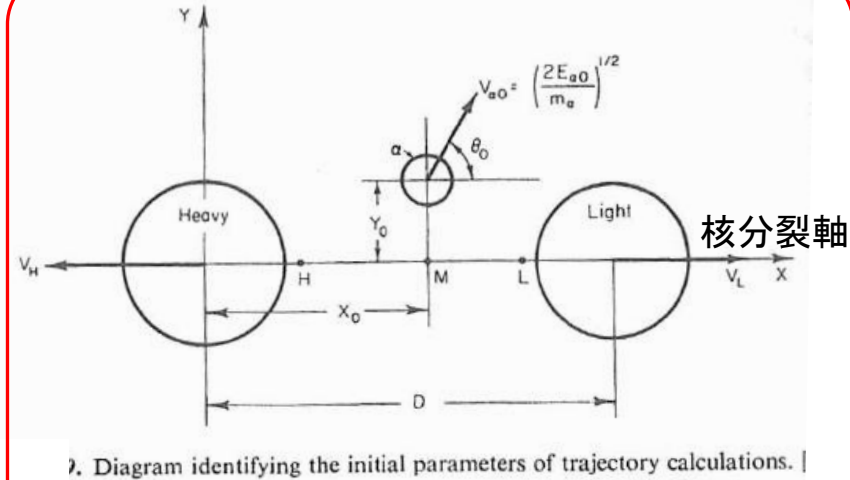
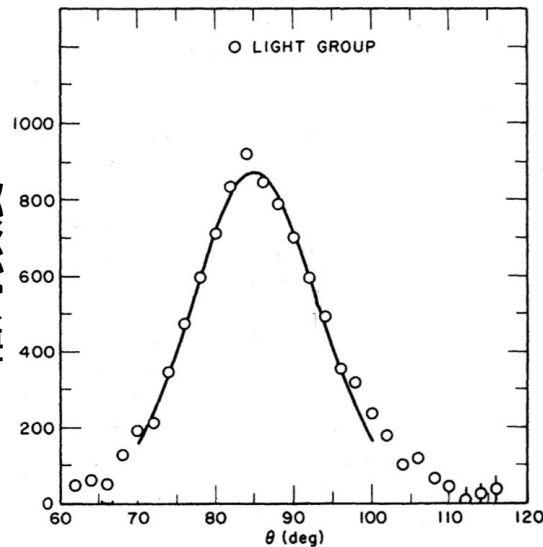
$\mu s \sim 10^7$ y

核分裂生成物の β 崩壊の総和計算
によるニュートリノ放出



4. 3体核分裂

左: $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f\alpha)$ 反応から放出される α 粒子の軽い核分裂片に対する角度分布 (垂直方向に放出)



Halpernの描像

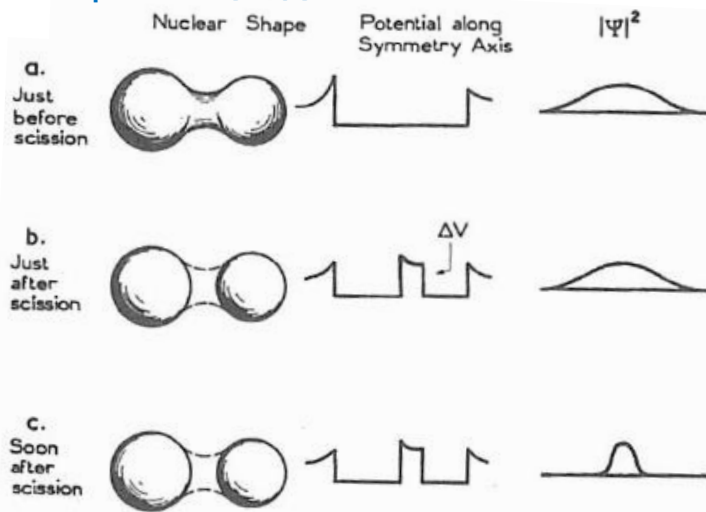


Fig. XIV-1. [From Halpern (1965).]

- 原子核平均場の時間発展
- ネック領域の密度低下
→ ネック領域の平均場の不安定性の発現
- ネック領域に取り残された核子がクラスターを形成
- ネックが消失後、第3粒子は核分裂片によるクーロン斥力を受けて運動エネルギーを獲得
- 核分裂軸に対して垂直方向に放出される(クーロンフォーカシング)

平均場 + 確率的2核子衝突

一粒子波動関数: ガウス波束:

$$\langle \vec{r} | \phi_i \rangle = \left(\frac{2\nu}{\pi} \right)^{\frac{3}{4}} \exp \left[-\nu \left(\vec{r} - \frac{\vec{Z}_i}{\sqrt{\nu}} \right)^2 \right] \chi_i$$

$$\vec{Z} = \sqrt{\nu} \vec{D} + \frac{i}{2\hbar\sqrt{\nu}} \vec{K}, \quad \chi_i = p \uparrow, p \downarrow, n \uparrow, n \downarrow$$

多核子系の全波動関数: スレーター行列式

$$|\Phi(r_1, r_2, \dots, r_A)\rangle = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det[\phi_i(r_j)]$$

時間依存の変分原理 → 運動方程式

平均場の時間発展

$$i\hbar \sum_{j\tau} C_{i\sigma, j\tau} \dot{Z}_{j\tau} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Z_{i\sigma}^*}$$

$$\mathcal{H} = \frac{\langle \Phi | \hat{H} | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle}, \quad C_{i\sigma, j\tau} = \frac{\partial^2}{\partial Z_{i\sigma}^* \partial Z_{j\tau}} \log \langle \phi_i | \phi_j \rangle$$

$$\sigma, \tau = \{x, y, z\}$$

有効相互作用: SLy4

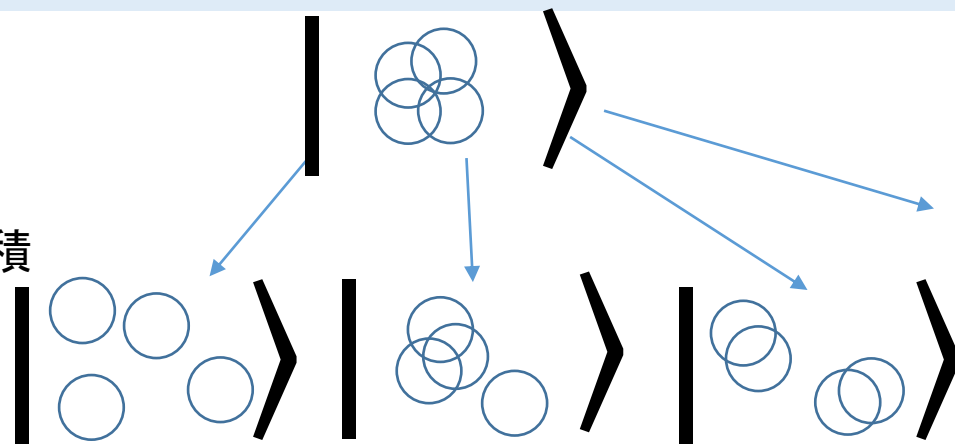
確率的2核子衝突

カスケード模型における扱いと等価

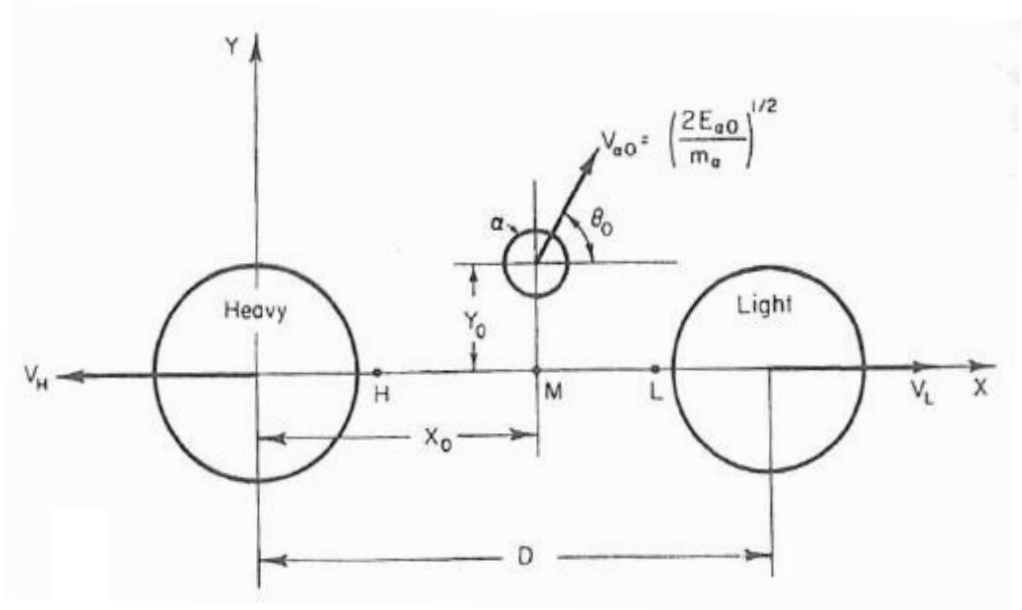
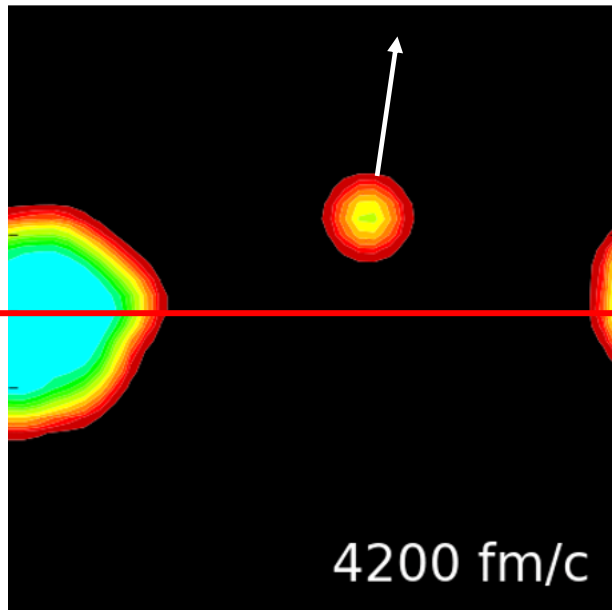
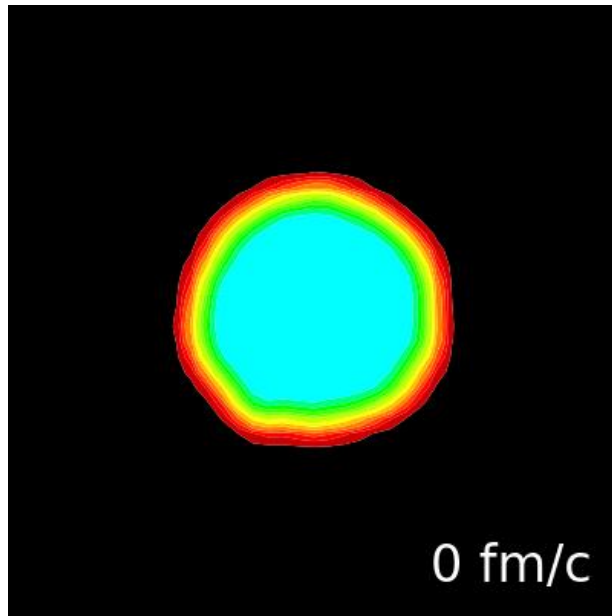
Lee-Machleitの密度依存NN衝突断面積

これにより波動関数の分岐が生起

→ 物理量の「分布」を記述可能



反対称化分子動力学(AMD)による3体核分裂イベント

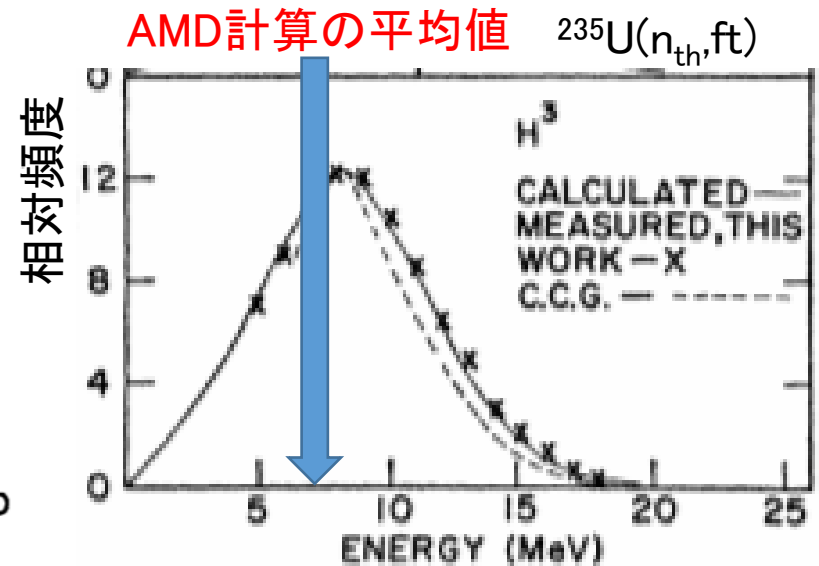
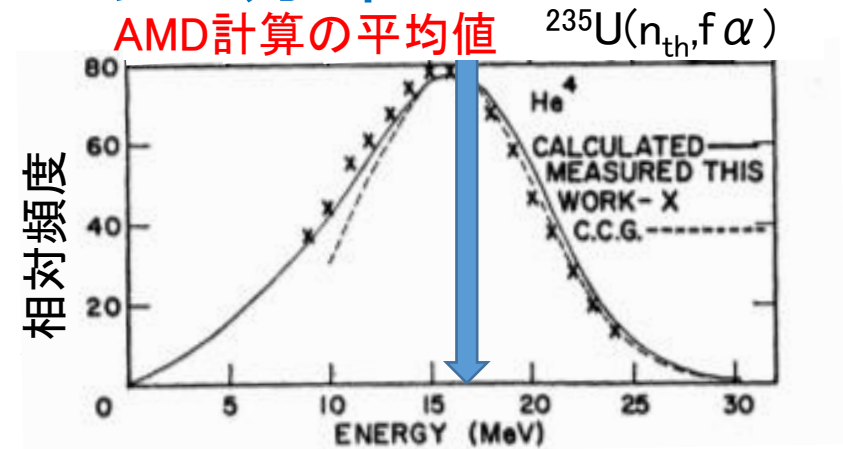
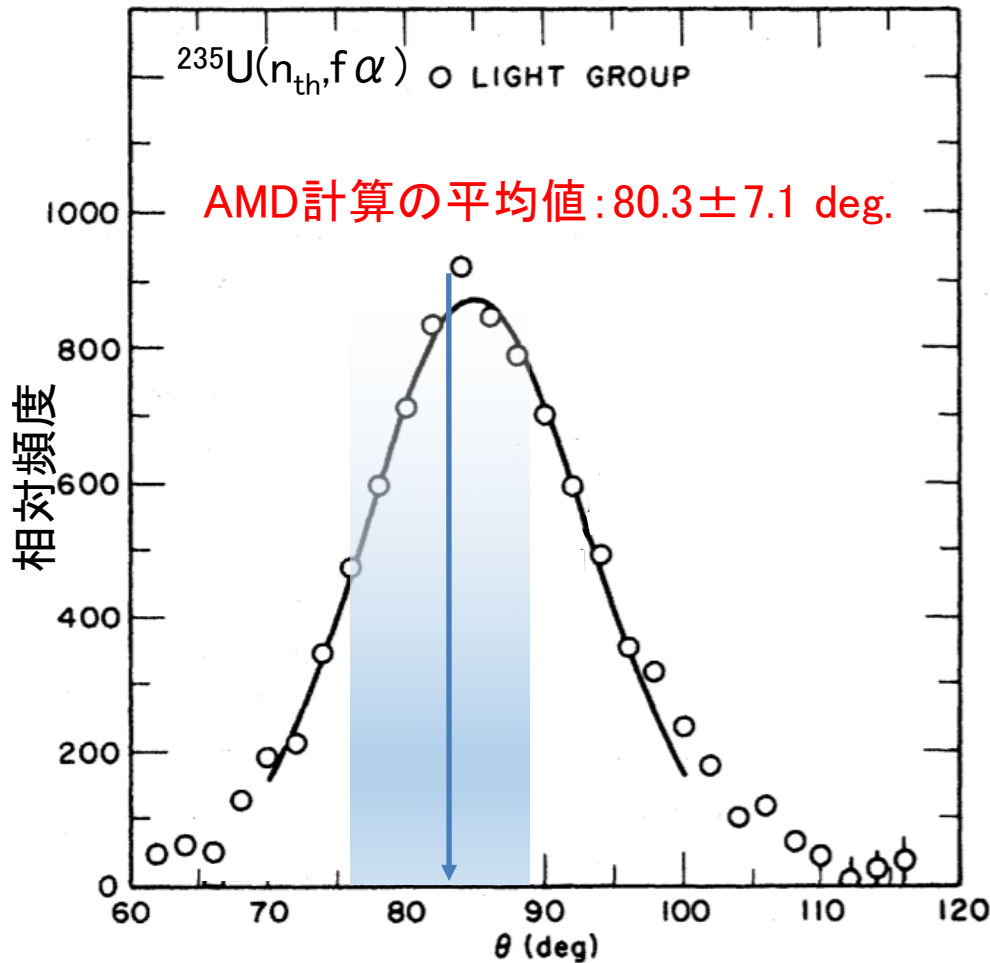


三体核分裂を説明するためにこれまでの計算で仮定されてきた初期配置

核分裂軸

AMDでは1体原子核からの時間発展によってネック領域から第3粒子が放出され上図のような初期配位の形成と、その後、核分裂軸に対して垂直方向に加速される様相が自然に記述されている。

第3粒子の放出角度、エネルギー分布



多中性子原子核の可能性

・多中性子核が結合するのであれば、(このような計算でも)3体分裂として放出されるはず

・クーロン加速がない分エネルギーは低い
・確率は今のところ評価不能

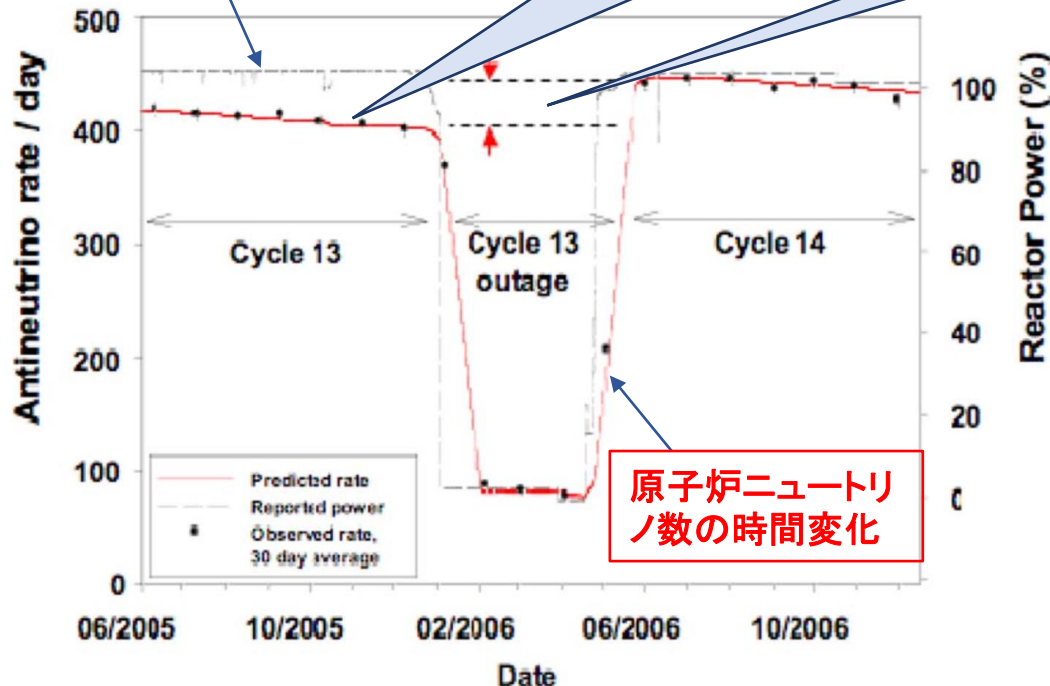
5. 原子炉ニュートリノ放出

保障措置における重要性

燃料の入れ替えによる
ニュートリノ数の変化

Puの蓄積による
ニュートリノ数の減少

原子炉の稼働状況(出力)



SONGS原子炉における原子炉出力とニュートリノ
フラックスの計測結果[*]

左図は米国SONGS原子炉で行われた、原子炉ニュートリノによる原子炉の運転状況把握実験の結果。
(炉心から25m離れた地点で観測)

原子炉ニュートリノの数やエネルギーを検知することで、**原子炉外部**から原子炉の運転状況や大まかな燃料組成を把握することができる。

核燃料の不正な抜き取りを検知することができれば、核兵器への転用といった懸念に対する有効な対処法となり、**保障措置**において重要な検知手法。

5. 原子炉ニュートリノ放出

原子炉ニュートリノ収率およびスペクトルの異常性

→ニュートリノ振動、ステライルニュートリノの存在検証

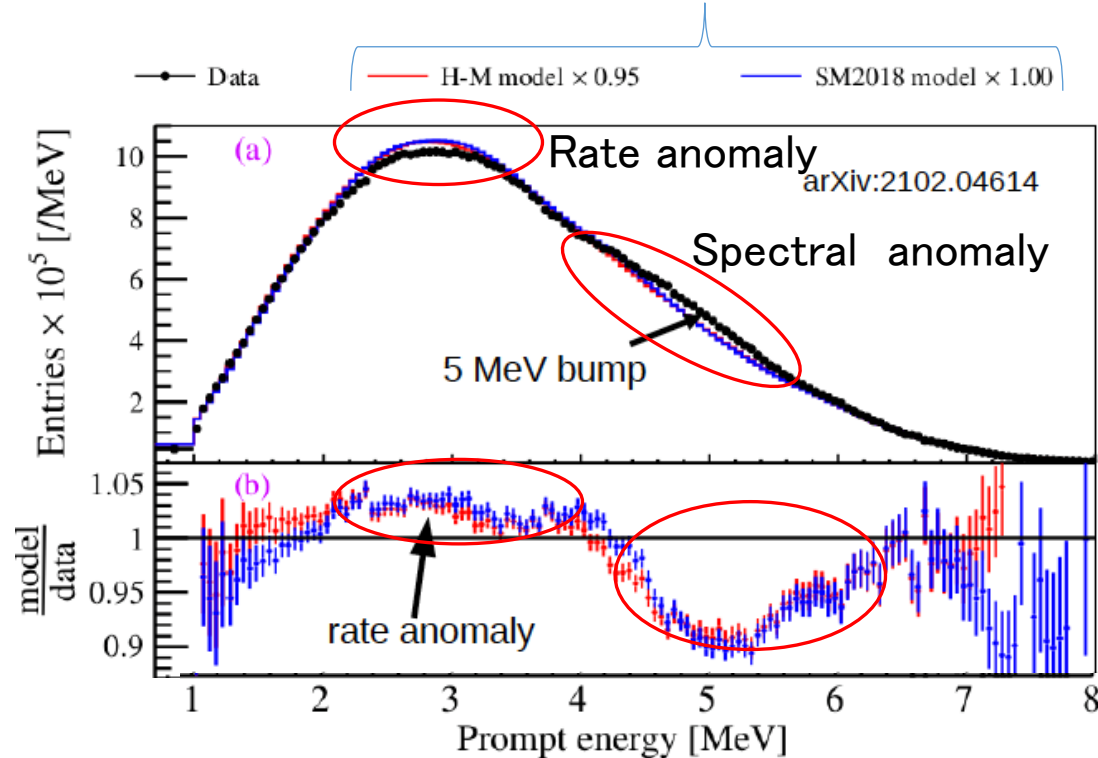
Daya Bay flux measurements

ニュートリノスペクトルの2種類の計算法

3.5 million inverse beta decay events.

Conversion (HM) prediction does **not** agree in total rate with the data or the summation calculation

Conversion (HM) and summation (SM) prediction agree on shape with each other, but **not** with the data.



赤線: **H-M model**: Huber-MuellerによるILL (Bill検出器)で測定された電子スペクトル
→反ニュートリノスペクトルへの変換(核分裂核種毎)

青線: **SM2018 model**: 核分裂生成物からの寄与を足し合わせた**総和計算**

5. 原子炉ニュートリノ放出

原子炉ニュートリノ放出総和計算のフローチャート

$$\frac{dN_\nu(t)}{dE_\nu} = \sum_{Z,A,m} \lambda_{Z,A,m} Y(Z, A, m, t) \frac{dN_\nu(Z, A, m)}{dE_\nu}$$

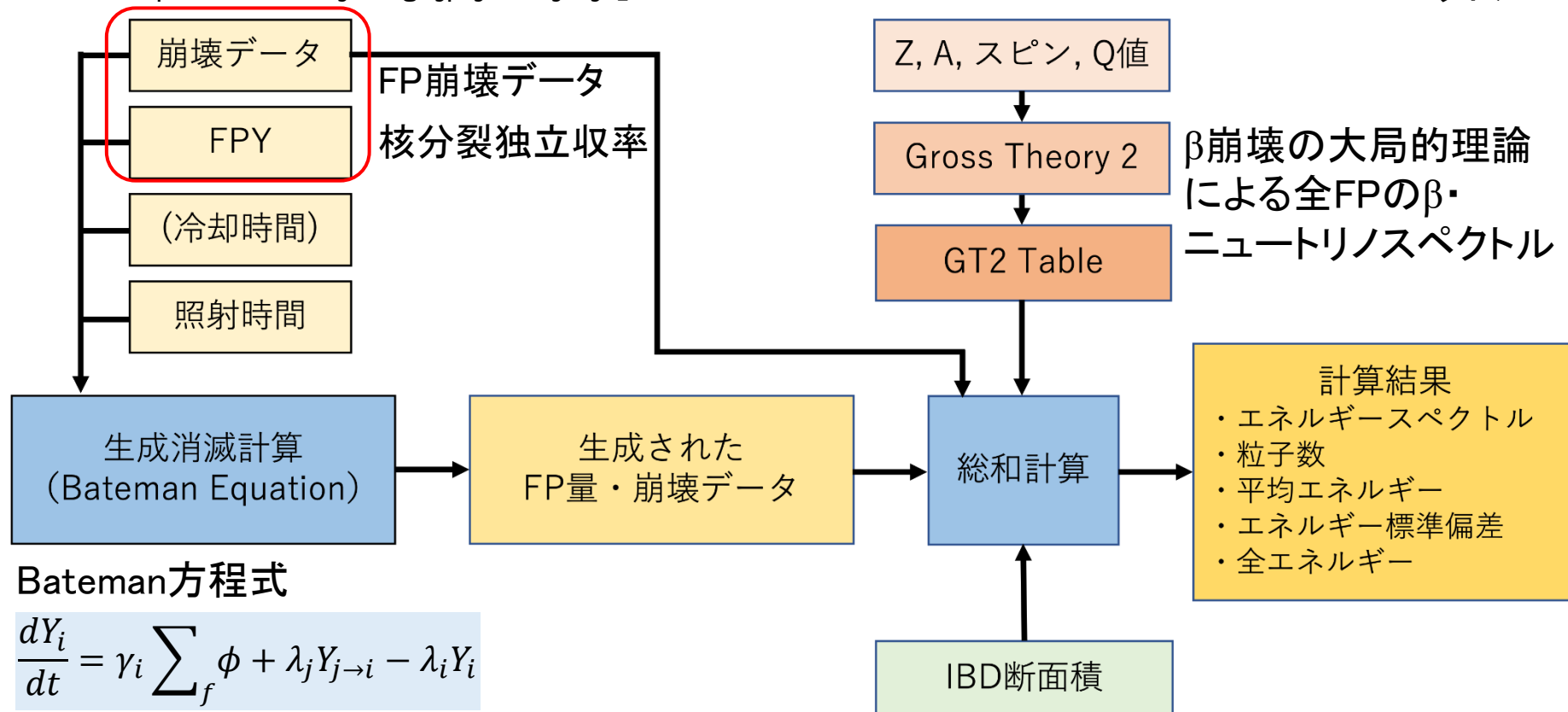
時刻tに存在するFP数/fission

β崩壊定数

ν スペクトル

原子力用核データJENDL-5

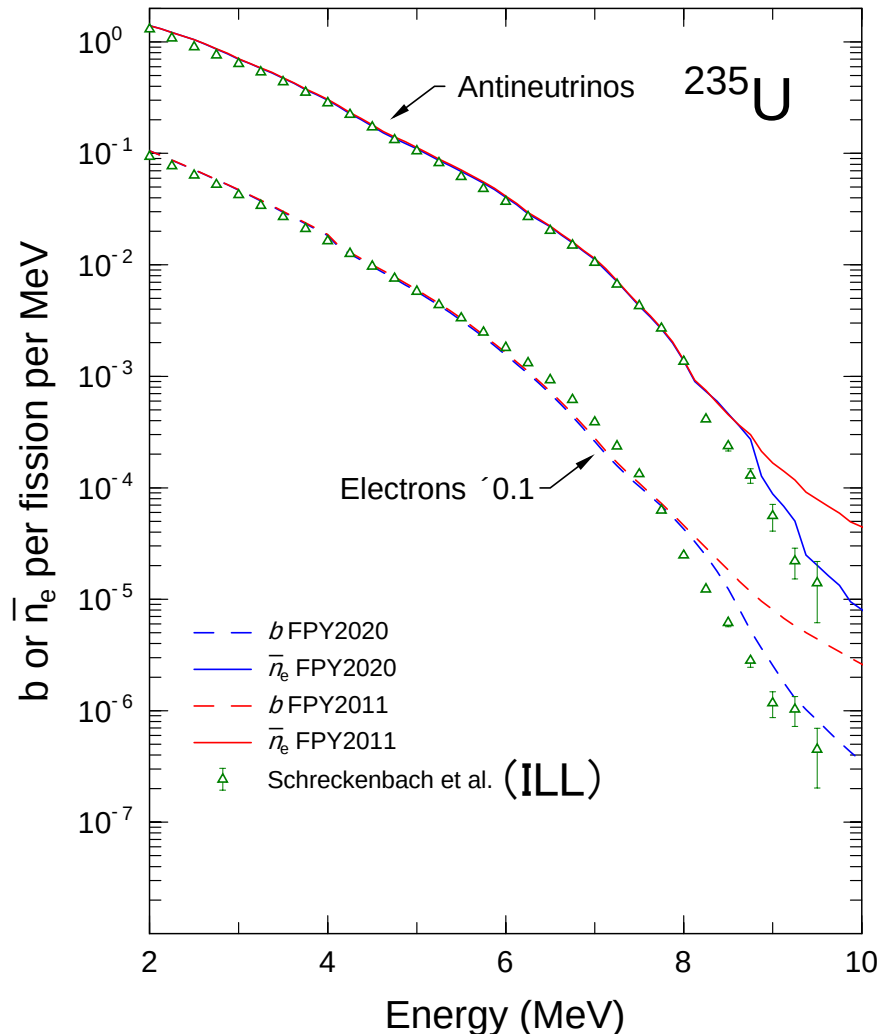
https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html



原子炉内でのFP核種*i*の生成消滅

5. 原子炉ニュートリノ放出

総和計算の結果(線)とILLのデータ(シンボル、電子および $\bar{\nu}_e$)との比較

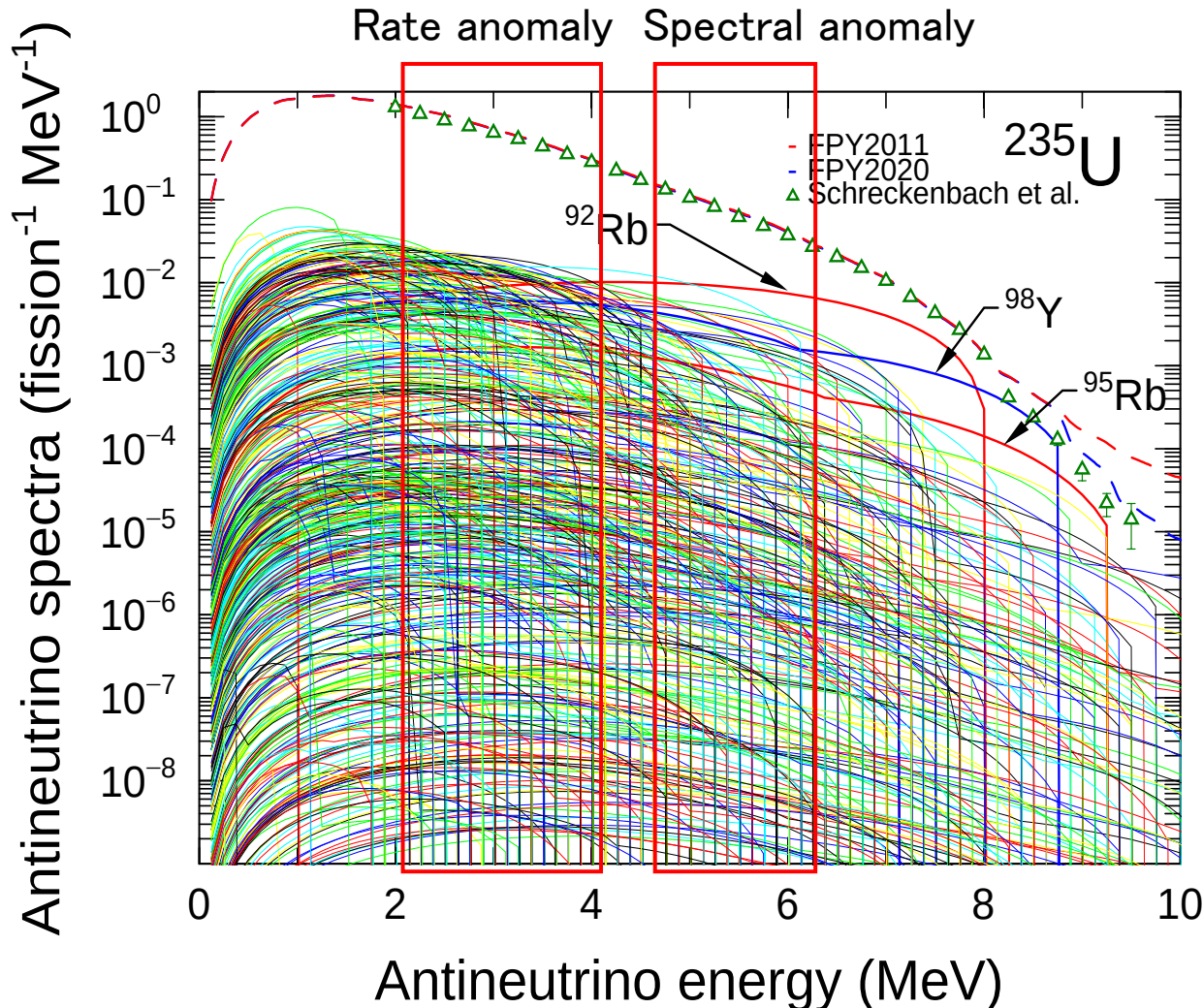


^{235}U 電子・反電子ニュートリノスペクトル

- $^{235}\text{U}+n_{\text{th}}$ の電子および反ニュートリノエネルギースペクトル(電子スペクトルは0.1倍してプロットされている)
- 2種類の線は、核分裂収率として異なるデータベースを用いた結果:
→8MeV以上の領域で違いが見える。
- RateおよびSpectral anomalyの領域では2つの計算に大きな差はなく、8MeV以下ではILLの実験データから変換されたニュートリノスペクトルとも良くあっているように見える

5. 原子炉ニュートリノ放出

総和計算による ^{235}U の熱中性子核分裂で発生する
ニュートリノスペクトルに対する核種の寄与



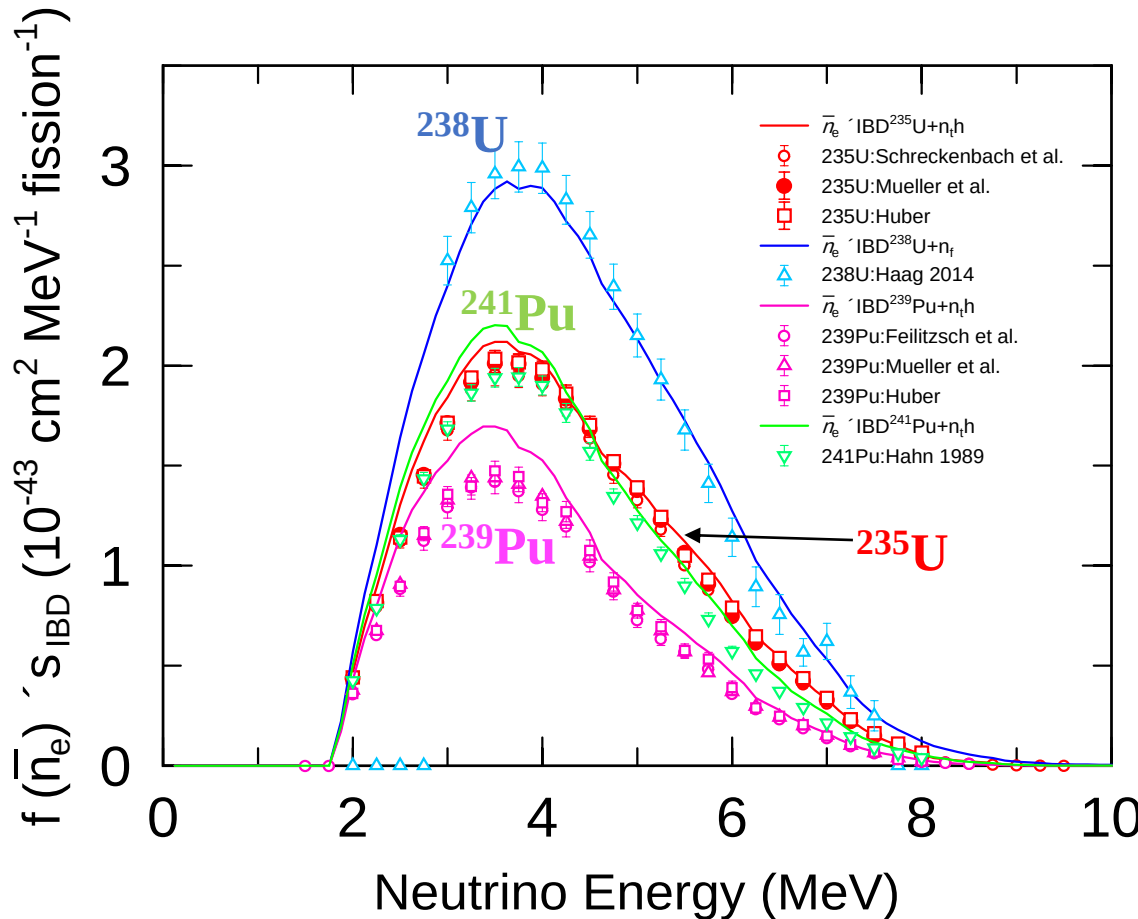
Rate anomaly (2~4MeV)、
のエネルギー領域では、多数
のFPからの寄与の重ね合わ
せとなっている。

Spectral anomaly (5~6MeV)
領域では主要な核種を10数
個程度は同定可能。

→核分裂収率や崩壊データ、
各FPのニュートリノスペクトル
によって全体のニュートリノス
ペクトルが決定される総和計
算の精度検証が不可欠。

5. 原子炉ニュートリノ放出

IBD断面積をかけた“観測される”ニュートリノスペクトル
核種名の色とシンボル(実験データ)・線(総和計算値)の色が対応



^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu のニュートリノスペクトル × IBD断面積

- 実験値(ILLのデータにIBD断面積をかけたもの)の形状は総和計算により良く再現された。
- ^{238}U では再現は良好であるが、それ以外は実験値の完全な再現には至っておらず、Rate anomalyが指摘されている領域で計算が過大評価となっている(最大で20%ほど)
- 大きすぎる理論値はmissing neutrino量、すなわちニュートリノ振動を過大に見積もることになるため更なる検討が必要。
- 結論として、原子炉ニュートリノ計算における核データの精度はまだ不十分。また、新たなILL様データが必要

6. まとめ

- 核分裂研究の意義、核分裂過程についての概観
- 東工大における核分裂研究の紹介
- 3体核分裂による軽粒子放出
 - ✓ 反対称化分子動力学
 - ✓ 荷電粒子はクーロンフォーカシングによる加速を受けるが、多中性子原子核については、放出されてもエネルギーが低いことが予想される
 - ✓ 放出確率を定量的に計算する能力は欠如している
- 原子炉ニュートリノ放出
 - ✓ 基礎研究、応用分野両方で重要な過程
 - ✓ 原子力用の核データと大局的理論によるFP毎の反電子ニュートリノスペクトルを用いる**総和計算**を実行
 - ✓ ILLのデータを用いる変換法の結果よりニュートリノ量が過大評価となっている
→missing neutrino量を大きく見積もる傾向
 - ✓ **Daya Bayデータへのアクセス性**
測定時の炉内核種組成
 - ✓ 総和計算に必要な核データの精度向上が必要
 - ✓ 新たな総和ニュートリノスペクトル(ILL様)のデータ取得が必要
 - 照射孔に至る真空ダクト+ β 線分析電磁石？