

# 超重元素と中性子過剰核



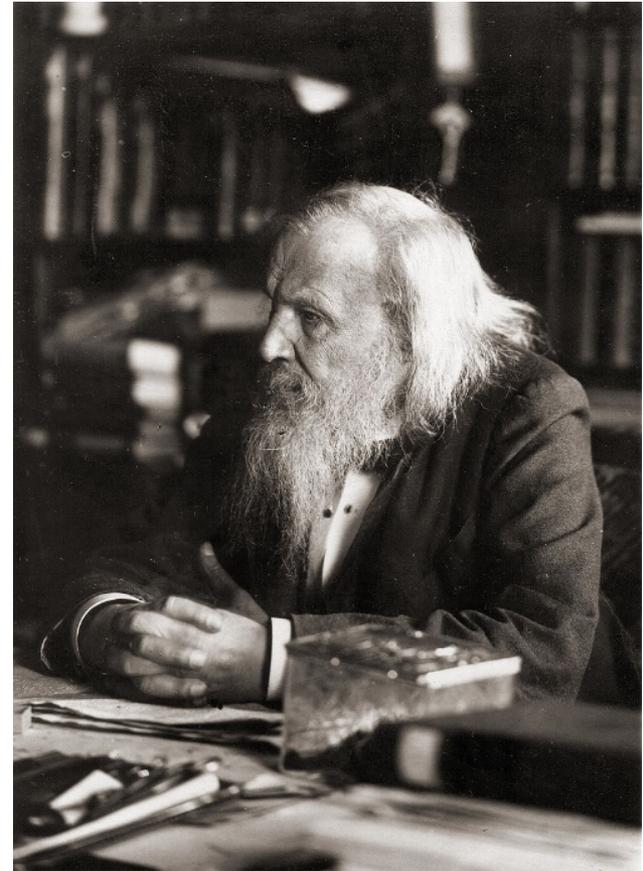
International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements

# 元素の周期表(1869年に発表)



International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements

国際周期表年



メンデレーエフ  
(1834-1907)

# 元素の周期表(1869年に発表)



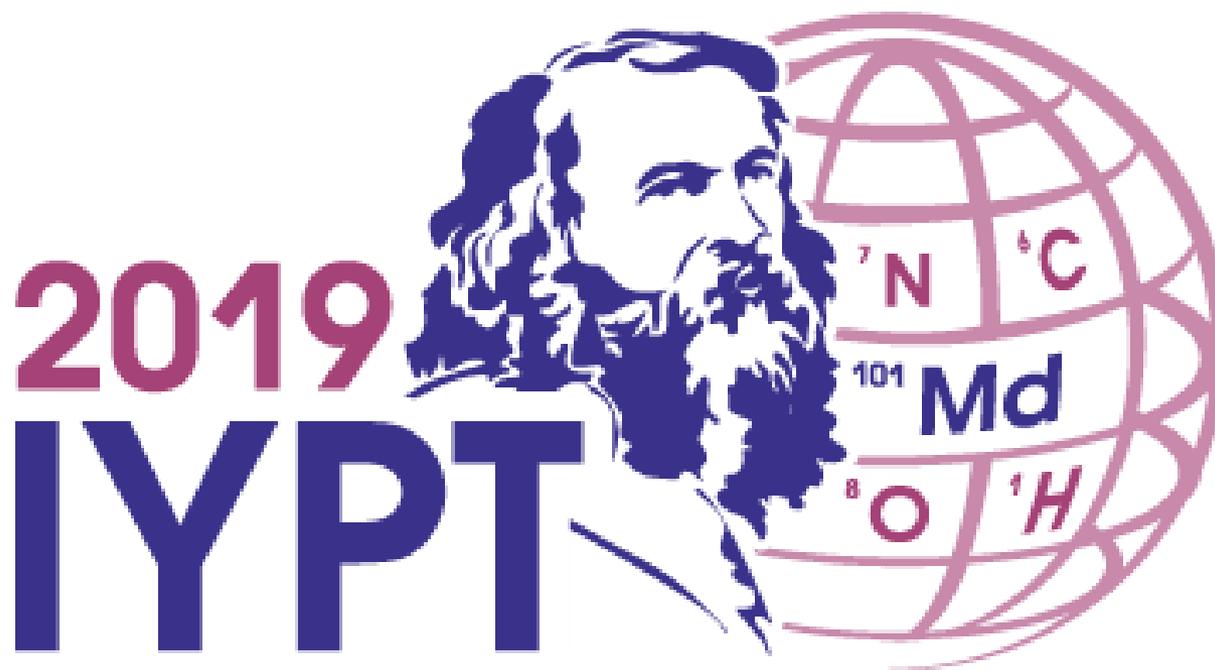
International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements

国際周期表年



閉会式(令和元年12月5日:  
東京)

# 国際周期表年



このロゴマークに書かれている元素は何？

5つの元素：

N(7番)、C(6番)、Md(101番)、O(8番)、H(1番)

このロゴマークに書かれている  
元素は何？



Md (Z=101) メンデレビウム

H (Z=1)

C (Z=6)

N (Z=7)

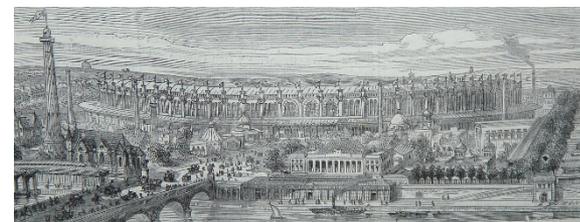
O (Z=8)

1876?

1867?

周期表

1869年



パリ万博(1867年)

メンデレーエフの名前  
(ロシア文字)? Менделеев

CHON?

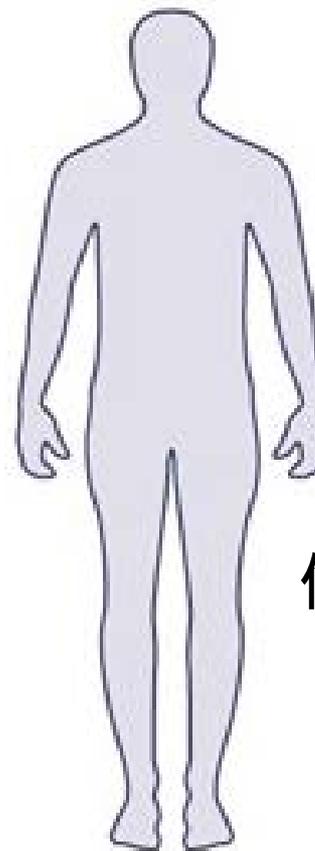
NOCH?

どうも違う...

このロゴマークに書かれている  
元素は何？



Md (Z=101) メンデレビウム



体重70kg

酸素 (O) 43 kg  
炭素 (C) 16 kg  
水素 (H) 7 kg  
窒素 (N) 1.8 kg  
カルシウム (Ca) 1.0 kg

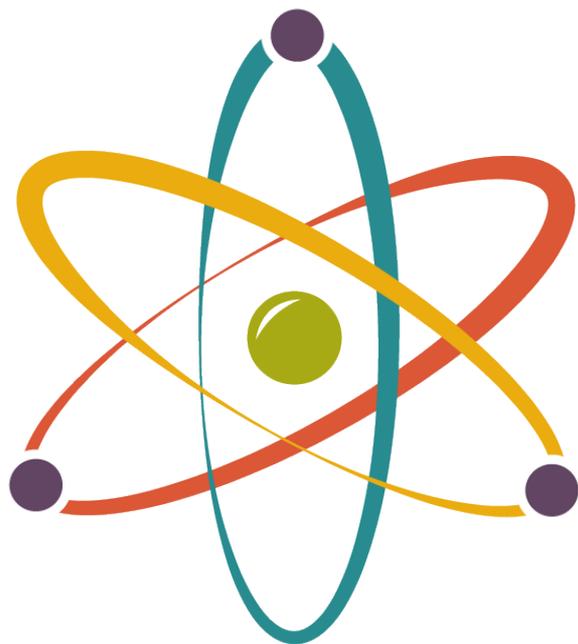


1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

## 超重元素の物理と化学で明らかにしたいこと

- 最も重い元素は何か? → 原子としての性質
- $^{208}\text{Pb}$  の次の二重魔法数核は何か? → 原子核としての性質
- 周期表はどう変わるのか、変わらないのか?
- r-プロセス元素合成にどのように影響するのか?

## 何が元素の存在限界を決めているのか？



**INTERNATIONAL  
YEAR OF THE  
PERIODIC TABLE  
2019**

考えなければならない可能性：

- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ 原子の中の原子核の安定性（←魔法数）

# 何が元素の存在限界を決めているのか？



考えなければならない可能性:

まず

- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ 原子の中の原子核の安定性

# 何が元素の存在限界を決めているのか? i) 原子中の電子の軌道

水素様原子

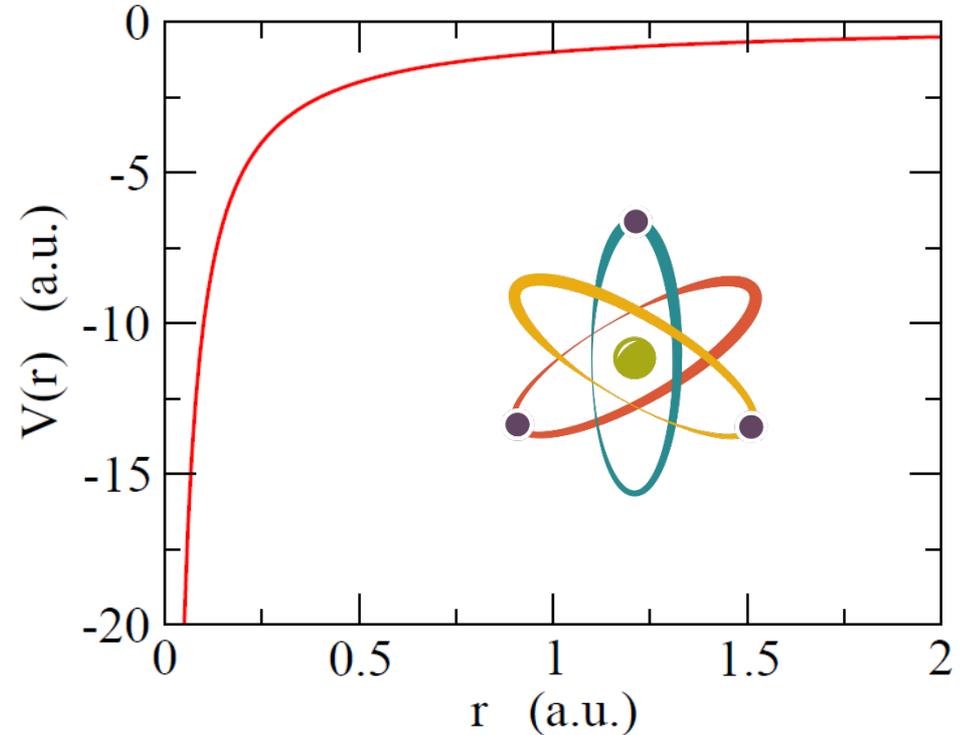
$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

1S 状態

$$E_{1S} = -Z^2 \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2}$$

$Z \rightarrow$  大、 $E_{1S} \rightarrow$  小

$\langle r \rangle \rightarrow$  小



# 何が元素の存在限界を決めているのか？ i) 原子中の電子の軌道

水素様原子

$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

1S 状態

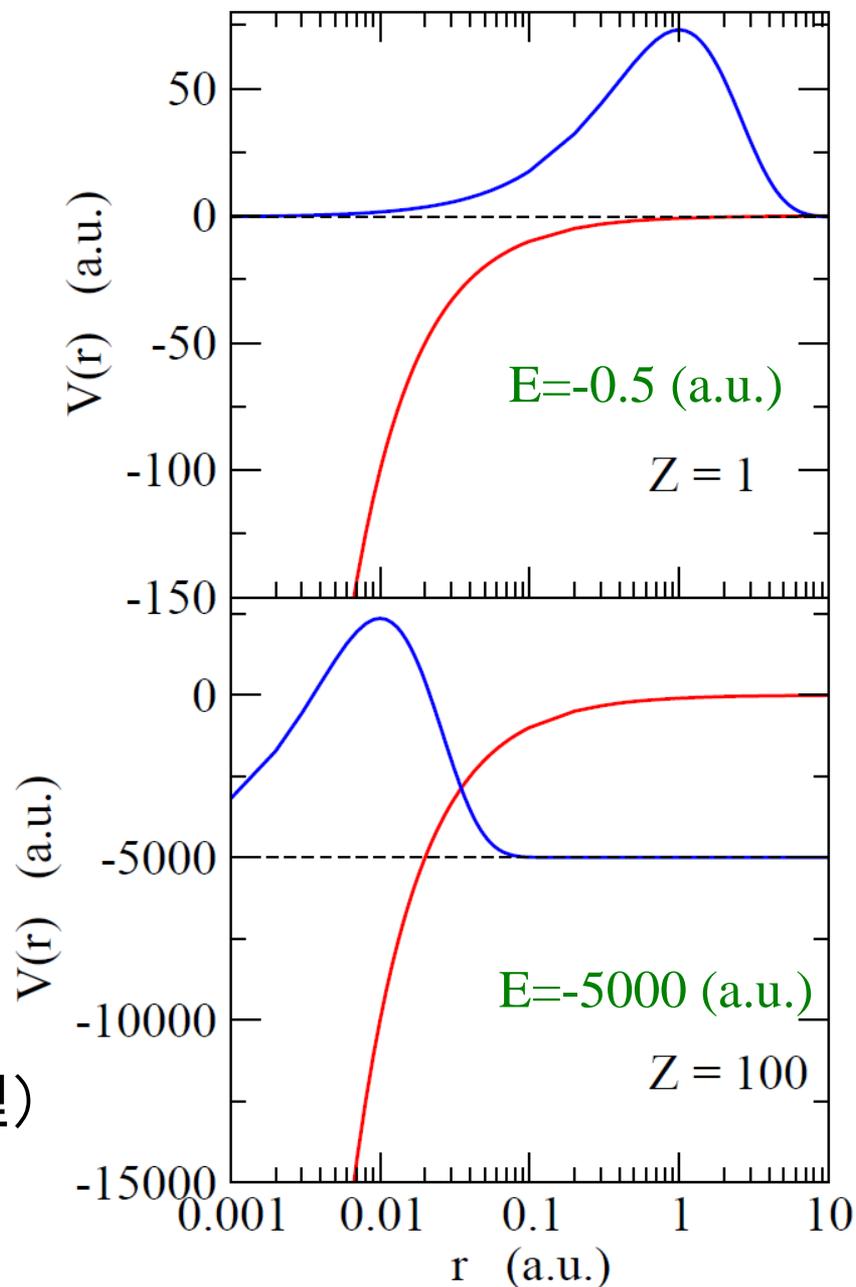
$$E_{1S} = -Z^2 \cdot \frac{me^4}{2\hbar^2}$$

$Z \rightarrow$  大、 $E_{1s} \rightarrow$  小

$\langle r \rangle \rightarrow$  小

$\langle p \rangle \rightarrow$  大 (不確定性原理)

**➡ 相対論的效果**



# 何が元素の存在限界を決めているのか？ i) 原子中の電子の軌道

水素様原子

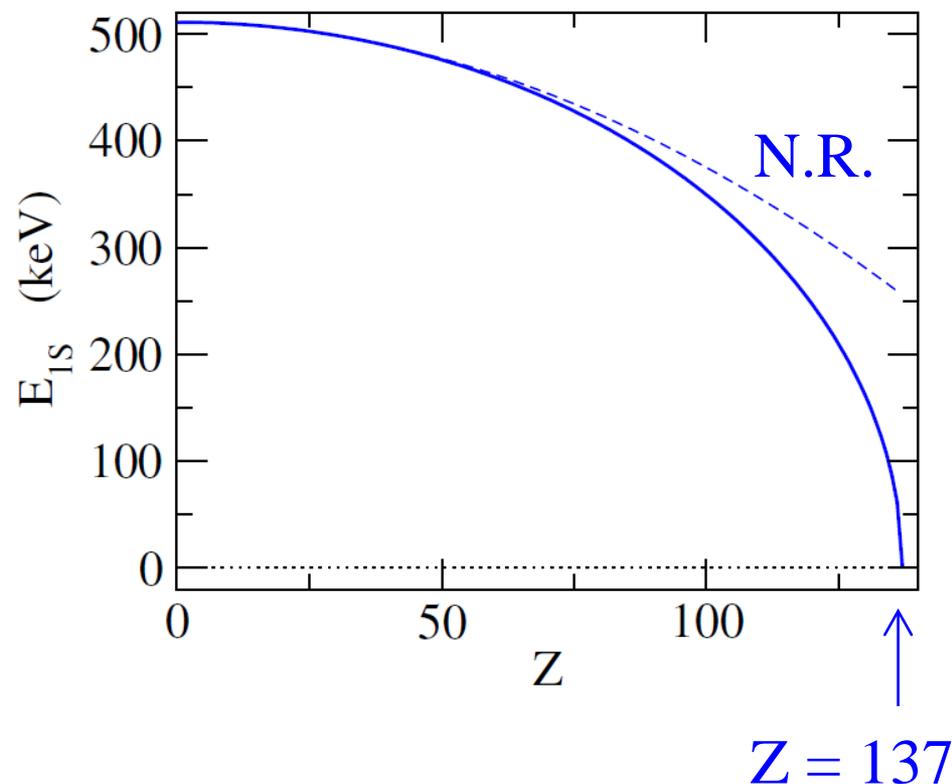
$$V(r) = -\frac{Ze^2}{r}$$

1S 状態 (ディラック方程式)

$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2}$$

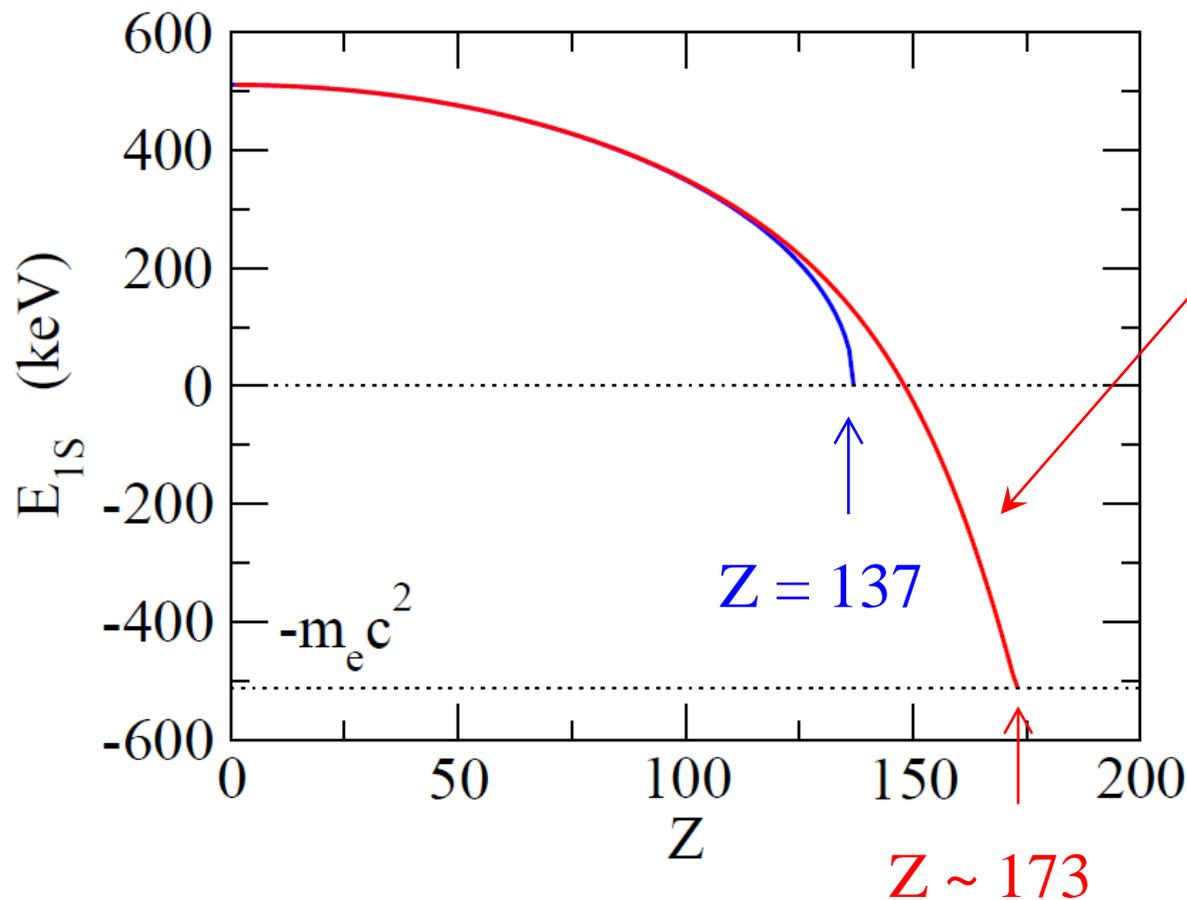
$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

$Z > 137 \rightarrow$  解は存在せず



# 何が元素の存在限界を決めているのか？ i) 原子中の電子の軌道

## 水素様原子



原子核の有限  
サイズ効果  
(一様帯電球  
を仮定)

$R_N \sim 10^{-4} \text{ \AA}$   
 $r_{ms} \sim 10^{-3} \text{ \AA}$   
( $A=173$ )

# 何が元素の存在限界を決めているのか？



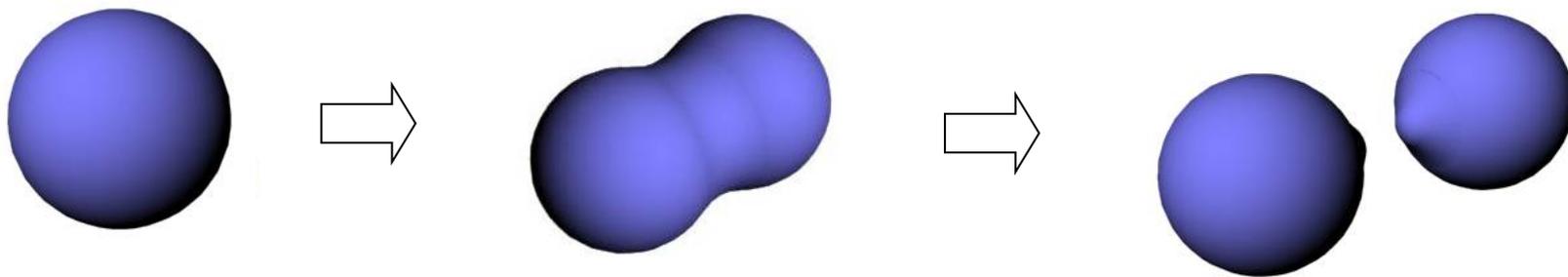
考えなければならない可能性：

**次に**

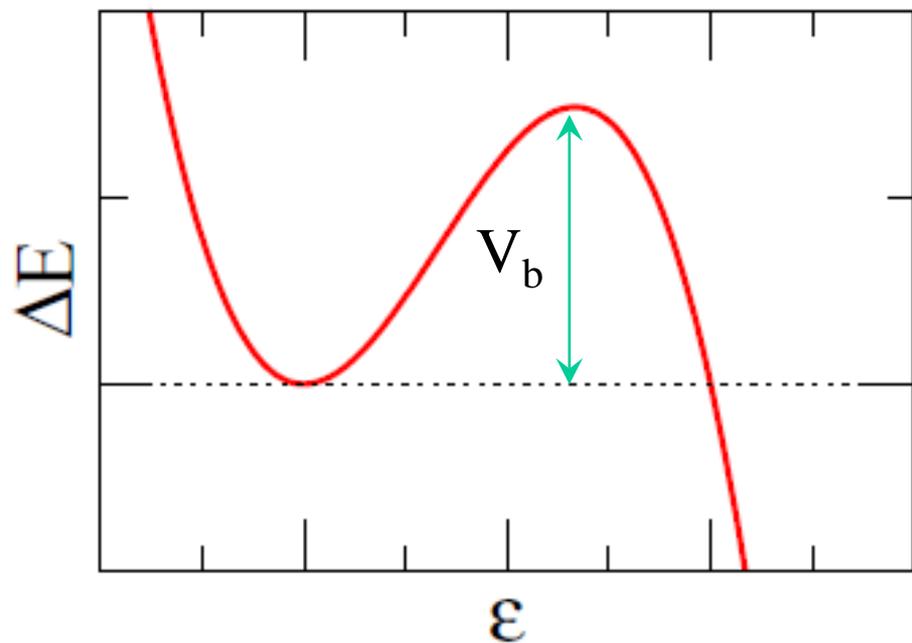
- ✓ 原子の中の電子軌道
- ✓ **原子の中の原子核の安定性**

# 何が元素の存在限界を決めているのか? ii) 原子中の原子核の寿命

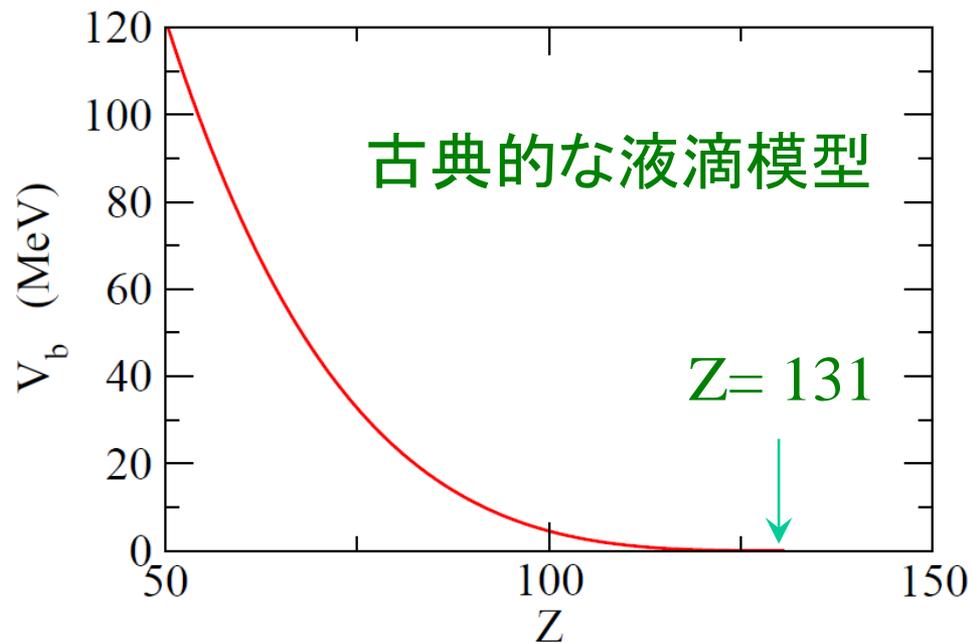
重い原子核 → 核分裂



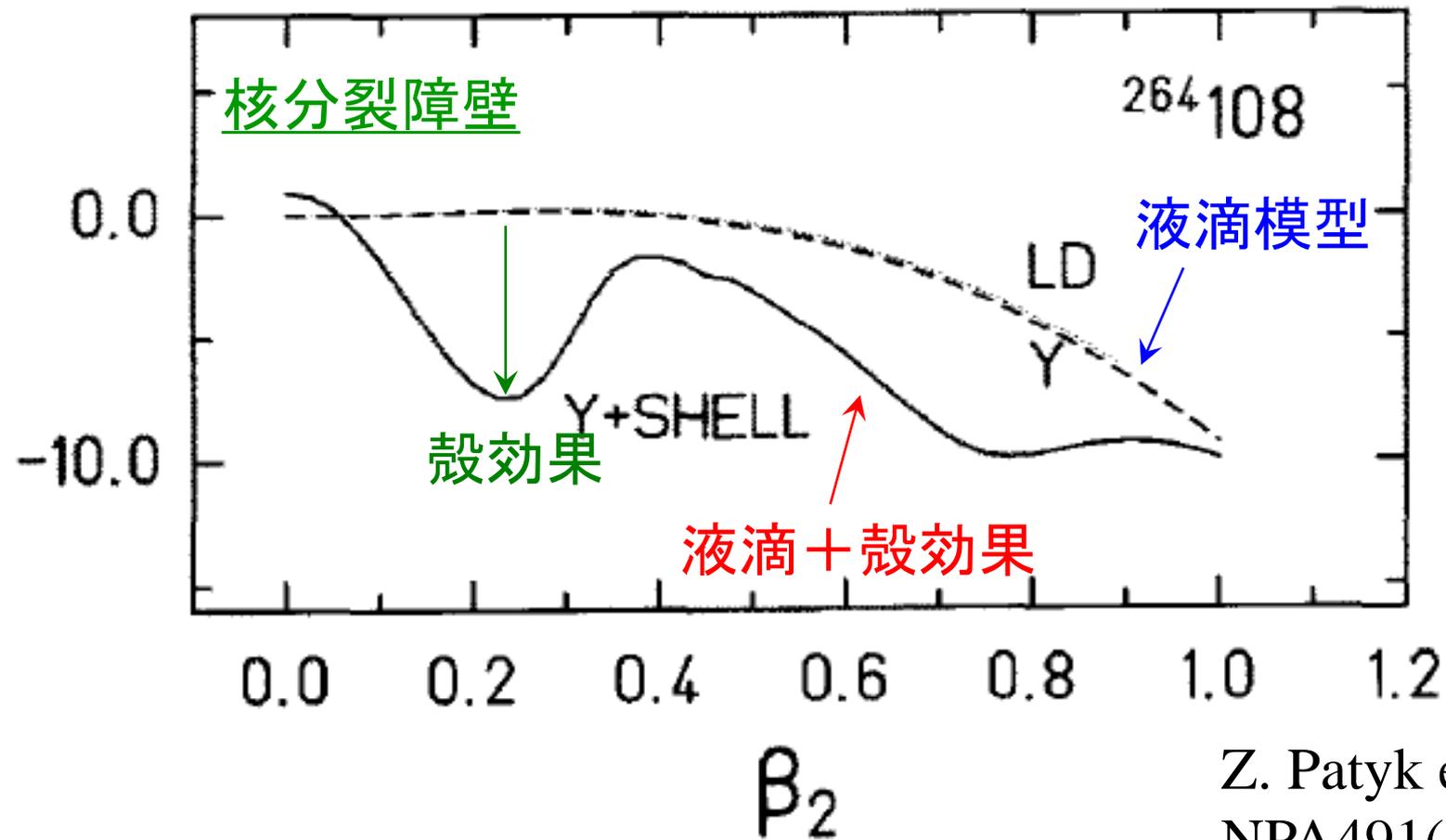
核分裂障壁



障壁の高さ



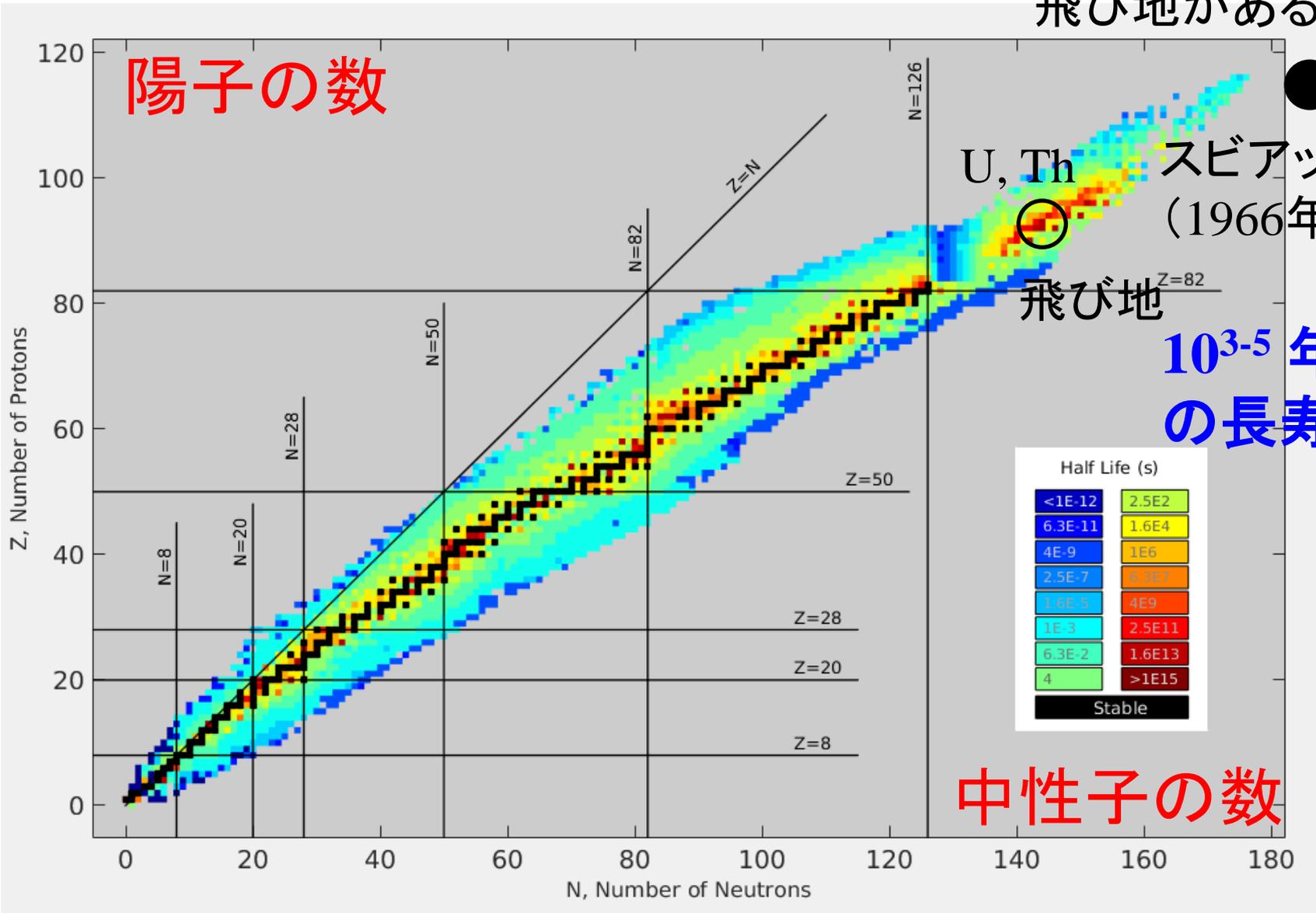
## 何が元素の存在限界を決めているのか? ii) 原子中の原子核の寿命



量子力学的効果(魔法数の効果)により核分裂障壁が高くなり原子核が安定化する

# 超重元素(安定の島)

この辺りにも安定の飛び地があるかも?



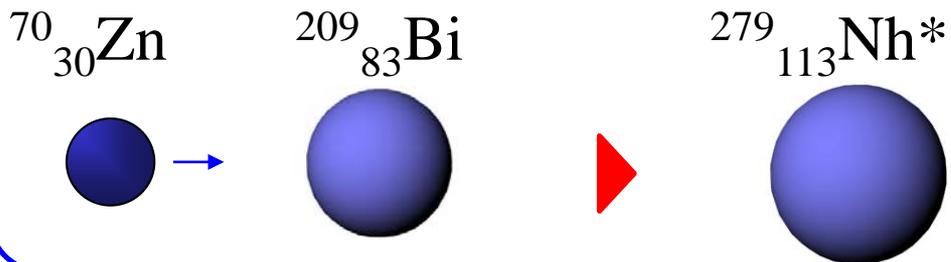
# 113番元素ニホニウム Nh

113 <b>Nh</b> nihonium	115 <b>Mc</b> moscovium
117 <b>Ts</b> tennessine	118 <b>Og</b> oganesson

2016年11月



Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											8 O	9 F	10 Ne			
3	11 Na	12 Mg											16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	34 Se	35 Br	36 Kr			
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Au	52 Te	53 I	54 Xe			
6	55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	84 Po	85 At	86 Rn			
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
	* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				



重イオン核融合反応

ところで



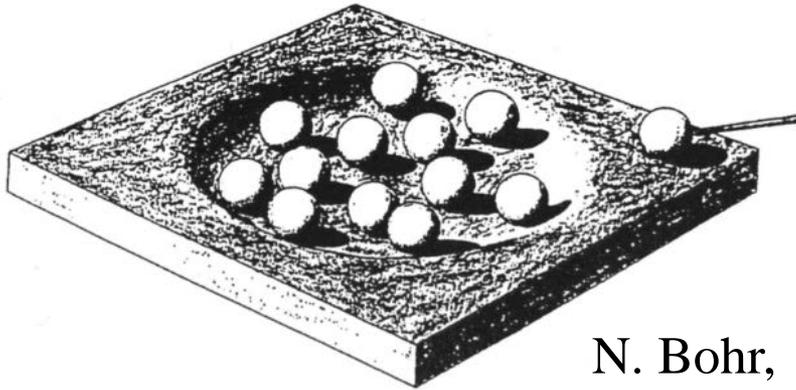
中国

「国家語言委員会」が新しい  
漢字を制定

# 核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

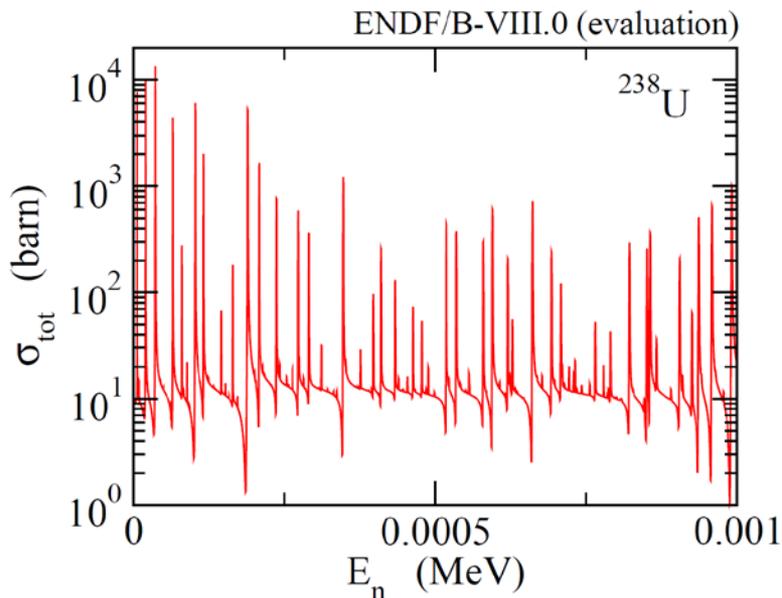
原子核による中性子の吸収 → 複合核



N. Bohr,  
Nature 137 ('36) 351



Wikipedia

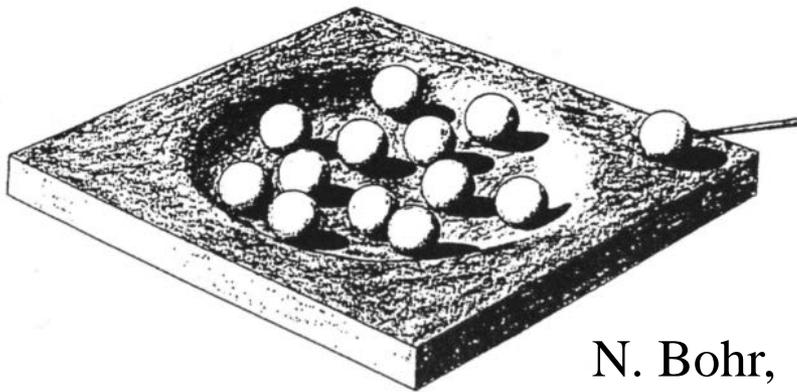


cf. フェルミの実験 (1935)  
MeV スケールの原子核に  
eV スケールの幅の多数の共鳴状態

# 核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

原子核による中性子の吸収 → 複合核

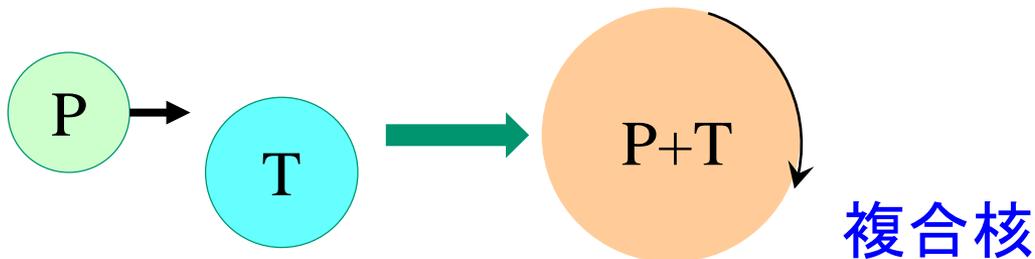


N. Bohr,  
Nature 137 ('36) 351

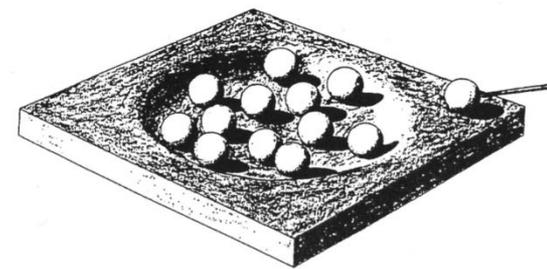
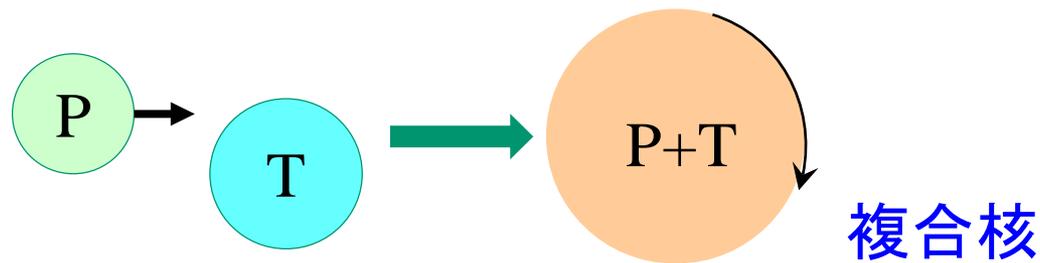


Wikipedia

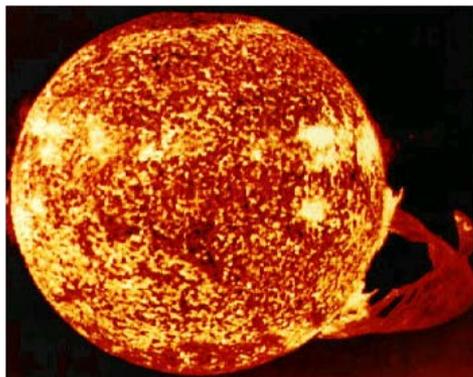
重イオン反応で複合核をつくる = 重イオン核融合反応



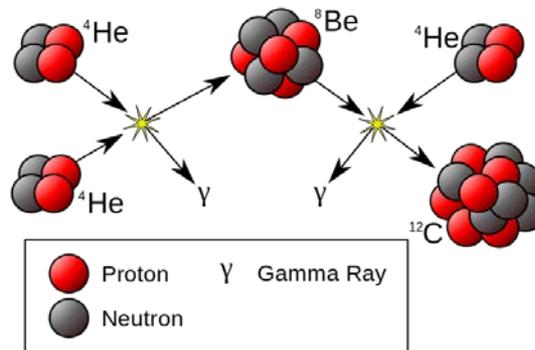
# 核融合反応： 複合核生成反応



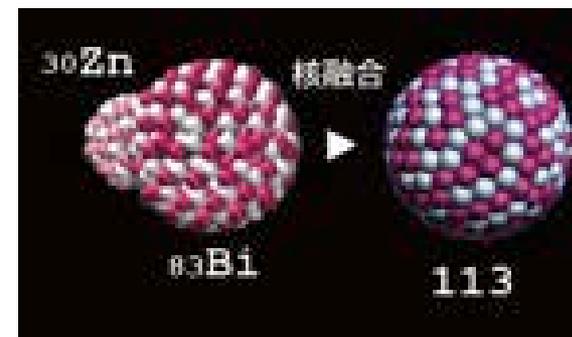
cf. N. Bohr '36



恒星のエネルギー源 (Bethe '39)



元素合成

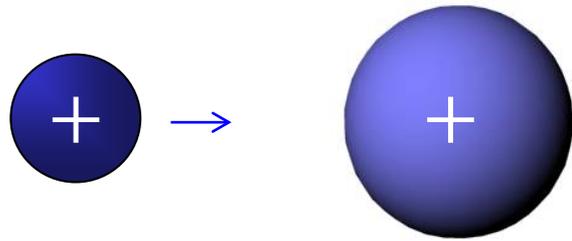


超重元素の合成

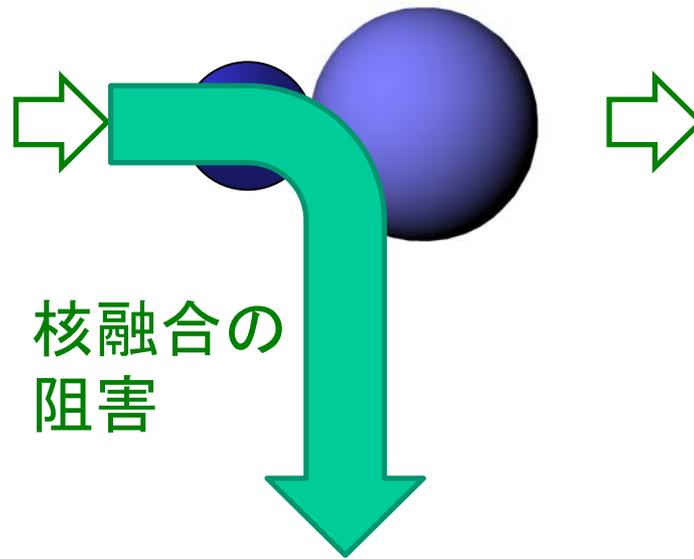
核融合・核分裂: 強い相互作用をする量子多体系の大振幅集団運動

← 微視的理解: 核物理における究極の未解決問題の一つ

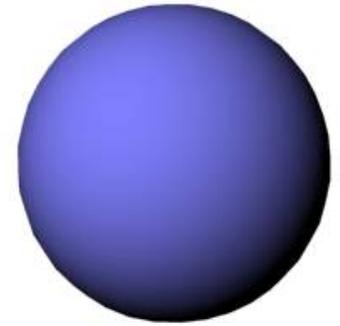
# 超重元素領域の核融合反応：阻害現象



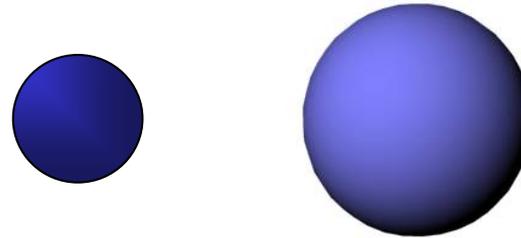
加速器



核融合の  
阻害

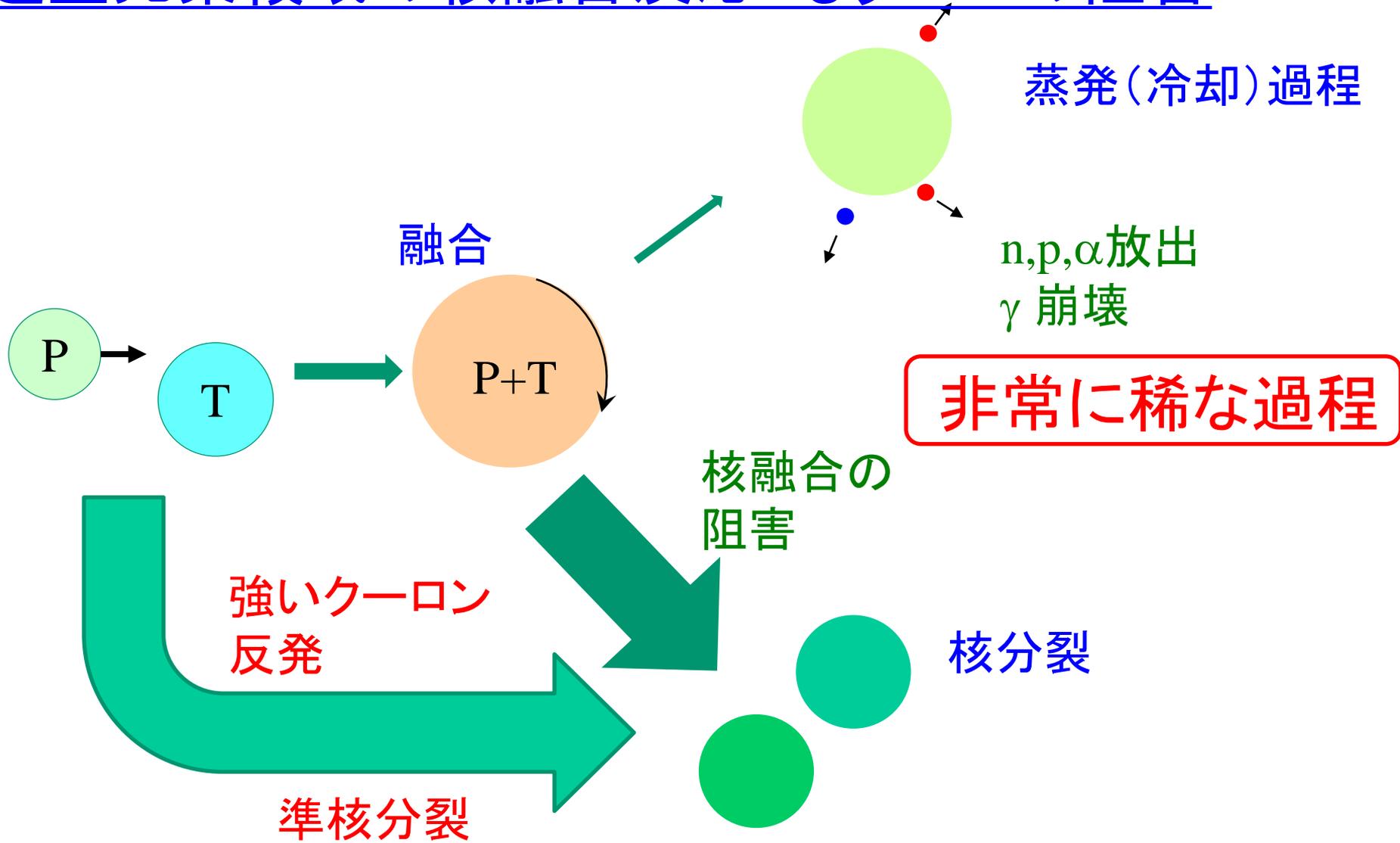


複合核

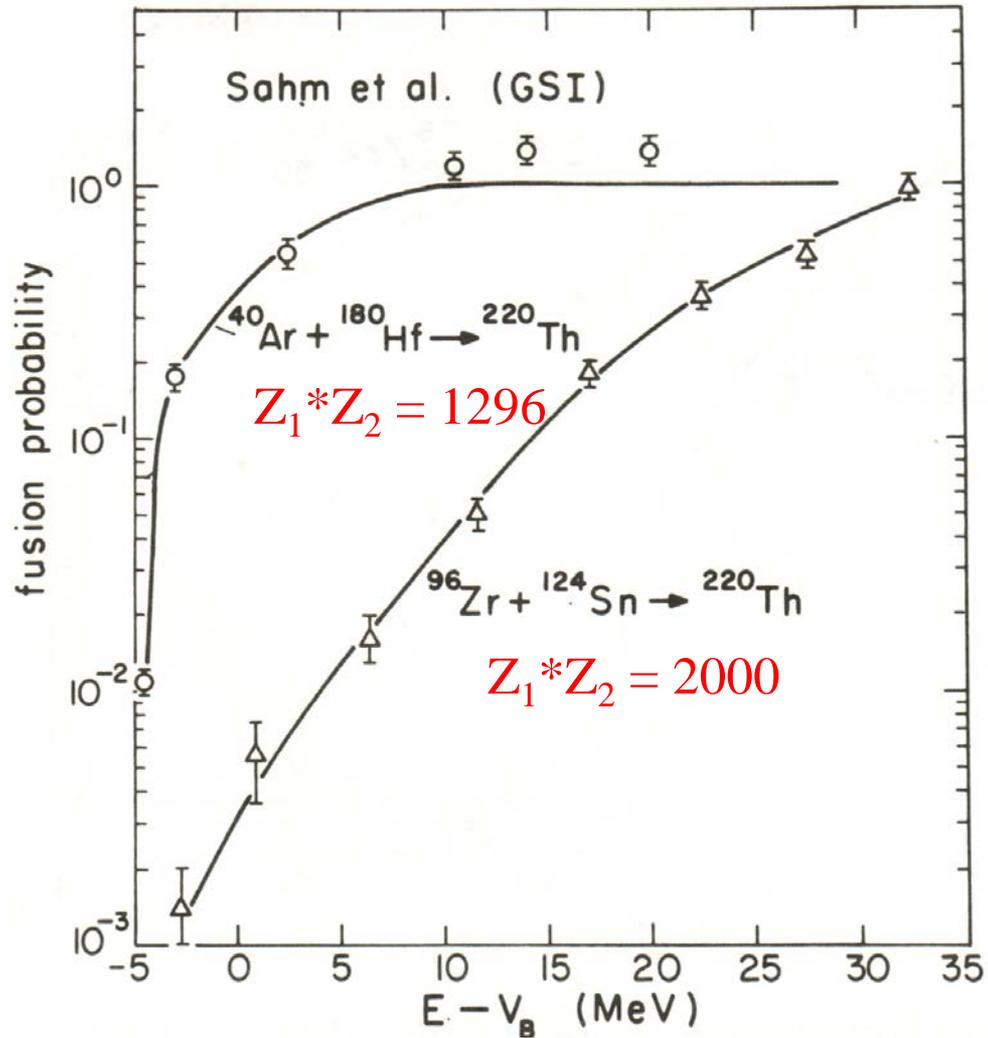


強いクーロン反発  
→ 再分離

# 超重元素領域の核融合反応：もう一つの障害

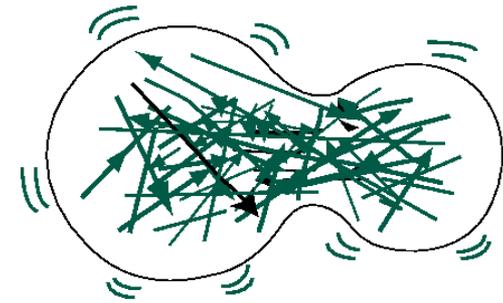
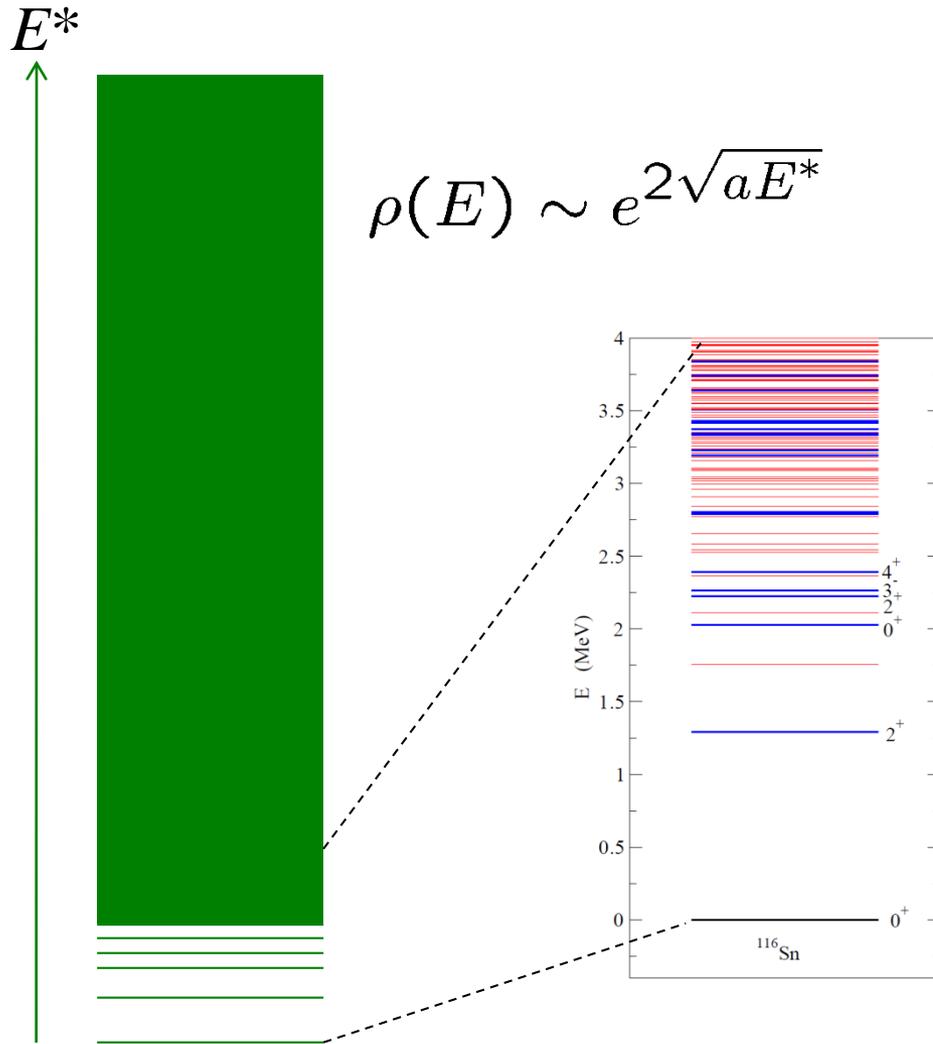


# fusion hindrance

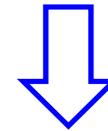


C.C. Sahm et al.,  
Z. Phys. A319 ('84) 113

# 原子核の摩擦と重イオン核融合反応



核反応の途中で複雑に励起

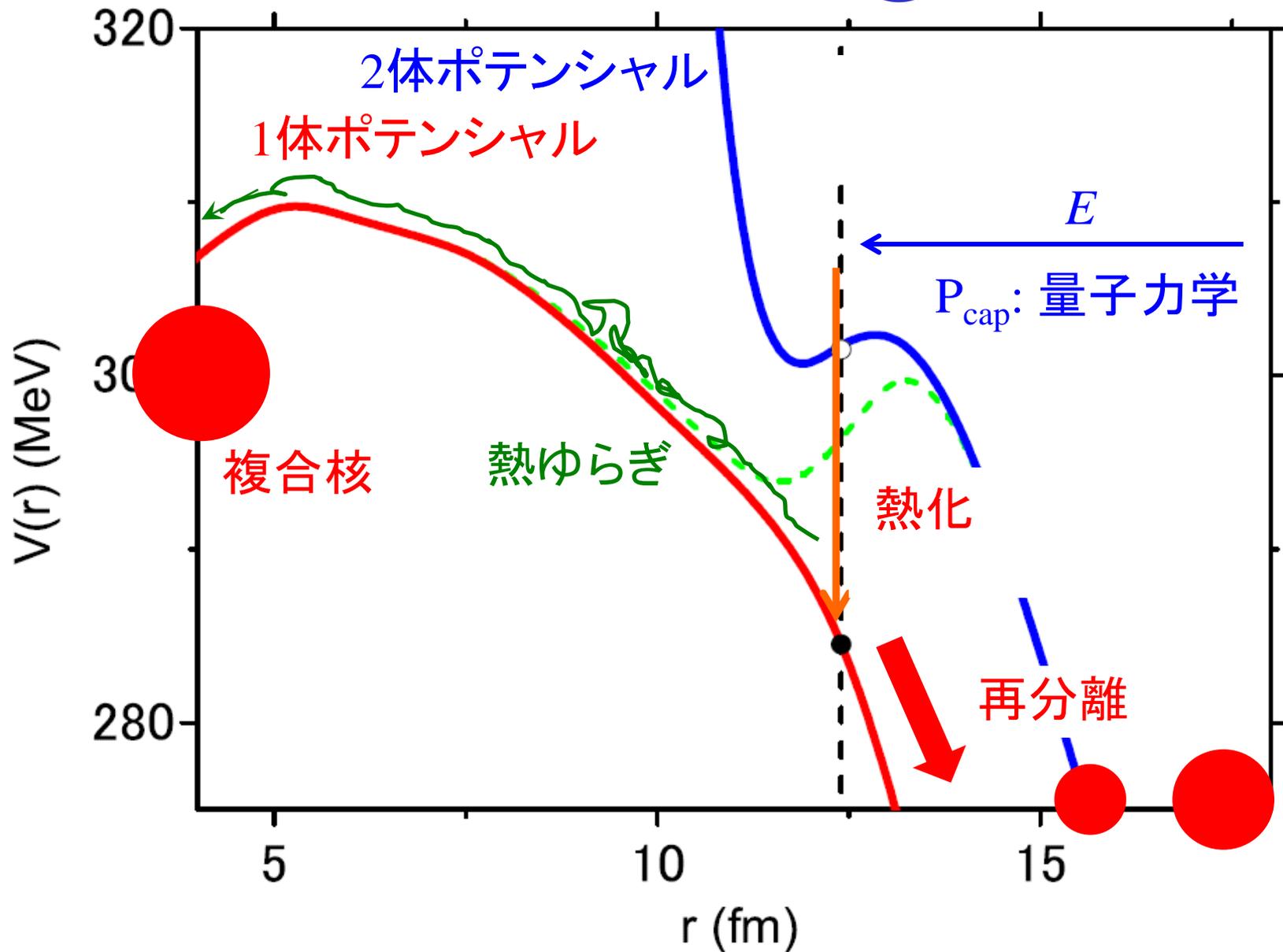
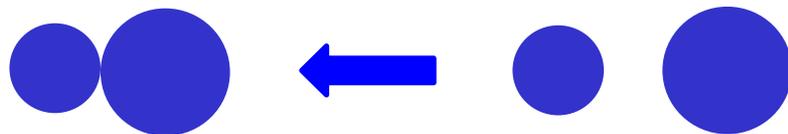


原子核の内部自由度:「環境」  
「内的環境自由度」

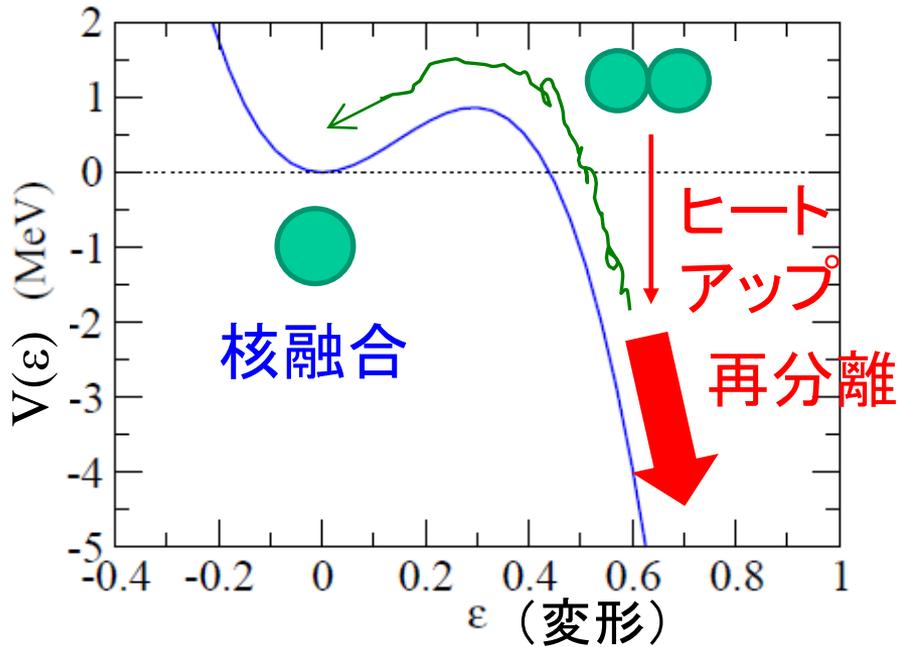
→ 摩擦

原子核のスペクトル

# 超重核生成反応



# ランジュバン法



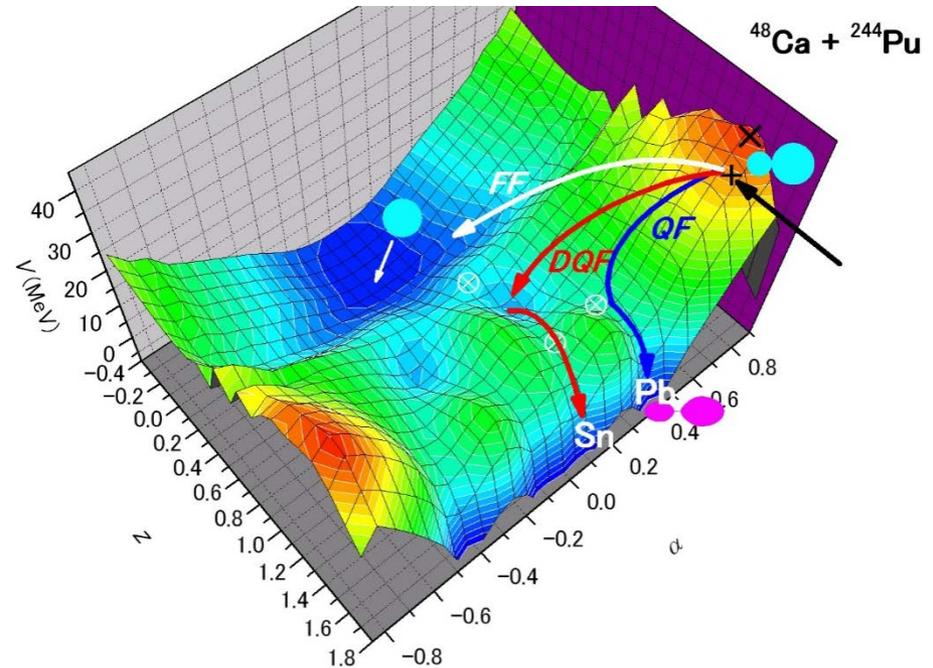
## 熱的拡散

→ ランジュバン法  
(ブラウン運動)

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = - \frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

## 多次元化

- ・フラグメント間距離
- ・フラグメントの変形
- ・2つのフラグメントの質量非対称度



- ✓ 和田、阿部、Boilley
- ✓ 有友、太田
- ✓ 千葉

# 理論: ランジュバン法

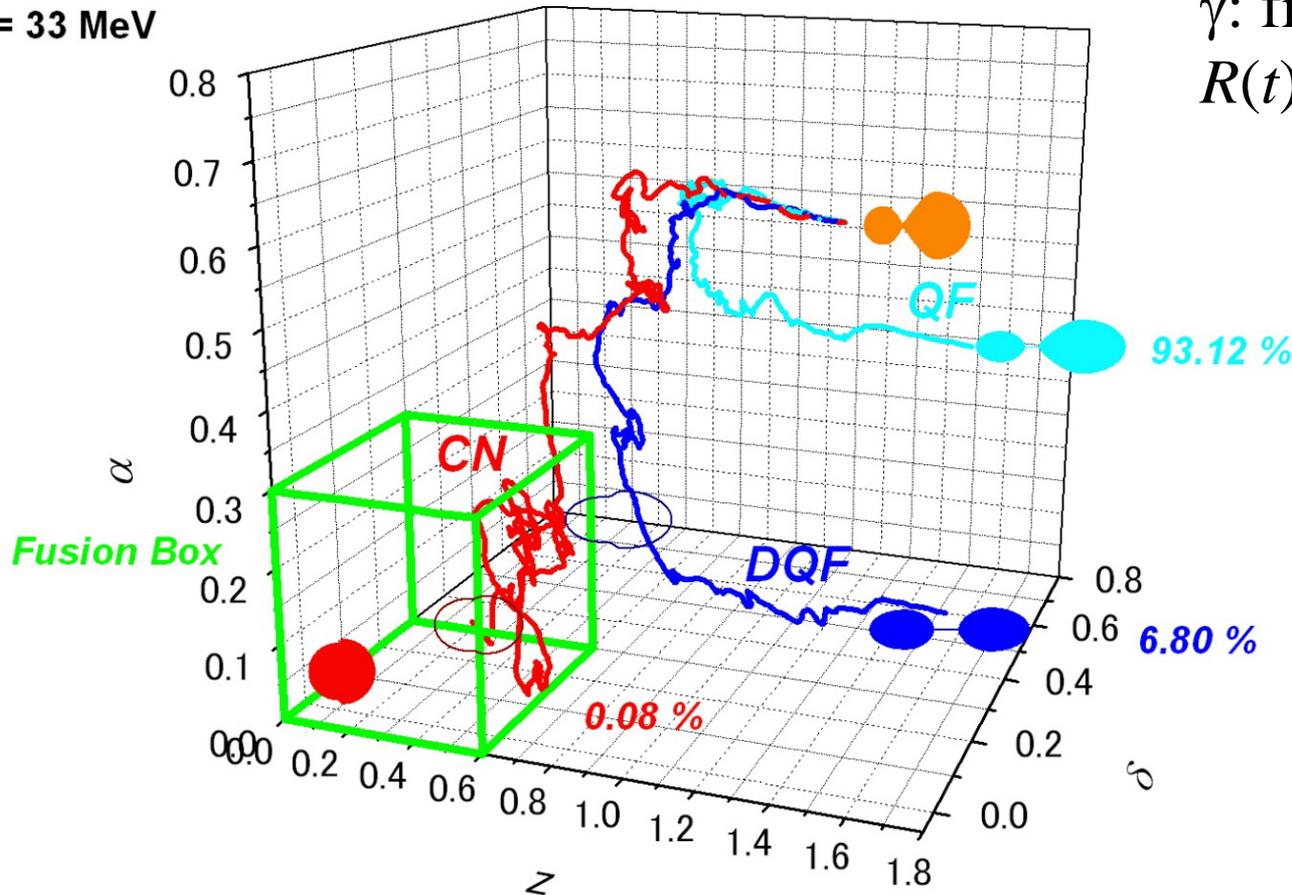
multi-dimensional extension of:

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = - \frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

$\gamma$ : friction coefficient  
 $R(t)$ : random force



$E^* = 33 \text{ MeV}$



# 超重元素反応の新モデル: TDHF + Langevin アプローチ

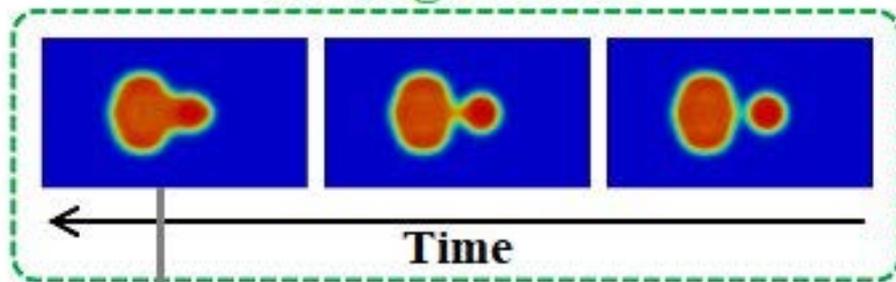
K. Sekizawa and K.H., PRC99 (2019) 051602(R)



## TDHF+Langevin:

a new hybrid model of fusion reactions for superheavy elements

### 1st stage: TDHF



3rd stage:  
statistical model



2nd stage:  
Langevin model

$^{48}\text{Ca}$ はどのように特別か?

System	CN (fm)	$R_{\min}$	$P_{\text{fus}}$ ( $\times 10^{13}$ )	
$^{48}\text{Ca} + ^{254}\text{Fm}$	302	120	12.93	302
$^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm}$	302	120	13.09	2.47
$^{51}\text{V} + ^{249}\text{Bk}$	300	120	12.94	0.461
$^{48}\text{Ca} + ^{257}\text{Fm}$	305	120	12.94	1.82

# 理論物理学としての課題

超重元素の生成: 非常に稀な過程

→ 大きな理論的不定性

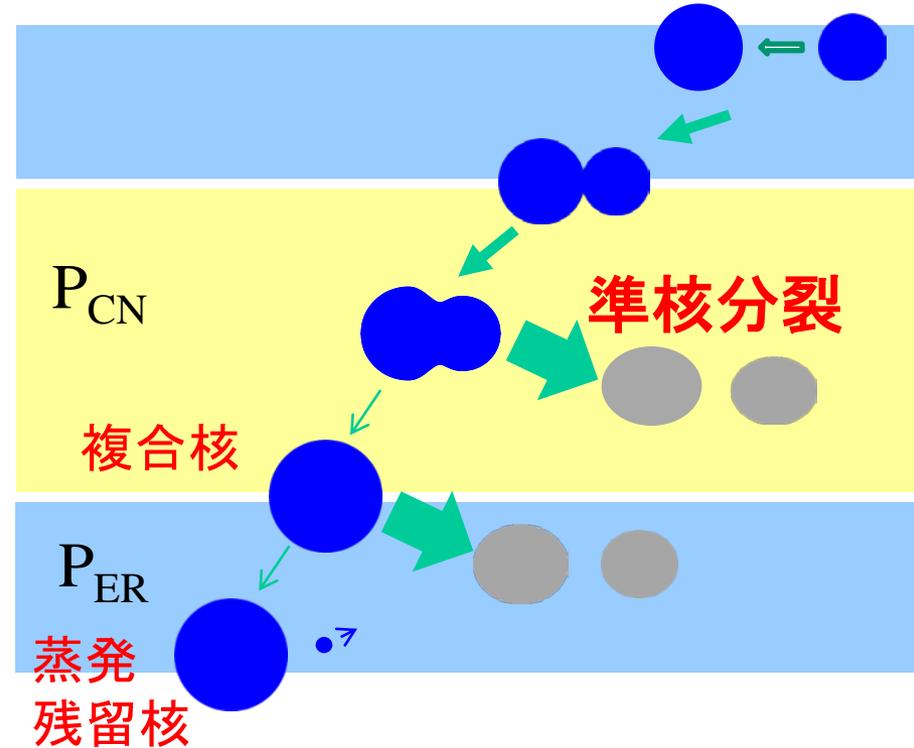
- ✓  $P_{\text{CN}}$  に対する実験データがない
- ✓ 実験データは  $P_{\text{ER}}$  のみ

CN=複合核、ER=蒸発残留核

挑戦的課題:  
いかに理論的不定性を小さくして  
信頼できる理論予言が出来るか?

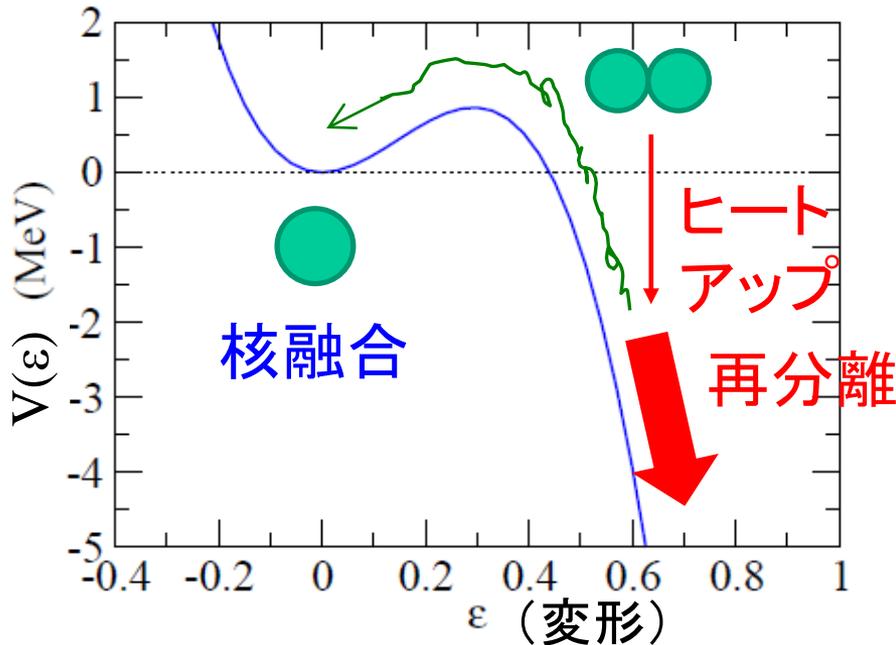
量子開放系の物理

## 核融合阻害の現代的理解



強いクーロン反発  
→ 複合核を作る前に再分離

# ランジュバン法



## ランジュバン方程式

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = -\frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

cf. QGP における  
熱化の問題

## 理論物理学としての課題

- ✓どのように熱化するのか?メカニズムは?
- ✓そもそも、「熱平衡」を仮定していいのか?
- ✓マルコフ過程で本当にいいのか?
- ✓量子効果?
- ✓量子系から古典系へデコヒーレンス?

微視的模型?

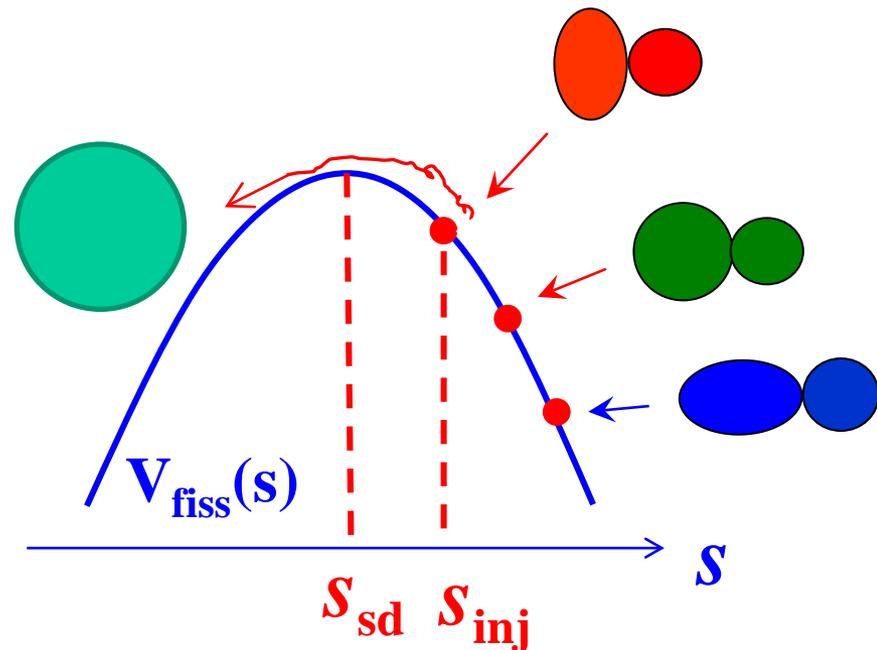
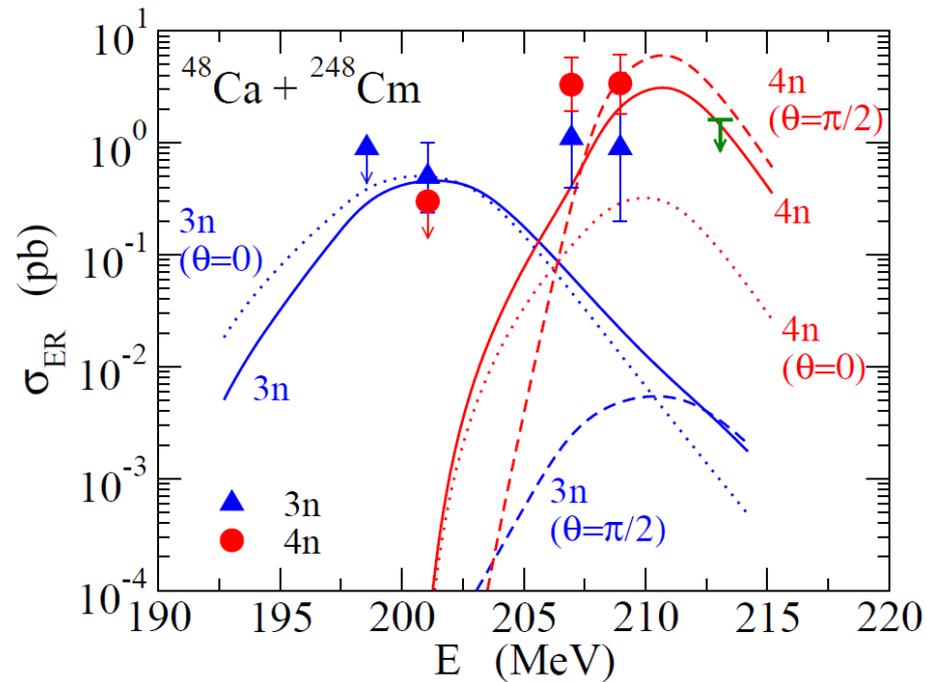
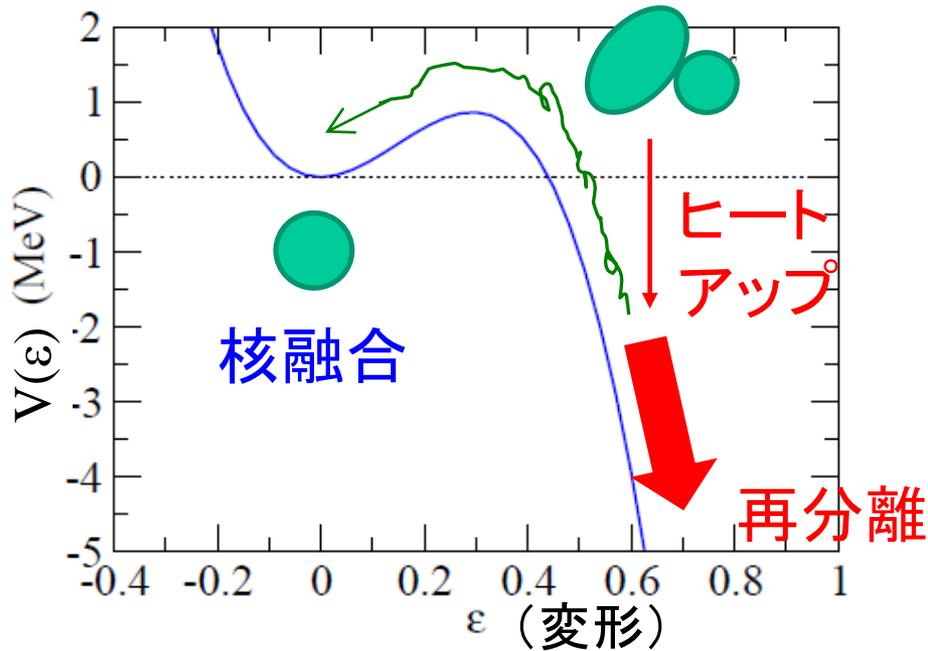
量子開放系の物理

# 関連した話題

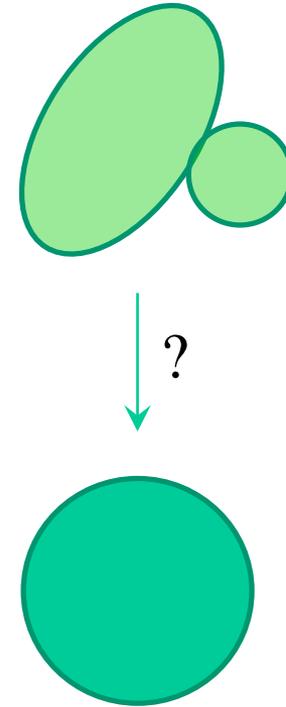
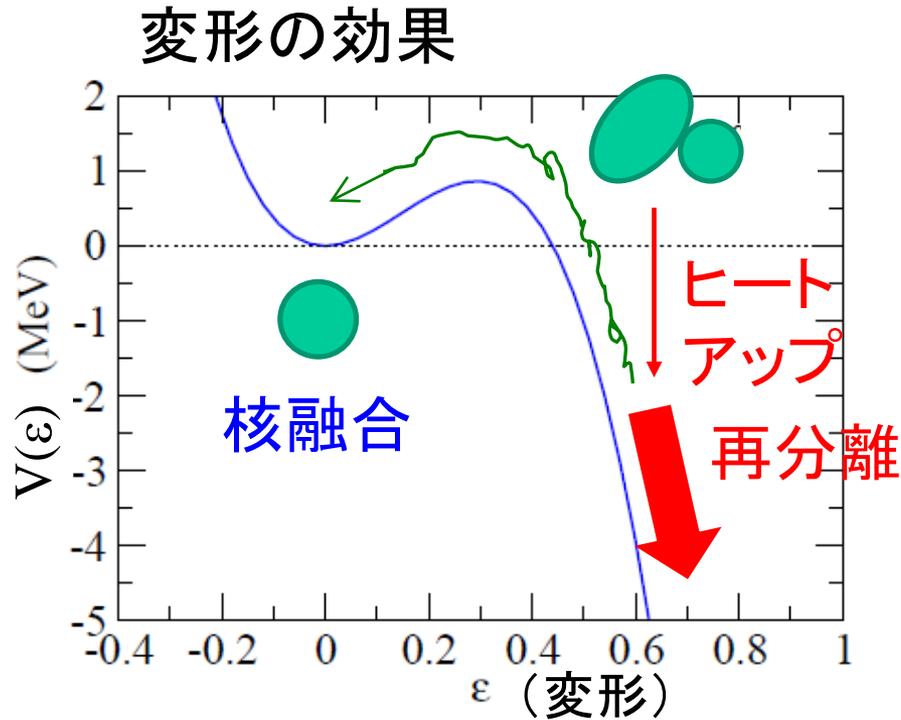
熱い核融合:

$^{48}\text{Ca}$  入射核 + 変形標的核

## 変形の効果



# 熱い核融合： $^{48}\text{Ca}$ 入射核 + 変形標的核を用いた核融合反応



## 未解決の問題

- どのように形状が進化して複合核になっていくのか?
- 変形: 量子効果  
ヒート・アップの過程でどのように変形が小さくなっていくのか?

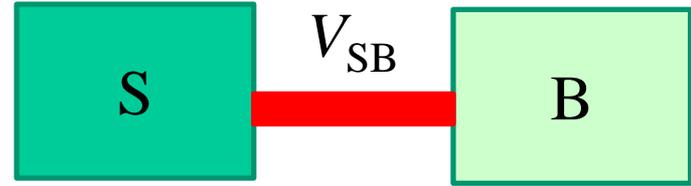
摩擦の量子論

# 量子開放系のモデリング

i) system + bath

$$H = H_S + H_B + V_{SB}$$

- ✓ Caldeira-Leggett
- ✓ Feynmann-Vernon



解き方:

a) B (bath) を消去  
→ S に対する eff. action  
(影響汎関数)

$$\text{b) } \rho_S = \text{Tr}_B[\rho]$$
$$\rightarrow i\hbar\dot{\rho}_S = \dots$$

Markov近似をすると  
Lindblad 方程式

c)  $H_B$  の固有状態で波動関数を展開(結合チャンネル方程式)

M. Tokieda and K.H.,  
Ann. of Phys. ('19)

cf. QGP における重いクォークの  
振る舞い: Y. Akamatsu, PRD91('15)

# 量子開放系に対する新しい結合チャンネル計算

M. Tokieda and K.H., Ann. of Phys. ('19)

$$H_{\text{tot}} = H_S + \underbrace{\sum_i \hbar\omega_i a_i^\dagger a_i}_{\text{環境}} + \underbrace{h(q) \sum_i d_i (a_i^\dagger + a_i)}_{\text{結合}}$$

注目する系      結合

ナイーブな結合チャンネル方程式:

$$\Psi_{\text{tot}}(q, t) = \sum_{\{n_i\}} \psi_{\{n_i\}}(q, t) |\{n_i\}\rangle; \quad |\{n_i\}\rangle = \prod_i \frac{1}{\sqrt{n_i!}} (a_i^\dagger)^{n_i} |0\rangle$$

➡  $\langle \{n_i\} | i\hbar \frac{\partial}{\partial t} | \Psi_{\text{tot}} \rangle = \langle \{n_i\} | H_{\text{tot}} | \Psi_{\text{tot}} \rangle$

➡  $\psi_{\{n_i\}}(q, t)$  に対する結合方程式

環境の振動子のモードの数が多いと無理

$$H_{\text{tot}} = H_S + \sum_i \hbar \omega_i a_i^\dagger a_i + h(q) \sum_i d_i (a_i^\dagger + a_i)$$

➡ もっと効率のいい基底を定義しなおす

$$e^{-i\omega t} \sim \sum_{k=1}^K \eta_k(\omega) u_k(t)$$

展開基底  
係数

cf. 相関関数

$$L(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \frac{J(\omega)}{1 - e^{-\beta \hbar \omega}} e^{-i\omega t}$$

cf. 階層型運動方程式

Y. Tanimura and R. Kubo,  
J. Phys. Soc. Jpn 58 ('89)101

➡

$$b_k^\dagger = \sum_i \frac{d_i}{\hbar} \eta_k(\omega_i) a_i^\dagger$$

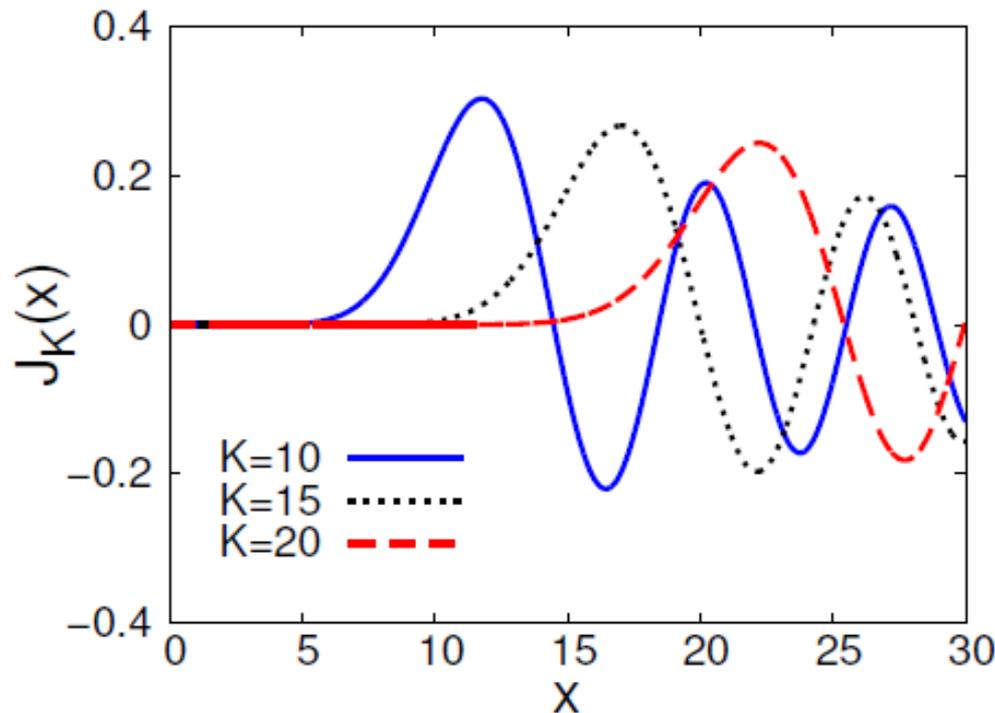
$$\Psi_{\text{tot}}(q, t) = \sum_{\{\tilde{n}_k\}} \tilde{\psi}_{\{\tilde{n}_k\}}(q, t) |\{\tilde{n}_k\}\rangle; \quad |\{\tilde{n}_k\}\rangle = \prod_{k=1}^K \frac{1}{\sqrt{\tilde{n}_k!}} (b_k^\dagger)^{\tilde{n}_k} |0\rangle$$

$$e^{-i\omega t} \sim \sum_{k=1}^K \eta_k(\omega) u_k(t) \quad \longrightarrow \quad b_k^\dagger = \sum_i \frac{d_i}{\hbar} \eta_k(\omega_i) a_i^\dagger$$

実際にはベッセル関数で展開 (Jacobi-Anger identity):

$$e^{-i\omega t} = J_0(\Omega t) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-i)^k T_k \left( \frac{\omega}{\Omega} \right) J_k(\Omega t)$$

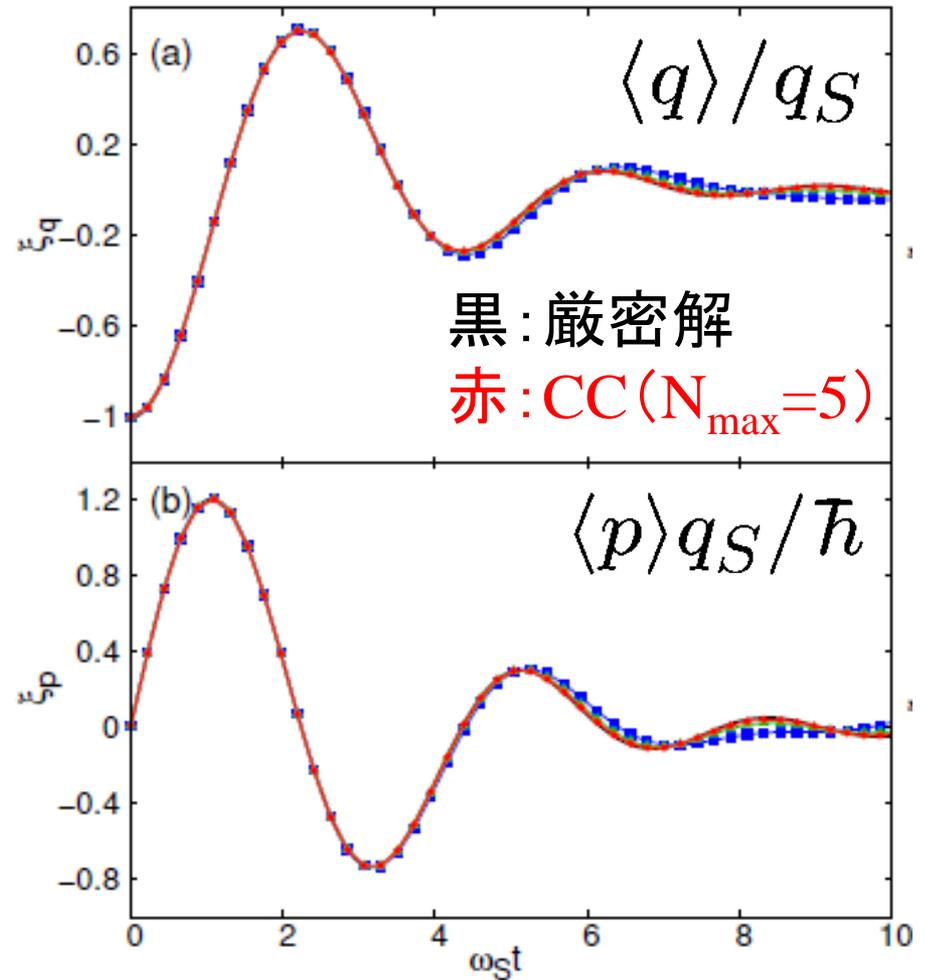
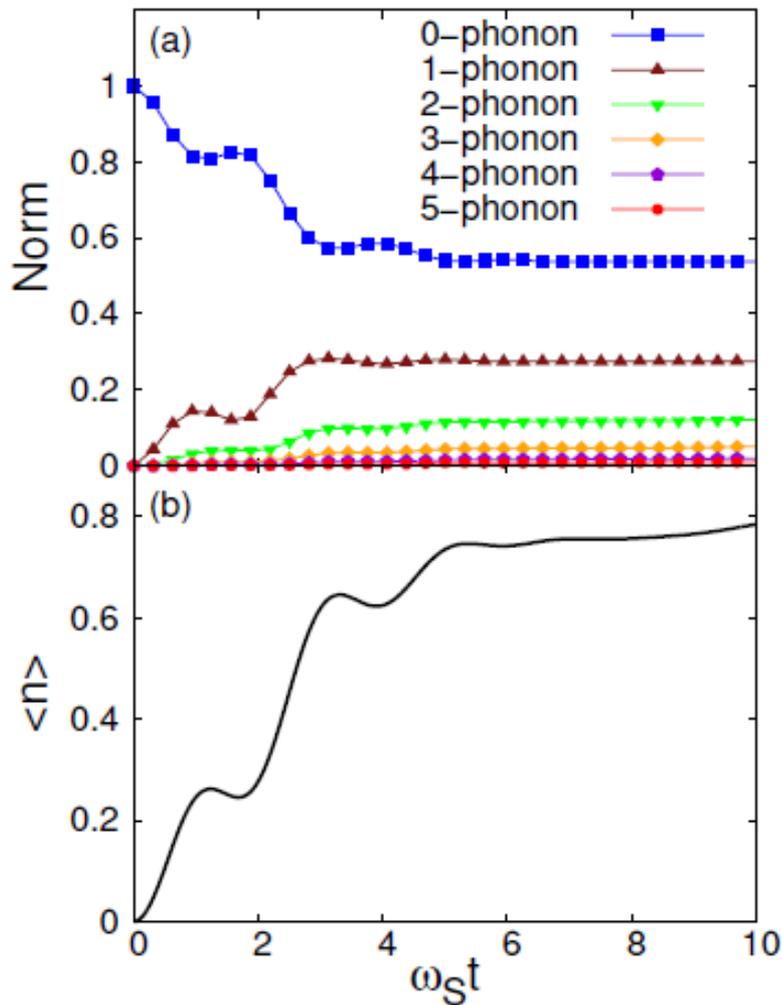
チェビシエフ多項式



*t* が小さい領域では大きな *k* は効かない

# 減衰振動への応用: 調和振動子+環境 (振動子は連続分布)

K=20 までのベッセル関数で展開



# 量子開放系のモデリング

i) system + bath

$$H = H_S + H_B + V_{SB}$$

- ✓ Caldeira-Leggett
- ✓ Feynmann-Vernon

解き方:

- S に対する eff. action  
(影響汎関数)
- Lindblad 方程式
- 結合チャンネル方程式

- 微視的アプローチ
- でも、解くのは大変

ii) 量子摩擦模型

$$\frac{d}{dt}\langle p \rangle = -\langle V'(x) \rangle - \gamma \langle p \rangle$$

となるようなハミルトニアンを作る

- ✓ E. Kanai, PTP 3 ('48)
- ✓ M.D. Kostin, JCP 57 ('72)
- ✓ K. Albrecht, PLB56 ('75)
- ✓ K.-K. Kan & J.-J. Griffin, PLB50 ('74)

# 摩擦の量子論

## 古典的な運動方程式

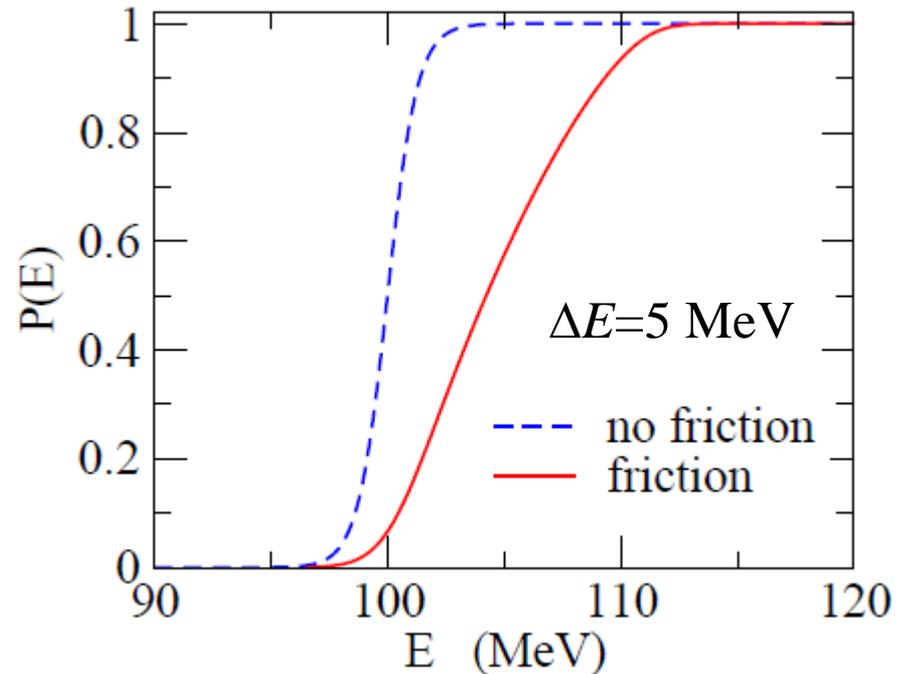
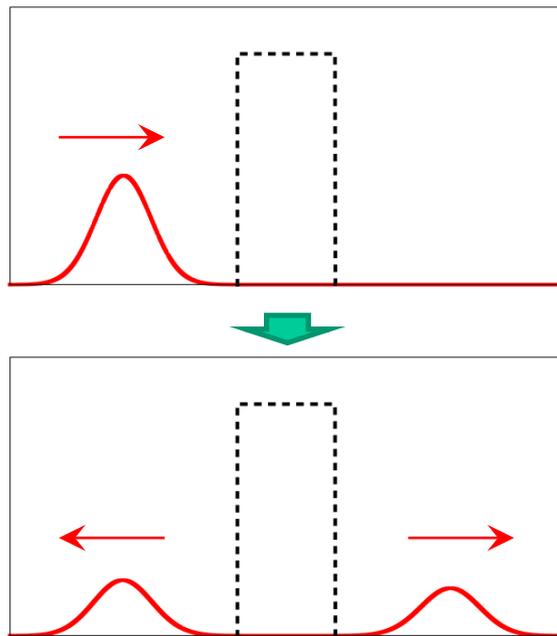
$$\dot{p} = -V'(x) - \gamma p$$

量子化の一形式: Kanai(金井)モデル (E. Kanai, PTP 3 (1948) 440)

$$H = \frac{p^2}{2m} + V(x) \rightarrow \frac{\pi^2}{2m} e^{-\gamma t} + e^{\gamma t} V(x) \quad (\pi = e^{\gamma t} p)$$

➡  $\frac{d}{dt} \langle p \rangle = -\langle V'(x) \rangle - \gamma \langle p \rangle$

## 時間に依存する波束法



# 量子開放系のモデリング

i) system + bath

$$H = H_S + H_B + V_{SB}$$

- ✓ Caldeira-Leggett
- ✓ Feynmann-Vernon

解き方:

- S に対する eff. action  
(影響汎関数)
- Lindblad 方程式
- 結合チャンネル方程式

- 微視的アプローチ
- でも、解くのは大変

ii) 量子摩擦模型

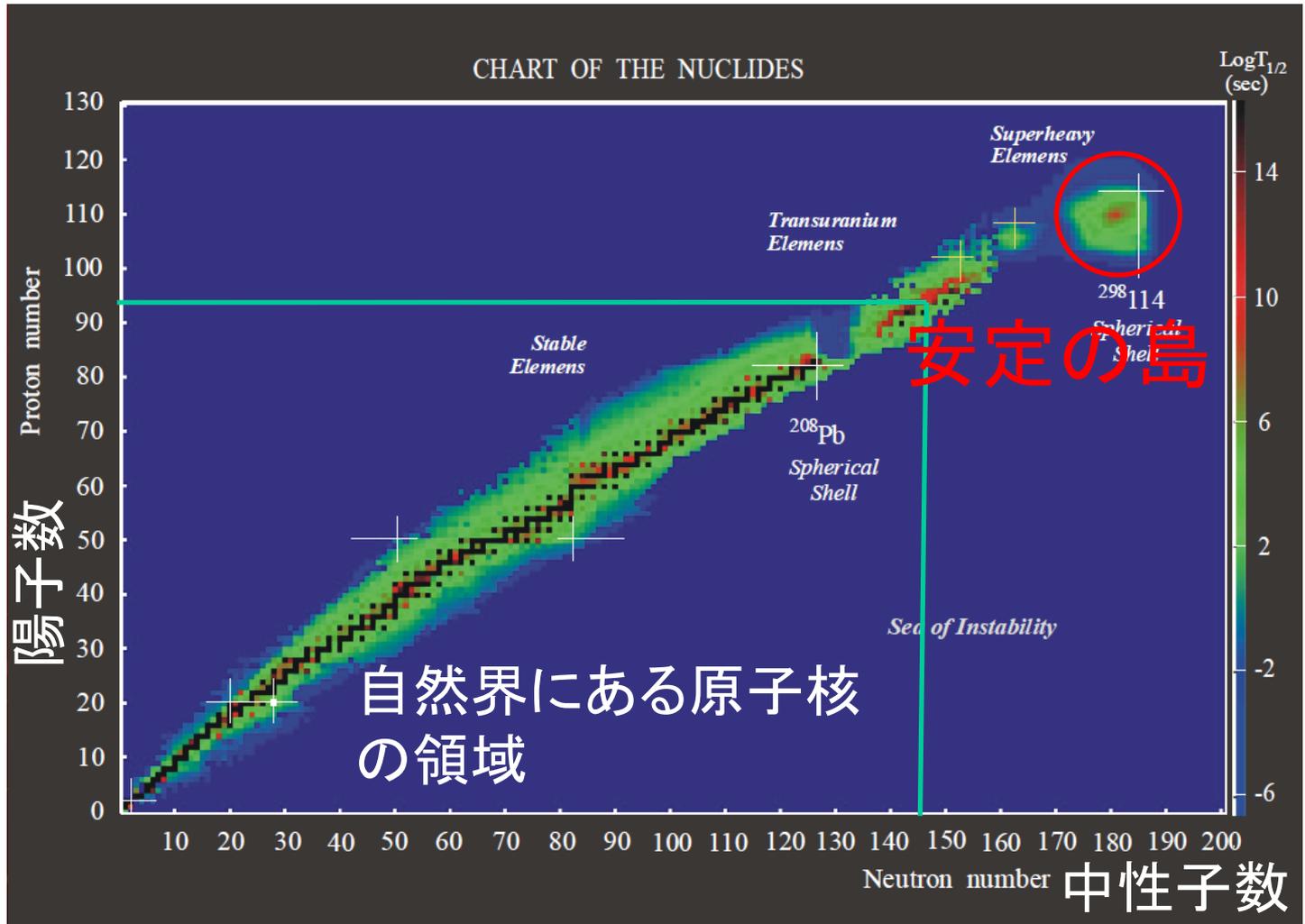
$$\frac{d}{dt}\langle p \rangle = -\langle V'(x) \rangle - \gamma \langle p \rangle$$

となるようなハミルトニアンを作る

- ✓ E. Kanai, PTP 3 ('48)
- ✓ M.D. Kostin, JCP 57 ('72)
- ✓ K. Albrecht, PLB56 ('75)
- ✓ K.-K. Kan & J.-J. Griffin, PLB50 ('74)

- 現象論的
- 解くのは比較的容易

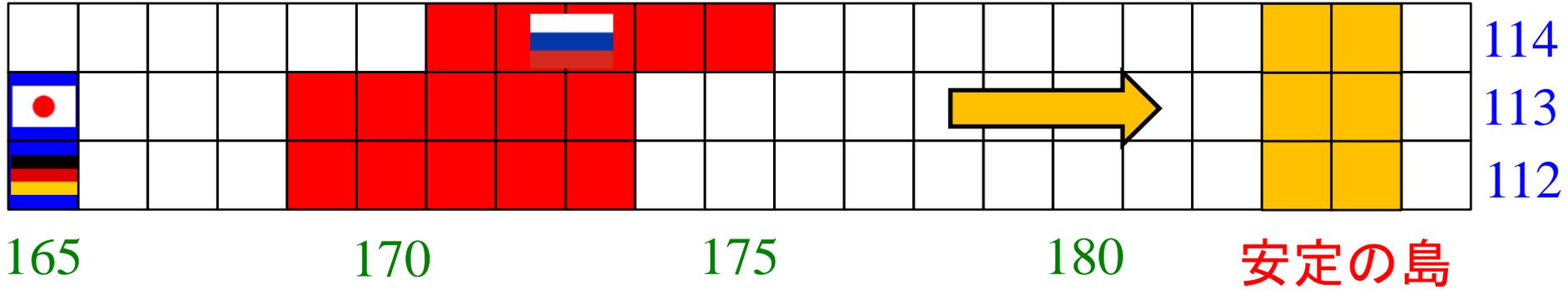
# 中性子過剰核の物理との関連



Yuri Oganessian

安定の島にどのように到達するか?

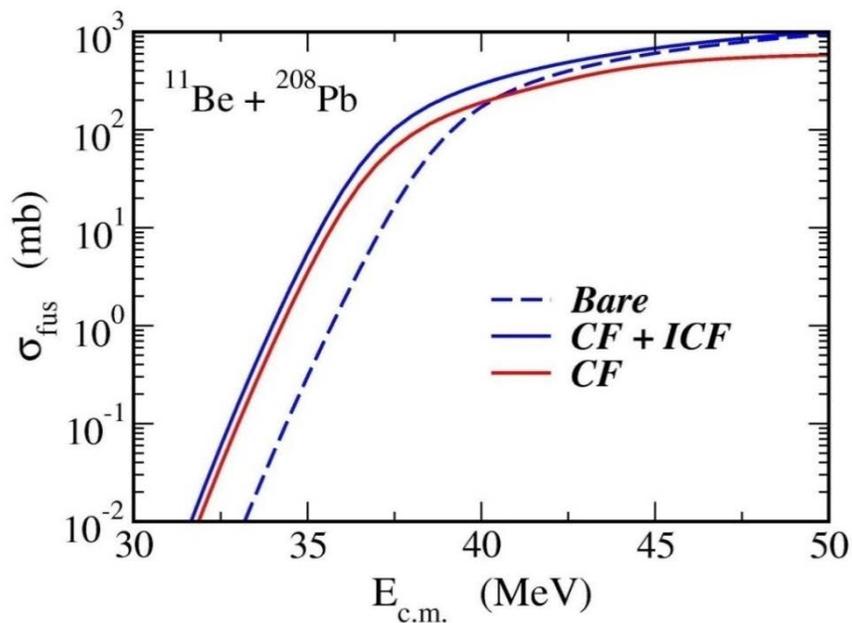
# 中性子過剰核の核融合反応



中性子過剰核ビームが必須→反応ダイナミクス?

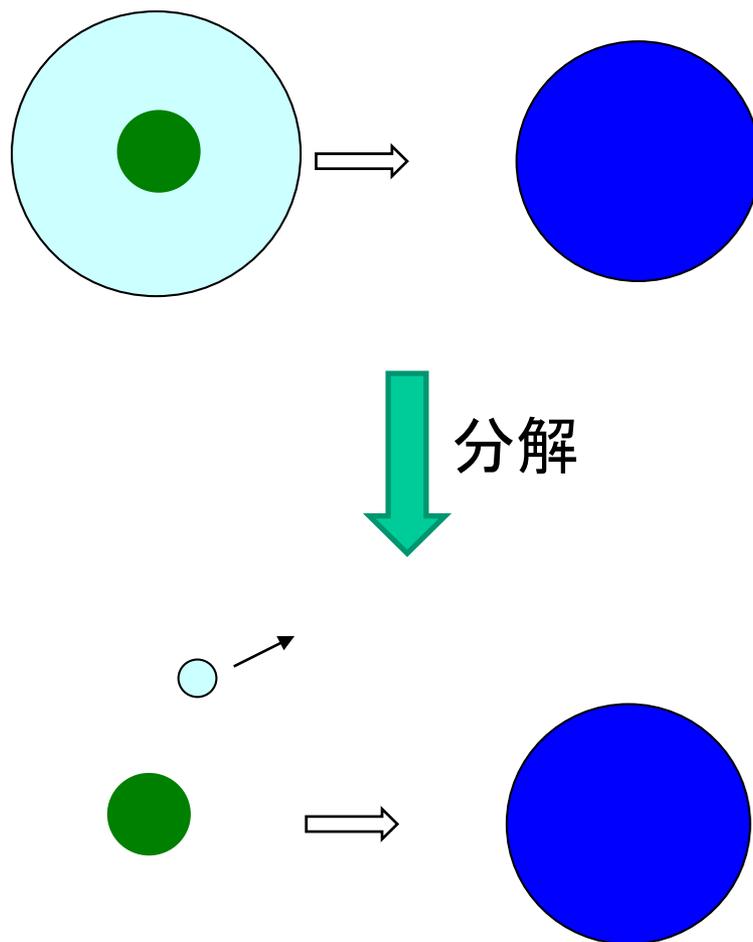
## ➤ 安定の島に向けて

中性子過剰核ビームを用いた  
実験が必要不可欠



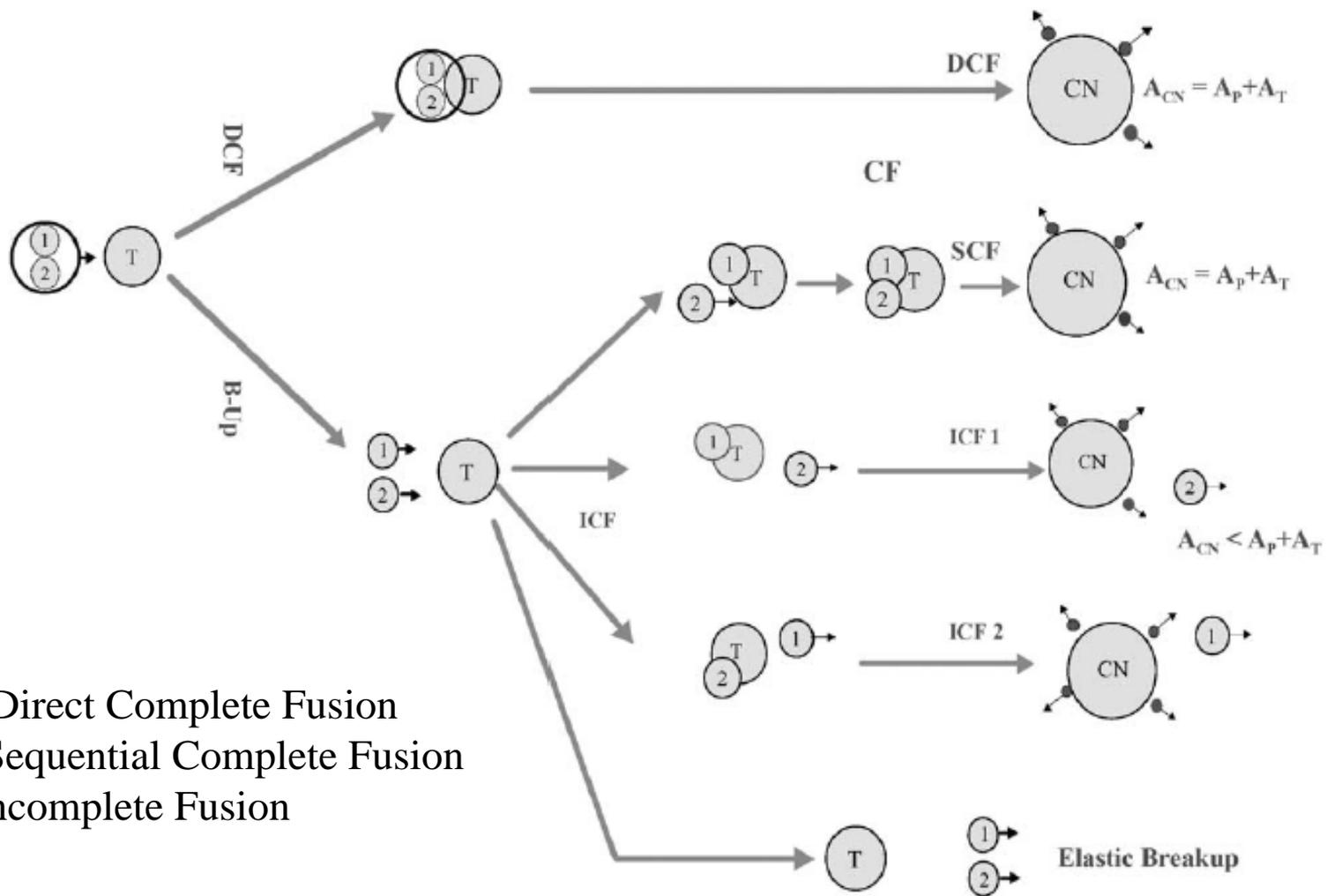
K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,  
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602

中性子過剰核 = 弱束縛



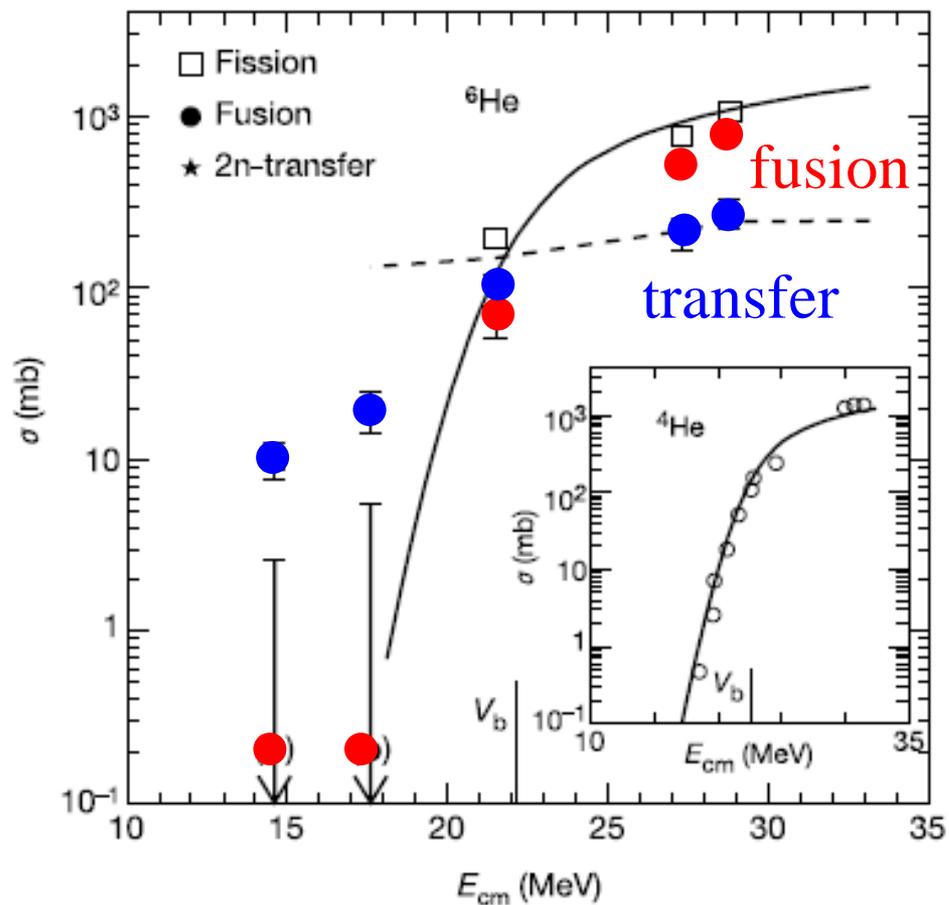
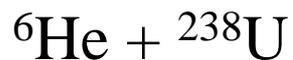
反応機構の理解(分解、核子移行、融合)

# 複雑な反応プロセス



DCF=Direct Complete Fusion  
 SCF=Sequential Complete Fusion  
 ICF=Incomplete Fusion

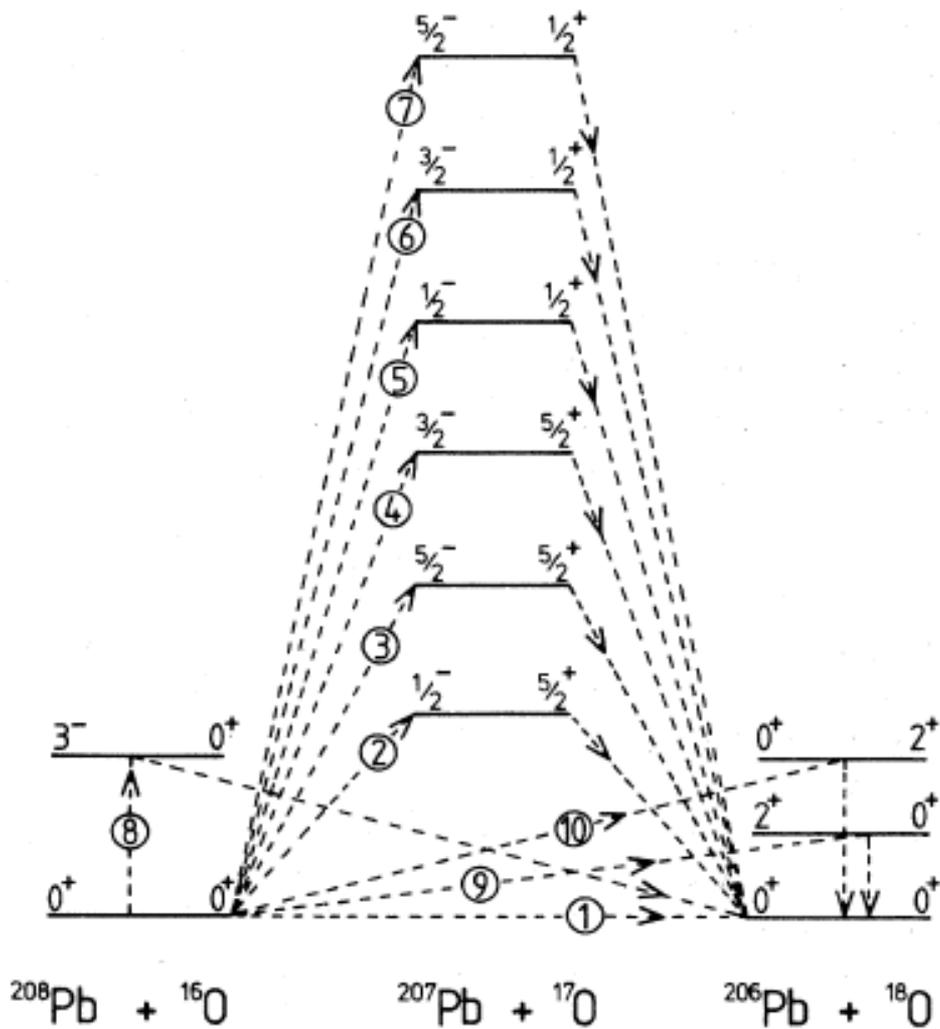
# 実際の実験データ



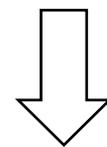
➤ 大きな2中性子移行反応の断面積

R. Raabe et al., Nature 431 ('04)823

# 中性子過剰核を用いた対移行反応



中性子過剰核を用いると、  
中間状態(の多くが)非束縛

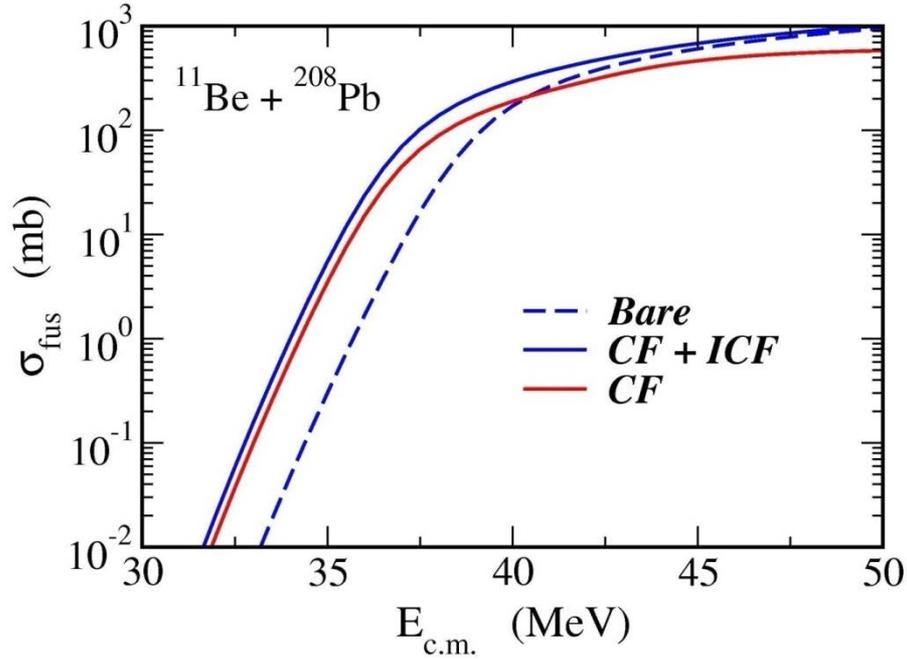


反応機構はどう変わる?



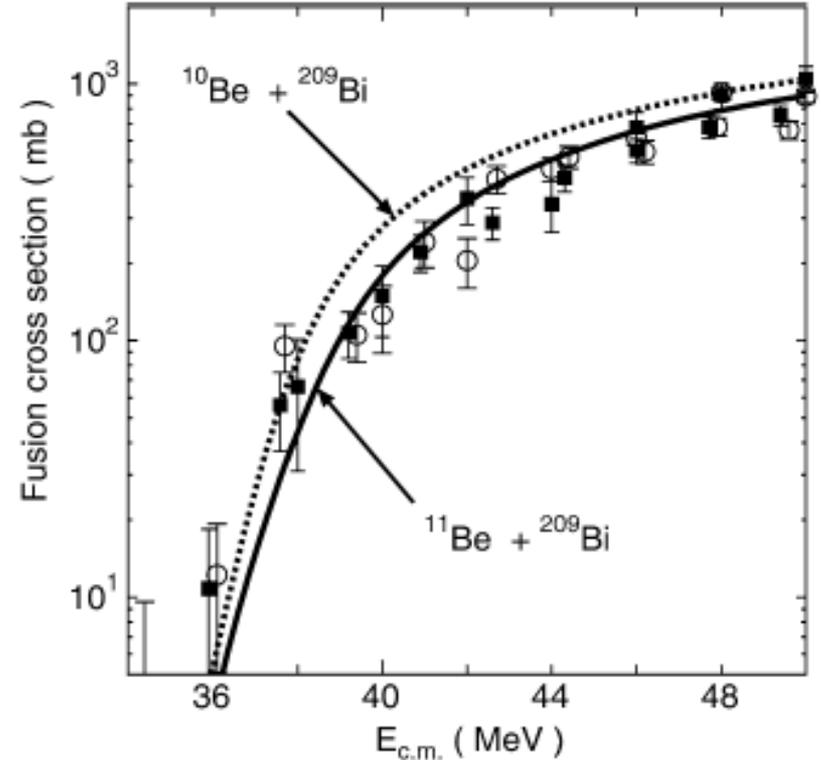
まだきちんと理解されて  
いない

理論計算では、連続状態の効果と移行反応の効果をきちんと取り入れる必要がある。(中々大変。)



CDCC的な計算

ただし連続状態間の結合なし



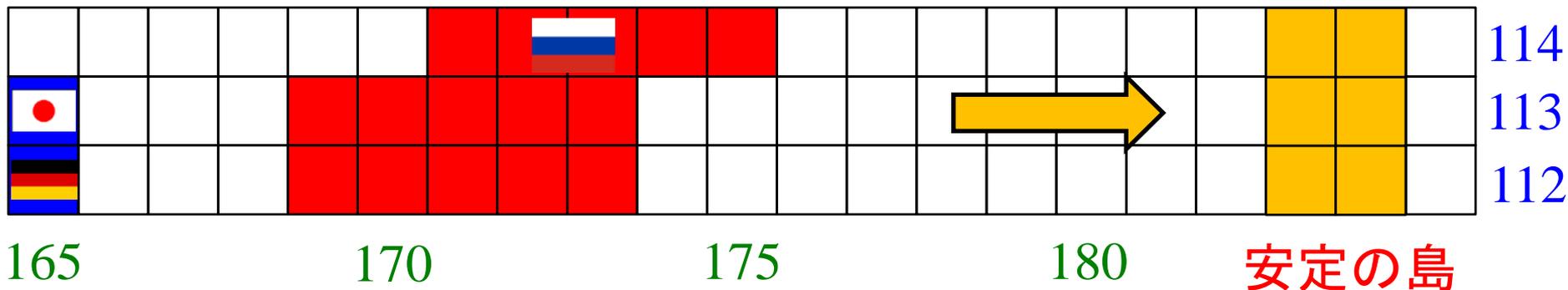
時間依存アプローチ

分解、移行の効果は自動的に入る

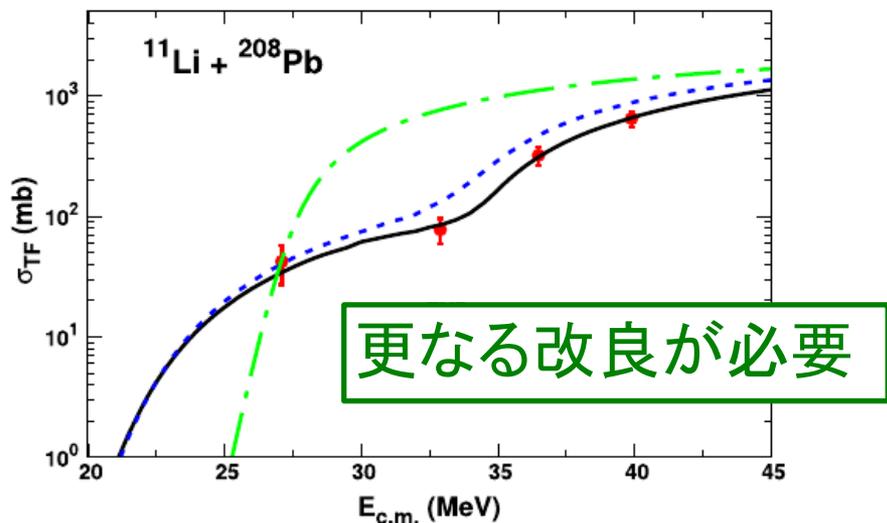
K. Hagino, A. Vitturi, C.H. Dasso,  
and S.M. Lenzi, Phys. Rev. C61 ('00) 037602

M. Ito, K. Yabana, T. Nakatsukasa,  
and M. Ueda, PLB637('06)53

# 中性子過剰核の核融合反応

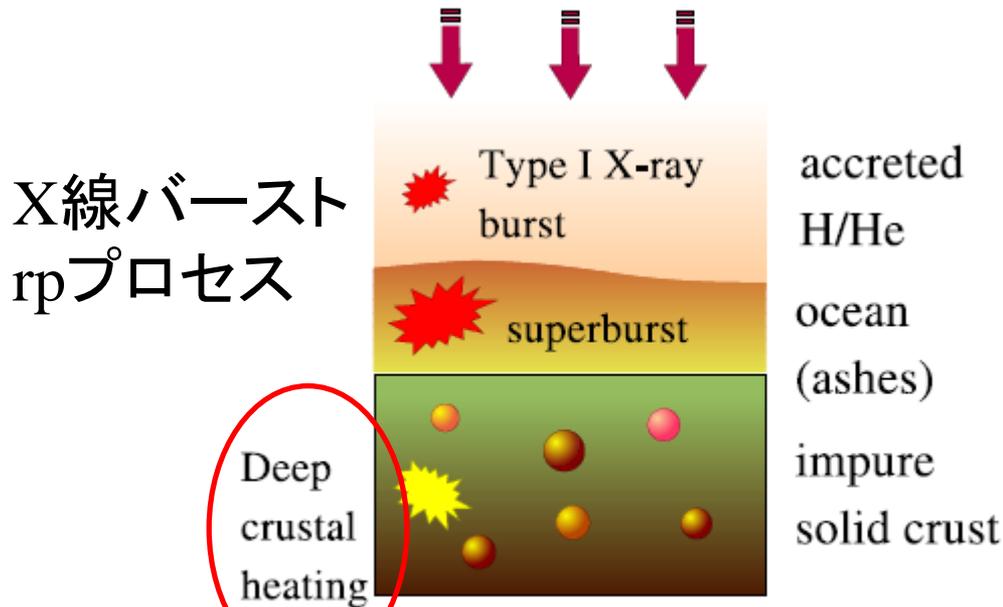


中性子過剰核ビームが必須→反応ダイナミクス?



K.-S. Choi, K. Hagino et al.,  
Phys. Lett. B780 ('18) 455

# 質量降着を伴う中性子星で起こる 中性子過剰核の核融合反応

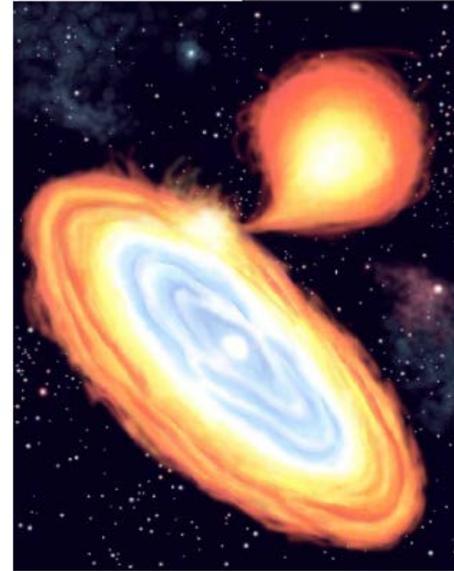


Accreting neutron

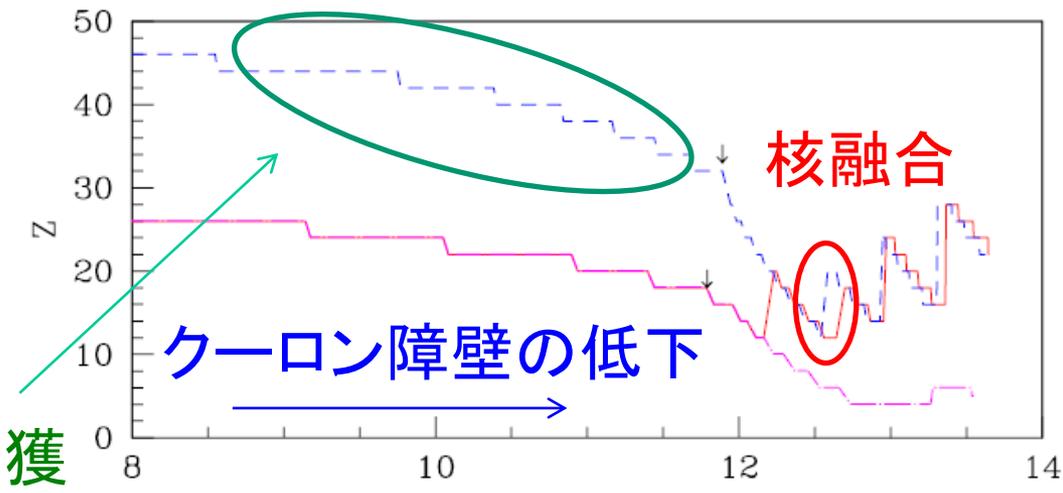
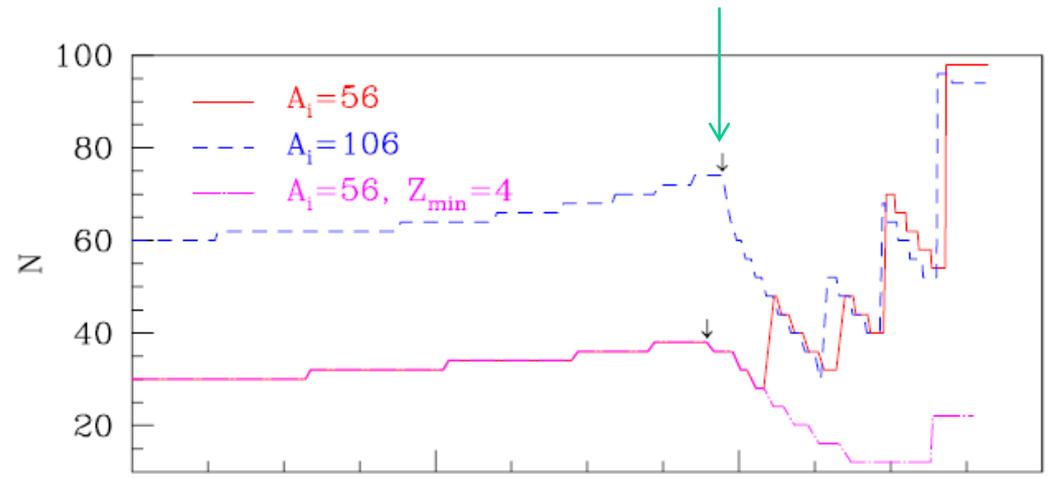
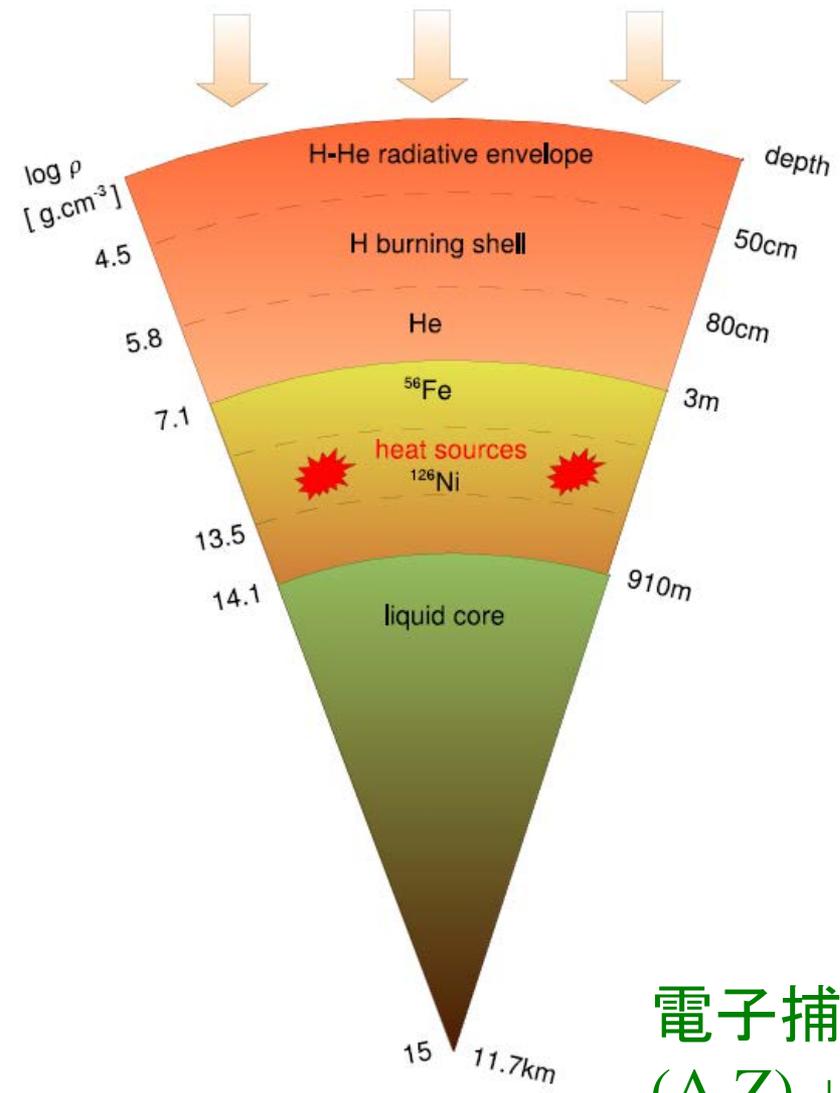
中性子過剰核の核融合反応



X線連星の静穏期  
におけるX線の起源



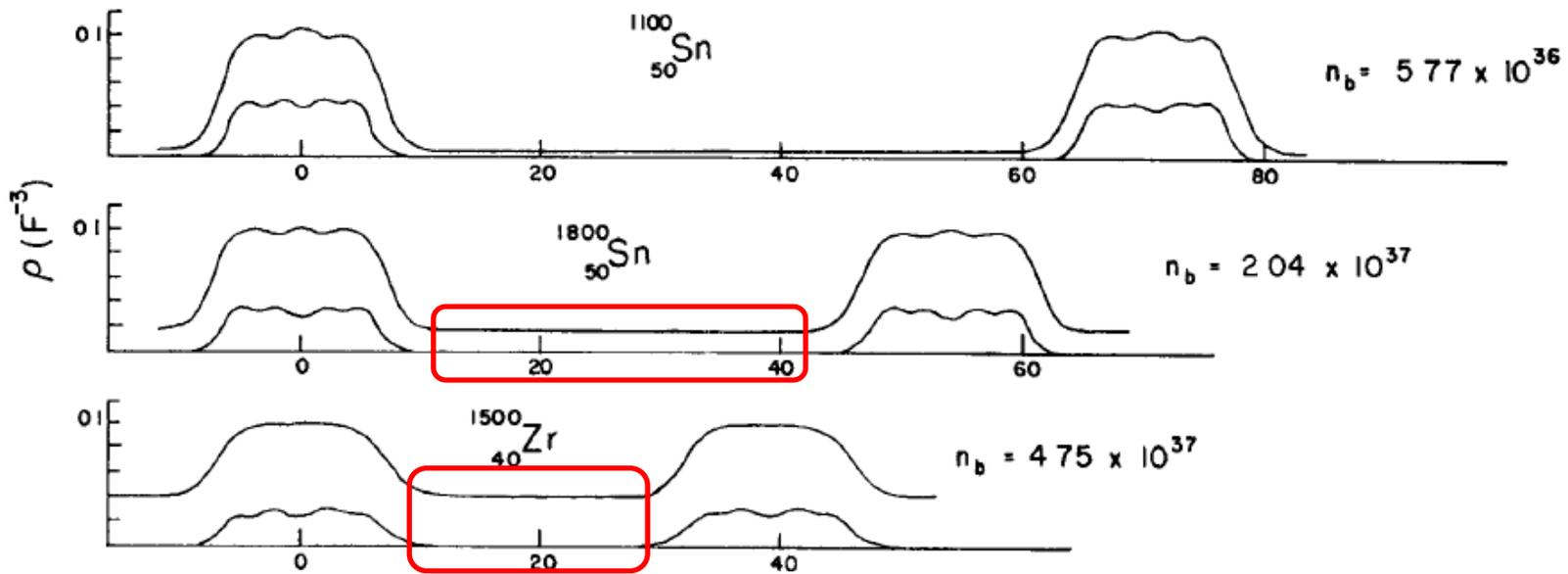
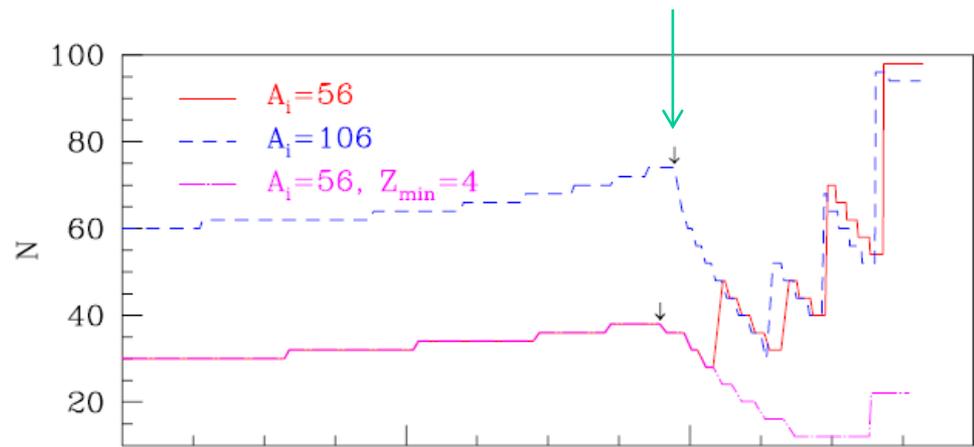
# 中性子のこぼれ落ち



電子捕獲  
 $(A,Z) + e^- \rightarrow (A,Z-1) + \nu_e$   
 中性子過剰へ

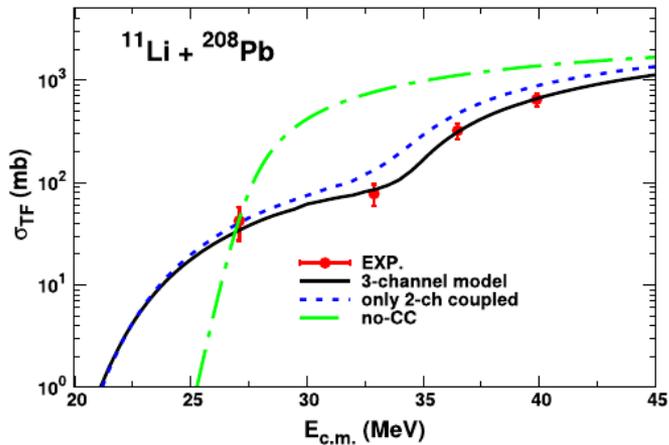
N. Chamel and P. Haensel, Living Rev. Relativity, 11 ('08) 10.

cf. 早い段階での研究: K. Sato, PTP62('79) 957



J.W. Negele and D. Vautherin,  
 NPA207('73)298

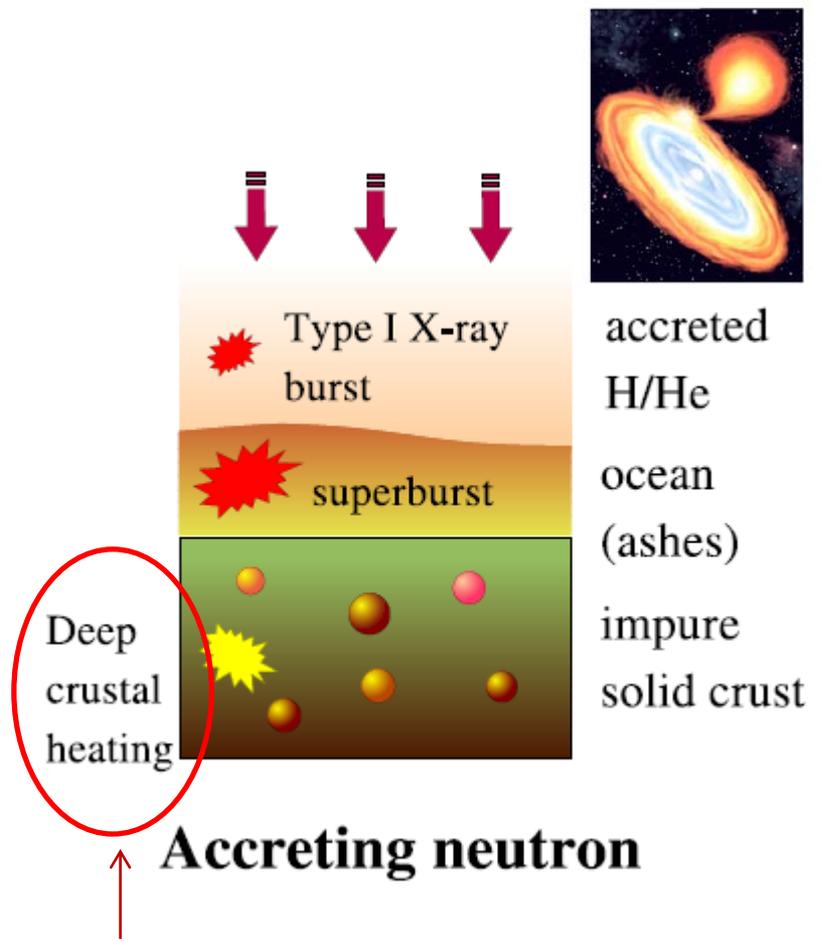
# 中性子過剰核の反応



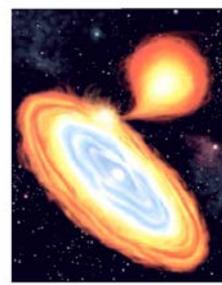
- ✓ 核融合反応
- ✓ 多核子移行反応



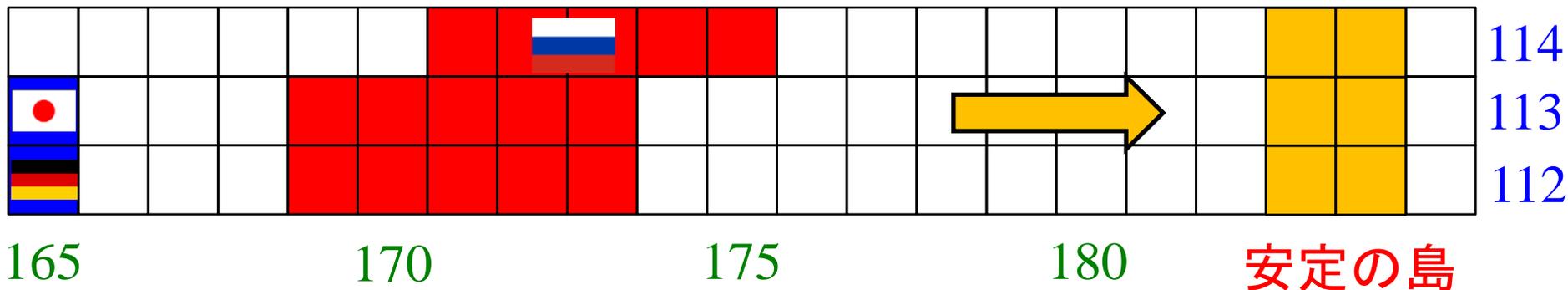
- 微視的反應理論の開発
- 中性子星内部の核反応



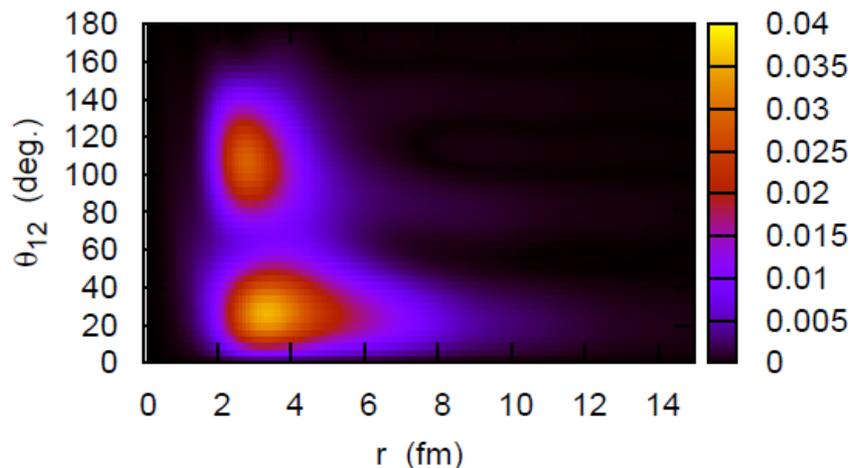
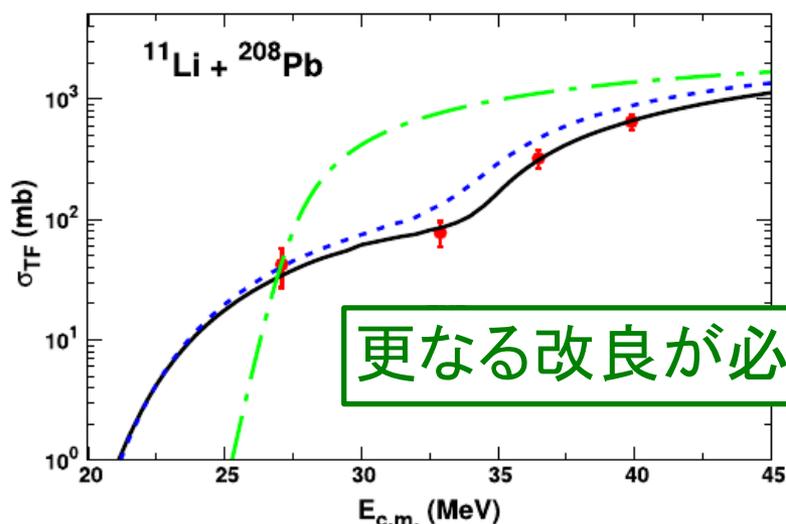
## 中性子過剰核の融合反応



# 中性子過剰核の核融合反応



中性子過剰核ビームが必須→反応ダイナミクス?



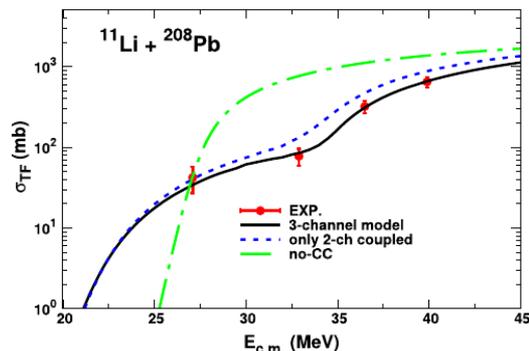
K.H. and H. Sagawa, PRC72('05)044321

K.-S. Choi, K. Hagino et al.,  
Phys. Lett. B780 ('18) 455

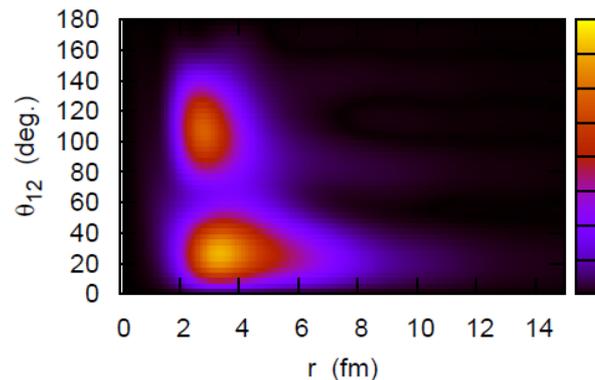
中性子過剰核の構造の理解も必要

# 超重元素の物理

## 中性子過剰核の反応

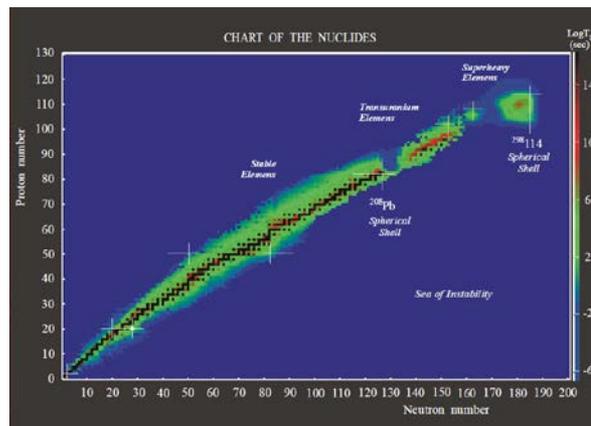


## 中性子過剰核の構造



- ✓ 核融合
- ✓ 核子移行
- ✓ 分解反応

- 超重元素
- 安定の島



- ✓ 核子相関
- ✓ 集団運動
- ✓ 核分裂

中性子過剰核を軸にした超重元素の物理を展開する

# 超重元素:強い電場の環境下での量子多体系

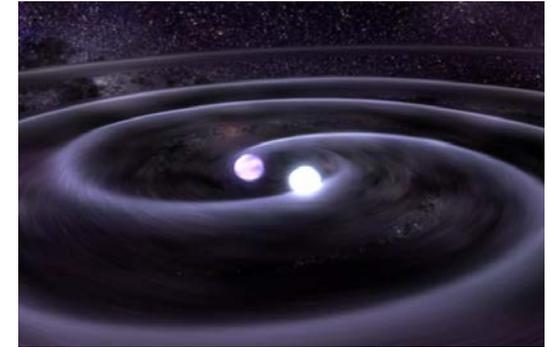
## 超重元素の核物理

## 超重元素の化学や物性

## 宇宙物理



Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	



## 反応ダイナミクス

- ✓ 摩擦の量子論
- ✓ 中性子過剰核



- ✓ 核物理(不安定核)
- ✓ 元素の起源
- ✓ キロノバ

核物理、化学、宇宙物理などの分野融合による超重元素の研究

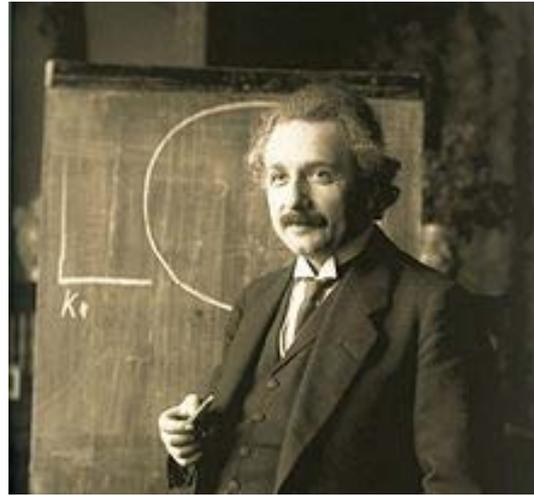
# 超重元素の化学

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	* 73 Ta	* 74 W	* 75 Re	* 76 Os	* 77 Ir	* 78 Pt	* 79 Au	* 80 Hg	* 81 Tl	* 82 Pb	* 83 Bi	* 84 Po	* 85 At	* 86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	* 105 Db	* 106 Sg	* 107 Bh	* 108 Hs	* 109 Mt	* 110 Ds	* 111 Rg	* 112 Cn	* 113 Nh	* 114 Fl	* 115 Mc	* 116 Lv	* 117 Ts	* 118 Og
				* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu	
				* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr	

- 本当にここに置きちゃっていいの？
- Nh は B や Al などと同じ性質？

# 相対論的効果：原子番号の大きい元素で重要

$$E = mc^2$$

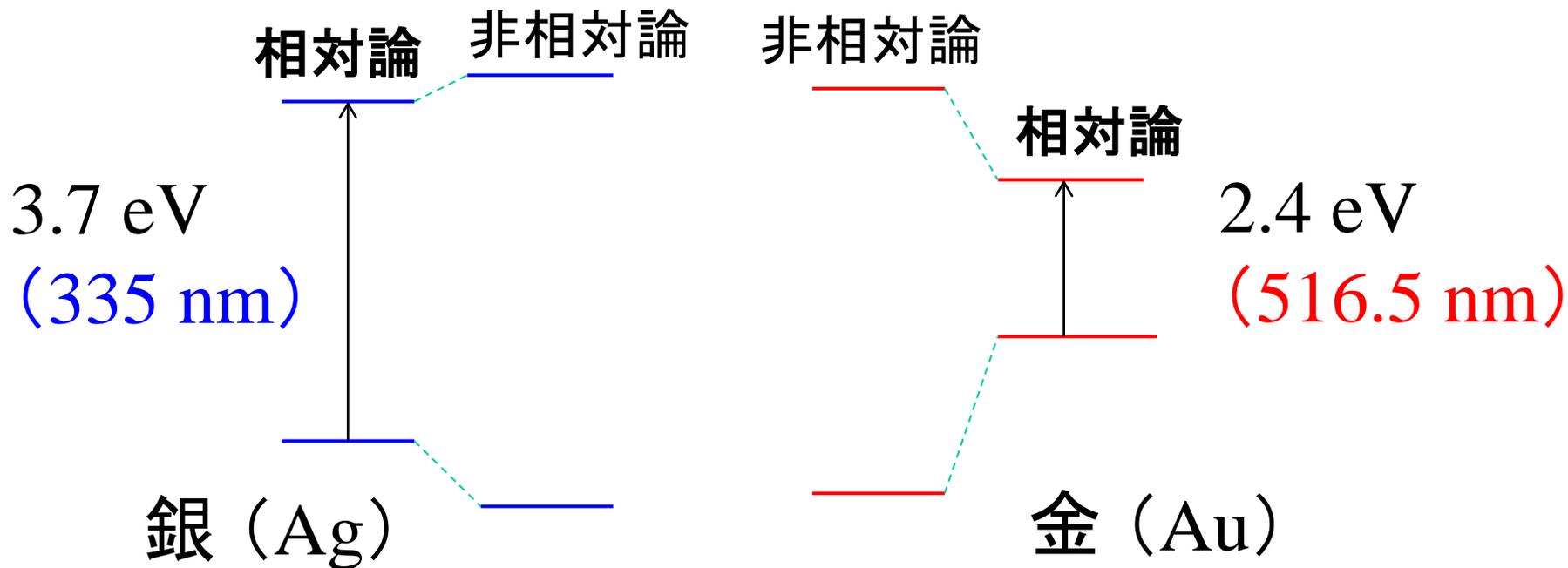


ディラック方程式(相対論的量子力学)を解くと、  
原子中の電子のエネルギーは、

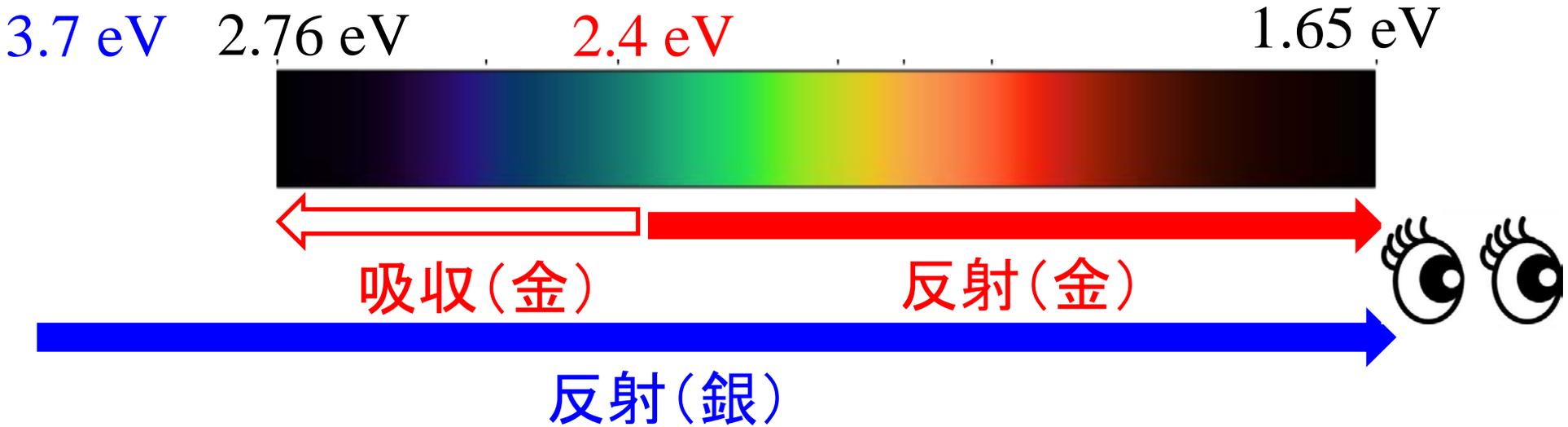
$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2} \sim mc^2 \left( 1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} - \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \dots \right)$$

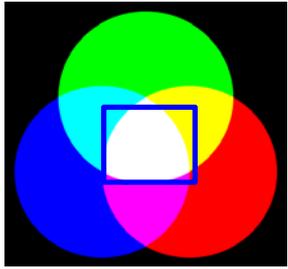
相対論的効果





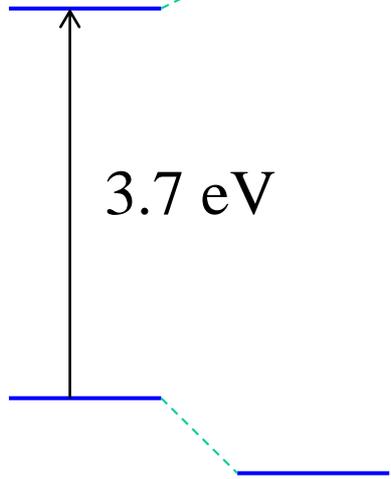
可視光





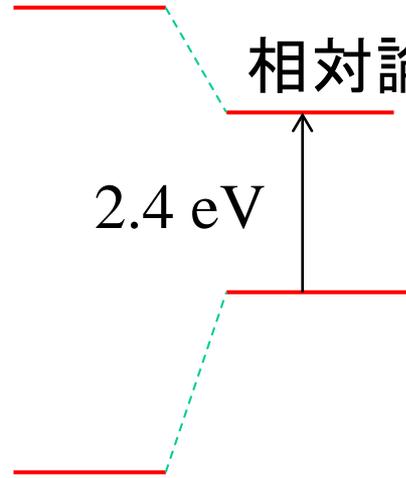
光の  
吸収なし

相対論 非相対論

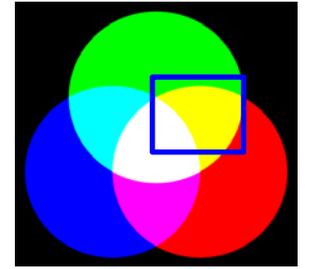


銀

非相対論



金



青色の光  
が吸収



銀

47番元素



金

79番元素

# 超重元素の化学

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	104 Rf *	105 Db *	106 Sg *	107 Bh *	108 Hs *	109 Mt *	110 Ds *	111 Rg *	112 Cn *	113 Nh *	114 Fl *	115 Mc *	116 Lv *	117 Ts *	118 Og *
				* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu	
				* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr	

相対論的効果で超重元素の場所が  
どのように変わるのか? → 未解決の謎

# 最後に:この集中講義全体のまとめ

## 1. イントロダクション(この回):中性子過剰核の物理

この講義で何をカバーするのか(概観), r-プロセス元素合成

## 2. 1粒子ハロー核の性質

角運動量とハロー現象

## 3. 非束縛核と共鳴現象

ポテンシャル共鳴の一般論

1陽子放出

ハドロン分野のM1やM2が  
聞いても面白いと思える講義  
(にしたい)



どうでしたか?

## 4. 変形した不安定核

結合チャンネル系の束縛状態と共鳴状態

## 5. 原子核における対相関と2中性子ハロー核

ボロミアン核、ダイニュートロン相関

## 6. 2中性子ハロー核のクーロン励起及び2核子放出崩壊現象

## 7. 超重元素と中性子過剰核

## ➤ 講義ノート

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~kouichi.hagino/lecture2.html>

「京都大学原子核理論」→「萩野浩一」  
→「講義ノート」→「他大学での集中講義」

## ➤ 成績

出席

質問した場合には成績にプラス