核 動 力 学

―核融合と核分裂―

阿部　恭久
核物理研究センター
大阪大学

１．はじめに

核分裂は、発見以来70年近く経つが、残念ながら依然よく理解されたとは、言いがたい。　自発核分裂の定量的問題も、未だ解決されていないが、私の話の主な目的は、誘起核分裂、特に重イオン核融合に伴う核分裂、即ち励起原子核の分裂について、及び融合反応それ自身についても、散逸揺動動力学（Dissipation-Fluctuation Dynamics)が必要であることを明らかにすることである。

80年代の所謂深部非弾性衝突（Deep－Inelastic Collisions)の発見が、その契機と考えられているが、実は核分裂の発見及びそのBohr-Wheeler理論に対するKramersによる統計力学的解釈に始まる。　これは、従来の核反応理論が平衡統計力学に基づくのに対して、集団自由度に対する非平衡統計力学の立場からの研究である。　この立場に立てば、超重元素核の合成反応をはじめ、融合、分裂、準分裂（Quasi-fission)、速分裂（Fast-fission)、前平衡分裂（Pre-equilibrium fission)等の種々の重イオン核反応の記述、分析が可能となる。

2. Basic Concepts of Atomic Nucleus

1. Liquid drop model ; saturated matter
   Nuclear binding systematics
   (Nuclear Physics starts from the masses
   and ends with the masses ?)

2. Independent particle model
   Magic numbers,
   spins and magnetic moments of ground
   states

結合エネルギー：質量公式

$$M(N,Z)=\frac{1}{c^2}\cdot E(N,Z)=N\cdot M_n+Z\cdot M_p-\frac{1}{c^2}\cdot B(N,Z)$$

$$B=b_{vol}\cdot A-\ b_{surf}\cdot A^{2/3}-\frac{3}{5}\frac{Z^2e^2}{R_c}-\frac{1}{2}b_{sym}\frac{(N-Z)^2}{A}$$

$$b_{vol}\approx 16\ \mathrm{MeV},\ \ b_{surf}\approx 17\ \mathrm{MeV},\ \ b_{sym}\approx 50\ \mathrm{MeV}$$

$$R_c\approx 1{,}24\cdot A^{1/3}\quad \text{(uniformly charged sphere)}$$

$$\delta B_{\mathrm{pairing}}=\begin{cases}\Delta & Z:\mathrm{even}\quad N:\mathrm{even}\\ 0 & A:\mathrm{odd}\\ -\Delta & Z:\mathrm{odd}\quad N:\mathrm{odd}\end{cases}$$

中性子過剰核の場合は、アイソスピン依存が他にも必要

対相関に加えて重要な量子効果は、殻効果、及び変形によるものである

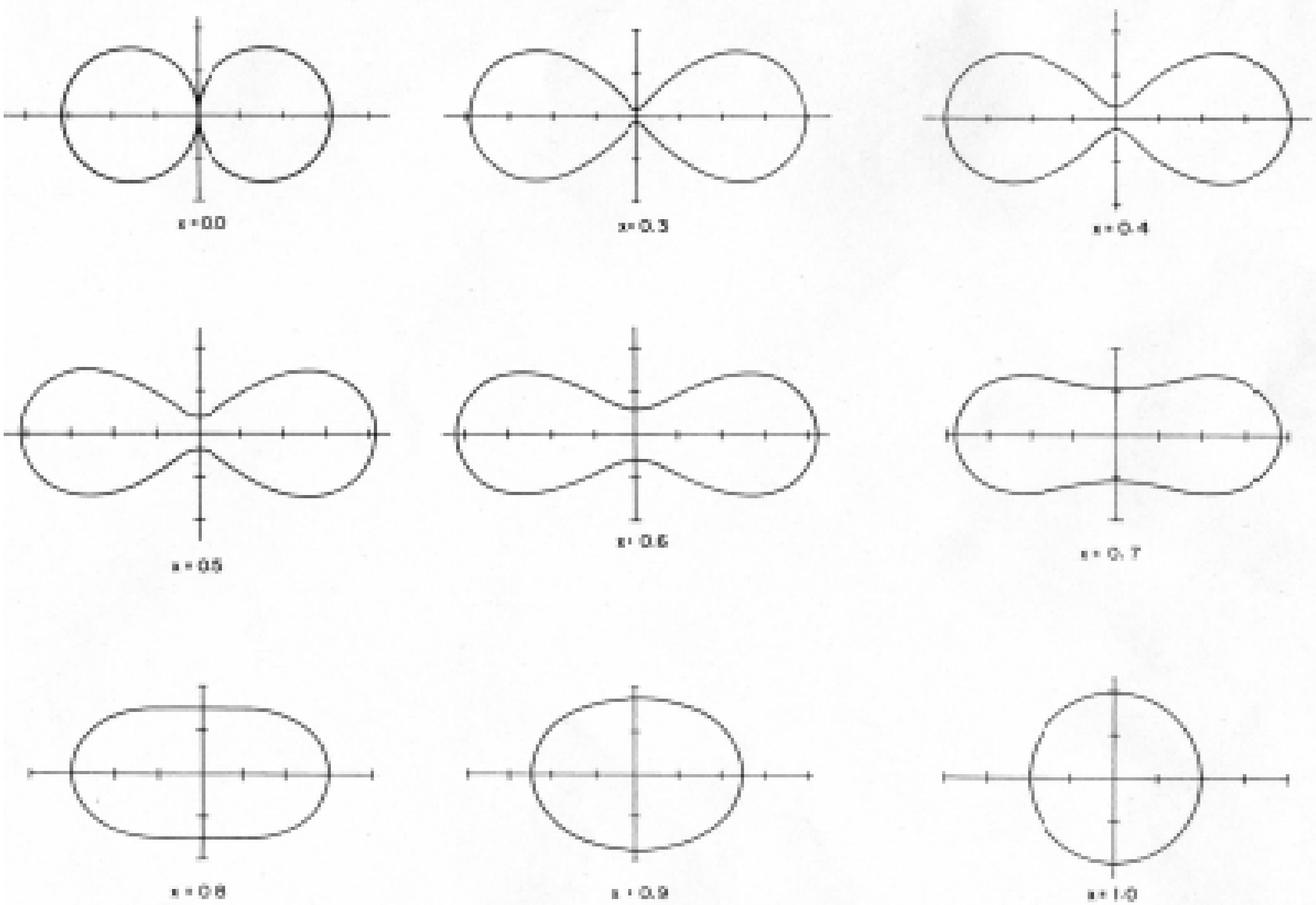
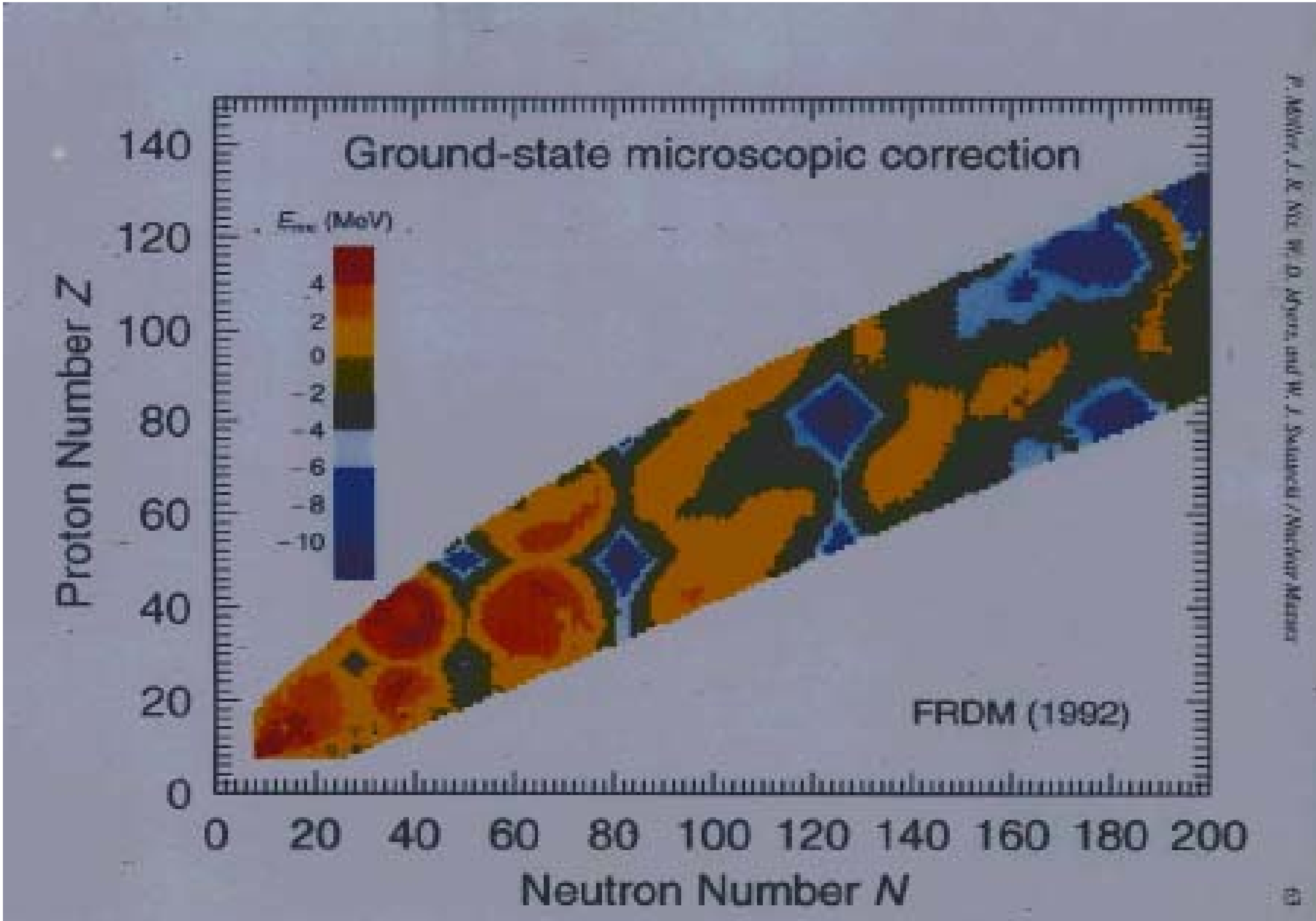


Fig. 1a. Saddle-point shapes for various values of x

[Cohen - Swiatecki]


Ground-state microscopic correction
E_{mic} (MeV)
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
Proton Number Z
140
120
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
Neutron Number N
FRDM (1992)

$$\delta B(\beta) = \frac{1}{2\pi} b_{surf} \cdot A^{2/3} \cdot \left\{ (1-x)\cdot\beta^2 - \frac{2}{21}(\frac{5}{4\pi})(1+2x)\cdot\beta^3 \right\}$$

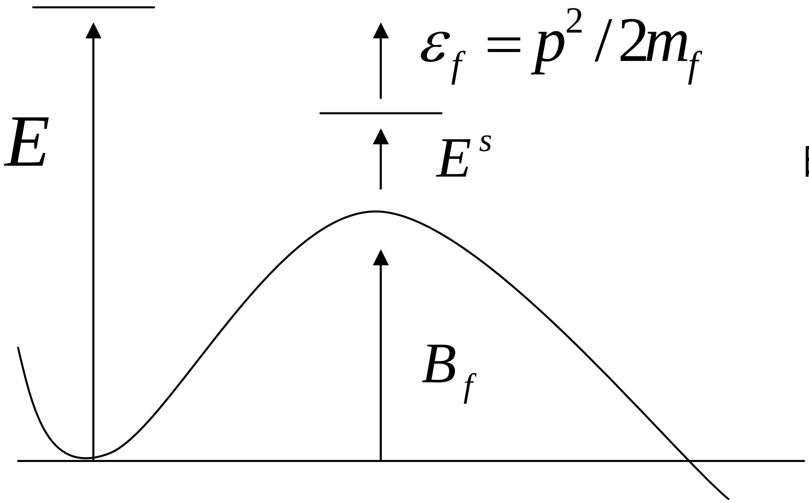
[B-M II. P.662]

$$x = E_c^o / 2E_s^o$$

$$= \frac{3}{10}\frac{e^2}{r_o}\frac{1}{b_{surf}}\cdot\left(\frac{Z^2}{A}\right) \quad ; \quad \text{fissility parameter}$$

$$\frac{\partial \delta B}{\partial \beta} = 0 \rightarrow \beta_s = \frac{7}{3}(\frac{4\pi}{5})^{1/2}(1-x)$$

$$B_f = \delta B(\beta_s) = \frac{98}{135}(1-x)^3 \cdot b_{surf} \cdot A^{2/3}$$



時間 Δt の間に鞍点を通過する状態数 N_f は、

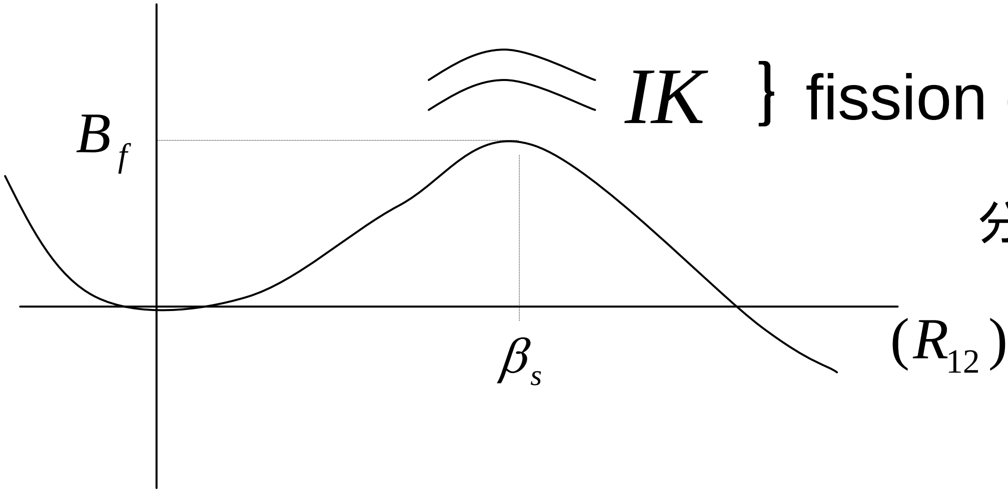
$$\sum_{\Delta p} \left(\frac{\Delta p \cdot \Delta q}{2\pi\eta} \right) \cdot \rho_s(E^s)$$

$$\Delta q = v_f \cdot \Delta t$$

$$E^s = E - B_f - \varepsilon_f$$

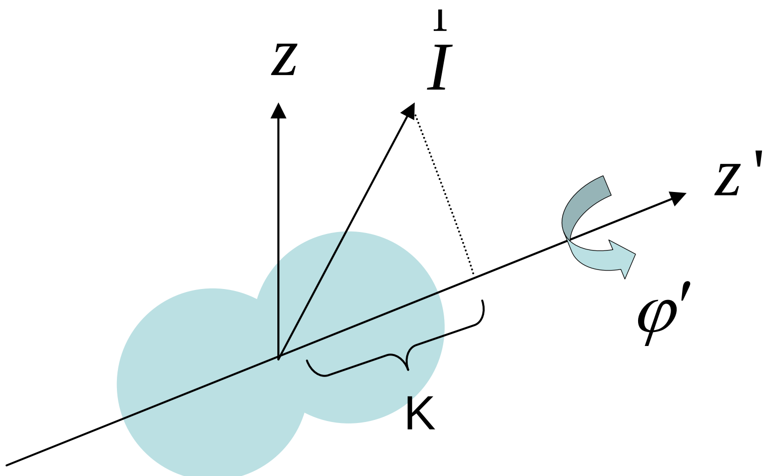
$$\Gamma_f = \eta \cdot P_f \,, \qquad P_f = N_f / \Delta t / \rho(E)$$

$$= \frac{1}{2\pi\rho(E)} \int_0^{E-B_f} d\varepsilon_f \cdot \rho_s(E - B_f - \varepsilon_f) = \frac{1}{2\pi\rho(E)} \int_0^{E-B_f} dE^s \rho_s(E^s)$$



IK } fission channels → 鞍点の存在!!

分裂片角分布 → $\left(d^{I}_{MK}(\theta)\right)^2$



鞍点で軸対称を仮定すると対称軸への射影Kが良い量子数になる！！

Kramers方程式及び準定常解　[Kramers, Physica VII4(1940)284]

ブラウン粒子の位相空間（ｐ、ｑ）での分数関数に対する以下の方程式を導出した。

$$\frac{\partial}{\partial t} f(p,q,t) = \left\{ -\frac{\partial}{\partial q}\frac{p}{m} + \frac{\partial}{\partial p}\frac{\partial U}{\partial q} + \frac{\partial}{\partial p}(\beta \cdot p + m \cdot \beta \cdot T \frac{\partial}{\partial p}) \right\} f(p,q,t)$$

（この式の簡単な導出は、すぐあとで）

ここで $\beta = \gamma / m$ で、γ は、摩擦係数、　T　は, 熱浴の温度。

Kramersは、Bohr-Wheeler理論が分裂自由度をブラウン粒子とみなし、核子系(複合核）を熱浴とみなして、そのブラウン粒子が僅かな確率で鞍点を越える過程を記述すると考えた。

さらに、上記方程式の鞍点近傍での準定常解による分裂巾（準定常流）を求めた。

$f(p,q,t) \approx F(p,q) \cdot e^{-(\frac{p^2}{2m}+U(q))/T}$ と置き、 F を求める。

(q は、, 核変形 β に対応する座標、 p は、共役な運動量)

F に対する偏微分方程式 を変数分離して、

境界条件 [球形近傍で１、鞍点の 外側で０] のもとで解くと、

$$F = N \cdot \int_{-\infty}^{u} e^{-((a-\alpha)/2m\gamma T)\cdot\alpha^2} d\alpha$$

$$u = p - a(q - q_s), \qquad a = (\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 4m^2\omega'^2})/2,$$

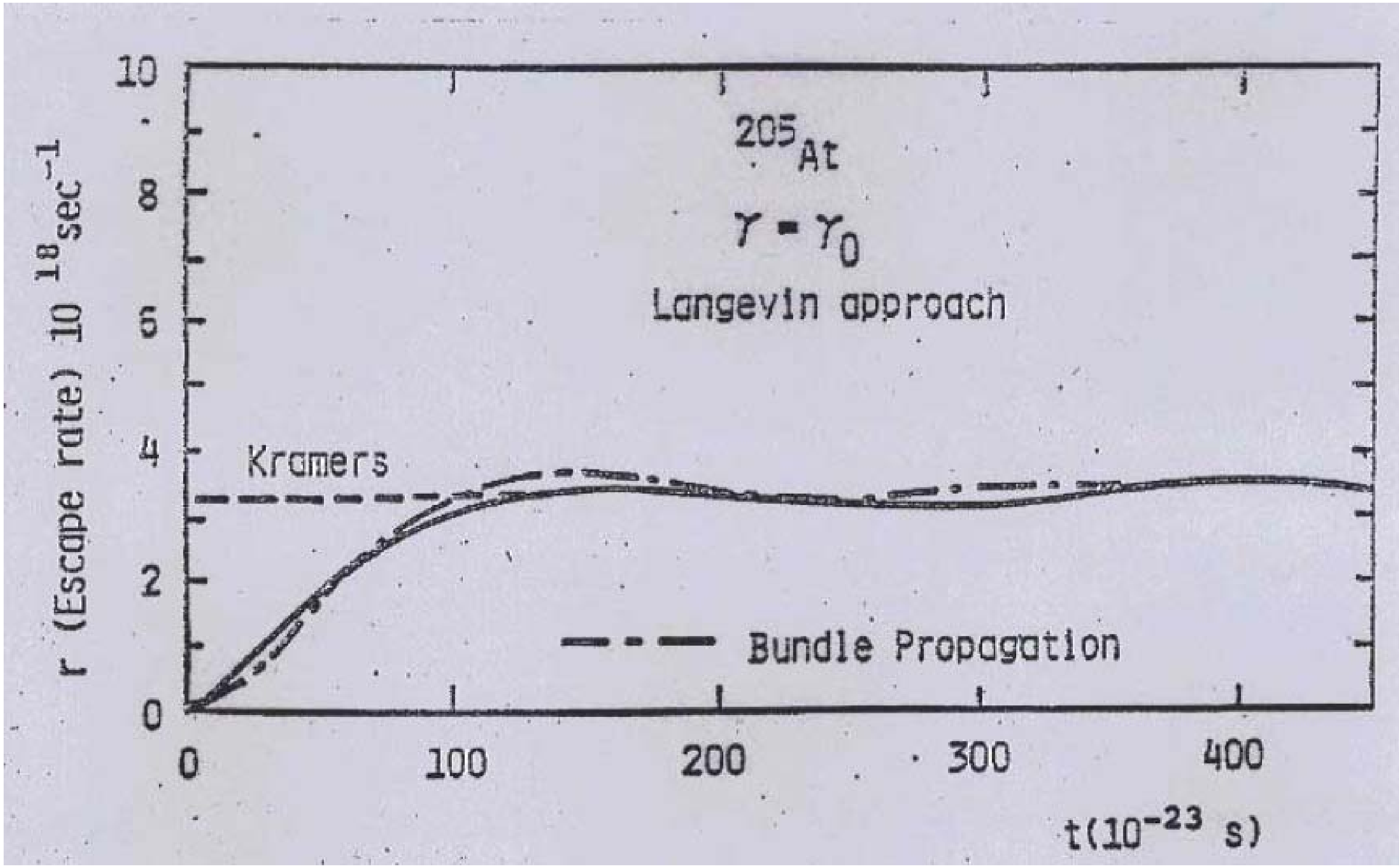
これを用いて鞍点での確率密度流を計算し、内部の全存在確率で除する

ことにより、単位時間当たりの分裂確率 r_k を求めた。

$$r_K = K \cdot \tilde{r}_{BW} \quad , \qquad \Gamma_{\mathrm{f}}^{\mathrm{BW}} \cong \eta r_{BW}$$

$$\mathrm{K} = \sqrt{\mathrm{x}^2 + 1} - x, \qquad x = \beta/2 \cdot \omega' = \gamma/2m\omega' \qquad \text{(Kramers factor)}$$

$$\tilde{r}_{BW} = \frac{\omega}{2\pi} e^{-B_f/T} = (\frac{\omega}{T}) \cdot \frac{T}{2\pi} e^{-B_f/T} \cong (\frac{\omega}{T}) \cdot r_{BW} \;, \qquad \omega/T : \text{Strutinski factor}$$



205At
γ = γ0
Langevin approach
Kramers
Bundle Propagation
r (Escape rate) 10 18sec-1
t(10-23 s)
0
2
4
6
8
10
0
100
200
300
400

核動力学の必要性

- 核分裂現象の研究から得られたことは、核子系の熱平衡化が早いこと、及び分裂自由度をブラウン粒子と看做しうることである。
- 現実の重イオン反応では、集団運動に対してある種の初期条件（必ずしも明確に定義されているとは限らないが）が与えられている訳であるから、集団運動自由度は　熱平衡化過程、或いは、緩和過程にあると看做される。　融合も分裂も、LDMポテンシャル表面上の確率的運動、或いは拡散運動である。
- 従って、準定常解にとどまらず　Kramers　方程式、或いは　Langevin　方程式を、与えられた初期条件から出発して解くことが必要となる。
  [Y. Abe et al., J.Phys.47(1986)C4-329] [H. Delagrange et al., Z.Phys. A323(1986)437] [Y. Abe et al., Phys. Rept 275(1996)49]
- 実際、すでにその必要性は、分裂前放出中性子の多重度の異常性などから認識されている。　　[T. Wada et al., PRL 70(1993)3538]

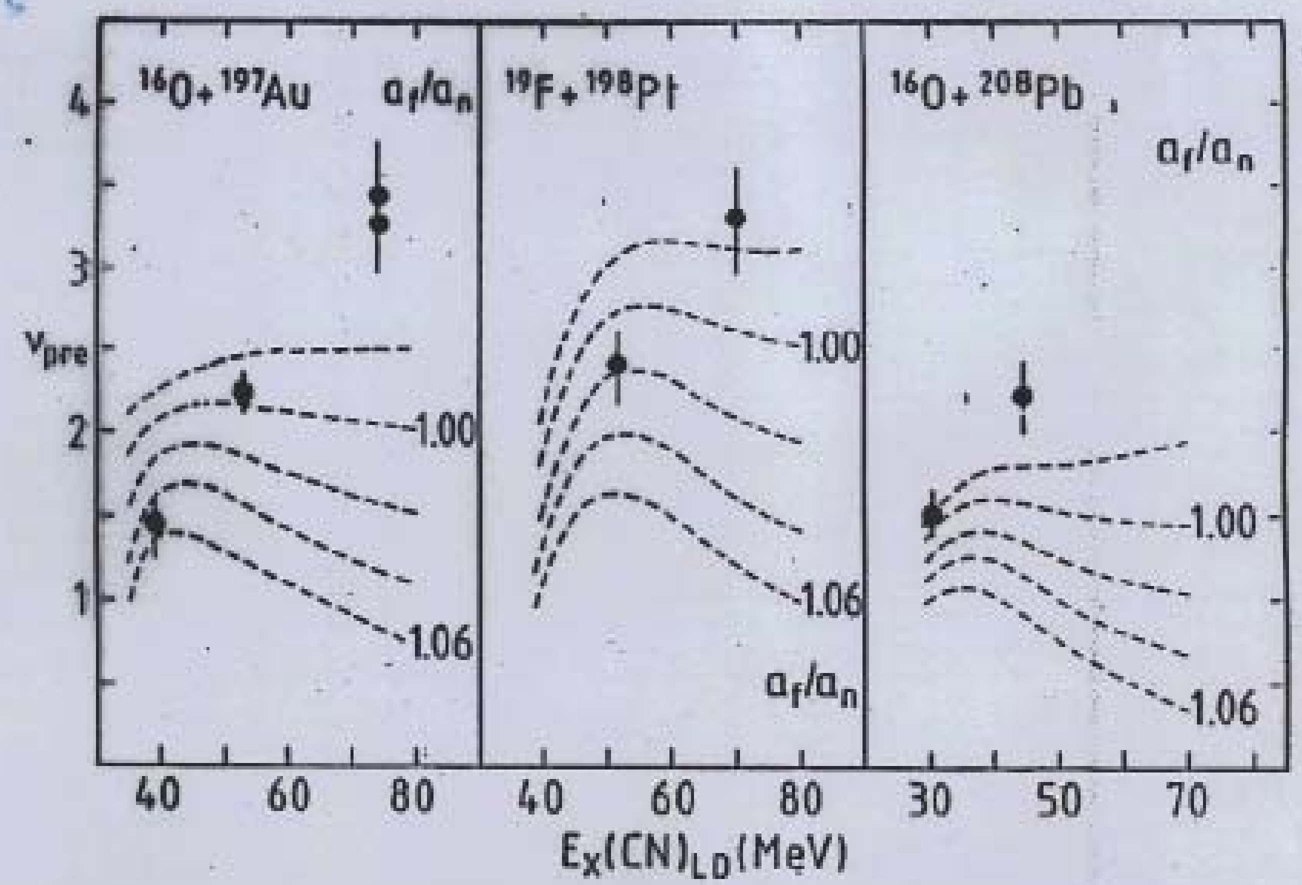


FIG. 6. Pre-scission neutron excitation functions, measured (points) and calculated using the statistical model only (dashed lines) for values of a_f/a_n varying by 0.02 (from Ref. 15).