



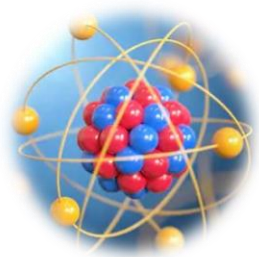
西安，2023年9月20日

超重新元素及新核素合成

周小红

中国科学院近代物理研究所

- 超重元素和核素合成的背景和意义
 - 重元素和核素合成技术方法、重要成果
 - 超重研究现状、困难和展望
 - 重质量区新核素合成
 - 我国新元素合成计划及进展
 - 总结
- } 我国布局



元素和元素周期表

“**元素 element**” 是指 “**基本要素**”

英国化学家波义耳1661年提出化学元素概念

化学元素：相同核电荷数的一类原子的总称

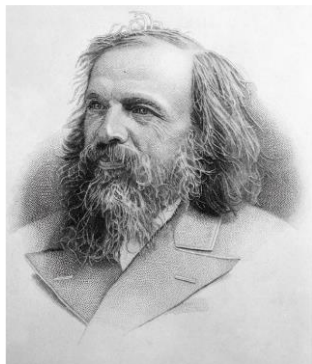
表征元素存在特征时间：原子核产生后，需要 $\sim 10^{-14}$ 秒形成稳定原子结构



α 粒子散射实验

1911年，卢瑟福提出：

原子：原子核 + 核外电子



D. Mendeleev

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.
ОСНОВАННОЙ НА ВѢСѢ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

	Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
	V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
	Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
	Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
	Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.
	Ni = Co = 59	Pi = 106,4	O = 199.
	Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2
	B = 11	Al = 27,1	? = 68
	C = 12	Si = 28	? = 70
	N = 14	P = 31	As = 75
	O = 16	S = 32	Se = 79,4
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4
		Ca = 40	Sr = 87,6
		? = 45	Ce = 92
		?Er = 56	La = 94
		?Yt = 60	Dj = 95
		?In = 75,4	Th = 118?
			U = 116
			At = 197?
			Sn = 118
			Sb = 122
			Bi = 210?
			Te = 128?
			I = 127
			Tl = 204.
			Pb = 207.

1869年创建了元素周期表

- 元素化学性质随原子量周期性变化
- 预言了Ge、Sc、Ga和Tc元素的存在
- 修订了已知元素的原子量
-

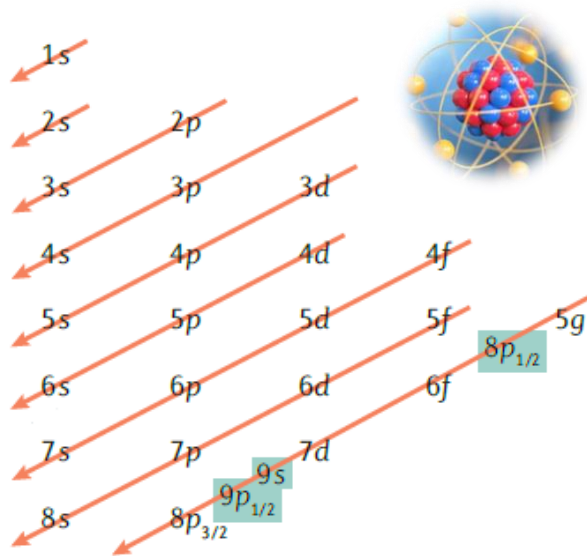
Periodic Table of Elements



元素和元素周期表



WHY PTE: Pauli and Aufbau principles



元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H 氢																		2 He 氦
2	3 Li 锂	4 Be 铍												5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
3	11 Na 钠	12 Mg 镁												13 Al 铝	14 Si 硅	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氩
4	19 K 钾	20 Ca 钙	21 Sc 钪	22 Ti 钛	23 V 钒	24 Cr 铬	25 Mn 锰	26 Fe 铁	27 Co 钴	28 Ni 镍	29 Cu 铜	30 Zn 锌	31 Ga 镓	32 Ge 锗	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪	
5	37 Rb 铷	38 Sr 锶	39 Y 钇	40 Zr 锆	41 Nb 铌	42 Mo 钼	43 Tc 锝	44 Ru 钌	45 Rh 铑	46 Pd 钯	47 Ag 银	48 Cd 镉	49 In 铟	50 Sn 锡	51 Sb 锑	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙	
6	55 Cs 铯	56 Ba 钡	La-Lu 镧系	72 Hf 铪	73 Ta 钽	74 W 钨	75 Re 铼	76 Os 锇	77 Ir 铱	78 Pt 铂	79 Au 金	80 Hg 汞	81 Tl 铊	82 Pb 铅	83 Bi 铋	84 Po 钋	85 At 砹	86 Rn 氡	
7	87 Fr 钫	88 Ra 镭	Ac-Lr 锕系	104 Rf 钚	105 Db 铼	106 Sg 钨	107 Bh 铪	108 Hs 钷	109 Mt 镆	110 Ds 达	111 Rg 錀	112 Cn 鎇	113 Nh 鉨	114 Fl 鉈	115 Mc 镆	116 Lv 鉨	117 Ts 鰐	118 Og 鰐	
8	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	

1s
2s2p
3s3p
4s3d4p
5s4d5p
6s5d6p
7s6d7p



57 La 镧	58 Ce 铈	59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆	65 Tb 铽	66 Dy 镝	67 Ho 铈	68 Er 铒	69 Tm 铥	70 Yb 镱	71 Lu 镱
89 Ac 锕	90 Th 钍	91 Pa 镤	92 U 铀	93 Np 镎	94 Pu 钚	95 Am 镅	96 Cm 锔	97 Bk 锫	98 Cf 锿	99 Es 镄	100 Fm 镆	101 Md 镅	102 No 镎	103 Lr 镥

主族金属 副族金属 非金属元素 稀有气体 人造元素

4f
5f

Where does the PTE end from an atomic or nuclear point of view?





元素存在的极限？

Is there a limit in term of the Z number to the existence of elements?

原子层次：元素存在的的电荷数上限？

玻尔原子理论

原子最内层轨道电子运动速度：

- 氢原子： $v_0 = \alpha c = \frac{1}{137} c$
- 假设原子核为点电荷：
重原子： $v \approx Z\alpha c = \frac{Z}{137} c, Z < 137$

量子电动力学

原子最内层轨道上电子动能：

- 假设原子核为点电荷：
 $E \sim m_e c^2 \left[(1 - (Z\alpha)^2)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right], Z < 137$
- 考虑原子核的大小： $Z < 173$

量子电动力学：原子（元素）存在的极限在173！

Bohr's velocity v_0 : the velocity of the electron in hydrogen atom (2.19×10^6 m/s)





元素存在的极限？

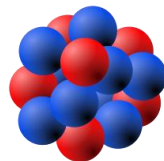
原子核层次：原子核存在的电荷数上限？

- 1939年，Hahn和Strassmann发现铀核受中子辐照后分裂成两块
- 1939年，Meitner在理论上解释了该现象。发现了原子核的裂变 (**Fission**)

Liquid Drop Model (LDM) 模型 (Gamov、Bohr等) :

原子核是一个带电液滴，核子像液滴中的分子。实验依据：

- 原子核结合能 $BE \propto A$ ，核力饱和性，类似液体中分子力饱和性
- 原子核体积 $\propto A$ ，不可压缩，与液体的不可压缩性类似



LDM模型，球形原子核的结合能 (Binding Energy, BE) :

$$BE(Z, A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a \left(\frac{A}{2} - Z \right)^2 A^{-1} + a_p \delta A^{-1/2}$$

A: 核子数
Z: 质子数

O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwissenschaften* 27, 11 (1939)

N. Bohr and J. Wheeler, *The mechanism of nuclear Fission*, *Phys. Rev.* 56, 426 (1939)



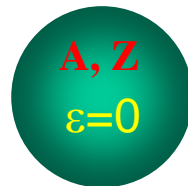


元素存在的极限?

$$BE(Z, A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_a \left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 A^{-1} + a_p \delta A^{-1/2}$$

↑ ↑ ↑ ↑ ↑
 Volume~ R^3 Surface~ R^2 Coulomb~ R^{-1} Asymmetry Pairing

$$R = r_0 A^{1/3}$$



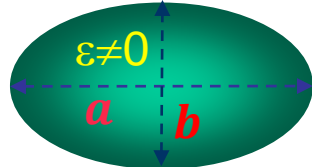
When deformed for given A and Z (assuming incompressibility):

- Volume, Asymmetry and Pairing terms ~ **constant**
- Surface energy E_S increases from $4\pi R^2$ to $4\pi R^2 \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2\right)$
- Coulomb energy E_C decreases from R^{-1} to $\left[R \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2\right)\right]^{-1}$

$$\Delta E = \frac{2}{5}\epsilon^2 a_s 4\pi R^2 (1 - x) \quad \text{裂变参量 } x = \frac{E_C}{2E_S} = 0.02 Z^2 / A$$

$x > 1$: 瞬间裂变; $x < 0.35$: 裂变不能释放能量

Ellipsoidal deformation ϵ



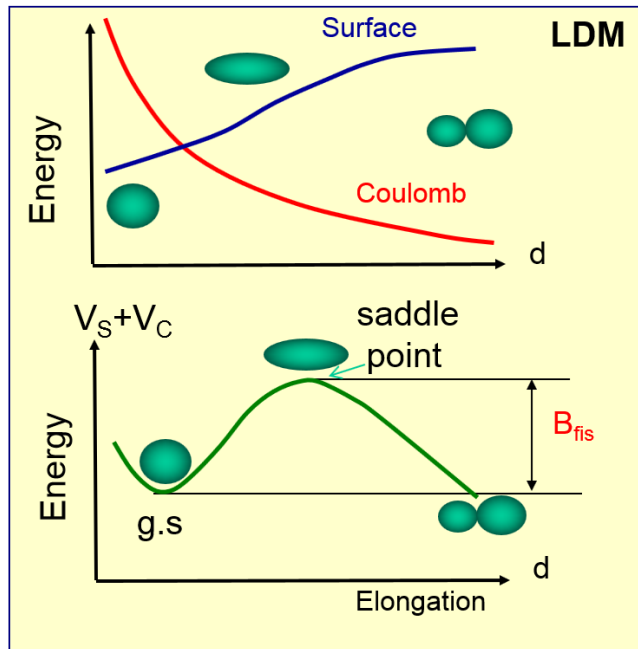
$$a = R(1 + \epsilon)$$

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

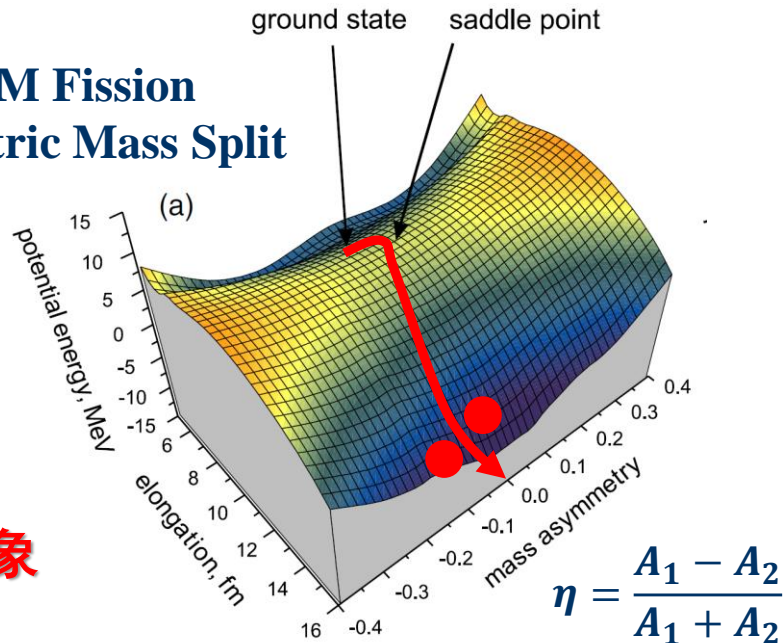


元素存在的极限?

Competition between increasing **Surface** and decreasing **Coulomb** energies while increasing deformation leads to a local maximum in their difference, the **Fission Barrier!**



LDM Fission Symmetric Mass Split



Fission:
量子隧穿现象

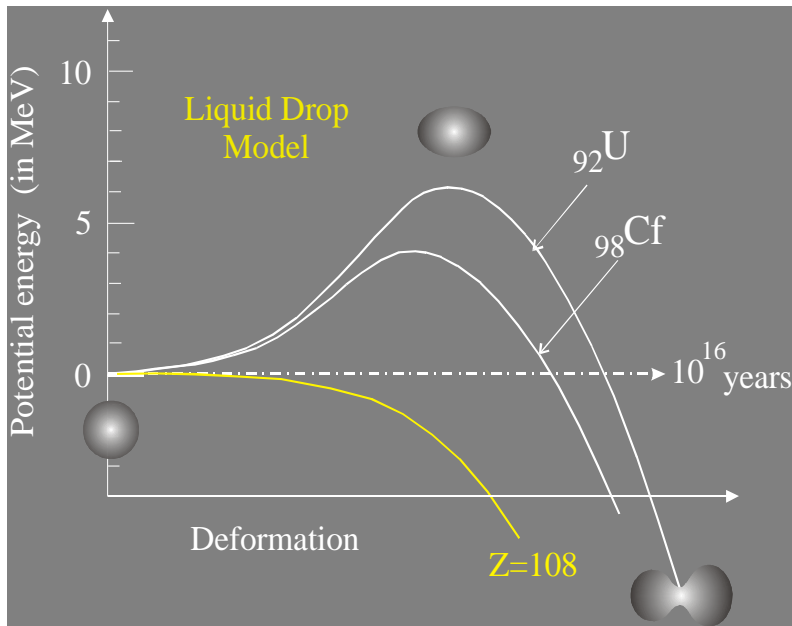
$$\eta = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$$



元素存在的极限？

原子核层次：原子核存在的电荷数上限？

裂变位垒随质子数 Z 的变化



沿稳定线增加质量数 A 和电荷数 Z ：

表面张力（强相互作用）：

- 原子核倾向于保持球形
- 表面能 $\propto A^{2/3}$

质子间库仑作用：

- 原子核倾向于具有拉长形变的状态
- 库仑能 $E \propto Z^2$

$Z \rightarrow 103$ ，裂变位垒 $B_f \rightarrow 0$ MeV； $T_{sf} \sim 10^{-19}$ s

原子核存在的电荷数（质子数）上限：~103

O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwissenschaften* 27, 11 (1939)

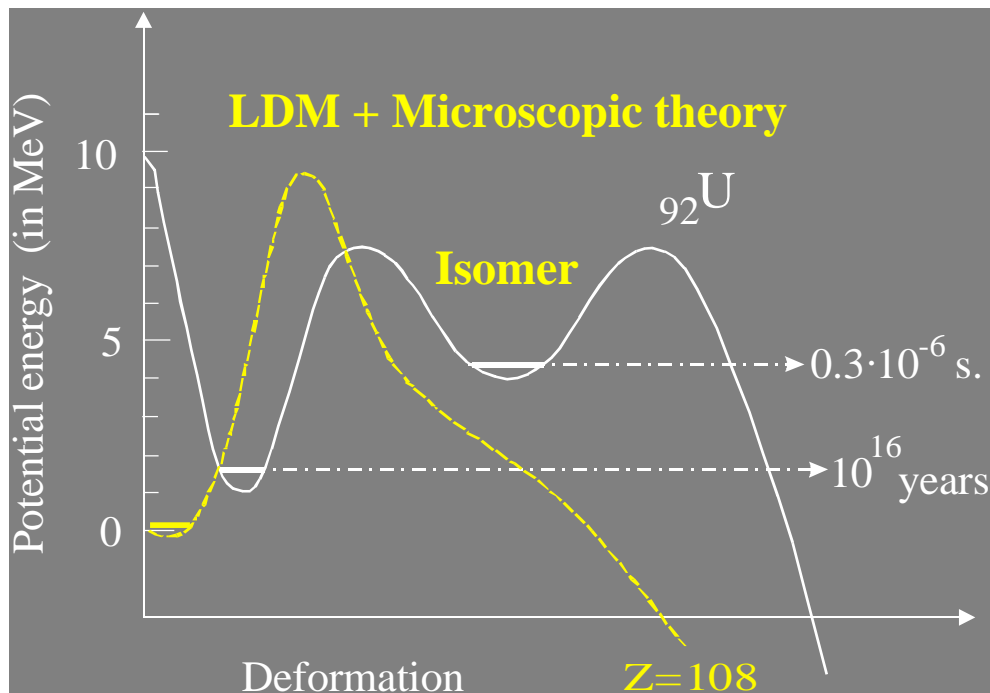
N. Bohr and J. A. Wheeler, *The mechanism of nuclear Fission*, *Phys. Rev.* 56, 426 (1939)





元素存在的极限？

原子核层次：原子核存在的电荷数上限？



原子核的总能量：

$$E_{total} = E_{LD} + \Delta E_{shell}$$

Sum of a macroscopic E_{LD} and a quickly changing microscopic ΔE_{shell} while changing neutron and proton numbers

ΔE_{shell} calculated by Strutinsky approach

现有理论不能准确计算裂变位垒

不能确定原子核存在电荷数极限！

应该存在电荷数大于120的核素！



什么是超重元素和核素？

经典液滴模型（LDM）预言不存在 $Z > 103$ 的原子核
壳结构使重核可能获得额外的稳定性

锕系

⁸⁹ 锕*	⁹⁰ 钍*	⁹¹ 镤*	⁹² 铀*	⁹³ 镎*	⁹⁴ 钚*	⁹⁵ 镅*	⁹⁶ 锔*	⁹⁷ 锿*	⁹⁸ 镄*	⁹⁹ 钷*	¹⁰⁰ 钷*	¹⁰¹ 钷*	¹⁰² 钷*	¹⁰³ 钷*
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Super Heavy!

89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
锕系	𬬻	𬬾	𬬿	鿀	鿁	鿂	鿃	鿄	鿅	鿆	鿇	鿈	鿉	鿊	鿋
Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

- **超重核素**：由于壳效应才存在的原子核（ $Z > 103!$ ）
- **超重元素（核素）**：超锕系元素（核素），From Rf onwards

超重元素和超重核素研究统称为超重研究

SHE: Super Heavy Element; **SHN**: Super Heavy Nuclide





超重元素合成的意义



科学问题：存在多少种元素？

何时、如何开启周期表第八周期？

元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	¹ ₁ H 氢																	² ₁₀ He 氦
2	³ ₃ Li 锂	⁴ ₄ Be 铍											⁵ ₅ B 硼	⁶ ₆ C 碳	⁷ ₇ N 氮	⁸ ₈ O 氧	⁹ ₉ F 氟	¹⁰ ₁₀ Ne 氖
3	¹¹ ₁₁ Na 钠	¹² ₁₂ Mg 镁											¹³ ₁₃ Al 铝	¹⁴ ₁₄ Si 硅	¹⁵ ₁₅ P 磷	¹⁶ ₁₆ S 硫	¹⁷ ₁₇ Cl 氯	¹⁸ ₁₈ Ar 氩
4	¹⁹ ₁₉ K 钾	²⁰ ₂₀ Ca 钙	²¹ ₂₁ Sc 钪	²² ₂₂ Ti 钛	²³ ₂₃ V 钒	²⁴ ₂₄ Cr 铬	²⁵ ₂₅ Mn 锰	²⁶ ₂₆ Fe 铁	²⁷ ₂₇ Co 钴	²⁸ ₂₈ Ni 镍	²⁹ ₂₉ Cu 铜	³⁰ ₃₀ Zn 锌	³¹ ₃₁ Ga 镓	³² ₃₂ Ge 锗	³³ ₃₃ As 砷	³⁴ ₃₄ Se 硒	³⁵ ₃₅ Br 溴	³⁶ ₃₆ Kr 氪
5	³⁷ ₃₇ Rb 铷	³⁸ ₃₈ Sr 锶	³⁹ ₃₉ Y 钇	⁴⁰ ₄₀ Zr 锆	⁴¹ ₄₁ Nb 铌	⁴² ₄₂ Mo 钼	⁴³ ₄₃ Tc 锝	⁴⁴ ₄₄ Ru 钌	⁴⁵ ₄₅ Rh 铑	⁴⁶ ₄₆ Pd 钯	⁴⁷ ₄₇ Ag 银	⁴⁸ ₄₈ Cd 镉	⁴⁹ ₄₉ In 铟	⁵⁰ ₅₀ Sn 锡	⁵¹ ₅₁ Sb 锑	⁵² ₅₂ Te 碲	⁵³ ₅₃ I 碘	⁵⁴ ₅₄ Xe 氙
6	⁵⁵ ₅₅ Cs 铯	⁵⁶ ₅₆ Ba 钡	La-Lu 镧系	⁷² ₇₂ Hf 铪	⁷³ ₇₃ Ta 钽	⁷⁴ ₇₄ W 钨	⁷⁵ ₇₅ Re 铼	⁷⁶ ₇₆ Os 锇	⁷⁷ ₇₇ Ir 铱	⁷⁸ ₇₈ Pt 铂	⁷⁹ ₇₉ Au 金	⁸⁰ ₈₀ Hg 汞	⁸¹ ₈₁ Tl 铊	⁸² ₈₂ Pb 铅	⁸³ ₈₃ Bi 铋	⁸⁴ ₈₄ Po 钋	⁸⁵ ₈₅ At 砹	⁸⁶ ₈₆ Rn 氡
7	⁸⁷ ₈₇ Fr 钫	⁸⁸ ₈₈ Ra 镭	Ac-Lr 锕系	¹⁰⁴ ₁₀₄ Rf 钚	¹⁰⁵ ₁₀₅ Db 铪	¹⁰⁶ ₁₀₆ Sg 钨	¹⁰⁷ ₁₀₇ Bh 铼	¹⁰⁸ ₁₀₈ Hs 铂	¹⁰⁹ ₁₀₉ Mt 铱	¹¹⁰ ₁₁₀ Ds 钌	¹¹¹ ₁₁₁ Rg 钨	¹¹² ₁₁₂ Cn 铊	¹¹³ ₁₁₃ Nh 铊	¹¹⁴ ₁₁₄ Fl 铊	¹¹⁵ ₁₁₅ Mc 铊	¹¹⁶ ₁₁₆ Lv 铊	¹¹⁷ ₁₁₇ Ts 铊	¹¹⁸ ₁₁₈ Og 铊
8	¹¹⁹	¹²⁰	¹²¹	¹²²	¹²³	¹²⁴	¹²⁵	¹²⁶	¹²⁷	¹²⁸	¹²⁹	¹³⁰	¹³¹	¹³²	¹³³	¹³⁴	¹³⁵	¹³⁶

⁹²U:
1789年发现，天然存在最重元素

93-118号元素:
✓ 中子俘获反应
✓ 重离子融合反应

119, 120?



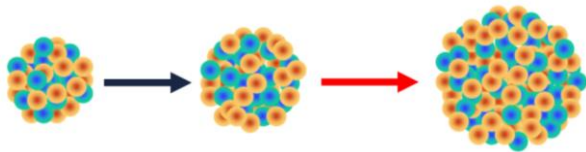
主族金属 副族金属 非金属元素 稀有气体 人造元素

核物理承担着合成新元素、拓展元素周期表的科学使命！



超重元素和核素合成技术方法、重要成果

重离子熔合反应：合成超重元素和核素唯一方法



The complete fusion reactions of heavy nuclei, producing excited compound nuclei coming to the ground state after the emission of neutrons and gamma rays, are the most promising ones (**likely the only way**) for the synthesis of SHN

技术路线

重离子融合
蒸发反应

飞行中电
磁分离

α 衰变E、T、X
和Y关联测量

要素：

- **重离子加速器：** 强流重离子加速器，提供足够数量的弹核
- **反应靶：** 可能需要稀有同位素靶材料，耐受高功率束流轰击
- **分离器：** 快速、高效率分离目标核素
- **测量系统：** 可靠的测量与鉴别系统，**单原子核灵敏探测**



超重元素和核素合成重要成果

主要实验室工作简介

- 德国GSI研究工作（冷熔合）
- 日本RIKEN研究工作（冷熔合）
- 俄罗斯JINR-DUBNA研究工作（热熔合）



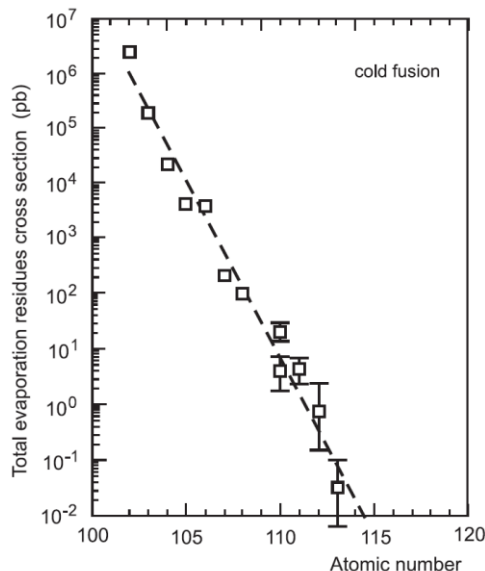
主要实验室工作简介: GSI



89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
锕系	𬬻	𬭙	𬭘	𬬛	𬬜	𬬝	𬬞	𬬟	𬬠	𬬡	𬬢	𬬣	𬬤	𬬥	𬬦
Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

冷融合反应:

- ✓ ^{262}Bh , $^{54}\text{Cr} + ^{209}\text{Bi}$, 1981
- ✓ ^{265}Hs , $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb}$, 1984
- ✓ ^{266}Mt , $^{58}\text{Fe} + ^{209}\text{Bi}$, 1982
- ✓ ^{269}Ds , $^{62}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$, 1994
- ✓ ^{271}Ds , $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$, 1998
- ✓ ^{272}Rg , $^{64}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi}$, 1994
- ✓ ^{277}Cn , $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb}$, 1996
- ✗ 113, 114, 116号元素



Only the one-neutron-evaporation cross sections are plotted. They are dominating and the only ones observed for the heaviest elements beyond hassium. The cross sections drop very fast by about one order of magnitude per two elements from 6 nb for rutherfordium to 0.5 pb for copernicium

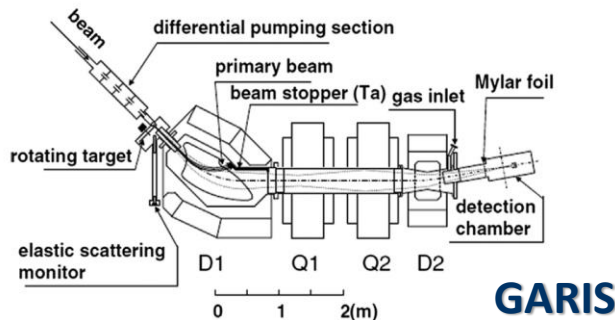
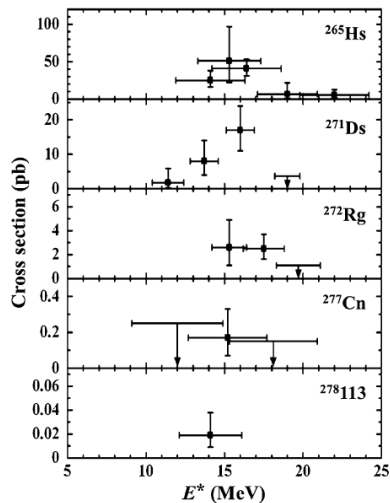
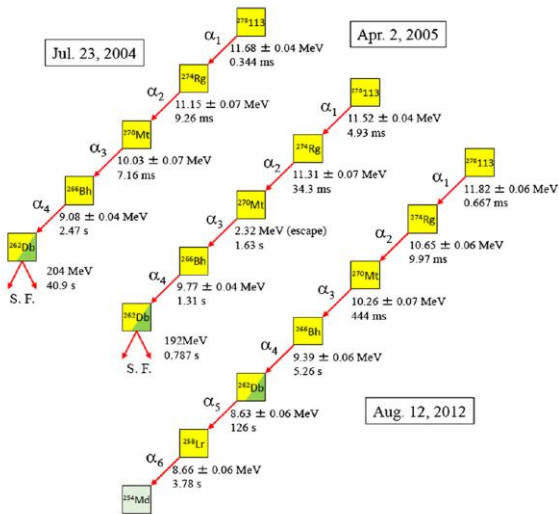
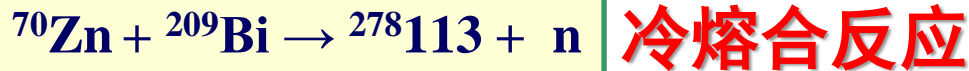
Over 20 years period of synthesis of SHN produced in the cold-fusion reactions!



主要实验室工作简介: RIKEN



89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
锕系	镭	锗	镭	铍	镭	镭	镭	镭	镭	镭	铁	镭	镭	镭	氮
Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og



Over nine years

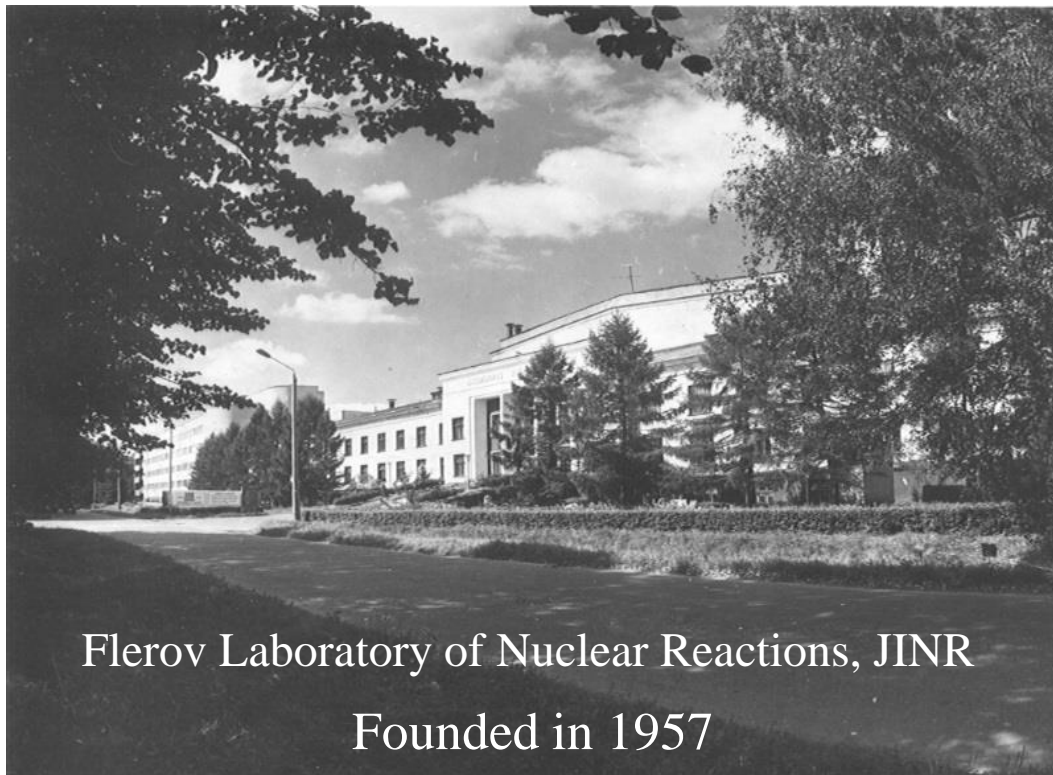
Net irradiation time of 575 days

Total beam dose of 1.39×10^{20}

Production cross section of **19 fb**



主要实验室工作简介: **DUBNA**



Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR
Founded in 1957



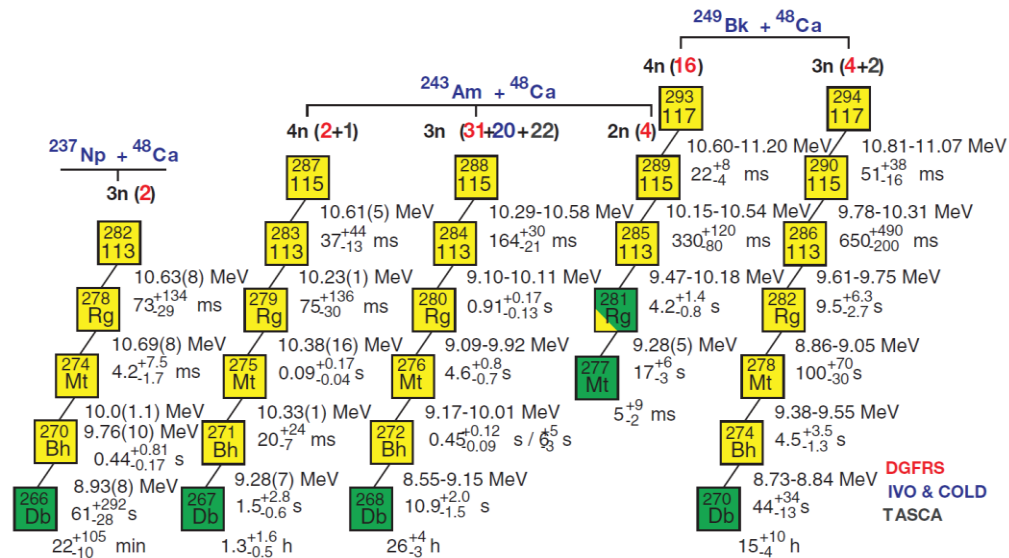


主要实验室工作简介: DUBNA

89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
锕系	𬬻	𬭙	𬭘	𬬛	𬬜	𬬝	𬬞	𬬟	𬬠	𬬡	𬬢	𬬣	𬬤	𬬥	𬬦
Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

热熔合反应:

- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{288}\text{Fl}$, 1999
- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{287}\text{Fl}$, 2003
- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{288}\text{Mc}$, 2003
- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{287}\text{Mc}$, 2003
- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{245,248}\text{Cm} \rightarrow ^{290-193}\text{Lv}$, 2000
- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{294}\text{Og}$, 2002
- ✓ $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk} \rightarrow ^{293,294}\text{Ts}$, 2009

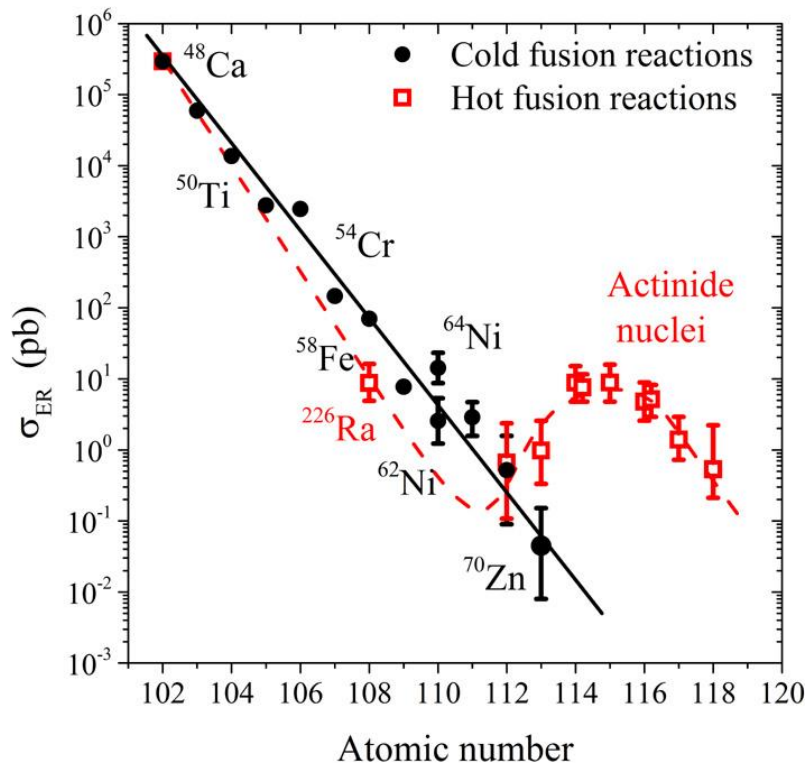


关键: ^{48}Ca 束流、锕系靶

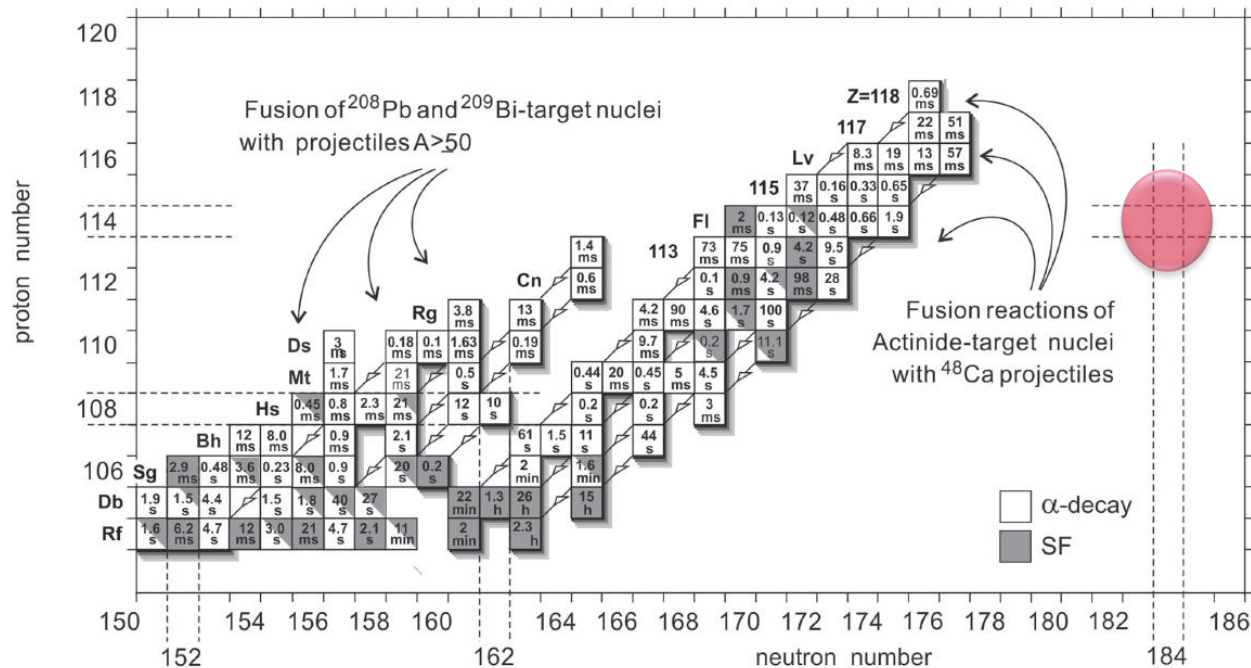
五种新元素; 25 新偶Z核素; 29个奇Z核素



超重元素和核素合成



超重元素和核素合成



实验数据:

- ✓ α 离子能量
- ✓ 衰变寿命
- ✓ 稀有的分支比



$$Q_\alpha = (M_X - M_Y - M_\alpha)C^2$$

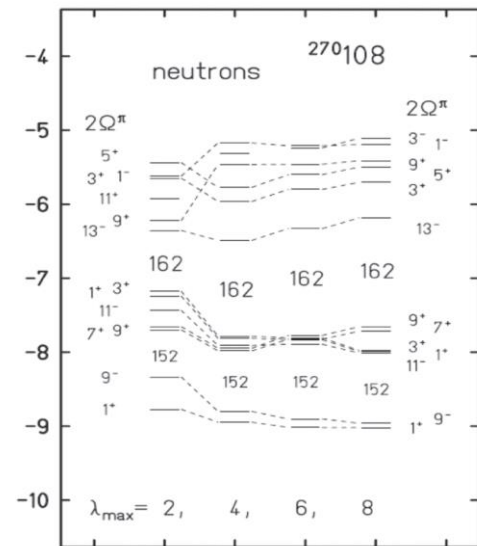
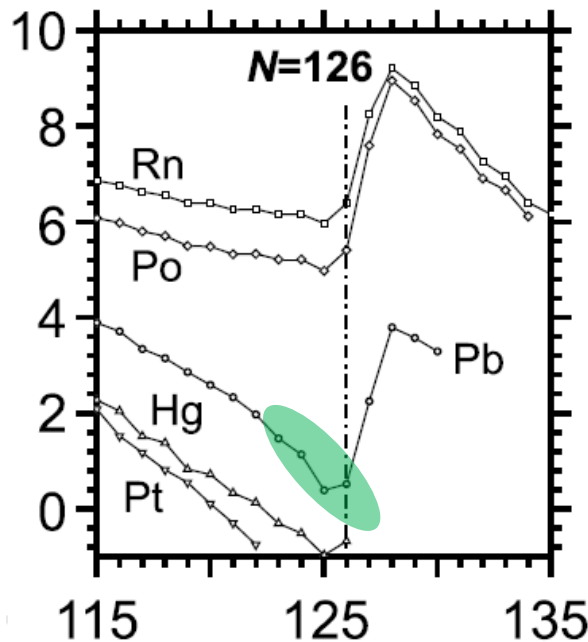
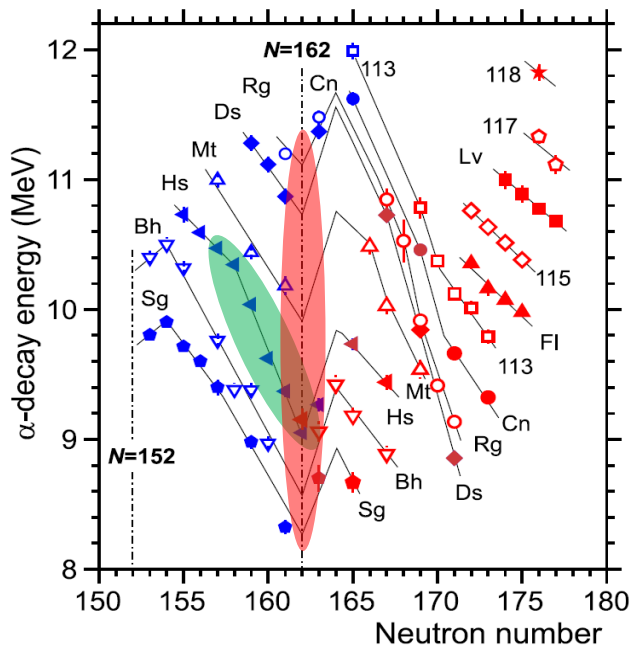
$$Q_\alpha = \left(\frac{A}{A-4} \right) E_\alpha$$

冷熔合反应: 所有衰变链建立在已知核素上 (已知 α 能量和寿命)

热熔合反应: 所有衰变链终结于未知核素的自发裂变, “孤悬”于核素图上!



超重核性质



十六极形变导致形变壳

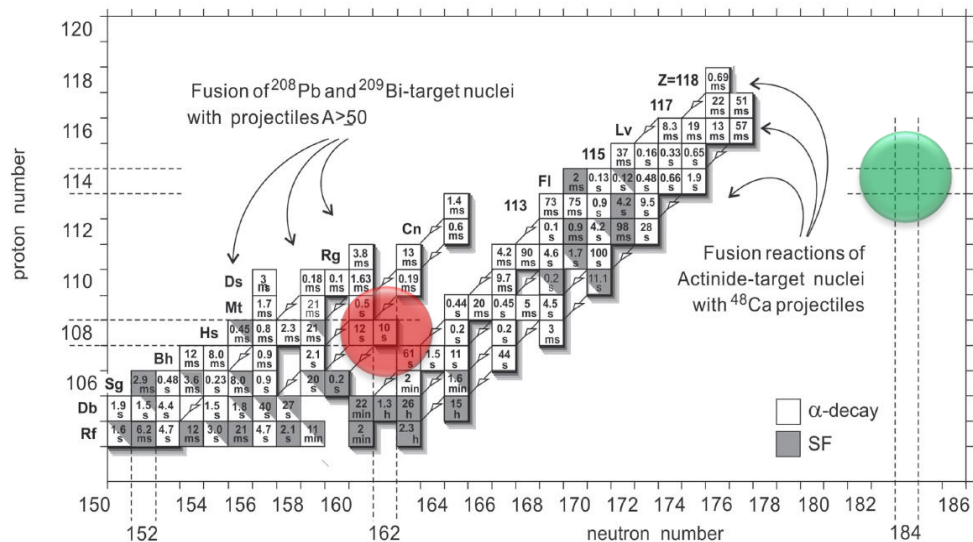
建立了Z=106~118同位素链 α 衰变系统性，完美揭示了Z=108、N=162闭壳



超重核合成



The principal question of super-heavy nuclide research:
Can shell stabilization extend the periodic table towards heavier elements?



确认了壳效应是超重核存在的关键因素！





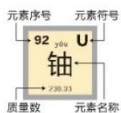
超重研究现状、困难和展望



超重元素合成：现状

元素周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 1 H 1.00794																	2 2 He 4.002602
3 3 Li 6.941	4 4 Be 9.012182											5 5 B 10.811	6 6 C 12.0107	7 7 N 14.00643	8 8 O 15.99903	9 9 F 18.998403	10 10 Ne 20.1797
11 11 Na 22.98976928	12 12 Mg 24.304											13 13 Al 26.9815386	14 14 Si 28.08558	15 15 P 30.973762	16 16 S 32.06	17 17 Cl 35.453	18 18 Ar 39.948
19 19 K 39.0983	20 20 Ca 40.078	21 21 Sc 44.955912	22 22 Ti 47.867	23 23 V 50.9415	24 24 Cr 51.9961	25 25 Mn 54.938045	26 26 Fe 55.845	27 27 Co 58.933195	28 28 Ni 58.6934	29 29 Cu 63.546	30 30 Zn 65.38	31 31 Ga 69.723	32 32 Ge 72.630	33 33 As 74.9216	34 34 Se 78.96	35 35 Br 79.904	36 36 Kr 83.80
37 37 Rb 85.4678	38 38 Sr 87.62	39 39 Y 88.90584	40 40 Zr 91.224	41 41 Nb 92.90638	42 42 Mo 95.94	43 43 Tc 98.90625	44 44 Ru 101.07	45 45 Rh 102.90550	46 46 Pd 106.3675	47 47 Ag 107.8682	48 48 Cd 112.4118	49 49 In 114.818	50 50 Sn 118.710	51 51 Sb 121.757	52 52 Te 127.603	53 53 I 126.90547	54 54 Xe 131.29
55 55 Cs 132.90545196	56 56 Ba 137.327	La-Lu 镧系	72 72 Hf 178.49	73 73 Ta 180.94788	74 74 W 183.84	75 75 Re 186.207	76 76 Os 190.23	77 77 Ir 192.222	78 78 Pt 195.084	79 79 Au 196.966569	80 80 Hg 200.59	81 81 Tl 204.3833	82 82 Pb 207.2	83 83 Bi 208.98038	84 84 Po 209	85 85 At 209	86 86 Rn 222
87 87 Fr 223	88 88 Ra 226	Ac-Lr 锕系	104 104 Rf 261	105 105 Db 262	106 106 Sg 263	107 107 Bh 264	108 108 Hs 265	109 109 Mt 266	110 110 Ds 267	111 111 Rg 268	112 112 Cn 269	113 113 Nh 270	114 114 Fl 271	115 115 Mc 272	116 116 Lv 273	117 117 Ts 274	118 118 Og 277
119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136



57 57 La 138.90547	58 58 Ce 140.12	59 59 Pr 140.90766	60 60 Nd 144.242	61 61 Pm 144.9126	62 62 Sm 150.36	63 63 Eu 151.964	64 64 Gd 157.25	65 65 Tb 158.92534	66 66 Dy 162.50014	67 67 Ho 164.93032	68 68 Er 167.259	69 69 Tm 168.9304	70 70 Yb 173.05468	71 71 Lu 174.967
89 89 Ac 227	90 90 Th 232.03772	91 91 Pa 231.03688	92 92 U 238.02891	93 93 Np 237.04817	94 94 Pu 244.06422	95 95 Am 243.06136	96 96 Cm 247.07035	97 97 Bk 247.07035	98 98 Cf 251.07958	99 99 Es 252.0833	100 100 Fm 257.1037	101 101 Md 258.1051	102 102 No 259.1063	103 103 Lr 260.1073

主族金属 副族金属 非金属元素 稀有气体 人造元素

自1940年以来，超重元素合成不断取得重大突破，迄今已合成了26种化学元素
 已将元素周期表扩展至118号元素，取得了巨大成就！





超重元素合成：现状

89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
锕系 Ac-Lr	镭 Rf	铷 Db	钨 Sg	铈 Bh	铉 Hs	铊 Mt	铋 Ds	铌 Rg	钨 Cn	铈 Nh	铁 Fl	镉 Mc	钷 Lv	砷 Ts	氮 Og

自然界中发现的最重元素为92号元素，其他较重元素均是利用核反应产生的
IUPAC和IUPAP确认并命名了全部已合成的超铀元素

IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry

IUPAP: International Union of Pure and Applied Physics

IUPAC和IUPAP邀请发现者为新元素命名。命名原则：神话故事和人物、矿物、**国家名称、地名、地理区域、研究机构名称、科学家姓名等**





超重新元素合成：困难

利用⁴⁸Ca合成了114~118元素

Np~Cf: 反应堆 + 化学分离

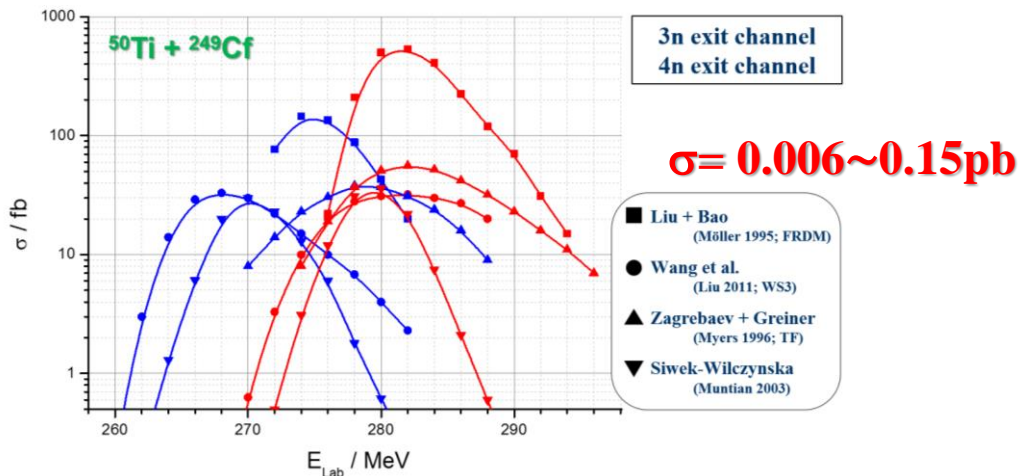
Target materials	Producer	Isotope enrichment (%)
²³⁷ Np	IAR	99.3
²⁴⁰ Pu	IAR/ORNL	99.98
²⁴² Pu	RFNC/ORNL	99.98
²⁴⁴ Pu	ORNL	98.6
²⁴³ Am	IAR / ORNL	99.9
²⁴⁵ Cm	IAR	98.7
²⁴⁸ Cm	IAR / ORNL	97.4
²⁴⁹ Bk	ORNL	≥ 95
²⁴⁹ Cf	IAR/ORNL	97.3
^{249,250,251} Cf	ORNL	(50+14+36)%

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
------------------	------------------	------------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

~0.5 mg/cm² → ~5 mg

254Es 唯一-Z=99材料
276 day α, β
仅有0.8微克

如何合成118号以上元素？



Very successful epoch of ⁴⁸Ca induced synthesis of new superheavy elements is over





超重新元素合成：困难

最近十年，119和120号元素合成：

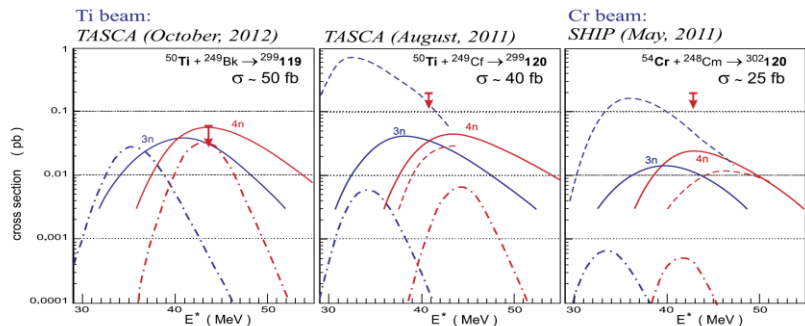
德国GSI: SHIP+TASCA

- × $^{238}\text{U} + ^{64}\text{Ni} \rightarrow$ 120号元素, 2007年, $\sigma \leq 90 \text{ fb}$
- × $^{248}\text{Cm} + ^{54}\text{Cr} \rightarrow$ 120号元素, 2011年, $\sigma \leq 560 \text{ fb}$
- × $^{249}\text{Bk} + ^{50}\text{Ti} \rightarrow$ 119号元素, 2012年, 结果未发表
- × $^{249}\text{Cf} + ^{50}\text{Ti} \rightarrow$ 120号元素, 2011年, 结果未发表

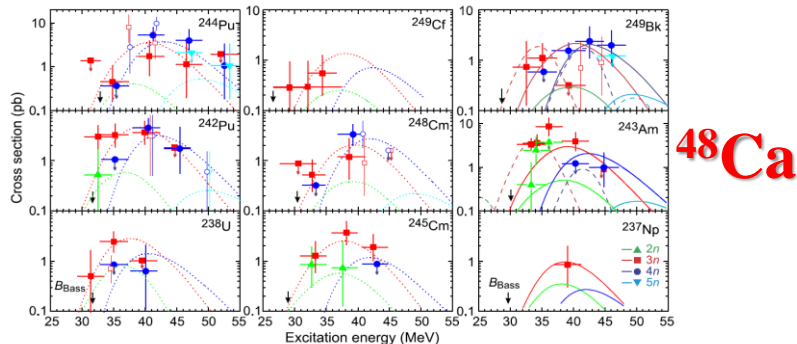
俄罗斯DUBNA: DGFRS

- × $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe} \rightarrow$ 120号元素, 2007年, $\sigma \leq 1.1 \text{ pb}$
- × $^{238}\text{U} + ^{64}\text{Ni} \rightarrow$ 120号元素, 2009年, $\sigma \leq 90 \text{ fb}$

日本RIKEN, 美国LBL.....



不同理论反应截面和实验测量反应截面上限



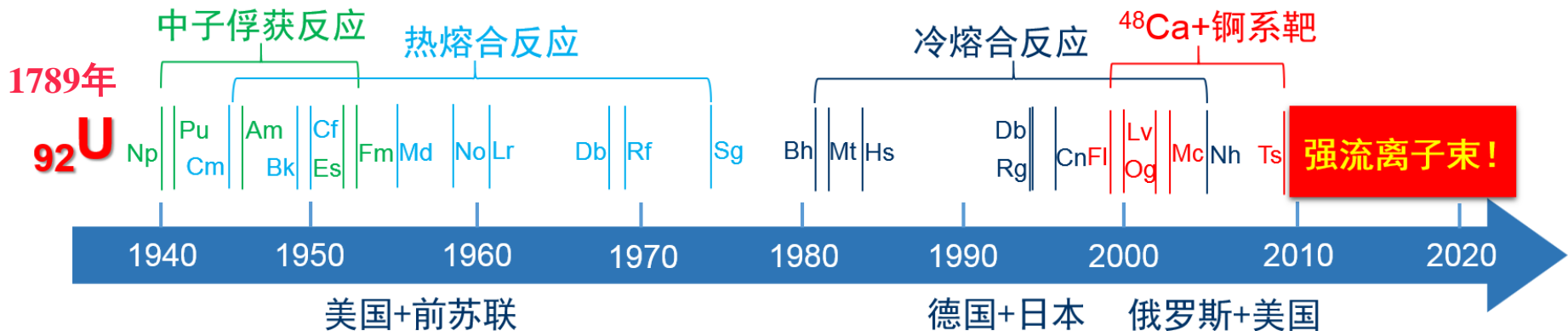
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{50}\text{Ti}$, 截面下降~2个数量级!





超重新元素合成：展望

能否合成119、120号元素，开启元素周期表第八周期？



92号元素铀是天然存在的最重元素，超铀元素都是人工合成的
70年合成26种超铀元素，平均约每三年合成一种元素，极具挑战！





超重新元素合成：展望

119和120号新元素产生截面：几个~几十飞巴！

产生截面：10飞巴 (10^{-38} cm²)

靶厚：400 μ g/cm² ($\sim 1.0 \times 10^{18}$ atoms/cm²)

束流强度：1.0 μ A (0.62×10^{13} ions/s)

分离效率和探测效率：50%

1 event / 500 days (68.3%概率)

如何突破超重新元素合成？

- 显著提高束流强度
 - 建造高效电磁谱仪
- } > 10倍！

俄罗斯，DUBNA

日本，RIKEN

中国，IMP

法国，GANIL

德国，GSI

.....





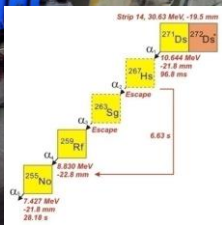
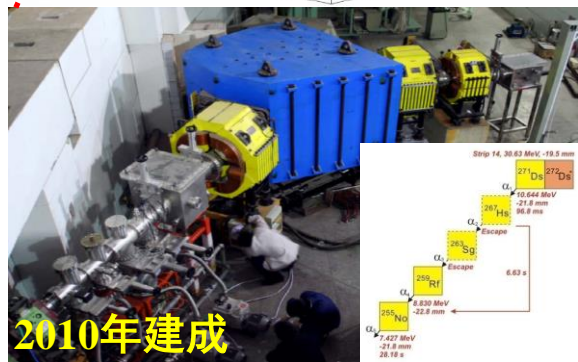
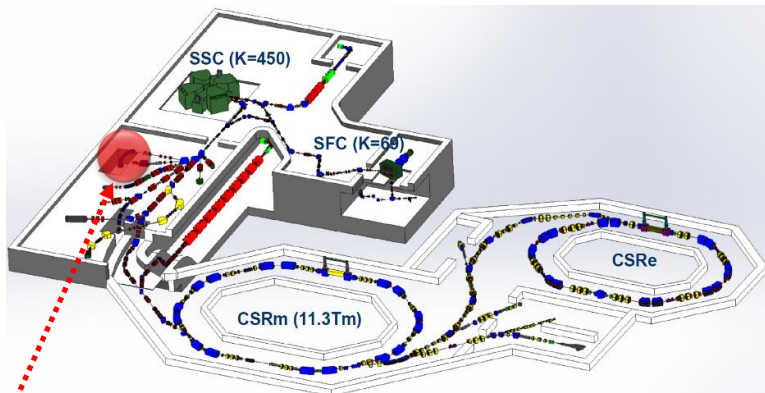
我国超重研究布局

重质量区缺中子新核素合成



兰州充气反冲核分离器

SHANS: Spectrometer for Heavy Atoms and Nuclear Structure

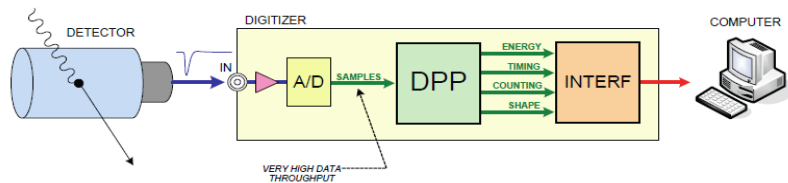


He-jet + 转轮装置

2002年: ^{259}Db 新核素

2004年: ^{265}Bh 新核素

快速数字化数据获取系统

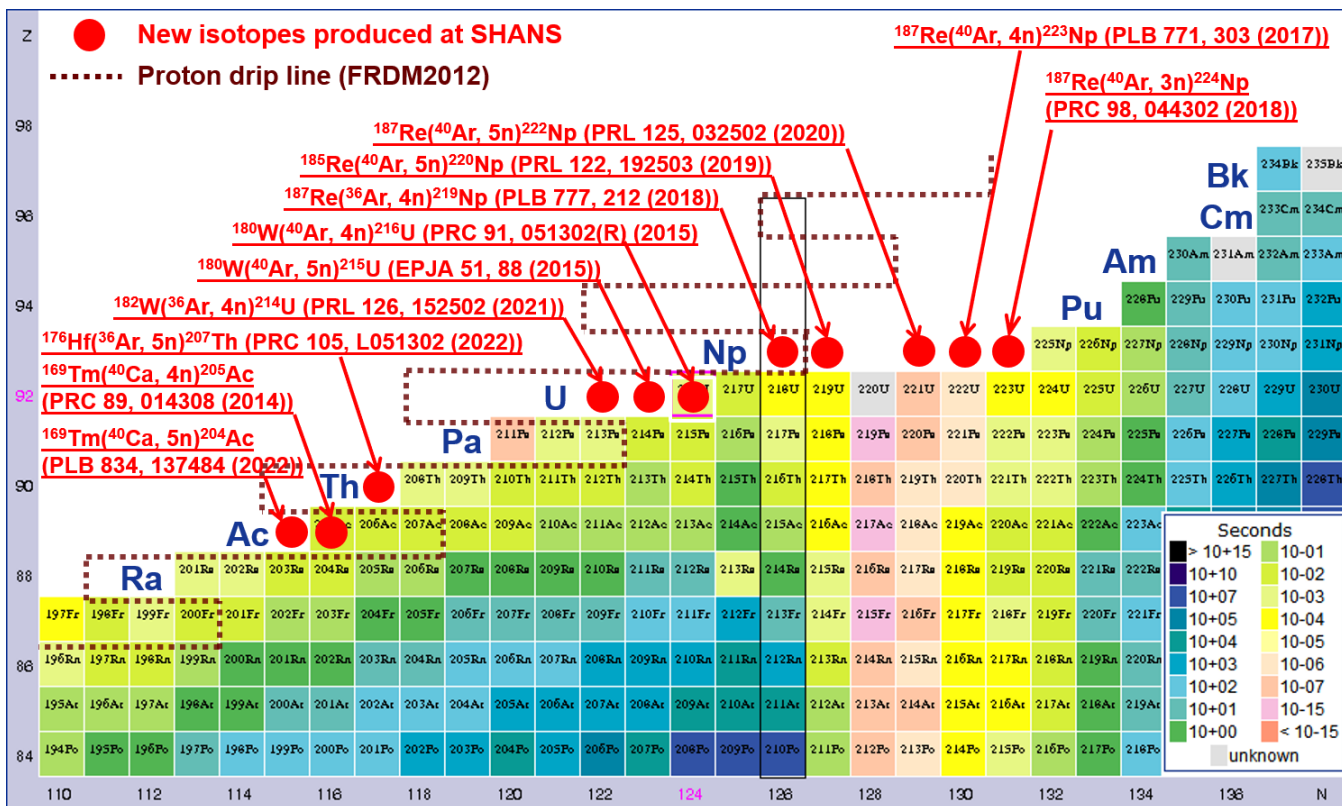


- 前放输出信号直接输入数字化仪进行模数变换
- 提取初始信号的能量、时间、波形信息
- 无死时间测量，输入信号计数率可达到1MHz

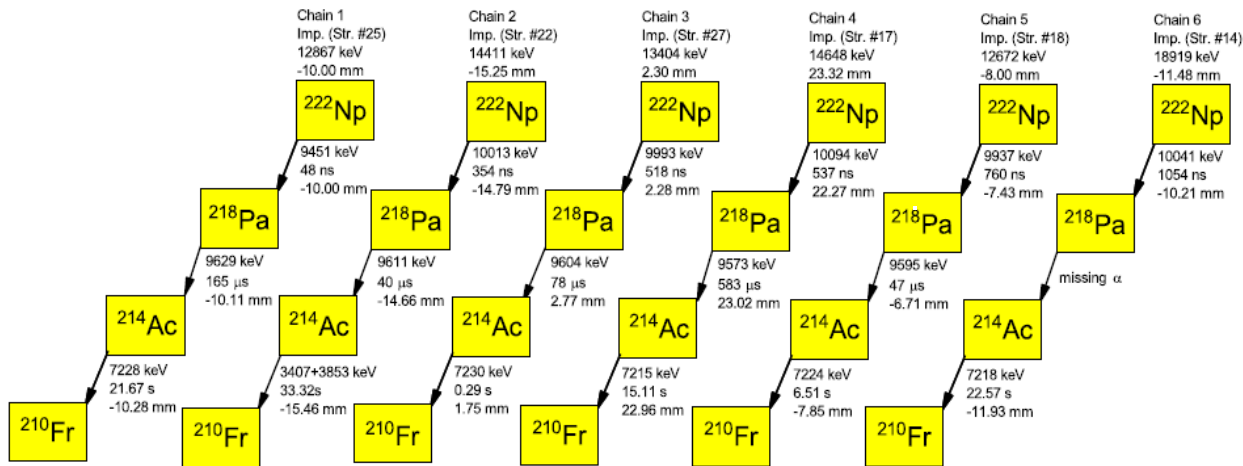
极短寿命原子核: 可测寿命 $\sim 1\text{ms} \rightarrow \sim 1\mu\text{s}$



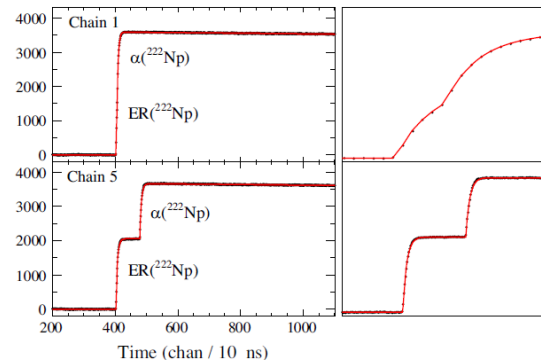
研究工作进展



新核素： ^{219}Np 、 ^{220}Np 、 ^{222}Np 、 ^{223}Np



$^{187}\text{Re}(^{40}\text{Ar}, 5n)^{222}\text{Np}$



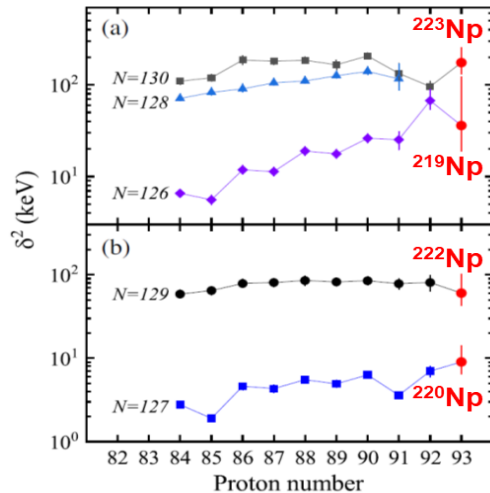
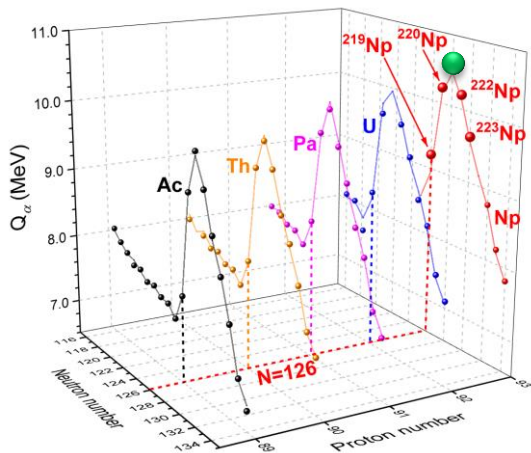
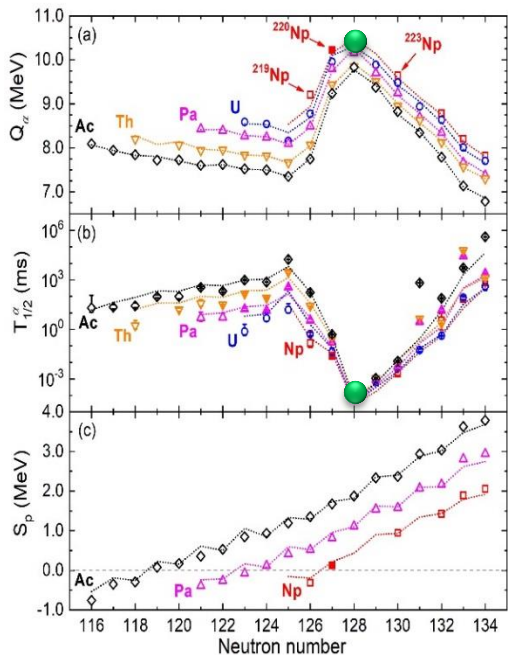
^{222}Np : $E_{\alpha} = 10016 (33) \text{ keV}$ and $T_{1/2} = 380_{-110}^{+260} \text{ ns}$

The time of flight of the ^{222}Np through SHANS was estimated to be $\sim 1.2 \mu\text{s}$



研究工作进展

新核素： ^{219}Np 、 ^{220}Np 、 ^{222}Np 、 ^{223}Np



$^{219}\text{Np}: S_p = -301 \pm 83 \text{ keV}$

- 建立了缺中子Np同位素 α 衰变能量和寿命的系统性
- 首次验证了 $N=126$ 壳效应在 $Z=93$ Np同位素中仍然显著
- 首次确定了 $Z=93$ 的同位素的质子滴线位置（已知最重质子滴线）



新核素： ^{219}Np 、 ^{220}Np 、 ^{222}Np 、 ^{223}Np

^{220}Np : **Phys. Rev. Lett.**, 122, 192503(2019)

^{222}Np : **Phys. Rev. Lett.**, 125, 032502(2020)

^{219}Np : **Phys. Lett. B**777, 212(2018)

^{223}Np : **Phys. Lett. B**771, 303(2017)

PHYSICAL REVIEW LETTERS **125**, 032502 (2020)

PHYSICAL REVIEW LETTERS **122**, 192503 (2019)

Editors' Suggestion

Short-Lived α -Emitting Isotope ^{222}Np and the Stability of the $N = 126$ Magic Shell

L. Ma (马龙)¹, Z. Y. Zhang (张志远)^{1,2,*}, Z. G. Gan (甘再国)^{1,2}, X. H. Zhou (周小红)^{1,2,†}, H. B. Yang (杨华彬)¹, M. H. Huang (黄明辉)¹, C. L. Yang (杨春莉)¹, M. M. Zhang (张明明)^{1,2}, Y. L. Tian (田玉林)¹, Y. S. Wang (王永生)^{1,2,3}, H. B. Zhou (周厚兵)⁴, X. T. He (贺晓涛)⁵, Y. C. Mao (毛英臣)⁶, W. Hua (滑伟)⁷, L. M. Duan (段利敏)^{1,2}, W. X. Huang (黄文学)^{1,2}, Z. Liu (刘忠)^{1,2}, X. X. Xu (徐新星)^{1,2}, Z. Z. Ren (任中洲)⁸, S. G. Zhou (周善贵)^{9,10,11,12} and H. S. Xu (徐珊珊)^{1,2}

New Isotope ^{220}Np : Probing the Robustness of the $N = 126$ Shell Closure in Neptunium

Z. Y. Zhang (张志远)^{1,2}, Z. G. Gan (甘再国)^{1,2,*}, H. B. Yang (杨华彬)¹, L. Ma (马龙)¹, M. H. Huang (黄明辉)^{1,2}, C. L. Yang (杨春莉)^{1,2}, M. M. Zhang (张明明)^{1,2}, Y. L. Tian (田玉林)^{1,2}, Y. S. Wang (王永生)^{1,2,3}, M. D. Sun (孙明道)^{1,2,3,†}, H. Y. Lu (卢洪洋)^{1,2}, W. Q. Zhang (张文强)^{1,2}, H. B. Zhou (周厚兵)⁴, X. Wang (王翔)⁵, C. G. Wu (武晨光)⁵, L. M. Duan (段利敏)^{1,2}, W. X. Huang (黄文学)^{1,2}, Z. Liu (刘忠)^{1,2}, Z. Z. Ren (任中洲)⁶, S. G. Zhou (周善贵)^{7,8}, X. H. Zhou (周小红)^{1,2}, H. S. Xu (徐珊珊)^{1,2}, Yu. S. Tsyganov⁹, A. A. Voinov⁹ and A. N. Polyakov⁹



2020年中国重大科学、技术和工程进展

《科技导报》2020年度十大科学进展



《科技导报》编辑部从国内外重要科技期刊和科技新闻媒体2020年1月1日至12月31日发表、公布或报道的中国科技成果中，遴选、推荐30项重大科学进展、30项重大技术进展、49项重大工程进展候选条目。

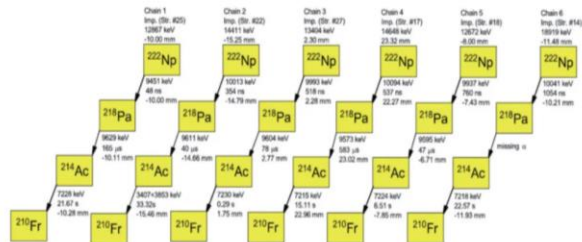
由《科技导报》编委、审稿人等专家通信评选，根据每项进展的得票情况，推选出2020年中国重大科学进展10项、重大技术进展10项、重大工程进展10项。以下按发表、公布或报道的时间先后逐一介绍。

1 2020年中国重大科学进展(10项)

首次合成近质子滴线百纳秒寿命超铀新核素 ^{222}Np

中国科学院近代物理研究所研究团队与合作者利用兰州重离子加速器的充气反冲核谱仪SHANS装置，首次合成了镎(Np)的一种新同位素核 ^{222}Np 。

此次在该同位素链中发现的新核素 ^{222}Np ，几乎达到了用充气反冲核谱仪研究新核素合成的半衰期极限。



实验建立的 ^{222}Np 衰变链 来源: *Physical Review Letter*



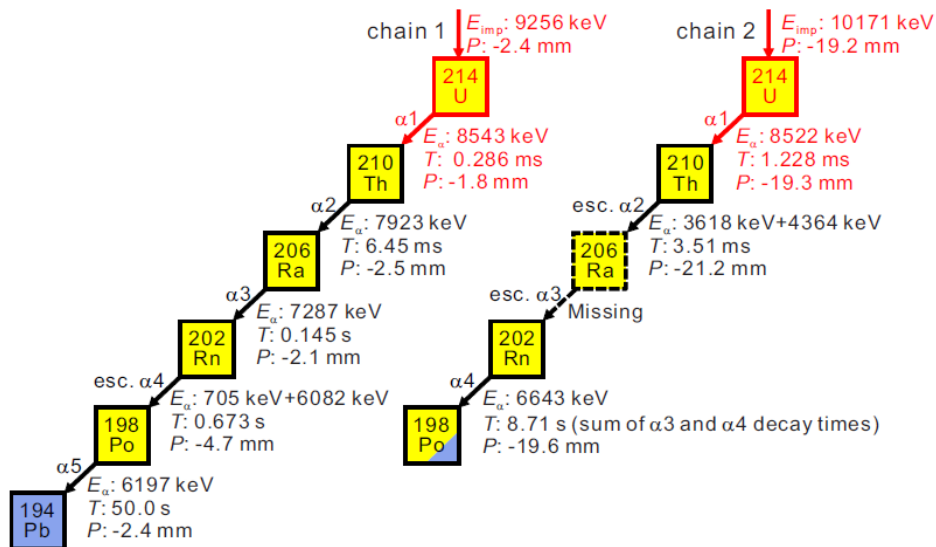
研究工作进展



新核素： ^{214}U ；精细测量： ^{216}U 、 ^{218}U



Isotope	This work			Literature data		
	E_a/keV	$T_{1/2}/\text{ms}$	δ^2/keV	E_a/keV	$T_{1/2}/\text{ms}$	Ref.
^{214}U	8533(18)	$0.52^{+0.95}_{-0.21}$	128^{+233}_{-52}
^{216}U	8374(17)	$2.25^{+0.63a}_{-0.40}$	78^{+22}_{-14}	8384(30)	$4.72^{+4.72}_{-1.57}$	[44]
				8340(50)	$3.8^{+8.8}_{-3.2}$	[45]
				8390(33)	$2.6^{+3.6}_{-1.0}$	[46]
^{218}U	8612(14)	$0.65^{+0.08}_{-0.07}$	53^{+7}_{-6}	8600(30)	$1.15^{+1.58}_{-0.42}$	[44]
				8612(9)	$0.51^{+0.17}_{-0.10}$	[47,48]
				8625(25)	$1.5^{+7.3}_{-0.7}$	[49]

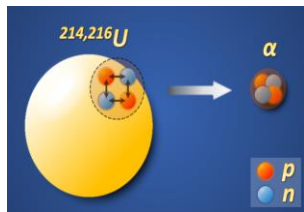
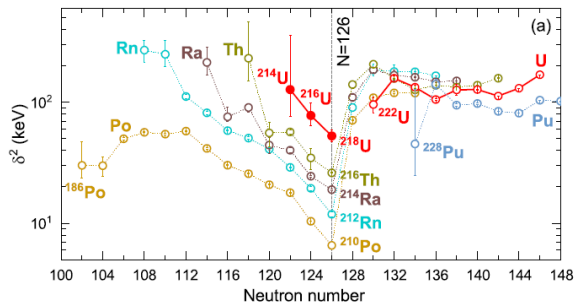


Cross section: 10 pb!

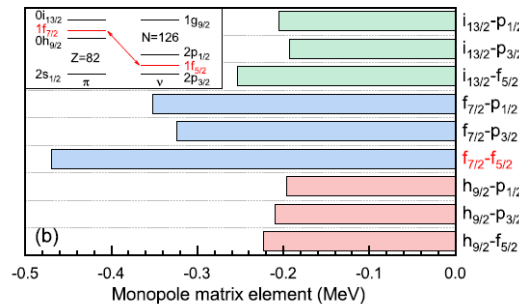
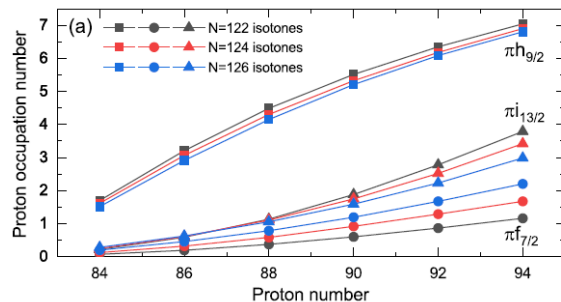
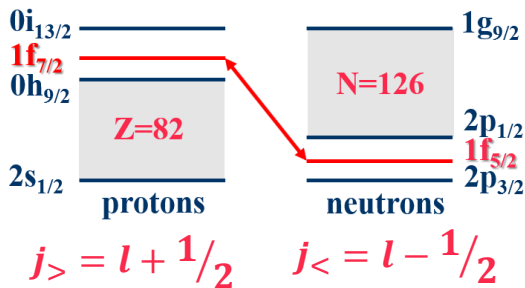
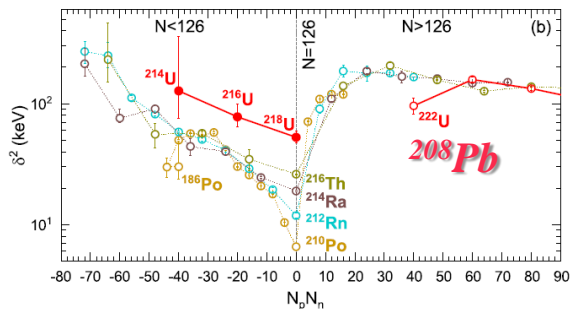


研究工作进展

新核素： ^{214}U ；精细测量： ^{216}U 、 ^{218}U



$N_p N_n$ value: n-p interaction



合成了铀元素最轻的同位素；发现极缺中子铀同位素奇异增强的 α 衰变强度



Editors' Suggestion

Featured in Physics

New α -Emitting Isotope ^{214}U and Abnormal Enhancement of α -Particle Clustering in Lightest Uranium Isotopes

编辑推荐、亮点物理

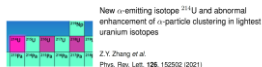
AMERICAN PHYSICAL SOCIETY
EDITORIAL OFFICE

1 Research Road • Ridge, NY 11061 • <https://journals.aps.org/>
(631) 591-4000

Physical Review Letters • Physical Review • Reviews of Modern Physics • Physics

Dear Sir or Madam,

We are pleased to inform you that the Letter



Published 14 April 2021

has been highlighted by the editors as an Editors' Suggestion. Publication of a Letter is already a considerable achievement, as Physical Review Letters accepts fewer than 1:4 of submissions, and is ranked first among physics and mathematics journals by the Google Scholar five-year h-index. A highlighted Letter has additional significance, because only one Letter in seven is highlighted as a Suggestion due to its particular importance, innovation, and broad appeal. Suggestions are downloaded more than twice as often as the average Letter, and receive substantially more press coverage. Suggestions are cited at roughly twice the rate of nonhighlighted Letters. More information about our journal and its history can be found on our webpage prj.aps.org.

Yours sincerely,

Hugues Chaté
Editor
Physical Review Letters

Michael Thoennessen
Editor in Chief
American Physical Society

PHYSICAL REVIEW LETTERS



Physics

SYNOPSIS

A Lightweight Among Heavyweights

Researchers have observed the lightest uranium isotope to date, offering insight into models of nuclear structure.

By Katherine Wright

Discovering new isotopes is like the stamp collecting of physics, but the consequences of adding to the set are much further reaching. A team of researchers using the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, China, has now expanded the collection with the discovery of the lightest uranium isotope to date [1]. The finding could have implications for our understanding of a particular type of radioactive decay that is still mysterious despite more than a century of work.

Uranium is an inherently unstable element. All of its isotopes are radioactive, with the most abundant ones having half-lives ranging from 150,000 to 4.5 billion years (roughly the age of Earth). Naturally occurring uranium contains between 140 and 146 neutrons. The newly discovered isotope has just 122, one fewer than the previous record for the element.

The team created the isotope in a "fusion-evaporation" reaction, which involved firing a beam of argon at a tungsten target and monitoring the fusion products. They identified two previously discovered light uranium isotopes—uranium-216

and uranium-218—as well as the new one, uranium-214, which has a blink and you'll miss it half life of 6.5 ms.

The number of neutrons in this isotope sits near a so-called magic neutron number, specifically 126, which makes it interesting for studying nuclear stability. Magic isotopes are unusually stable, and observing their near neighbors provides opportunities to probe how nuclear structure influences radioactive decay processes. In this case, measurements from the three observed uranium isotopes suggest that they experience an enhanced proton-neutron interaction compared with isotopes of other elements. This stronger interaction affects the formation of alpha particles in the nucleus, a complex quantum many-body problem whose details are still unknown.

Katherine Wright is the Deputy Editor of Physics.

REFERENCES

- Z. Y. Zhang et al., "New α -emitting isotope ^{214}U and abnormal enhancement of α -particle clustering in lightest uranium isotopes," Phys. Rev. Lett. 126, 152502 (2021).



Physics评论

nature

Search Q Login

Explore content Journal information Publish with us

nature > research highlights > article

ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS • 22 APRIL 2021

The world's lightest uranium atom reveals nuclear secrets

A flyweight isotope of uranium helps to shed light on a fundamental form of nuclear decay.



The creation of the lightest uranium atom ever gives scientists a better understanding of a fundamental type of radioactive decay.

All elements have one or more isotopes, which differ from each other in the number of neutrons in their nuclei. Almost all naturally occurring uranium atoms contain either 143 or 146 neutrons.

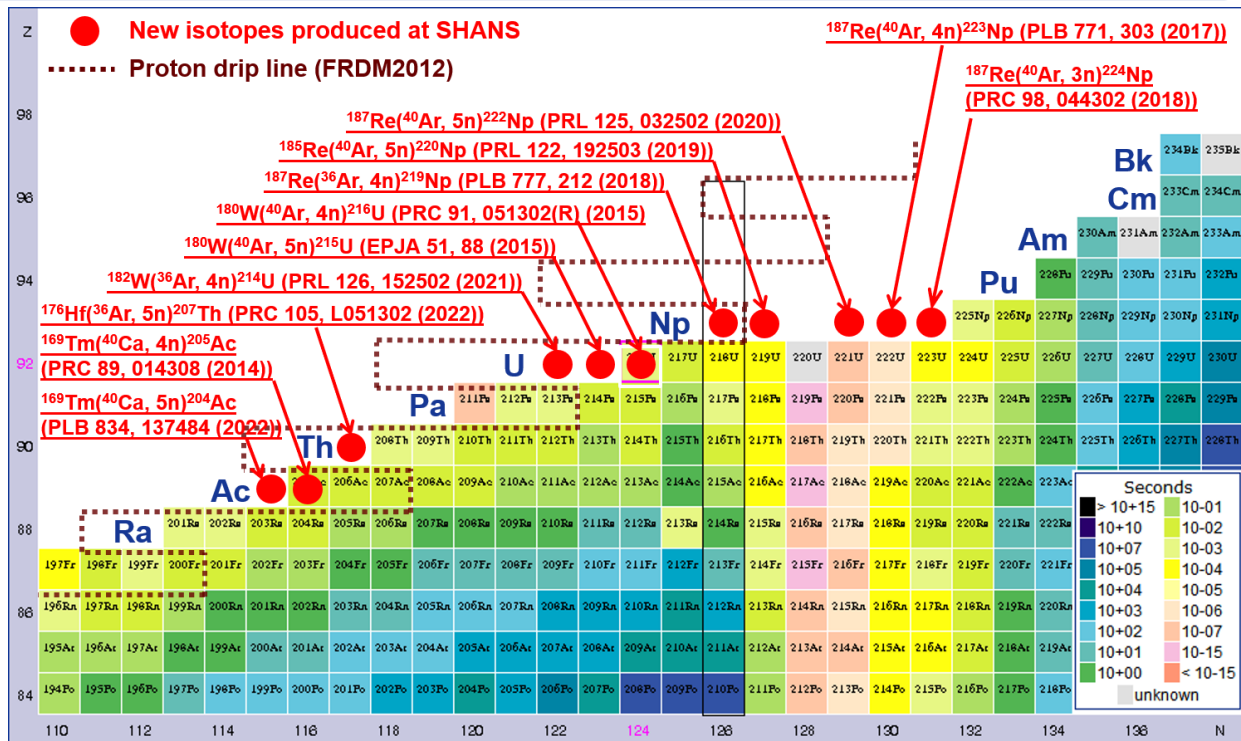
Zai-Guo Gan at the Chinese Academy of Sciences in Lanzhou and his colleagues have produced a uranium isotope with only 122 neutrons by firing a beam of argon at a tungsten target until atoms of each element fused together—an extremely rare event that formed uranium atoms. The team then extracted the 122-neutron isotope using a magnetic device called a separator.

All uranium isotopes undergo α decay, a process whereby an atom loses two protons and two neutrons. Unexpectedly, the authors found that their ultralight isotope and a previously detected uranium isotope containing 124 neutrons decay more easily than do light isotopes of other elements. This suggests that interactions between protons and neutrons in atomic nuclei can have a greater role in α decay than previously thought.

Phys. Rev. Lett. (2021)



重质量缺中子新核素合成



在国际上形成了优势研究方向

掌握了单原子核灵敏的鉴别技术和方法、为冲击新元素合成奠定了基础





我国超重研究计划及进展



科学院战略性先导科技专项：核物质相结构与重元素合成研究

- 新元素合成与超重核稳定岛探索：力争合成119、120号超重元素、开启元素周期表第八周期；比较113号超重元素与同族元素化学性质的差异，检验元素化学性质周期律的外推性；发展丰中子超重核素产生、分离、鉴别关键技术，成为探索超重核稳定岛的先行者
- 奇特核性质与天体环境中核合成过程：研究奇特核结构、宇宙中超铁元素起源
- 核物质相结构：寻找从强子气体到夸克胶子等离子体的相变临界点
- 先进核探测技术及应用：研制硅像素探测器、发展重离子储存环质谱术



先导B进展



超重研究专用装置：*China Accelerator Facility for Superheavy Elements*



离子源及LEBT段



RFQ段

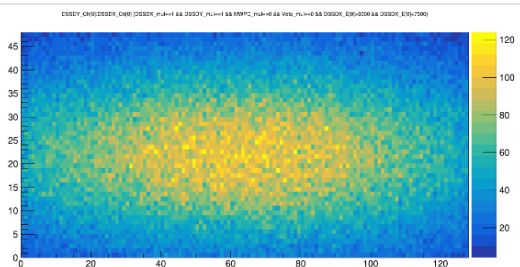
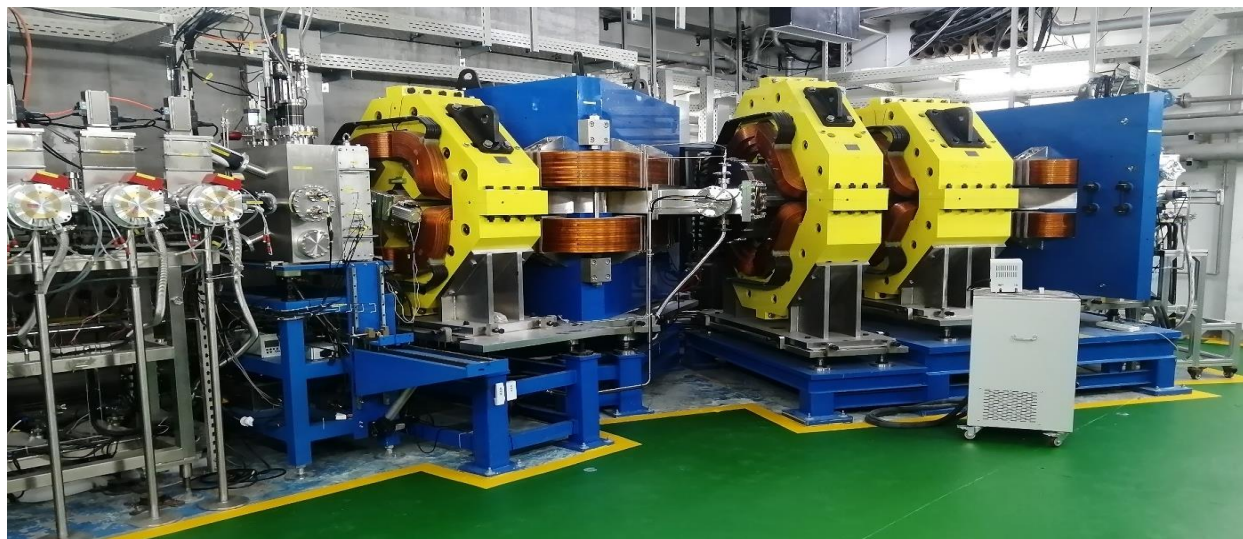


MEBT段

完成了超重研究专用加速器的建造。2021年4月离子源点火，目前运行良好
产生国际上最强的~6 MeV/u重离子束流，为合成新元素提供理想实验条件



高分离效率充气反冲核分离器



新谱仪传输效率： $^{40}\text{Ar}+^{169}\text{Tm} \sim 58\%$ ； $^{40}\text{Ar}+^{175}\text{Lu} \sim 47\%$ ；合成了一批新核素

先导B进展



超重元素合成研究时间进度安排

任务	束流	流强 (pμA)	2022年												2023年												2024年																
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
离子源、加速器、充气谱仪联调	40Ar	1	■	■																																							
平衡电荷态、传输效率测试				■	■	■	■	■									■	■	■	■																							
转靶系统、探测系统、数据获取系统测试				■	■	■	■	■						加速器检修			■	■	■	■																							
新核素合成及核结构研究	40Ca	3-5			■				■	■																																	
Bi靶, 实验本底及加速器测试	55Mn	2					■	■																																			
Tb、Ho、Tm和Lu靶, 反应截面	54Cr	1-2															■	■																									
Bi、Th和U靶, 反应截面, 电荷态积累	54Cr	3-5																■	■	■	■																						
放射性靶材料243Am检验与测试	48Ca、54Cr	3-5																	■	■	■	■																					
48Ca+243Am, 115号元素验证实验	48Ca	3-5																																									
48Ca+243Am, 113号元素化学实验尝试	48Ca	3-5																																									
54Cr+243Am, 119号元素合成首轮实验	54Cr	3-5																																									
54Cr+243Am, 持续开展119号元素合成实验	54Cr	5-10																																									



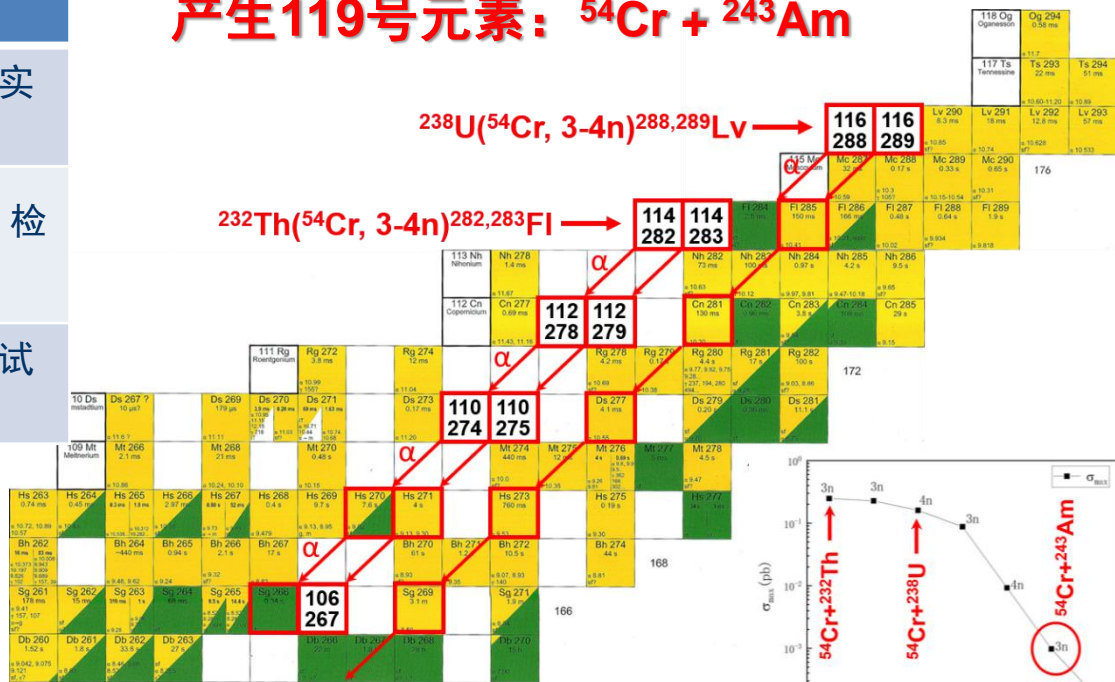
目前工作安排



时间	研究计划
2023年2月-3月	开展 $^{54}\text{Cr}+\text{Tb}$, Ho , Tm , Lu 实验, 测激发函数, 测磁刚度
2023年4月-5月	开展 $^{54}\text{Cr}+\text{Ta}$ 、 Au 、 Bi 实验, 检验磁刚度
2023年5月-6月	开展 $^{54}\text{Cr}+^{232}\text{Th}$ 、 U 实验, 尝试合成FI新核素

2024年1月-2月 利用 $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)^{287-288}\text{Mc}$ 反应验证合成115号Mc元素, 尝试开展113号元素化学性质研究

产生119号元素: $^{54}\text{Cr} + ^{243}\text{Am}$



研究计划、内容、目标

新元素合成

➤ 目标：冲击合成119, 120号元素

➤ 验证115号元素： $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$

➤ 产生119号元素： $^{54}\text{Cr} + ^{243}\text{Am}$ ($^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$)

➤ 产生120号元素： $^{55}\text{Mn} + ^{243}\text{Am}$ ($^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$)

➤ 可行性评估：

113

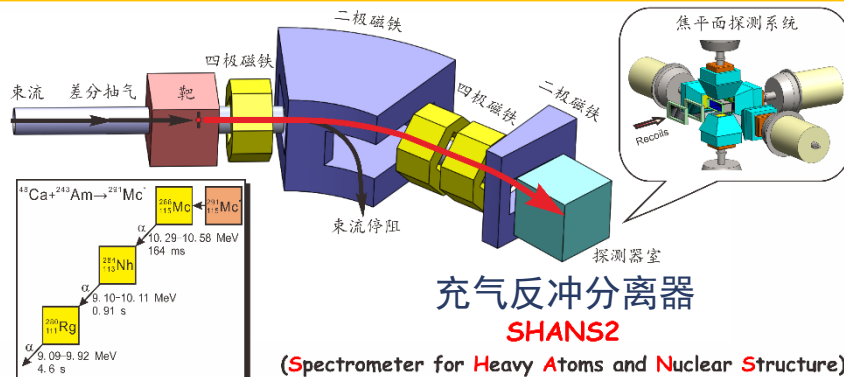
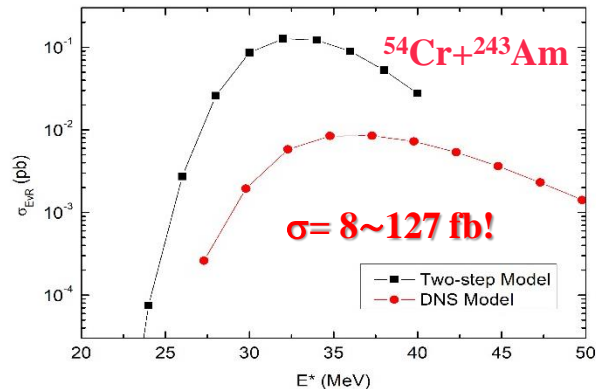
Nh 铈

当时实验能力极限（日本）：
束流强度： $\sim 1\mu\text{A}$ ； $\sigma \sim 19\text{fb}$
结果：575天，3个事件

$\sigma \sim 8\text{fb}$ ，束流强度 $5 \sim 10\mu\text{A}$

标准实验设置：事件/100~200天，可行！

反应截面预言



总结



- 存在多少种化学元素、元素周期表有终结点么？
- 存在长寿命的超重核素么（他们的寿命究竟有多长）？
- 如何产生、鉴别位于超重核稳定岛上的核素？
- 什么因素决定着超重核素的稳定性？
- 在天体环境中能够产生超重核素么（天体环境、产生过程）？
- 在超重原子的极强库仑场中电子是如何排列的？
- 在什么位置超重元素的化学性质偏离周期率的预期？
-

