

核分裂から見たクラスター分裂

筑波大・物理学系
李 相茂

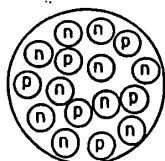
1. 序論

原子核は自然界で久しくユニークな有限量子多体系として存在してきた。また、その分裂現象も半世紀の間多くの実験的、並びに理論的に研究された。しかし、膨大なデータの蓄積にも拘わらず Fission Dynamics を第一原理から解くまでには至っていない。

さて、マイクロ・クラスターの登場により原子核もついに親類縁者を持つことになった。核とクラスターは相互作用の力の違いを乗り越えて多くの類似性を持っている。殊に、それはメタルクラスターと核との間で見られる [1] (図 1.)。核とクラスターの分裂を比較する道が開けた

Quantal Finite Many Body System**Nucleus**

$$A=Z+N$$



$$A < 300$$

$$R \sim 10 \text{ fm} = 10^{-12} \text{ cm}$$

$$\rho_N \sim 10^{14} \rho_{\text{atom}}$$

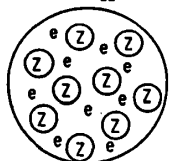
$$E_{\text{bin}} \sim \text{MeV}$$

Strong Interaction

Shell Structure

Liquid Drop Model
(LDM)**Metal Cluster**

$$(A)_n$$



$$n = 10 \sim 10^4$$

$$R \gtrsim 10 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ cm}$$

$$\rho_{\text{cluster}} \sim \rho_{\text{atom}}$$

$$E_{\text{bin}} \sim \text{eV}$$

Weak Interaction

Shell Structure

LDM ?

図 1.

Liquid Drop Model of Nucleus

For small, axially symmetric distortions

$$R(\theta) = R_0 [1 + \alpha_2 P_2(\cos \theta)]$$

The surface and Coulomb energies for small distortions (Bohr and Wheeler, 1939)

$$E_s = E_s^0 (1 + \frac{2}{5} \alpha_2^2), \quad E_c = E_c^0 (1 - \frac{1}{5} \alpha_2^2)$$

fissility parameter

$$x = E_c^0 / 2E_s^0$$

where

$$E_c^0 = \frac{3}{5} (Ze)^2 / R_0, \quad E_s^0 = 4\pi R_0^2 \sigma$$

by Green (1954)

$$E_c^0 = 0.7103 Z^2 / A^{1/3} \text{ and } E_s^0 = 17.80 A^{2/3}$$

$$x = Z^2 / 50.13 A$$

$$(Z^2 / A)_{\text{crit}} = 50.13$$

図 2.

ことは、有限量子多体系の量子崩壊現象を統一的に研究できる事を意味する。
特にクラスター分裂では

- 原子核の系が高々 250 で終わるのに対してクラスターはいくらでも連続的に大きくなれる。即ち、quantal fission から classical fission まで観測できる。
- クラスターサイズの変化に、量子液滴から固相の結晶構造に相転移する分裂現象の本質的变化を観測できる。(たとえば Na クラスターで $N \simeq 1400$)
- 核では唯一の critical fissility parameter $(z^2/N)_{cr} \simeq 50$ しかないが、クラスターはその元素の種類の違いによって固有の $(z^2/N)_{cr}$ が多様に現れる。

等々の理由により、アカデミックにはクラスター分裂物理が核の分裂物理を凌駕する可能性すらある。クラスター分裂物理に対する大きな期待にも拘わらず、その進歩は以外にも遅い。それは、核分裂に比べてクラスター分裂の方は観測される物理量が少ない事に起因している。主な理由は、

- 核の場合系が大きくなるにつれて原子番号 Z も自動的にふえるが、クラスターの場合一般的に中性であり、電荷は強制的に与えねばならない。
- 分裂片の運動エネルギーがクラスターの場合小さく、高々 $\sim eV$ なので測りにくい。

等である。しかし、実験の工夫次第ではより多くの物理量を決めることが出来、更なる発展が望まれると期待できる。

この小論文では、クラスター分裂全般をレビューするのではなく比較的明らかな物理量となっている“クリティカルサイズ N_c ”を中心に議論を進め、将来の展望を語ってみる。

2. Critical size N_c

小さな帯電している液滴の安定性について最初に議論したのは、1882年 L.Rayleigh であった。小球の半径 a_0 、電荷 Q 、凝集力を T とすると、

$$T > \frac{Q^2}{16\pi a_0^3}$$

の時は小球は安定。不等号が逆になると不安定になって分裂することを示した。この理論の実験的検証は正に核分裂でなされた。Bohr-Wheeler は原子核の場合 $(Z^2/A)_c \simeq 50$ と評価したのに対して、実験値は 48 を与え驚くほどの一致性を得た [2] (図 2.)。

さて、クラスターの場合はどうであろうか? 先ずクラスターをレーザーで 2 価にイオン化したものが実験的に易しく、多くの実験がなされた。従ってクラスターサイズは自ずと $N < 100$ に限定された。多くは asymmetric fission が観測され、Mass 分布に shell 効果も見いだされた。しかし、大部分の実験は“観測すると終状態としてこれこれの親核からの fission と考えられる…”というもので、初期条件即ち親核の質量、内部エネルギーなどが明確に同定されていないことが多い。これが、クラスター分裂物理の発展が遅れている一因とも言える。ただここでは、初期条件の質量を決めながら実験している Orsay の Bréchnagnac グループの実験を例に見てみよう。彼女らはクラスターイオン源から出た複数の Mass をパルスシステムにより一組の質量を選び fission zone で分裂を起こさせ減速して fission fragment の Mass を分けながら T-O-F で質量分布を測った。これによって、Na クラスターでは $N_c = 27$ を境としてそれより大きいクラスターは fission dominant であると決定した [3] (図 3.)。これに対して Saunders は fission barrier と Na monomer の活性化エネルギーのクラスターサイズ依存性を調べ、 $N_c = 27$ を見事に説明した [4]。Bréchnagnac のグループは最近この実験を発展させ evaporation と fission の分岐比から fission の inner barrier を決め Total kinetic energy 分布の測定から outer barrier を決める注目すべき結果を出しているが詳細な批評はここでは控えたい。

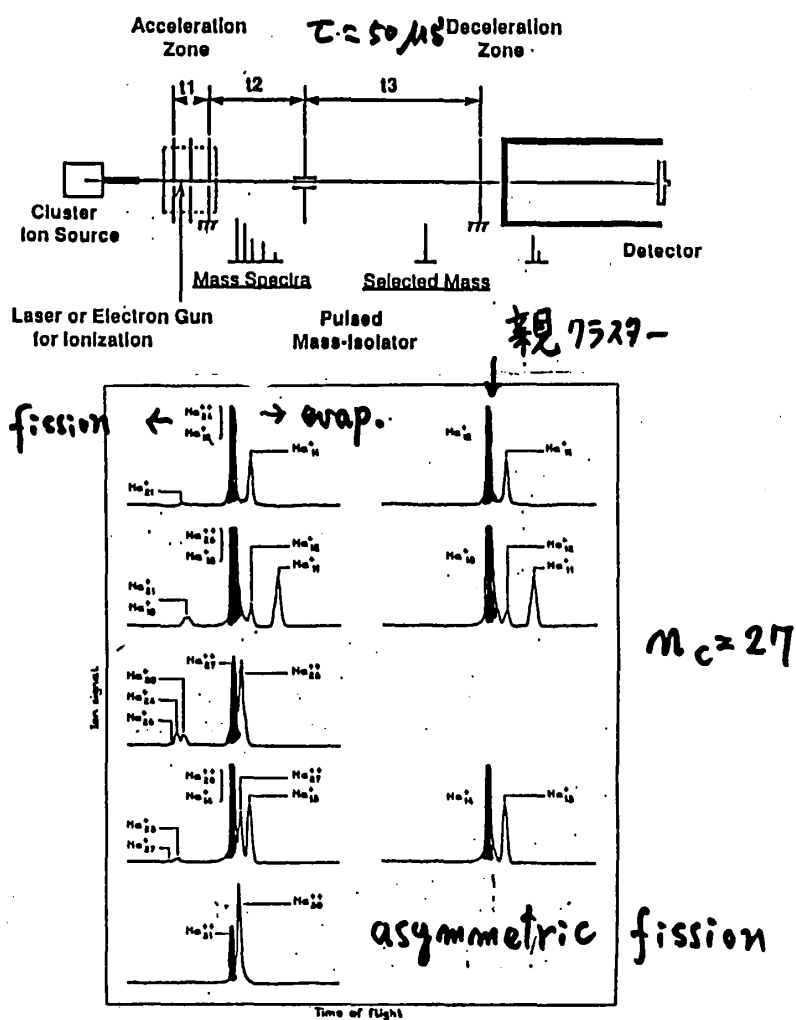
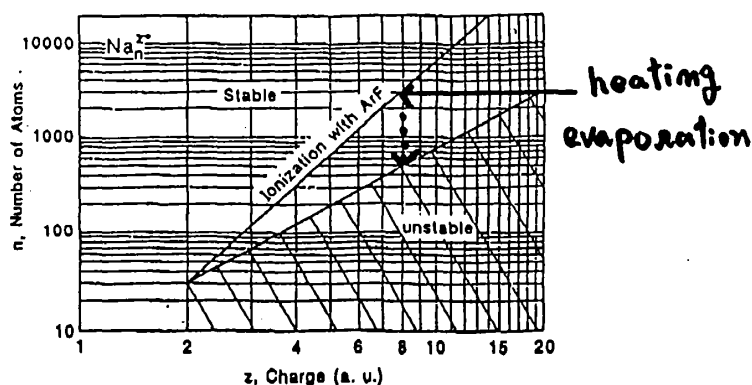


FIG. 2. Unimolecular dissociation spectra for several clusters selected by the size-to-charge ratio. Right-hand side, the unimolecular evaporation of pure singly charged clusters. Left-hand side, unimolecular dissociation of Na_n^{+} and Na_n^{++} .

c. Bréchtgnac et al., Phys. Rev. Lett. 64,
(1990) 2893

☒ 3.



$(\text{Na})_n^{+q}$ clusters

$$Z^2/n \leq 0.125$$

Z	n_c
2	27 ± 1
3	64 ± 1
4	123 ± 2
5	208 ± 5
6	321 ± 5
7	448 ± 10

T.P. Martin et al., "Fission of Highly Charged Sodium Clusters",
Chem. Phys. Lett. (1992) 113.

図 4.

1992年 Martin 等は double laser excitation 法を開発して Na クラスターの電荷を一挙に+7まで上げるブレイクスルーを果たした。こうしてクラスターサイズは $N = 450$ まで上げられた。クリティカルサイズ N_c の領域も $N_c = 2 \sim 7$ まで広がり $(z^2/N)_{cr} \leq 0.125$ を与えた。ところが Martin によると Rayleigh の式で計算した理論的な予測値は $(z^2/N)_{cr} \sim 0.4$ でありこの不一致性は不可解であるとした [5] (図 4.)。

原子核との違いを考察してみよう。核の場合は親核の基底状態即ち $T = 0$ で理論を適用しているので純粋に表面張力とクーロン斥力の力関係だけでクリティカルサイズが決められた。ところがクラスターの場合一般的に $T \neq 0$ の状態であり、fission と evaporation は競争しながらクリティカルサイズ N_c が決まる。従ってクラスターの場合に Rayleigh の式を単純に適用しただけでは N_c は決まらない。最近 P.Fröblich は fission rate R_f と evaporation rate R_{ev} が等しくなる ($R_f = R_{ev}$) クラスターの大きさを求めクリティカルサイズを Weisskopf の統計理論を使い計算した [6]。注目すべきは、 R_{ev} 、 R_f は温度 T により敏感に値が変わるにも拘わらず N_c はむしろ変わらない (図 5.)。しかし、計算された mean life time $\tau \sim 1/k$ は実験の $\sim 20\mu\text{s}$ より 1000 倍も違うのは何故であろうか？ 実験も未だ意識的に fission life time を決めるようになされていないが、理論とのオーダーの違いが大きすぎる。今後の課題として注目すべきであろう。殊に原子核でも fission delay time は最近の topics であり、核の粘性の温度依存性は興味あるテーマとなっているが、life time の直接測定が難しいだけに物理的結論も今一つ釈然としない。これに比べクラスターの分裂寿命はその time range が測定許容範囲に入るため今後の

Table Captions

Table 1: Experimental [1] and theoretical critical cluster sizes n_c^* for Na_n^z clusters. The calculated Coulomb barriers V_{cb} are also given.

z	2 ⁺	3 ⁺	4 ⁺	5 ⁺	6 ⁺	7 ⁺	8 ⁺	9 ⁺	10 ⁺
$n_c^*(\text{exp})$	27 ± 1	63 ± 1	123 ± 2	206 ± 4	310 ± 10	445 ± 10			
$n_c^*(\text{th})$	22	62	123	208	316	451	610	801	1019
$V_{cb}[\text{eV}]$	1.21	1.93	2.46	2.87	3.22	3.51	3.77	4.00	4.20

Table 2: Evaporation and 'fission' rates for charged Na_n^z clusters at the critical sizes n_c^* for different temperatures

charge	size	$T_0 = 300^\circ\text{K}$		$T_0 = 500^\circ\text{K}$	
z	n_c	$R_{ev}[s^{-1}]$	$R_f[s^{-1}]$	$R_{ev}[s^{-1}]$	$R_f[s^{-1}]$
2	22	$2.23 \cdot 10^8$	$1.88 \cdot 10^8$	$6.03 \cdot 10^9$	$5.00 \cdot 10^9$
3	62	$1.13 \cdot 10^4$	$1.04 \cdot 10^4$	$3.57 \cdot 10^7$	$3.38 \cdot 10^7$
4	123	$5.87 \cdot 10^1$	$7.94 \cdot 10^1$	$4.02 \cdot 10^6$	$4.41 \cdot 10^6$
5	208	$4.44 \cdot 10^0$	$4.49 \cdot 10^0$	$1.41 \cdot 10^6$	$1.42 \cdot 10^6$
6	316	$9.48 \cdot 10^{-1}$	$1.02 \cdot 10^0$	$8.21 \cdot 10^5$	$8.59 \cdot 10^5$
7	451	$3.65 \cdot 10^{-1}$	$3.57 \cdot 10^{-1}$	$6.06 \cdot 10^5$	$5.98 \cdot 10^5$
8	610	$1.99 \cdot 10^{-1}$	$2.19 \cdot 10^{-1}$	$5.11 \cdot 10^5$	$5.42 \cdot 10^5$
9	801	$1.31 \cdot 10^{-1}$	$1.31 \cdot 10^{-1}$	$4.63 \cdot 10^5$	$4.62 \cdot 10^5$
10	1019	$9.90 \cdot 10^{-2}$	$1.02 \cdot 10^{-1}$	$4.40 \cdot 10^5$	$4.49 \cdot 10^5$

Exp.
~ 10⁵

図 5.

発展に望みがかけられる。

3. 今後の展望

今までの Cluster Fission の実験は大部分レーザーによりクラスターをイオン化したり内部エネルギーを暖めて行われてきた。核の場合のアナロジーで行うと γ -ray induced fission の様なものである。ここでは角運動量効果は現れない。核の Fusion-Fission に対応する Collision Induced Dissociation (CID) はわずかにしか研究されていない。この領域は角運動量効果が大きく期待されるので未だ広い可能性が残されている。さらに核でも問題になっている Fission Delay Time due to Nuclear Viscosity は Cluster ではどうなっているだろうか？興味は尽きないものがある。

今後のクラスター分裂の発展方向は2つである。

- 実験的物理量をもっと豊富に工夫を凝らしてはかる。そして理論との比較を科学の段階に引き上げる。
- 抜本的な方法を開発してクラスターに大電荷を与え、大クラスターの Fission を観測する。

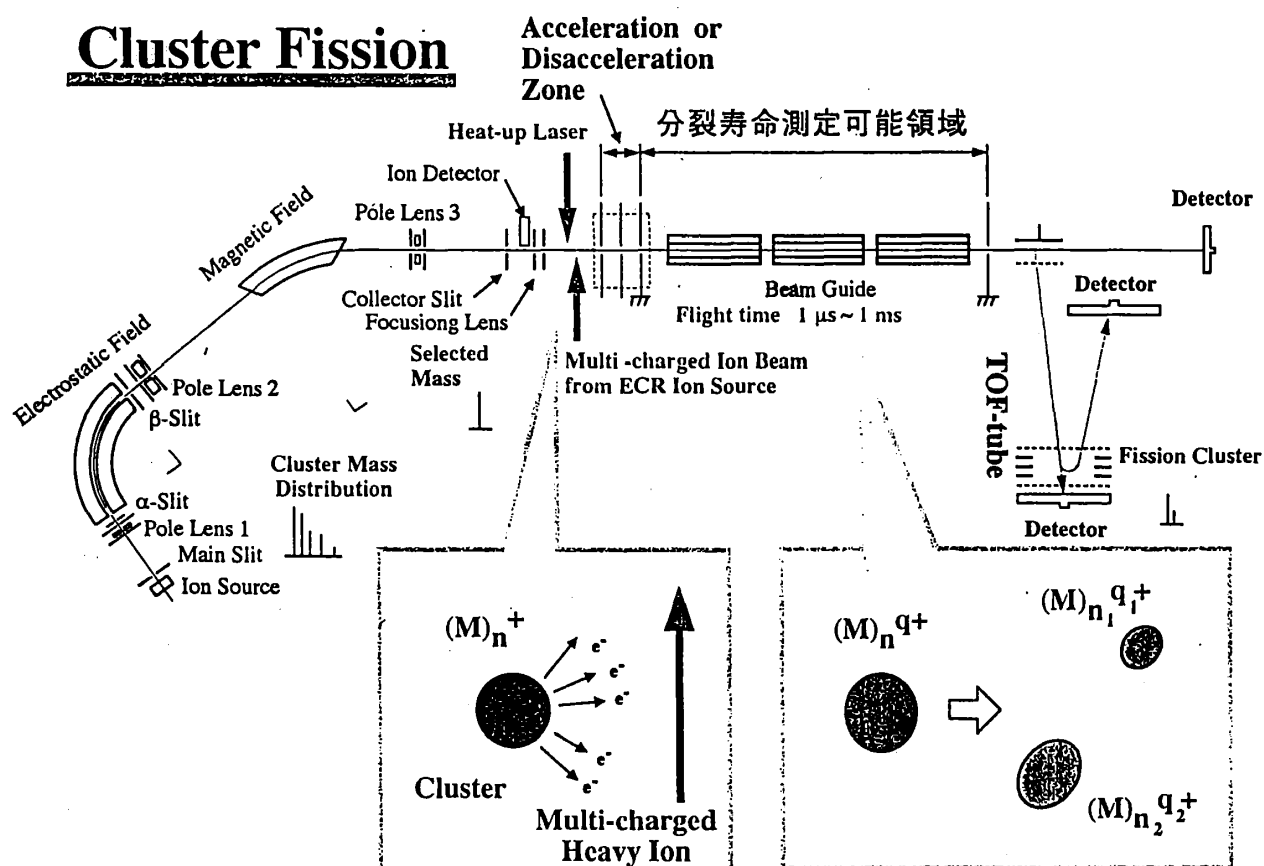


図 6.

後者については、現在筑波グループがクラスターと ECR イオン源からの多荷イオン交差法により、 $z \sim 20$ 、 $N_c \sim 3000$ までがカバーできる実験装置を製作中である (図 6.)。

References

- [1] S. Sugano, *Microcluster Physics*, (Springer Series in Materials Science 20)
- [2] N. Bohr and J.A. Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939) 426.
- [3] C. Brechignac et al., *Phys. Rev. Lett*, **64** (1990) 2893.
- [4] W.A. Saunders, *Phys. Rev. Lett*, **66** (1991) 840.
- [5] T.P. Martin et al., *Chem. Phys. Lett*, **196** (1992) 113.
- [6] P. Fröblich, *Phys. Lett*, **A202** (1995) 99.