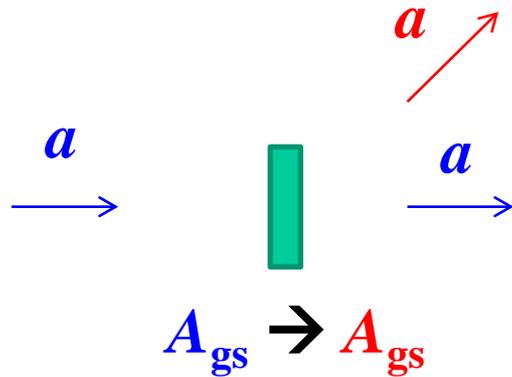
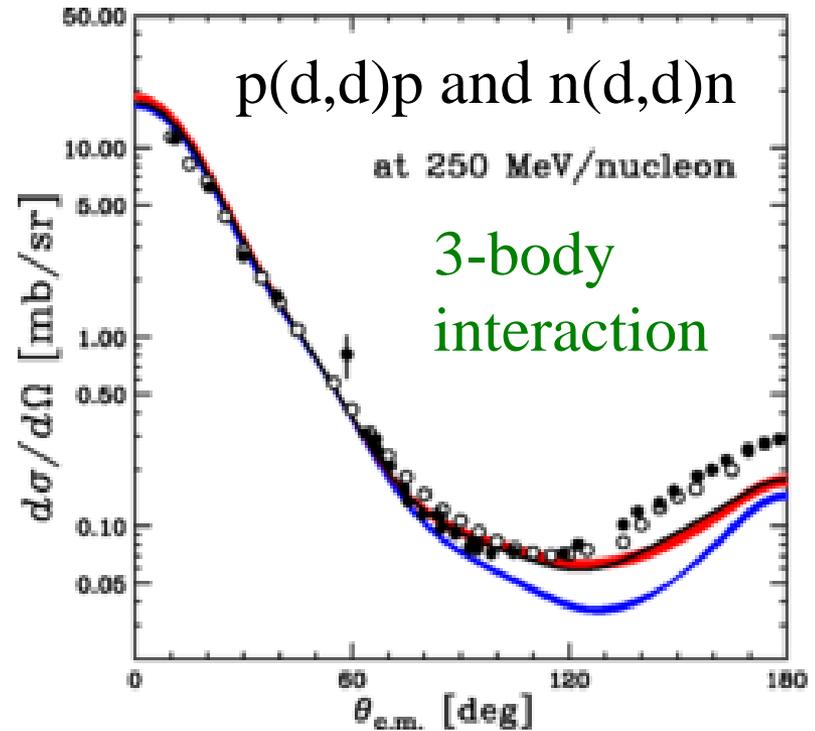


✓ elastic scattering



fundamental interaction
between a and A

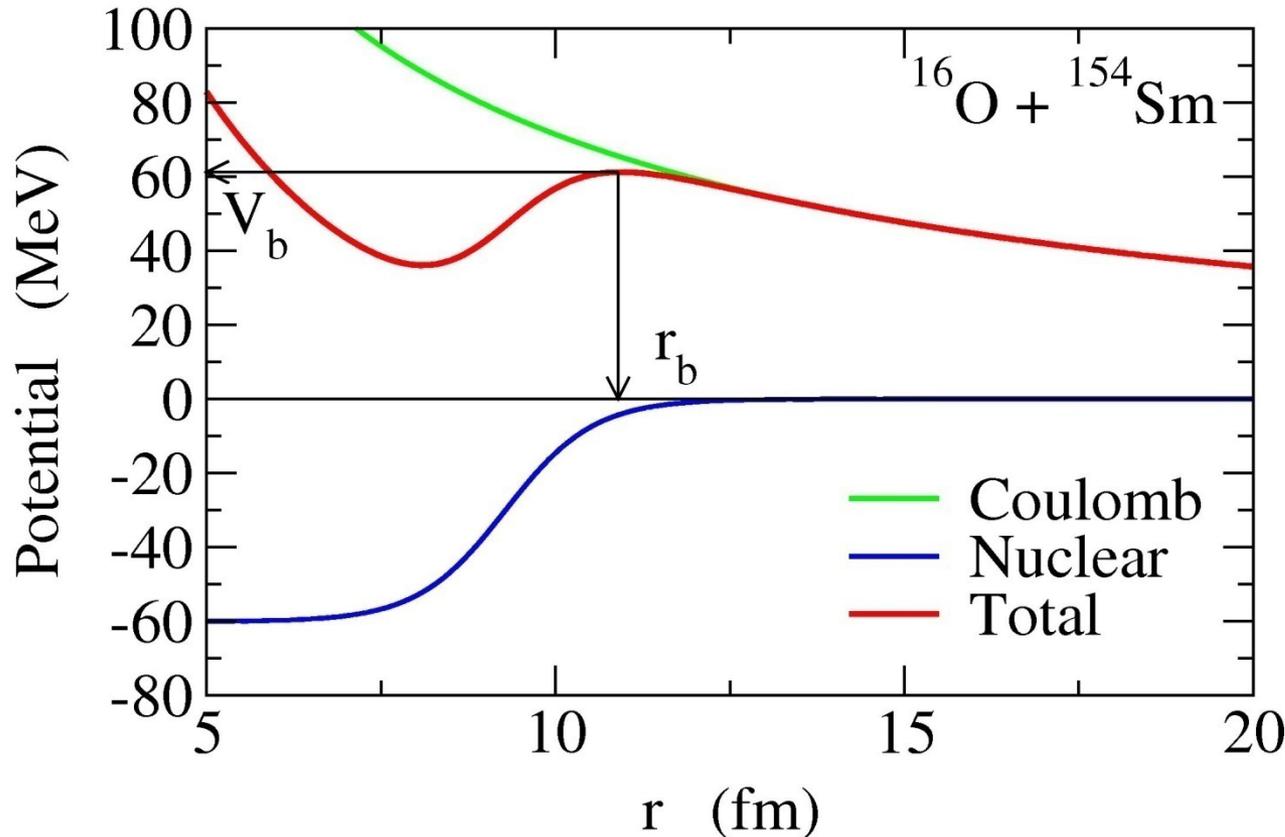


K. Sekiguchi et al., PRC89('14)064007

- neutron beam from ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$
- detection of recoil deuteron

Fusion reactions and superheavy elements

Inter-nucleus potential



Two forces:

1. Coulomb force

Long range,
repulsive

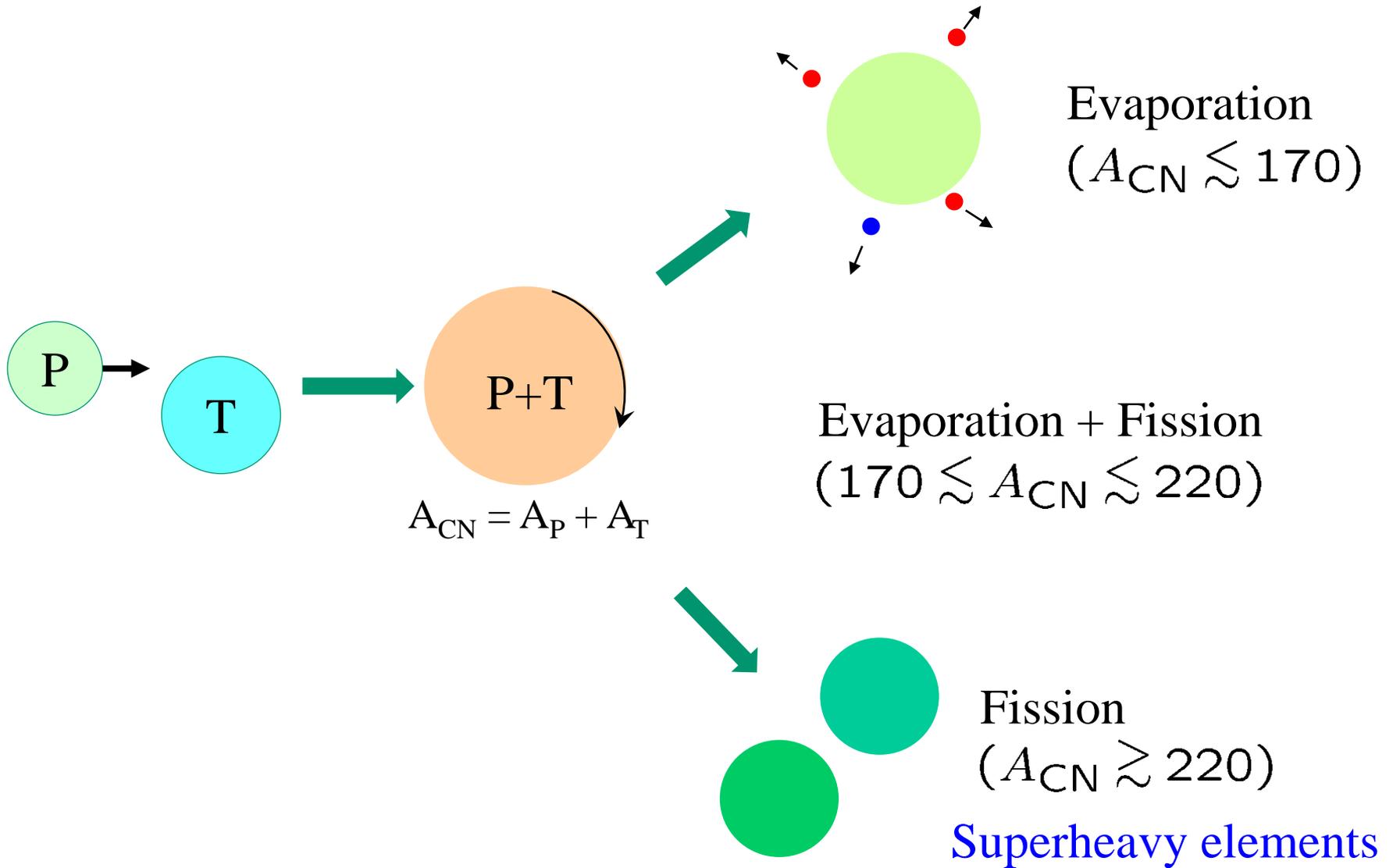
2. Nuclear force

Short range,
attractive



Potential barrier due to the compensation between the two
(Coulomb barrier)

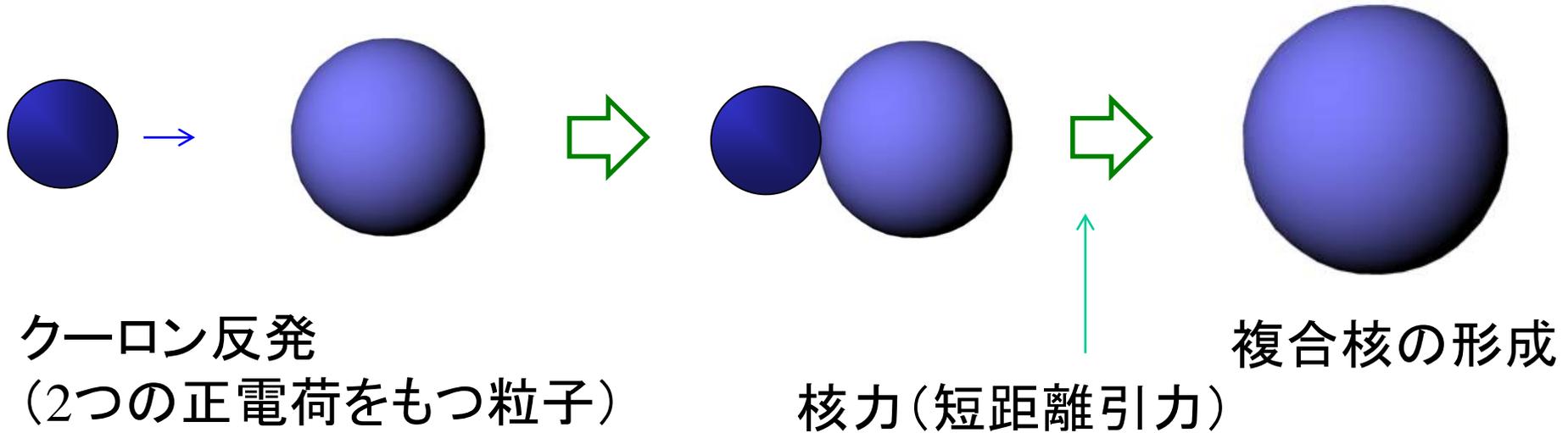
Fusion: compound nucleus formation



Heavy-ion fusion reactions and superheavy elements

どのように超重元素を生成するか?

核融合反応



クーロン反発
(2つの正電荷をもつ粒子)

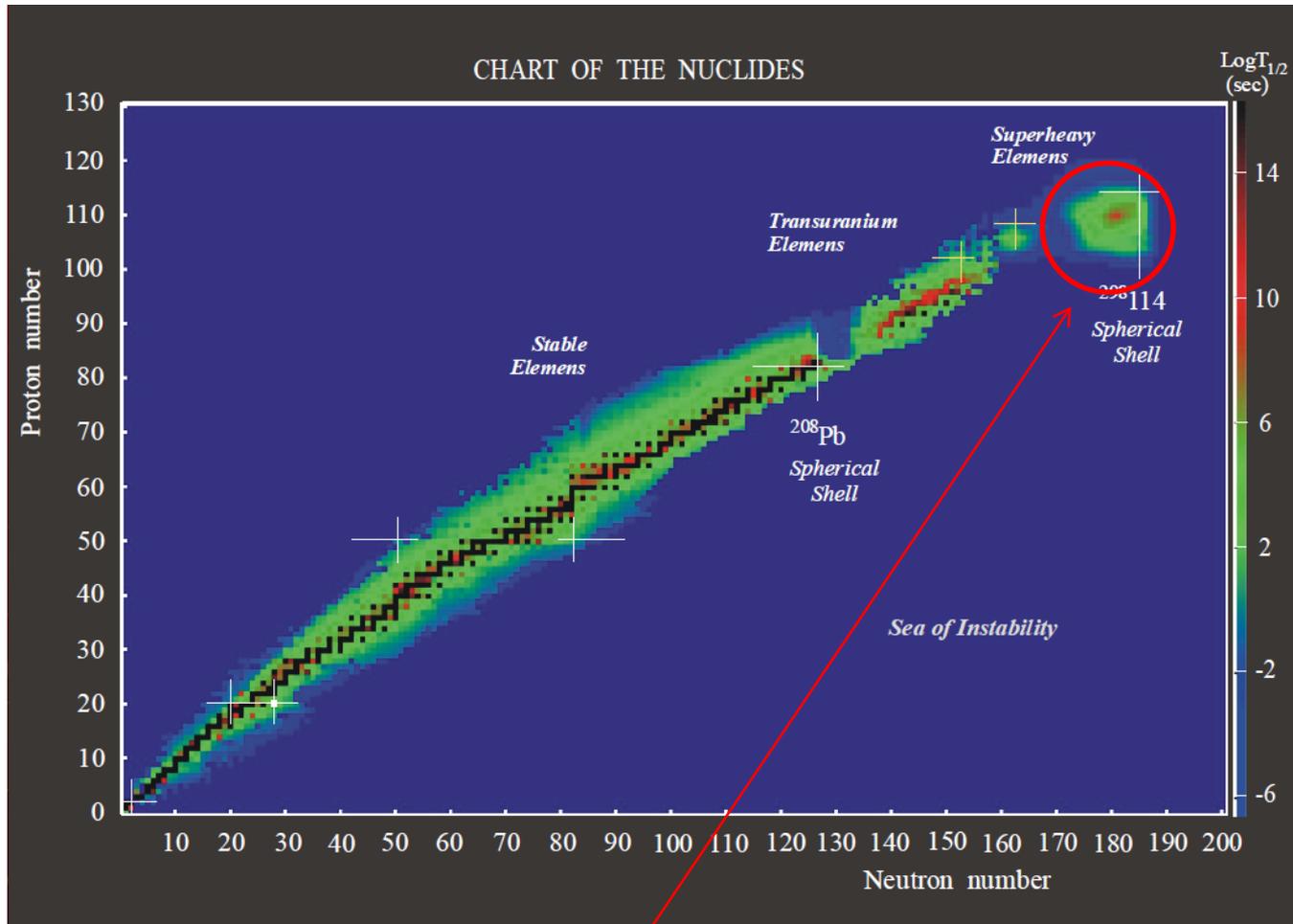
↓
入射核を加速器で加速して
標的核にぶつける

核力 (短距離引力)

複合核の形成



Heavy-ion fusion for SHE



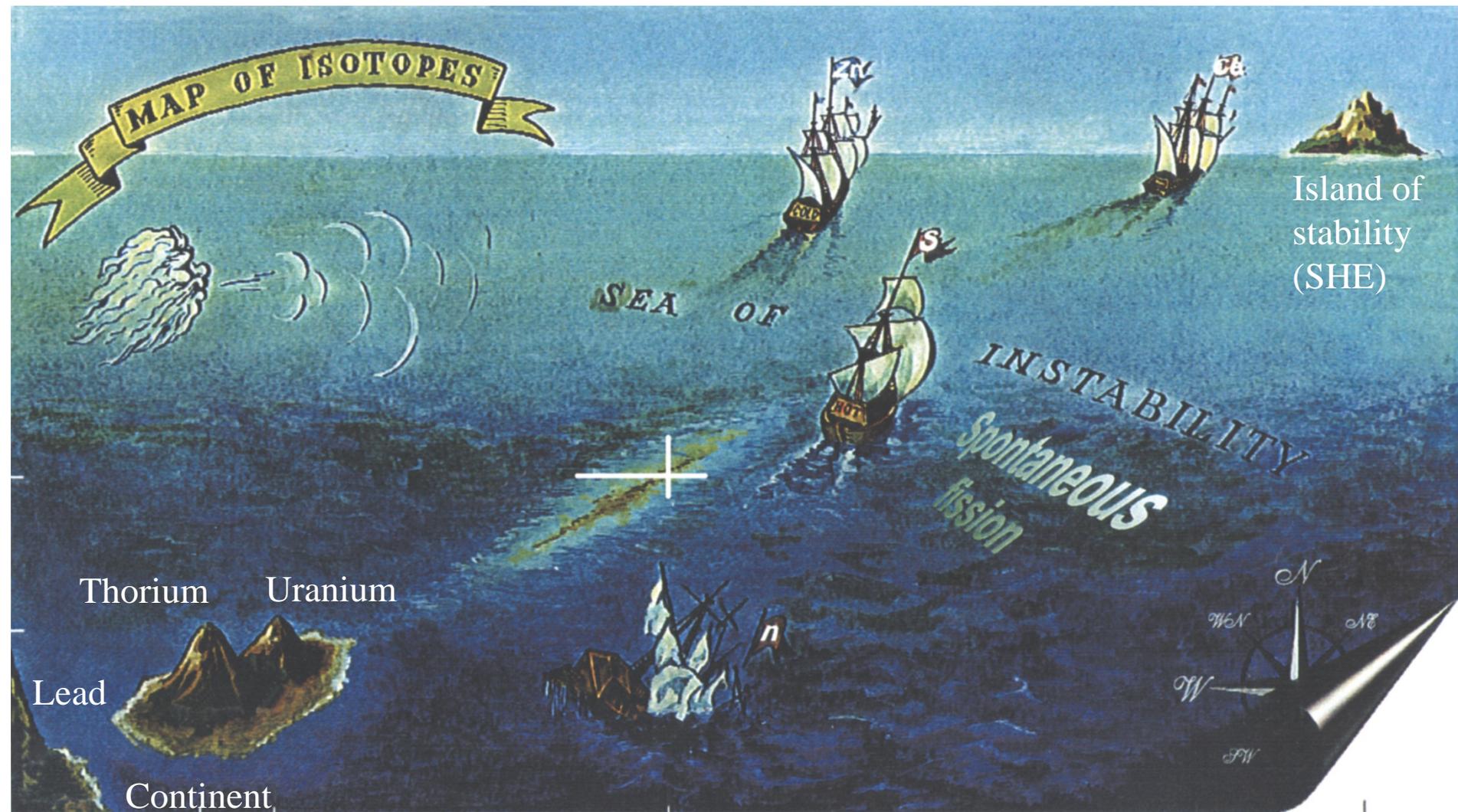
island of stability around Z=114, N=184

Yuri Oganessian

W.D. Myers and W.J. Swiatecki (1966), A. Sobiczewski et al. (1966)

→ modern calculations: Z=114, 120, or 126, N=184

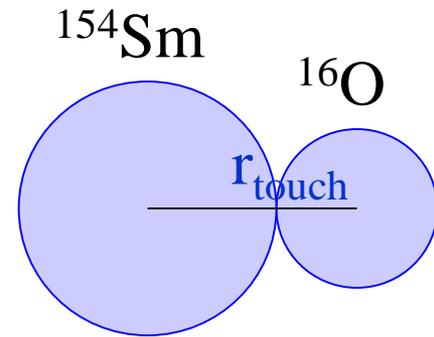
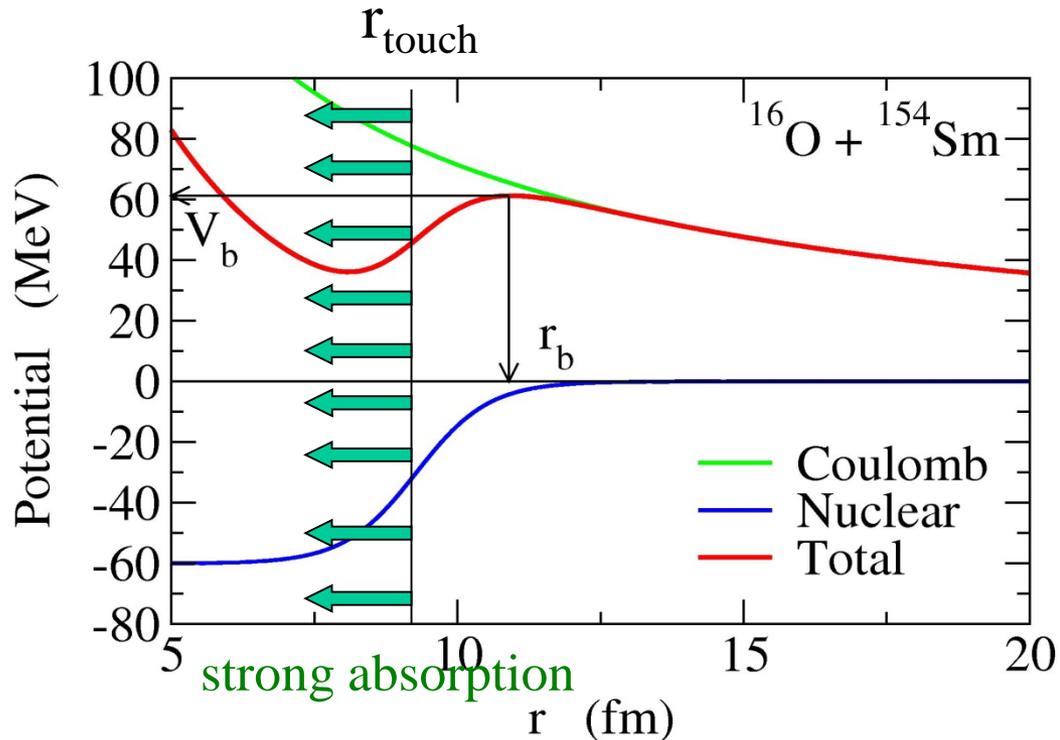
e.g., H. Koura et al. (2005)



Yuri Oganessian

Heavy-ion subbarrier fusion reactions in the SHE region

➤ Fusion of medium-heavy systems:

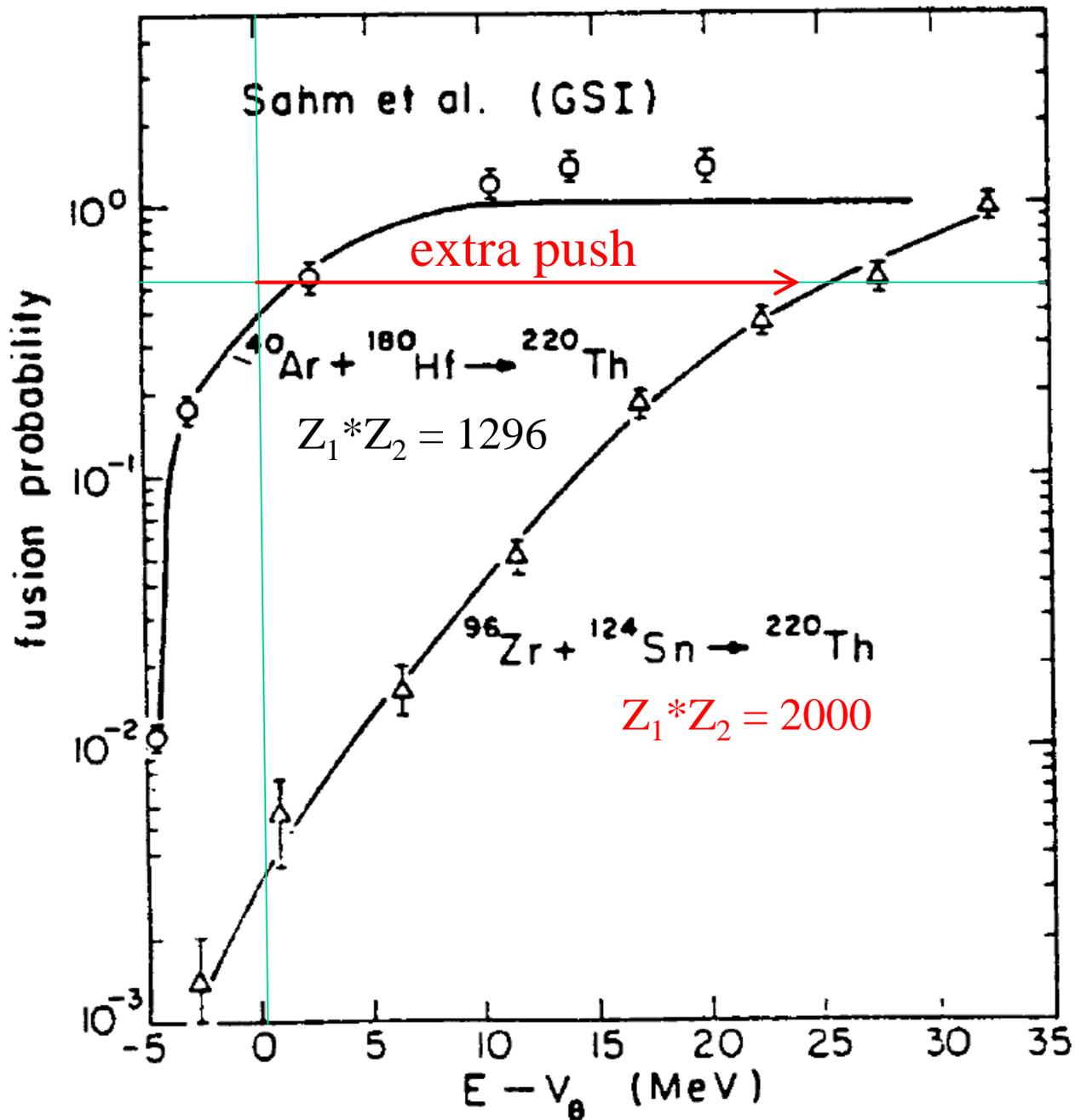


Compound nucleus:
automatically formed
once touched
(strong absorption)

➤ Fusion of heavy and super-heavy systems

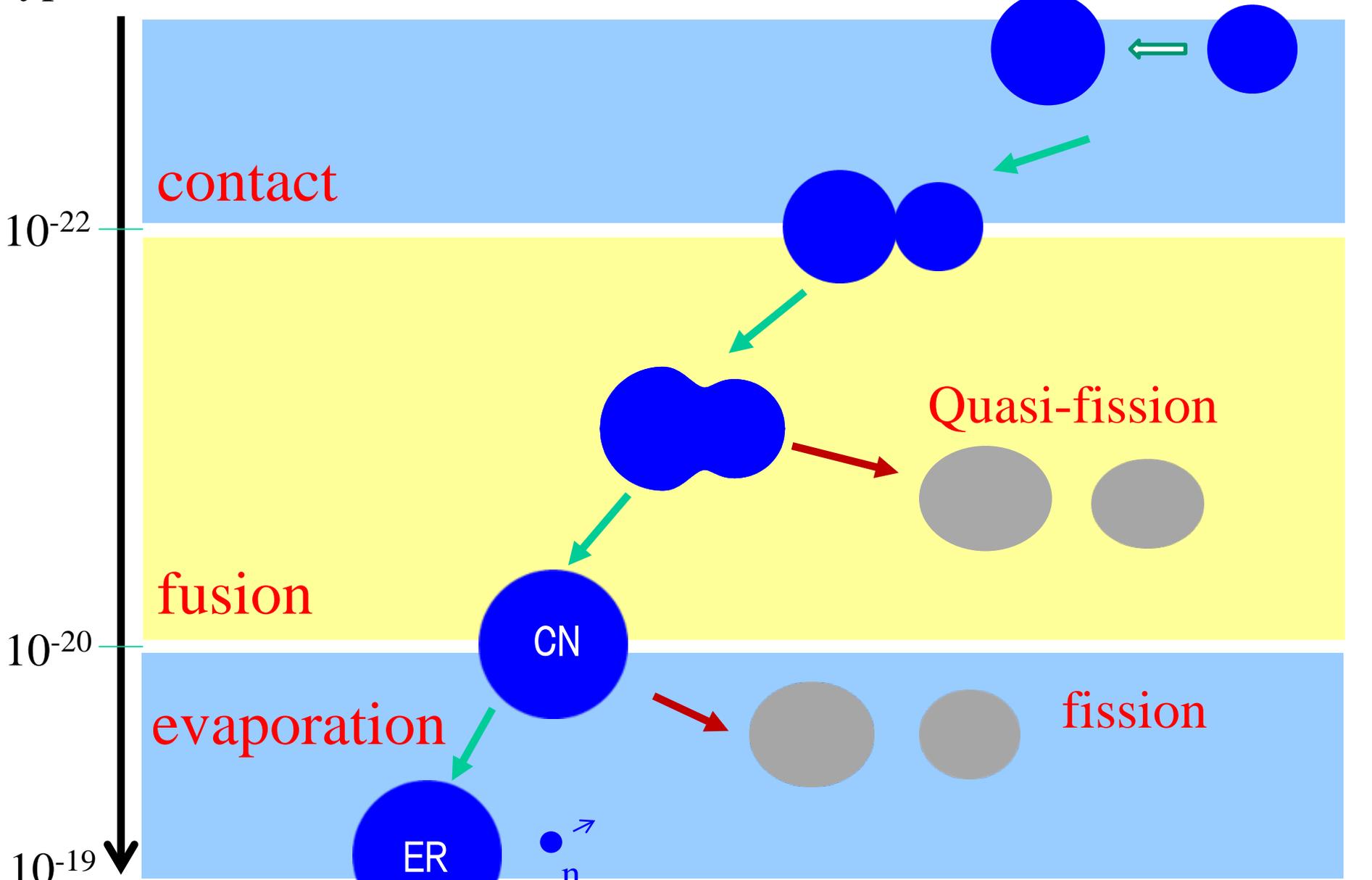
Large probability of re-separation (due to the strong Coulomb repulsion)

[This happens for $Z_1 * Z_2 > 1600 \sim 1800$.]



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

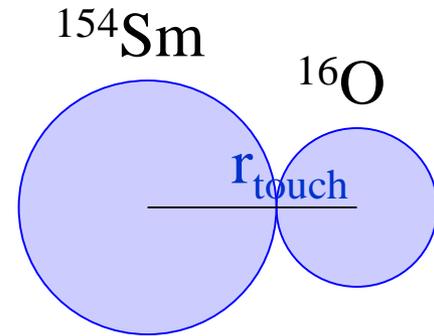
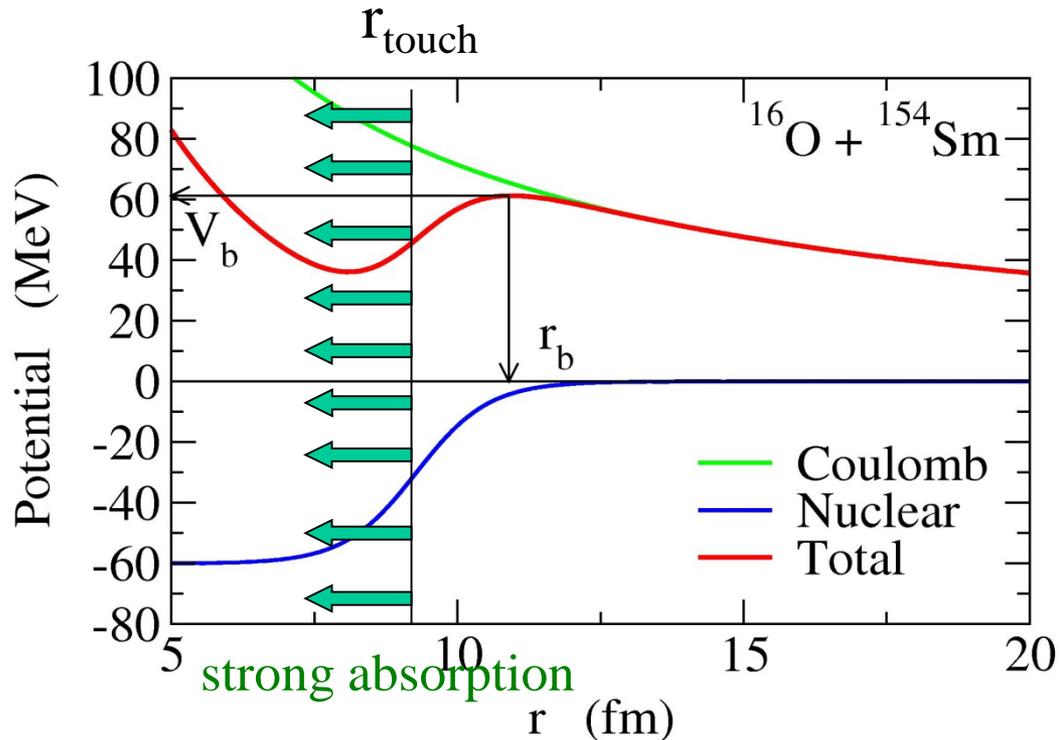
typical time-scale (sec.)



CN = compound nucleus
ER = evaporation residue

Heavy-ion subbarrier fusion reactions in the SHE region

➤ Fusion of medium-heavy systems:



Compound nucleus:
automatically formed
once touched
(strong absorption)

➤ Fusion of heavy and super-heavy systems

Large probability of re-separation (due to the strong Coulomb repulsion)

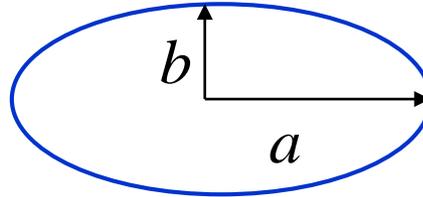
[This happens for $Z_1 * Z_2 > 1600 \sim 1800$.]

(復習)

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

原子核を体積一定のまま変形してみる

例) 回転楕円体



$$a = R \cdot (1 + \epsilon)$$

$$b = R \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

$$ab^2 = R^3 = \text{一定}$$

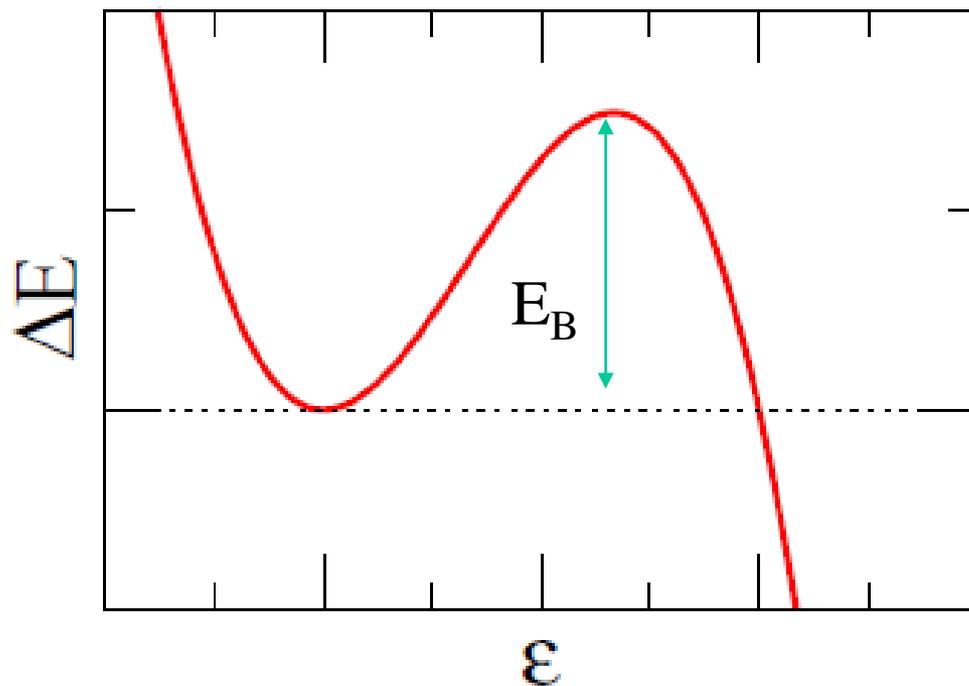
変形したときのエネルギー変化:

- 体積項、対称エネルギー項: 変化せず
 - クーロン項
 - 表面項
- } 変化

{ 表面項 → 球形になる傾向
クーロン項 → 変形になる傾向 } → 2つの力の競合

(復習)

$$\Delta E = E_S^{(0)} \left\{ \frac{2}{5}(1-x)\epsilon^2 - \frac{4}{105}(1+2x)\epsilon^3 + \dots \right\}$$



$$x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} = \frac{a_C}{2a_S} \cdot \frac{Z^2}{A} \sim \frac{1}{53.3} \cdot \frac{Z^2}{A}$$

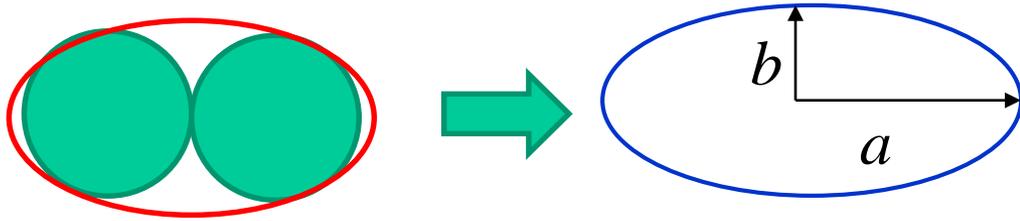
$$E_B = \frac{98}{15} \cdot \frac{(1-x)^3}{(1+2x)^2} \cdot E_S^{(0)}$$

$$\epsilon_B = 7 \cdot \frac{(1-x)}{(1+2x)}$$

重い核ほど障壁は低くなる

重い核ほど障壁での変形度は小さくなる

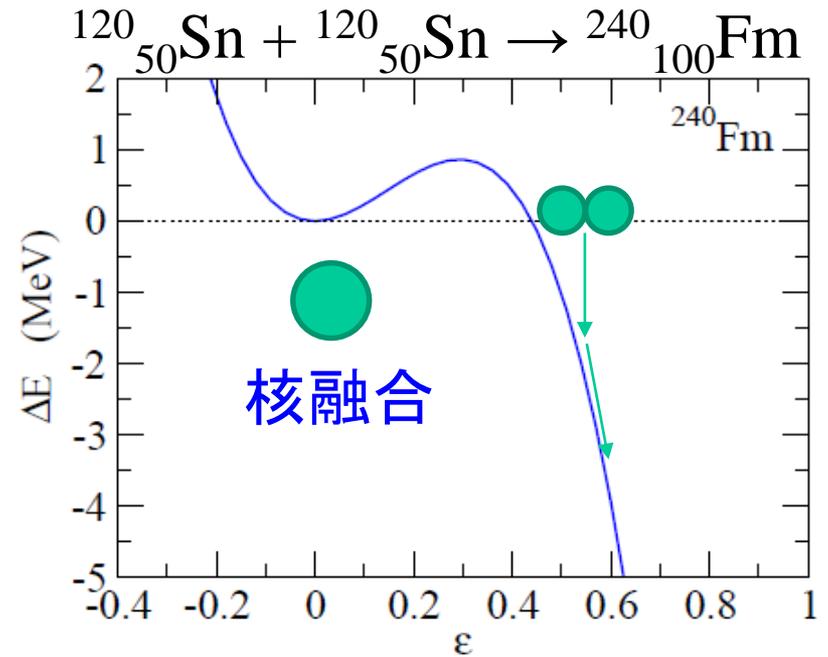
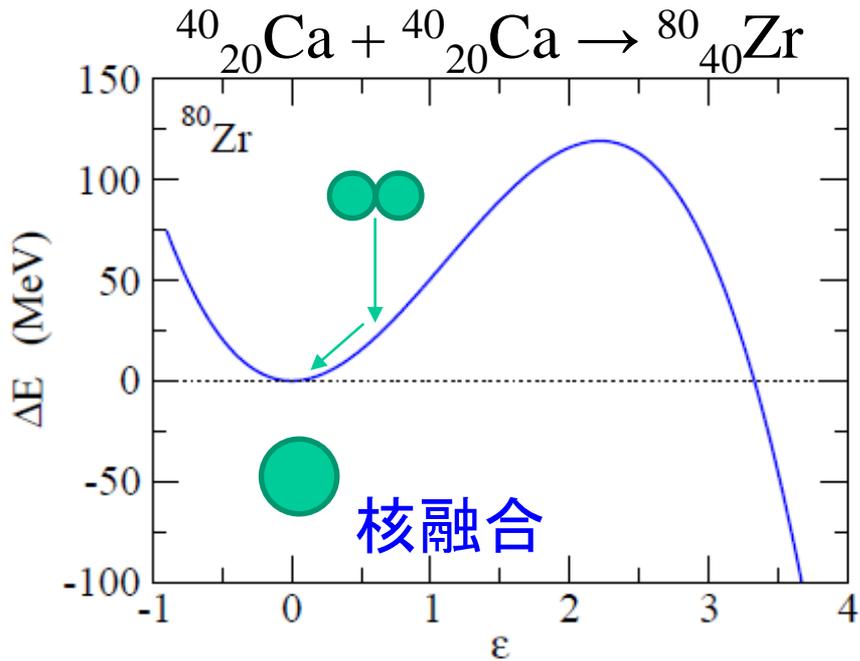
同じ原子核が接触すると:



$$a = R_0 \cdot (1 + \epsilon)$$

$$b = R_0 \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

$$a/b \sim 2R/R = 2 \rightarrow \epsilon \sim 0.587$$

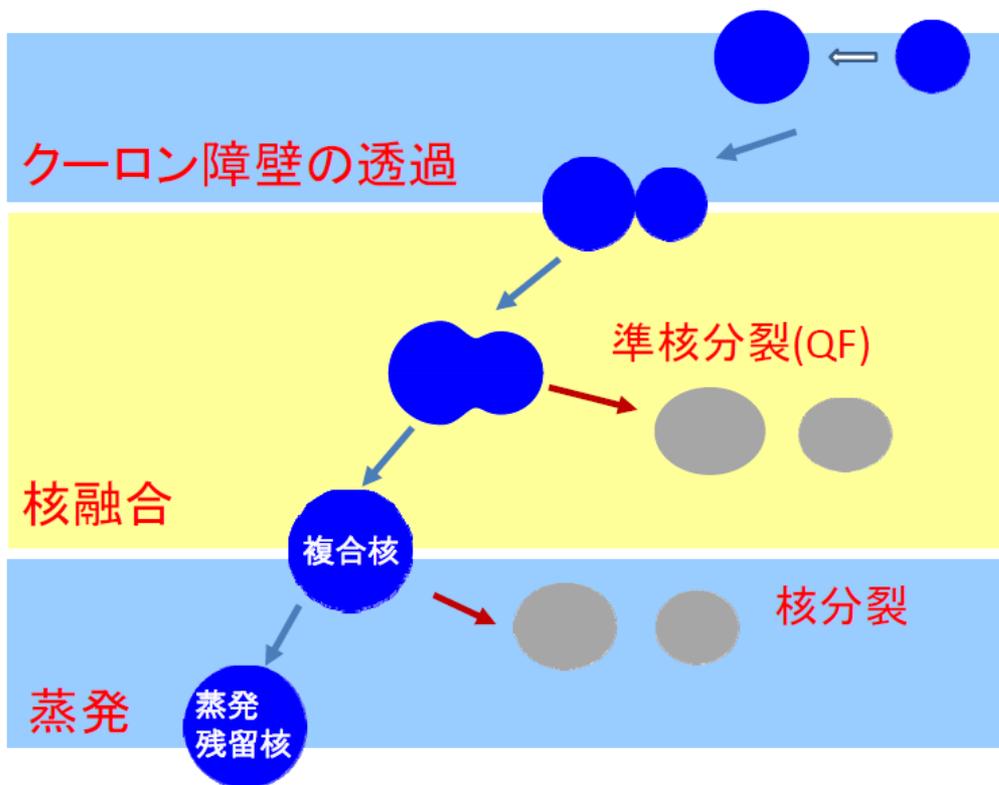


* どのように核融合反応断面積を測定するのか?

➤ 中重核領域の場合:

✓ 核融合生成物の直接測定 (蒸発残留核 + 核分裂)

➤ 重核・超重核領域の場合:



準核分裂 + 生き残りの2重苦

大きな準核分裂の確率のため、核分裂片の測定は複合核形成を意味しない (QFとFFの区別は実験的に困難)

蒸発残留核の測定をもって複合核形成とみなす

重い複合核:
圧倒的な確率で核分裂
(例: $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$ 反応では
核分裂しない確率は
 $P_{\text{suv}} \sim 10^{-6}$ 程度)

formation of evaporation residues:
a very rare process

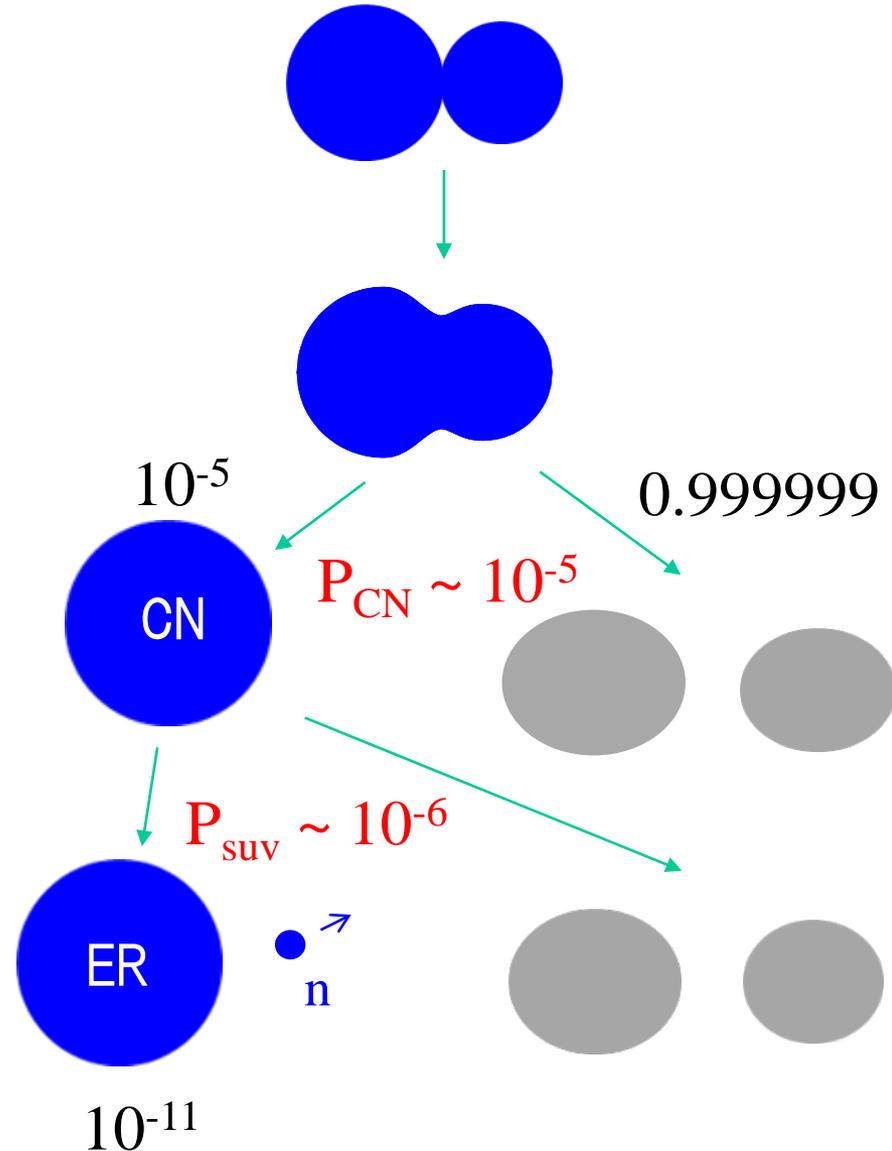


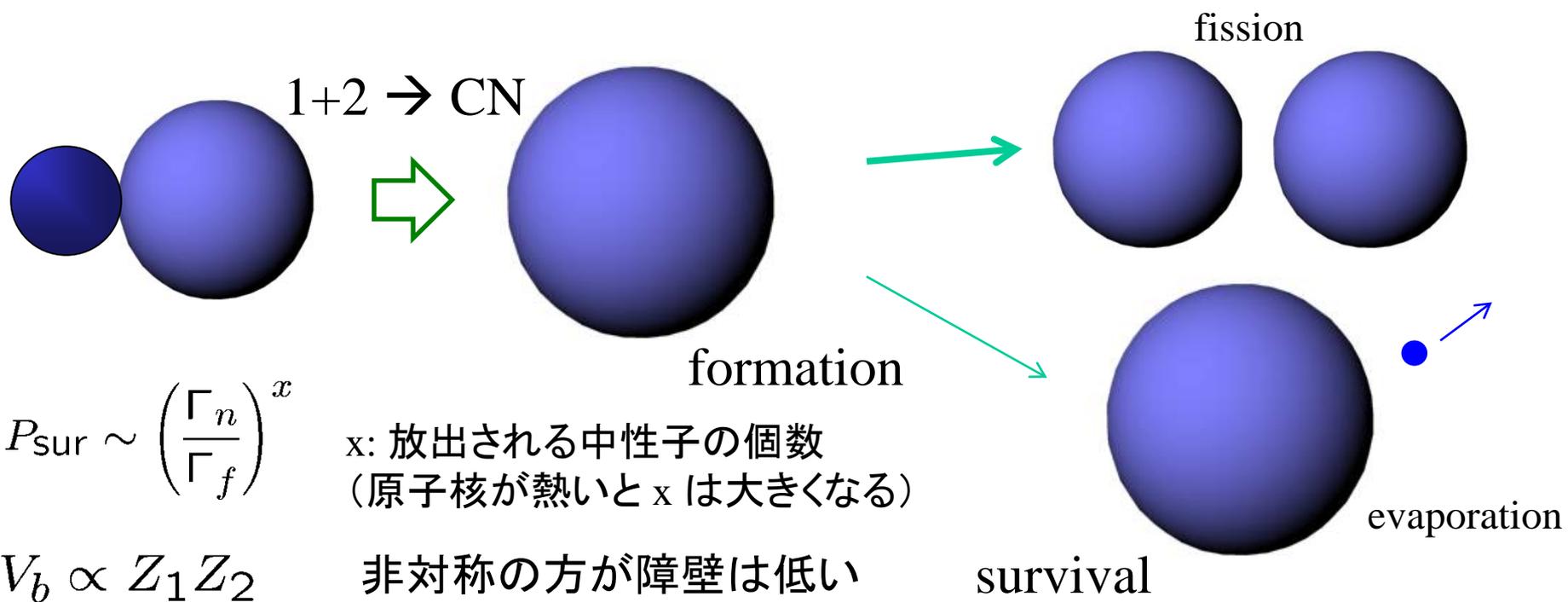
a small uncertainty in each process
can be largely amplified



challenges: how to reduce theoretical
uncertainties and make a reliable
prediction

typical values for
Ni+Pb reaction





	Hot Fusion	Cold Fusion
Example	$^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{187}\text{Nh} + 4n$	$^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{278}\text{Nh} + 1n$
asymmetry	large	small
Capture	large	small
Survival	small	large

超重元素探索の歴史

- 熱い核融合反応 $Z=102: {}^{246}\text{Cm}({}^{12}\text{C}, 4n){}^{254}\text{No}$ (シーボルク(米)ら 1958)
 $Z=104: {}^{242}\text{Pu}({}^{22}\text{Ne}, 4n){}^{260}\text{Rf}$ (フレロフ(ロ)ら 1964)
 $Z=106: {}^{249}\text{Cf}({}^{18}\text{O}, 4n){}^{263}\text{Sg}$ (ギオーソ(米)ら 1974)
 など → これ以上重い元素ではうまくいかなかった

- 安定島の理論的予言(スビアテッキら 1966 年)

- 冷たい核融合反応の提案(オーガネシアン(ロ) 1975)

「 ${}^{208}\text{Pb}$ や ${}^{209}\text{Bi}$ を使うと冷たい複合核ができてうまくいくかもしれない」

${}^{208}\text{Pb}({}^{50}\text{Ti}, 2n){}^{255}\text{Rf}$ の生成(オーガネシアン(ロ) 1975)

→ その後 GSI (ドイツの研究所)で発展、後に理研も

Bh (Z=107: アムブルスター(独)ら 1981)

Hs (Z=108: アムブルスター(独)ら 1984)

Mt (Z=109: アムブルスター(独)ら 1984)

Ds (Z=110: ホフマン(独)ら 1994)

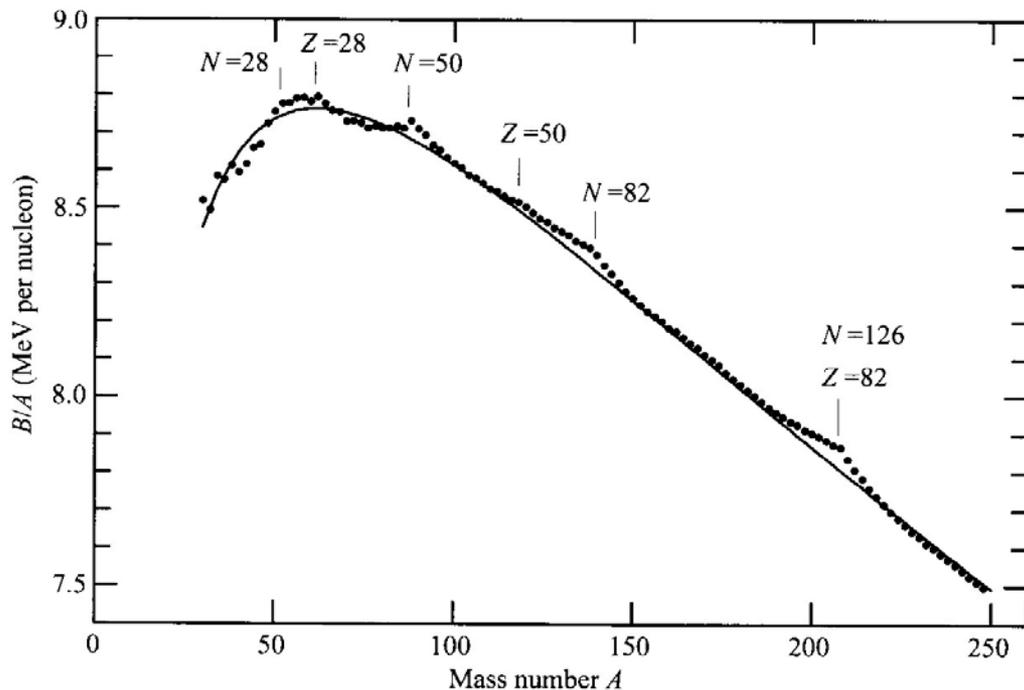
Rg (Z=111: ホフマン(独)ら 1994)

Cn (Z=112: ホフマン(独)ら 1996)

Nh (Z=113: 森田(日)ら) 2004

原子核の質量

$$m(N, Z)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B$$



$N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ (魔法数)に対して束縛エネルギー大

⇒ とても安定(平均に比べて質量が軽い)



超重元素の励起エネルギー: $E^* = m_1 c^2 + m_2 c^2 + E_{\text{cm}} - m_{\text{CN}} c^2$

→ ${}^{208}\text{Pb}$ を使うと E^* を小さくすることができる
($m_1 c^2$ が小さいから)

超重元素探索の歴史

- 熱い核融合反応 $Z=102$: $^{246}\text{Cm} (^{12}\text{C}, 4n)^{254}\text{No}$ (シーボルク(米)ら 1958)
 $Z=104$: $^{242}\text{Pu} (^{22}\text{Ne}, 4n)^{260}\text{Rf}$ (フレロフ(ロ)ら 1964)
 $Z=106$: $^{249}\text{Cf} (^{18}\text{O}, 4n)^{263}\text{Sg}$ (ギオーソ(米)ら 1974)
 など → これ以上重い元素ではうまくいかなかった
- 安定島の理論的予言(スビアテッキら 1966 年)
- 冷たい核融合反応の提案(オーガネシアン(ロ) 1975)
「 ^{208}Pb や ^{209}Bi を使うと冷たい複合核ができてうまくいくかもしれない」
 $^{208}\text{Pb} (^{50}\text{Ti}, 2n)^{255}\text{Rf}$ の生成(オーガネシアン(ロ) 1975)
→ その後 GSI (ドイツの研究所) で発展、後に理研も
- オーガネシアン(ロ)は同時に ^{48}Ca を使う実験も検討していた
最初の実験(1978): $^{48}\text{Ca} + ^{246, 248}\text{Cm}, ^{243}\text{Am}, ^{242}\text{Pu} \rightarrow Z=114, 115, 116$
(いずれも生成には成功せず。上限値のみ)
→ その後フレロフ研究所(ロシアの研究所)で発展(「熱い」核融合)
Nh ($Z=113$: オーガネシアン(ロ)ら) 2003
Fl ($Z=114$: オーガネシアン(ロ)ら) 1999
Mc ($Z=115$: オーガネシアン(ロ)ら) 2003
Lv ($Z=116$: オーガネシアン(ロ)ら) 2000
Ts ($Z=117$: オーガネシアン(ロ)ら) 2010
Og ($Z=118$: オーガネシアン(ロ)ら) 2002

超重元素探索の歴史

- 熱い核融合反応 $Z=102: {}^{246}\text{Cm} ({}^{12}\text{C}, 4n) {}^{254}\text{No}$ (シーボルク(米)ら 1958)
 $Z=104: {}^{242}\text{Pu} ({}^{22}\text{Ne}, 4n) {}^{260}\text{Rf}$ (フレロフ(ロ)ら 1964)
 $Z=106: {}^{249}\text{Cf} ({}^{18}\text{O}, 4n) {}^{263}\text{Sg}$ (ギオーソ(米)ら 1974)
など → これ以上重い元素ではうまくいかなかった
- 安定島の理論的予言(スビアテッキら 1966 年)
- 冷たい核融合反応の提案(オーガネシアン(ロ) 1975)
「 ${}^{208}\text{Pb}$ や ${}^{209}\text{Bi}$ を使うと冷たい複合核ができてうまくいくかもしれない」
 ${}^{208}\text{Pb}({}^{50}\text{Ti}, 2n) {}^{255}\text{Rf}$ の生成(オーガネシアン(ロ) 1975)
→ その後 GSI (ドイツの研究所)で発展、後に理研も
- オーガネシアン(ロ)は同時に ${}^{48}\text{Ca}$ を使う実験も検討していた
最初の実験(1978): ${}^{48}\text{Ca} + {}^{246, 248}\text{Cm}, {}^{243}\text{Am}, {}^{242}\text{Pu} \rightarrow Z=114, 115, 116$
(いずれも生成には成功せず。上限値のみ)
→ その後フレロフ研究所(ロシアの研究所)で発展(「熱い」核融合)
オーガネシアンの考え:
 ${}^{208}\text{Pb}$ や ${}^{209}\text{Bi}$ を固定して重い元素を作ろうとすると入射核が重くなり、系の対称性が増す。障壁の高さの関係から不利。
また、中性子の数が足りずに安定の島には行けない。
→ 「熱い」核融合反応を使えば解決

$$\sigma \sim \text{fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$$

RIKEN

(Cold fusion)



3rd event Aug. 12 2012

113

112

known nuclides

111

110

109

108

107

106

105

104

103

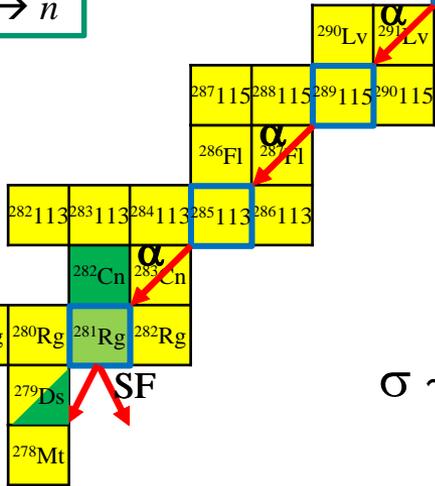
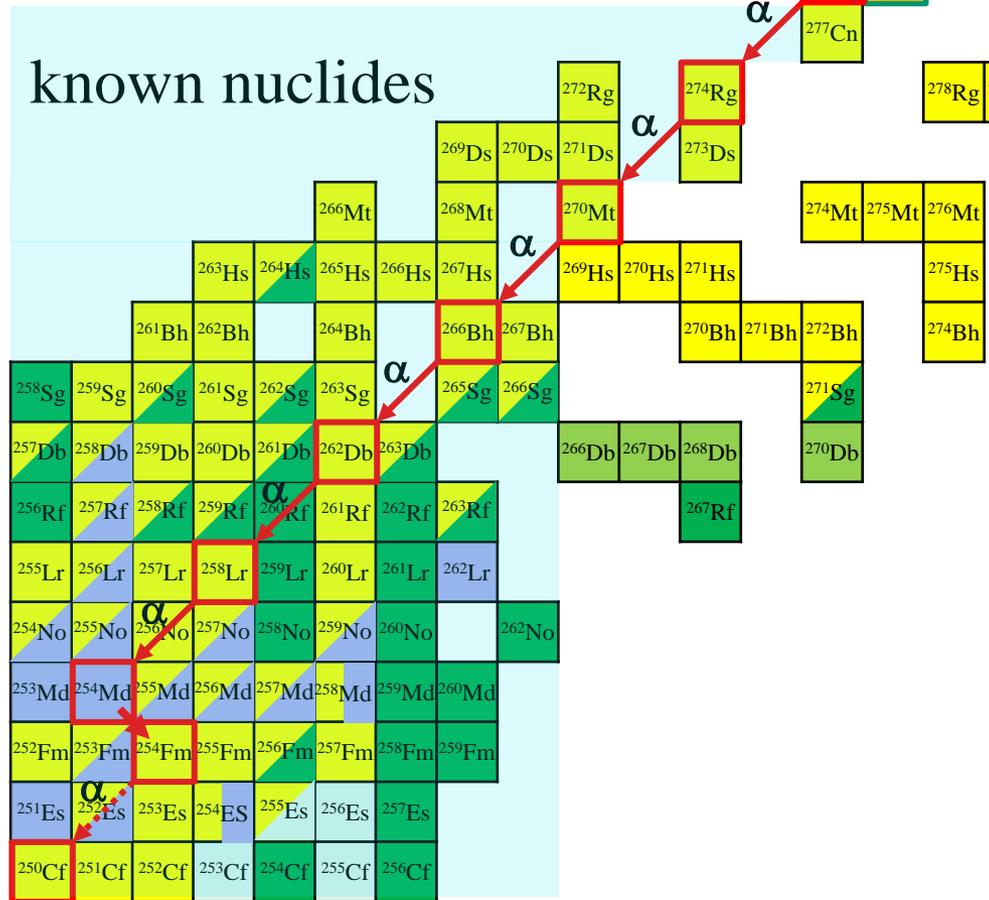
102

101

100

99

98



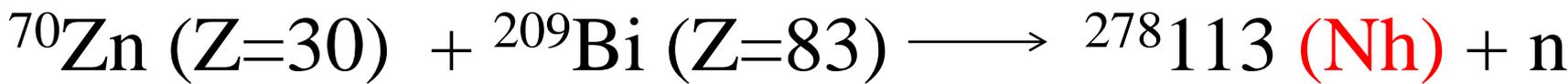
Dubna
(Hot fusion)

$$\sigma \sim \text{pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$$

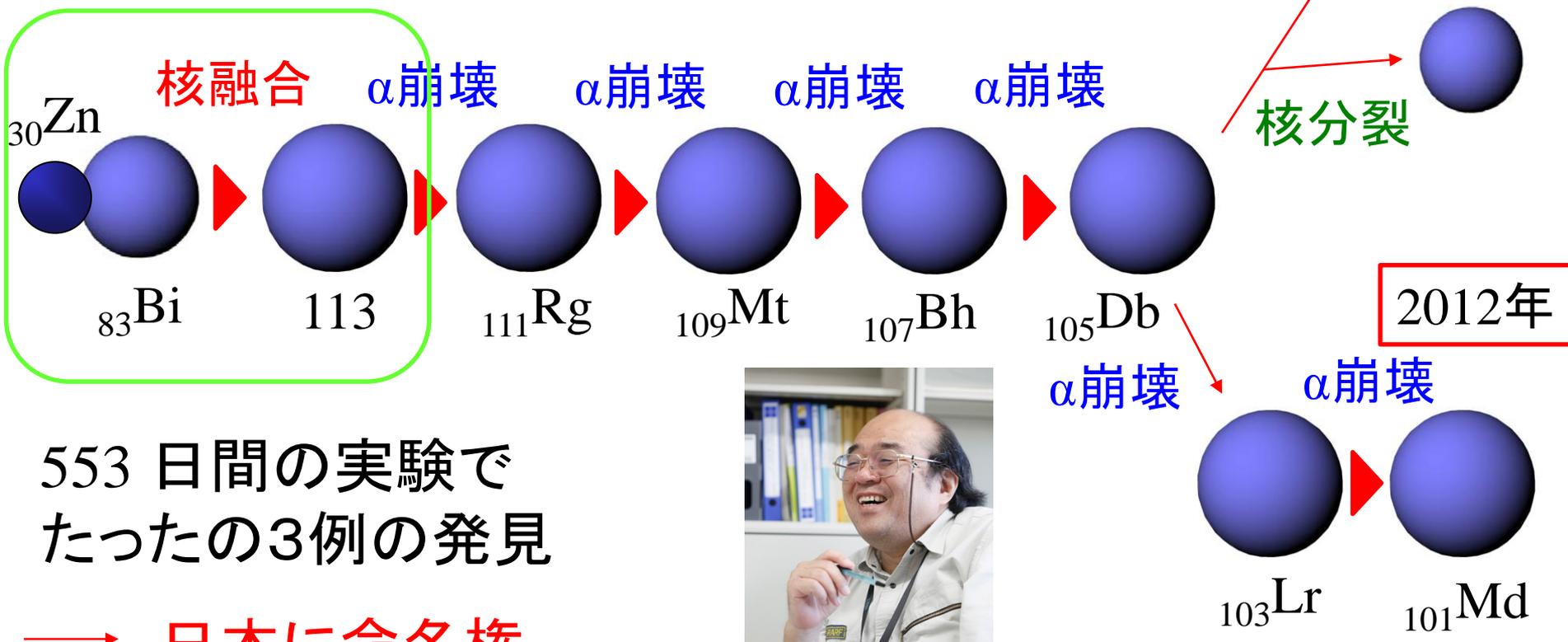
cf. Cold Fusion:
既知核とつながる
(不定性がより少ない)

Hot Fusion:
より中性子過剰な複合核
が作れる。

新元素113番 ニホニウム (Nh)



光速の約10パーセント
まで加速



553 日間の実験で
たったの3例の発見

→ 日本に命名権
ニホニウム Nh



Campus Map

東北大学 大学院 理学研究科・理学部
青葉山北キャンパスマップ

Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University



- 所 (Building)
- ing Points (Access Points)
- 下鉄東西線 (Subway East-West Line)
- バス停 (Bus Stop)
- teeing Loop Bus Stop (Loop Bus Stop)
- ンバスバス バス停 (Campus Bus Stop)
- 停 (市バス) Stop (City Bus Stop)
- コンビニ Convenience Store
- 購買 University Shop
- 食堂・喫茶 Dining / Cafeteria
- タクシー乗り場 Taxi Stand
- 車いす対応トイレ Disabled Toilet
- 公共電話 Public Phone
- 一方通行 One-way

理学研究科
Graduate School of
Pharmaceutical Science

北青葉山憩い公園
Kita-Aobayama Park

中央広場
Central Plaza

サイクロトロン・ラジオ
アイソトープセンター
Cyclotron and
Radiotope Center

至宮城教育大学

至工学部

至川内キャンパス

幻の元素、ニッポニウム (Np)

1908年:「43番目の元素」として新元素を発見し
ニッポニウム (Np) と命名したと発表。

→ その後疑問視され、周期表からは落とされる
(実は75番元素レニウム(当時未発見)だった)



小川正孝
(1865－1930)



東北大学第4代総長
(1919－1928)

ニホニウム Nh は
この時以来の悲願
達成！

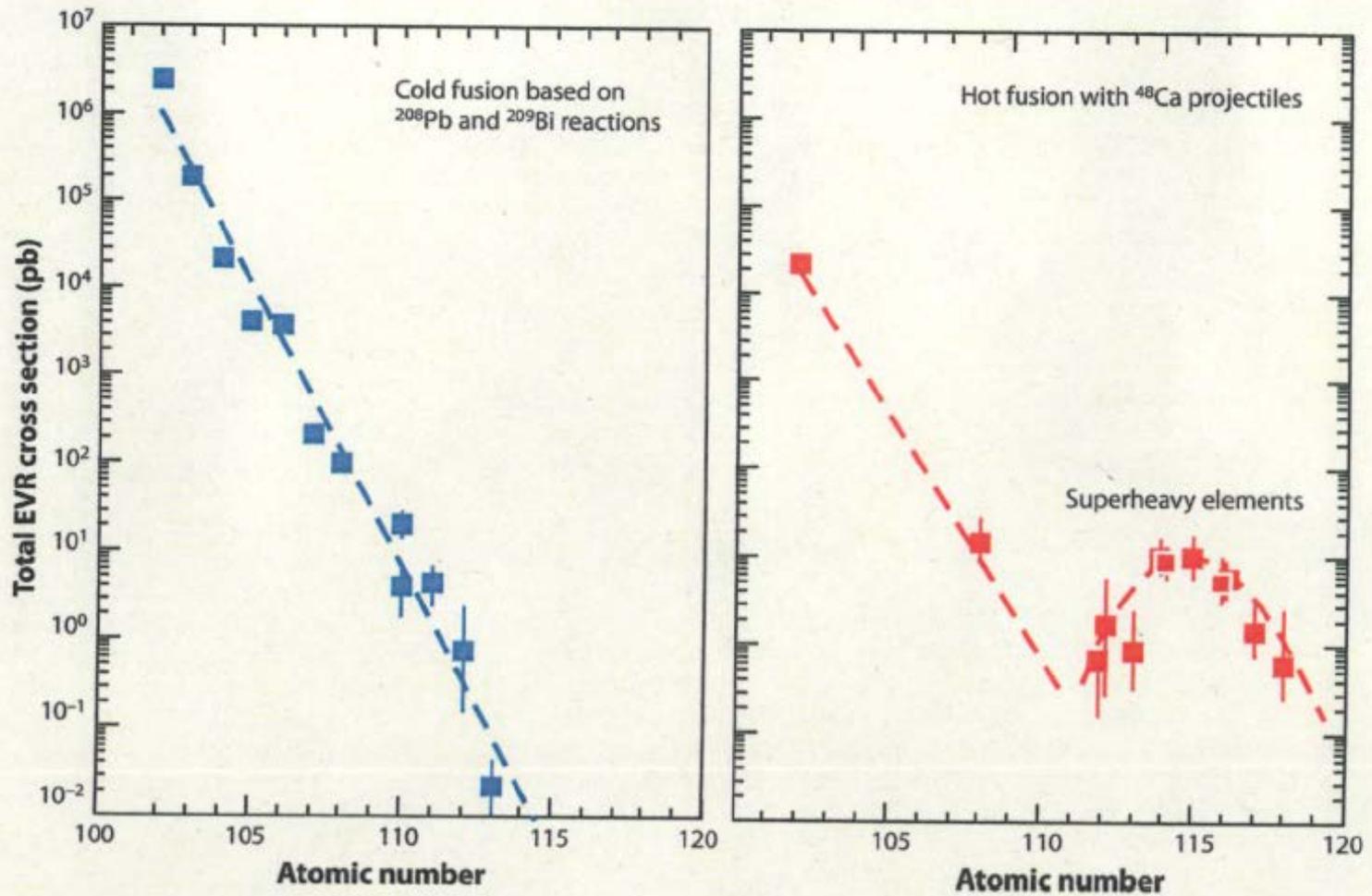


Figure 3

Measured cross sections for cold and hot fusion reactions. The total evaporation residue (EVR) cross section is the maximum value of the sum of neutron evaporation channels measured as a function of the beam energy.

Z=120

$^{244}\text{Pu}(^{58}\text{Fe},\text{xn})^{302-\text{x}}120$ (オーガネシアン(ロ)ら 2007)

$^{238}\text{U}(^{64}\text{Ni},\text{xn})^{302-\text{x}}120$ (ホフマン(独)ら 2008)

$^{248}\text{Cm}(^{54}\text{Cr},\text{xn})^{302-\text{x}}120$ (ホフマン(独)ら 2011)

$^{249}\text{Cf}(^{50}\text{Ti},\text{xn})^{299-\text{x}}120$ (ホフマン(独)ら 2011)

いずれもまだ合成には成功せず。

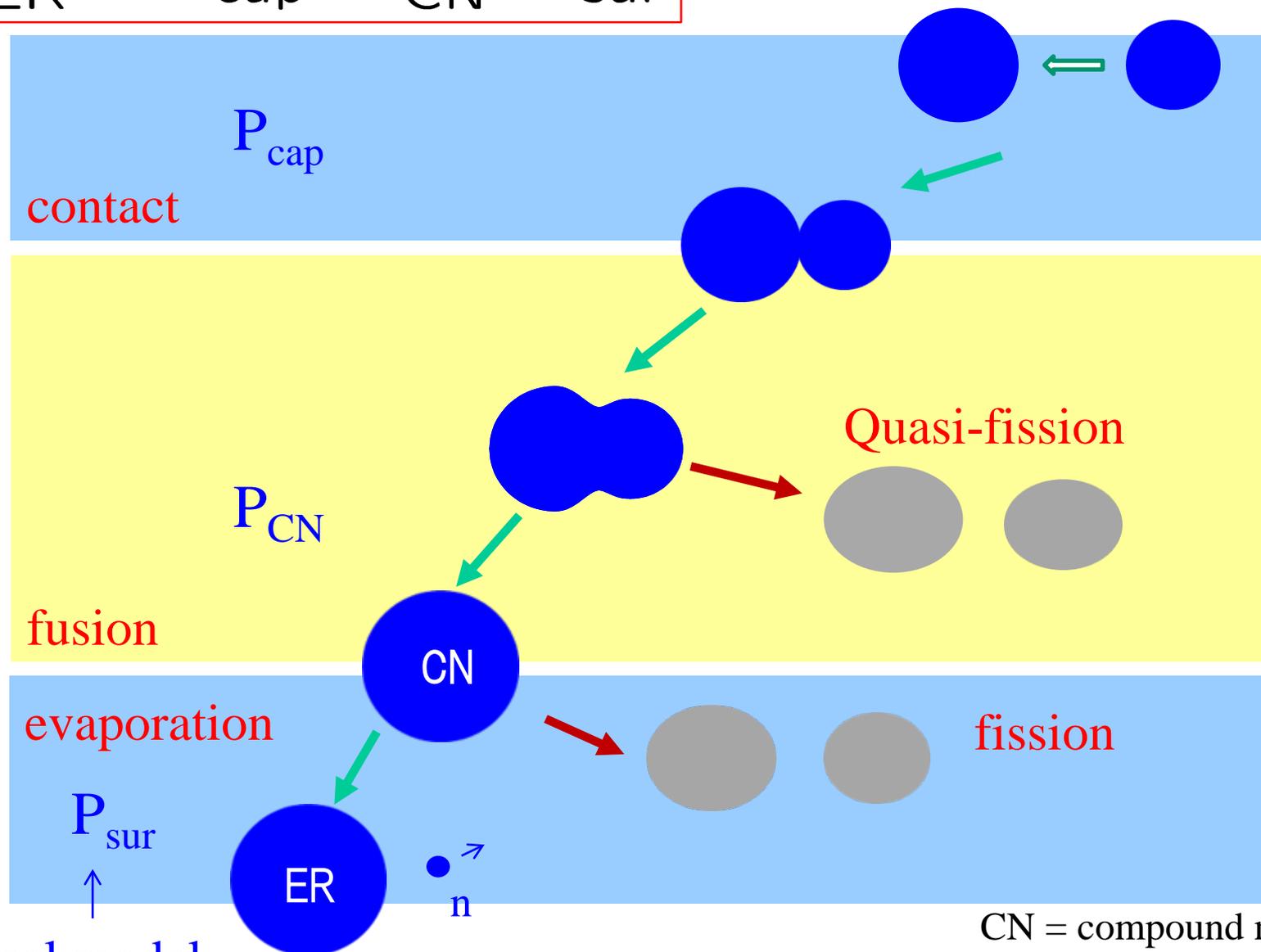
Z=119

$^{249}\text{Bk}(^{50}\text{Ti},\text{xn})^{299-\text{x}}119$ (ホフマン(独)ら 2012)

まだ合成には成功せず。

超重元素生成反応の理論

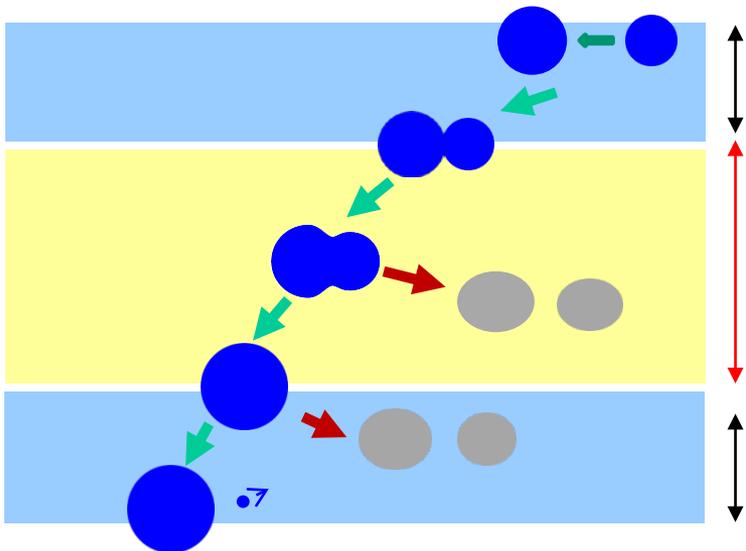
$$P_{ER} = P_{cap} \cdot P_{CN} \cdot P_{sur}$$



statistical model

CN = compound nucleus
ER = evaporation residue

超重元素生成反応の理論



量子トンネルの確率

ランジュバン方程式

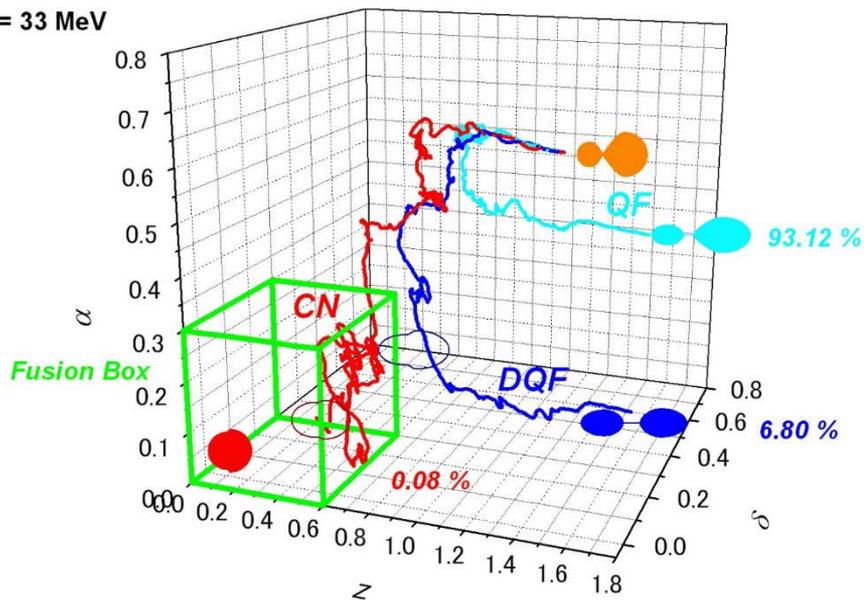
V.I. Zagrebaev and W. Greiner, NPA944('15)257

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

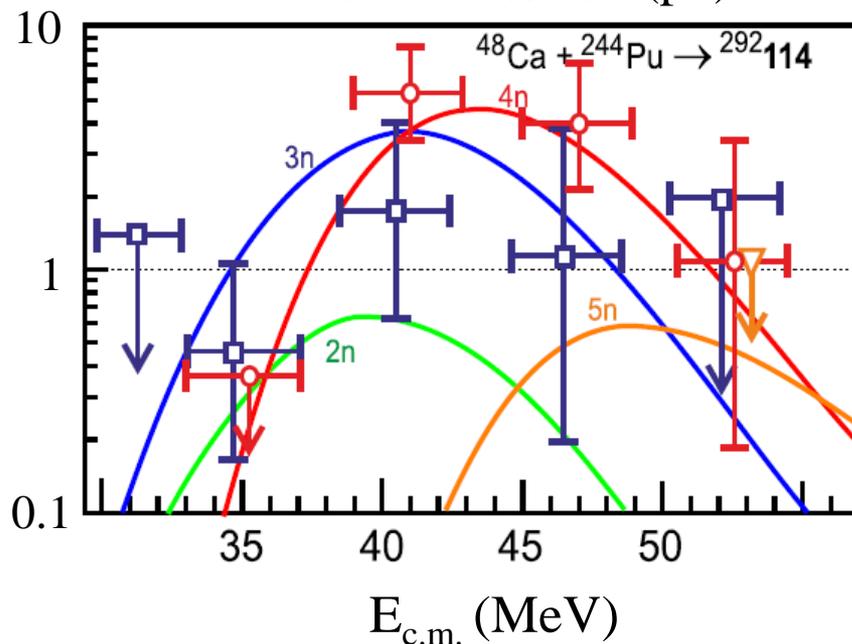
統計模型



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



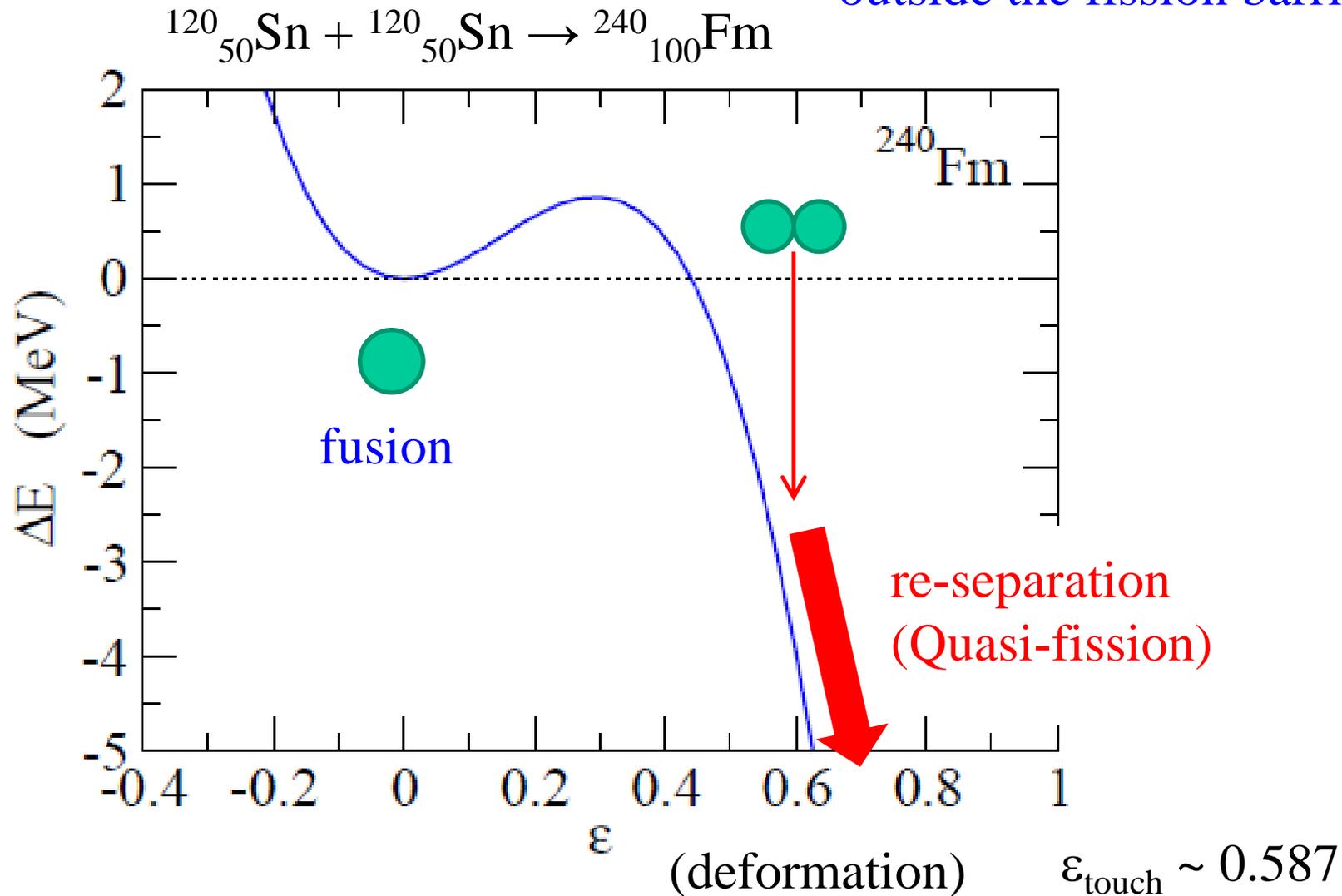
蒸発残留核の断面積 (pb)



Langevin approach to P_{CN}

Fission barrier (Liquid Drop Model)

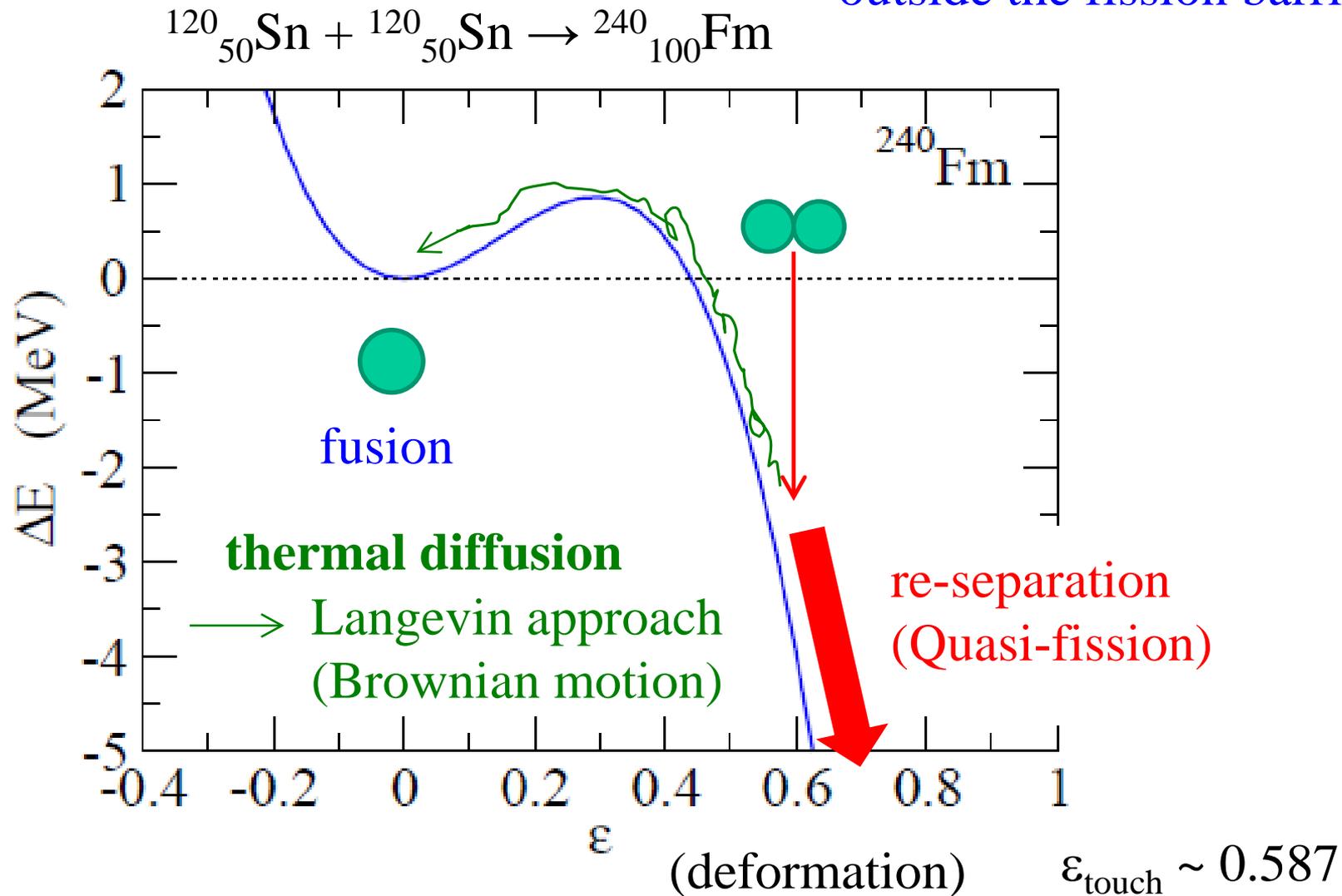
touching point:
outside the fission barrier



Langevin approach to P_{CN}

Fission barrier (Liquid Drop Model)

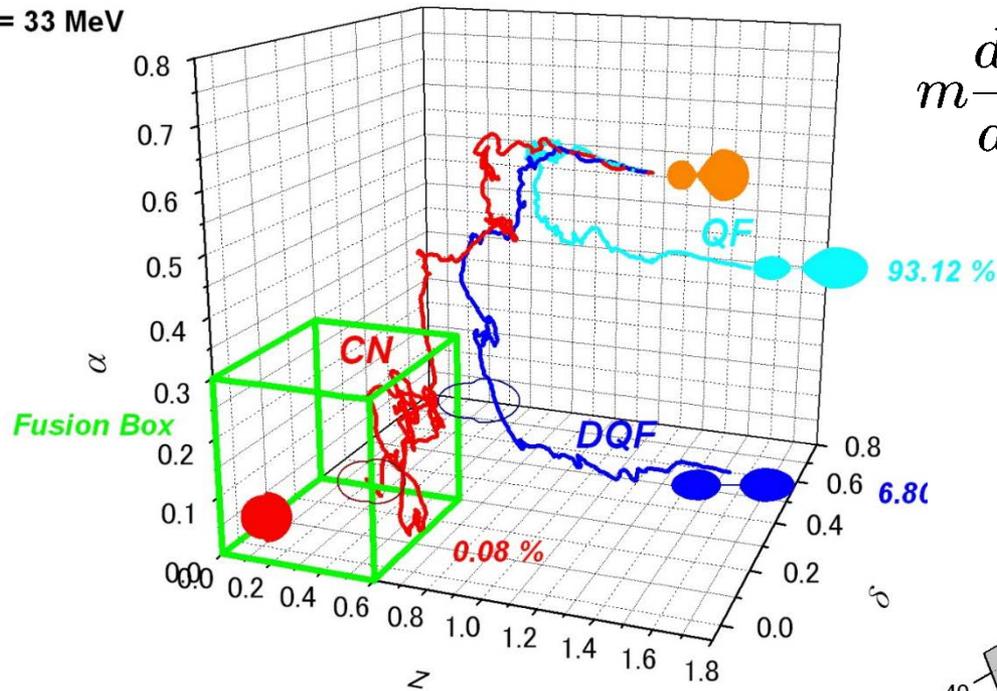
touching point:
outside the fission barrier



Theory: Lagenvin approach

$^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{292}\text{114}$

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

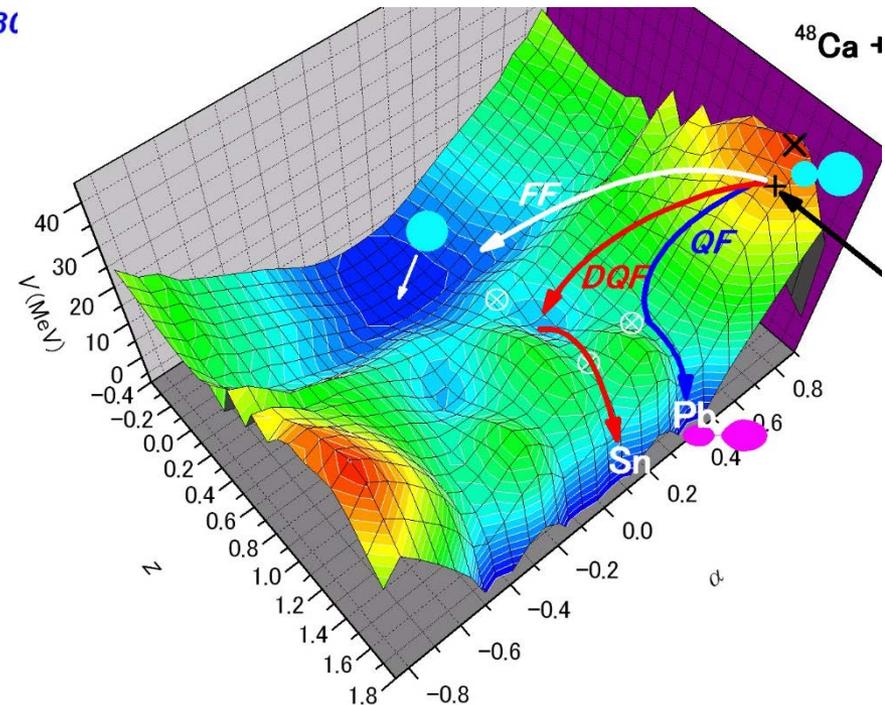


- q :
- internuclear separation (z),
 - deformation (δ),
 - asymmetry of the two fragments (α)

multi-dimensional extension of:

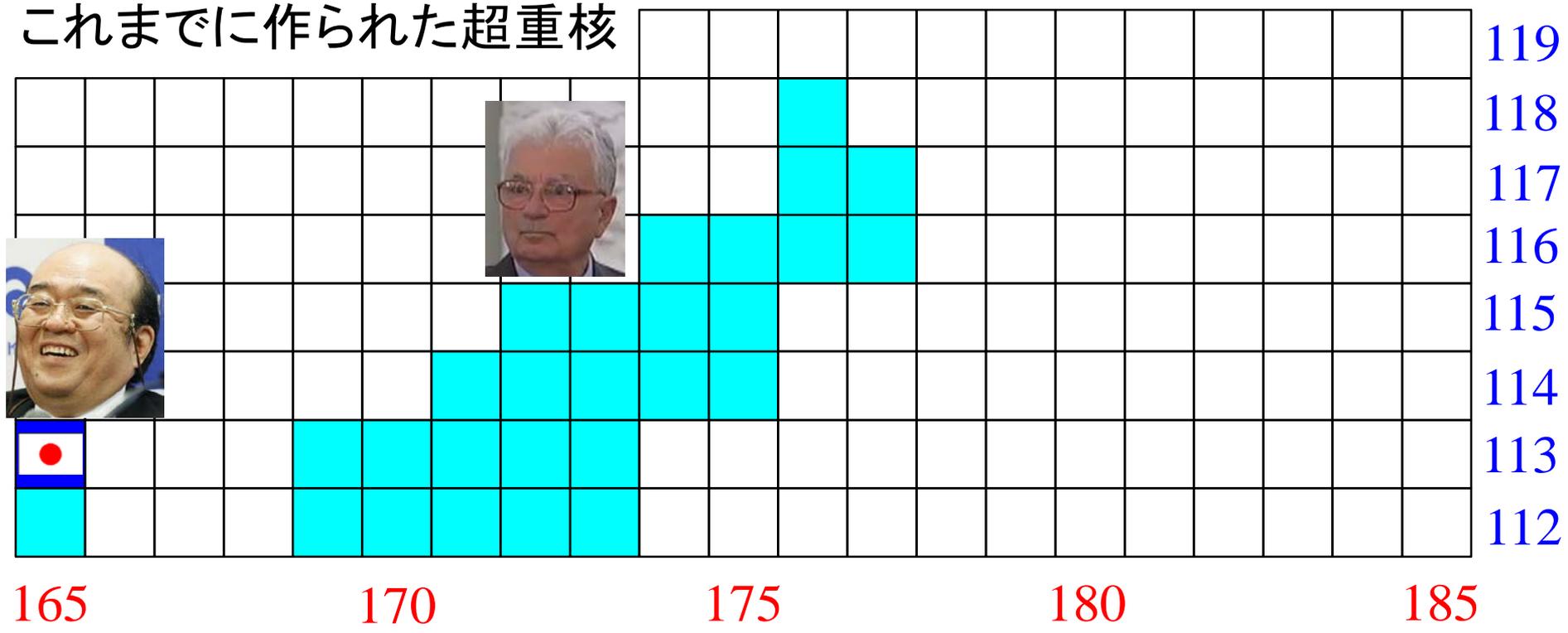
$$m \frac{d^2 q}{dt^2} = - \frac{dV(q)}{dq} - \gamma \frac{dq}{dt} + R(t)$$

γ : friction coefficient
 $R(t)$: random force



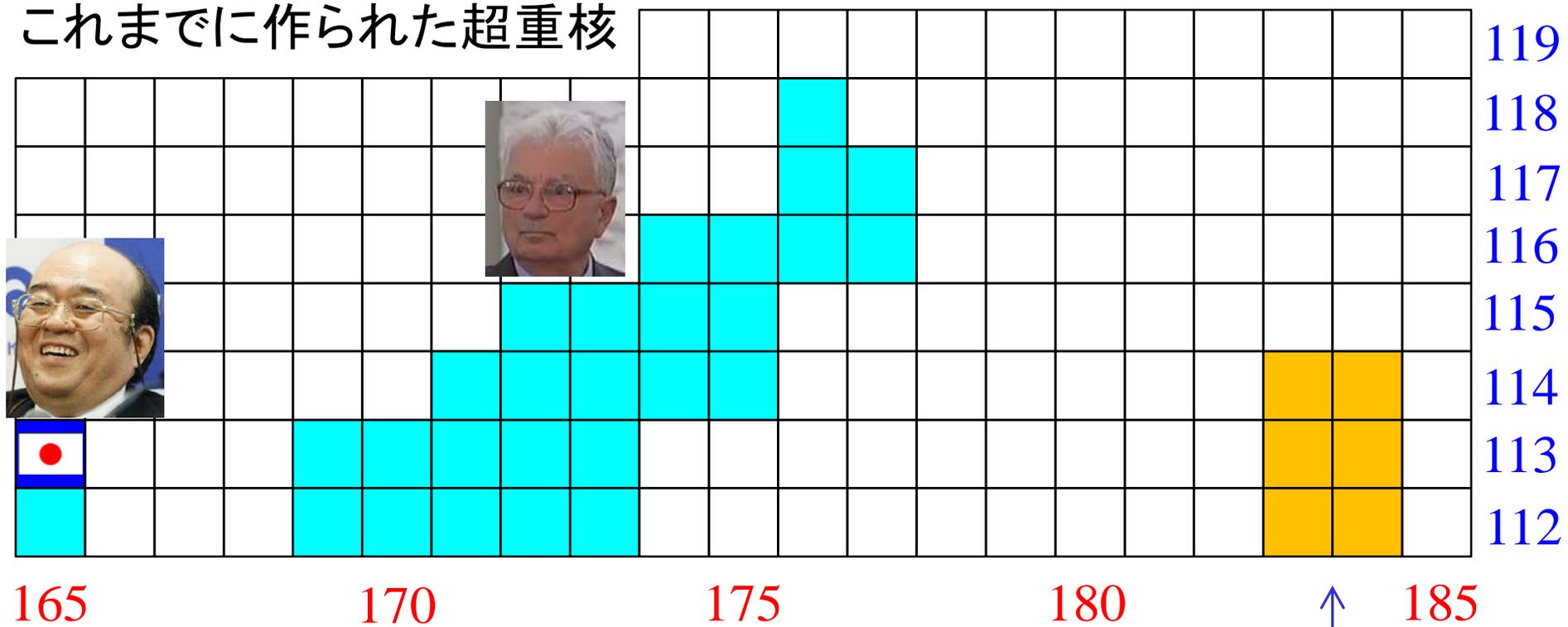
安定の島に向けて

これまでに作られた超重核



安定の島に向けて

これまでに作られた超重核



安定の島はこの辺り(?)

島にたどり着くためには中性子過剰核ビームが必要不可欠

将来の重要課題(反応系、ビームのエネルギー、断面積の見積もり)

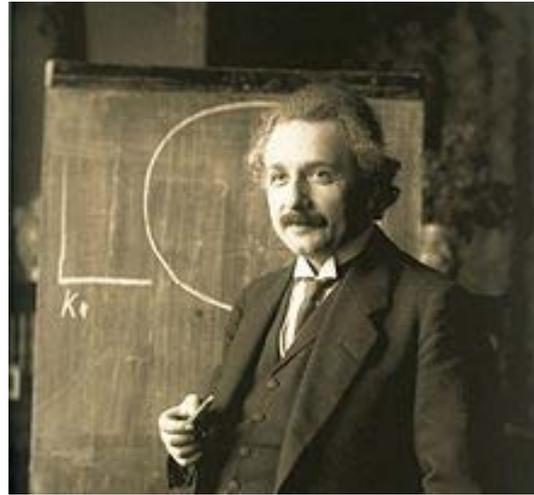
超重元素の化学

Group → ↓ 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		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		104 Rf	105 Db	106 Sq	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides	57 La	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			
Actinides	89 Ac	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			

- 超重元素を周期表のここに置けるの？
- つまり、Nh は B, Al, Ga 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

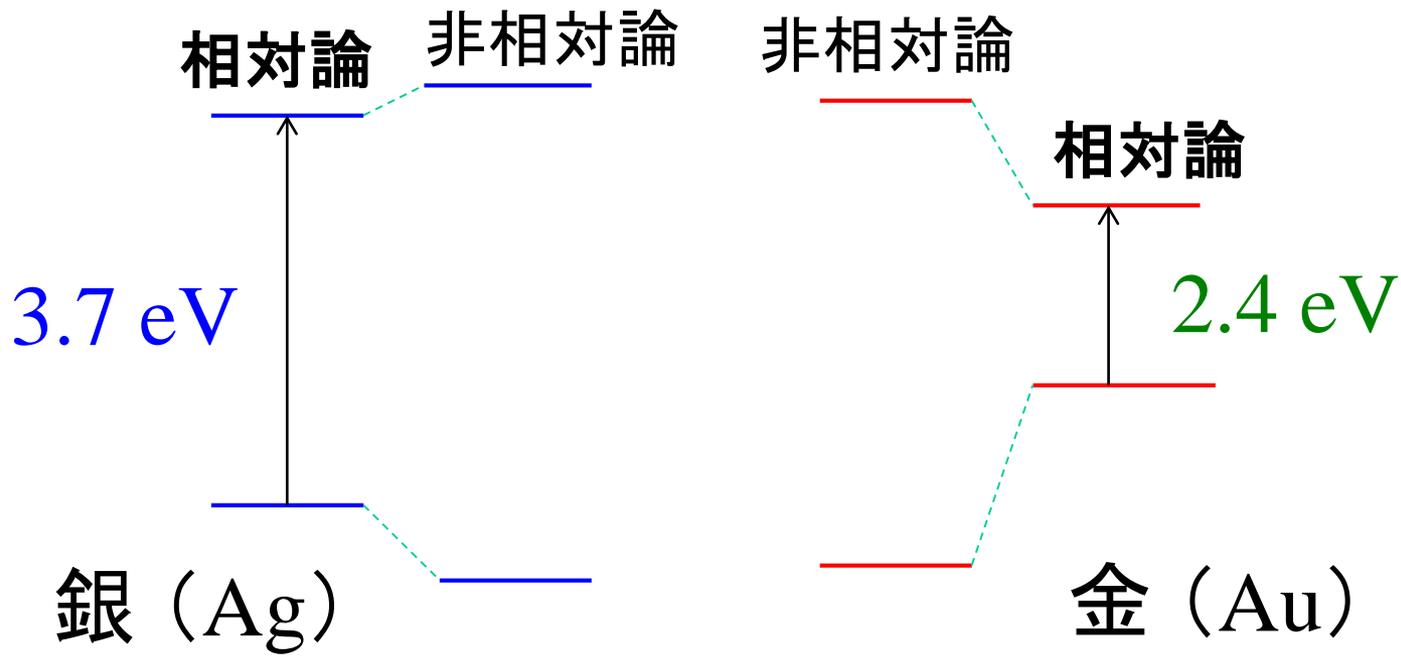
$$E = mc^2$$



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、

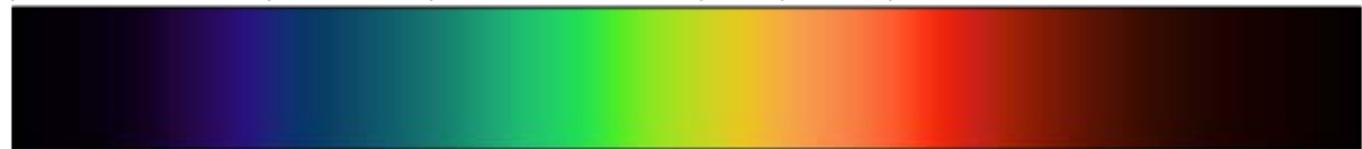
$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2} \sim mc^2 \left(1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} - \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \dots \right)$$

相対論的効果



可視光

3.7 eV 3.26 eV 2.4 eV 1.65 eV

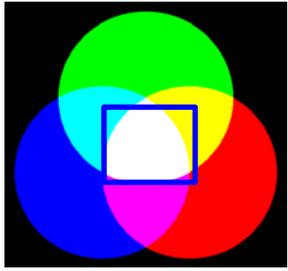


吸收(金) 反射(金)



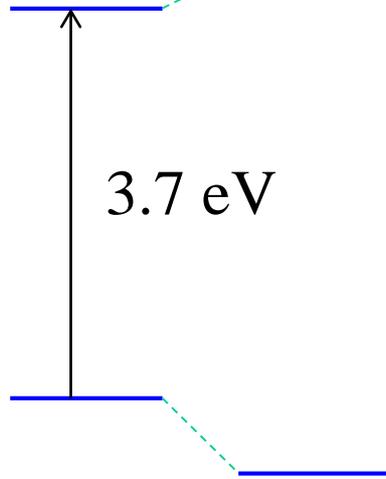
反射(銀)



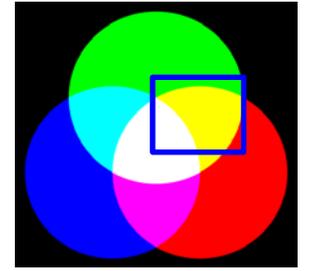
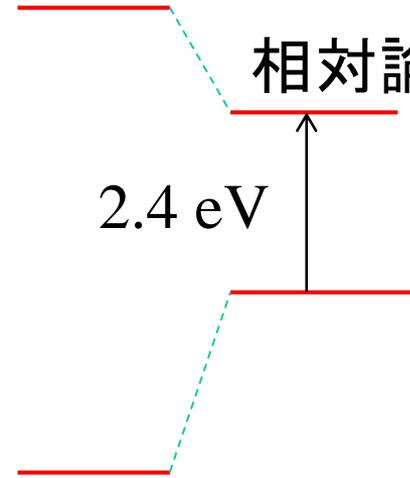


光の
吸収なし

相対論 非相対論



非相対論



青色の光
が吸収

相対論



銀

47番元素



金

79番元素

超重元素の化学

Group → ↓ 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		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		104 Rf	105 Db	106 Sq	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides	57 La	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			
Actinides	89 Ac	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