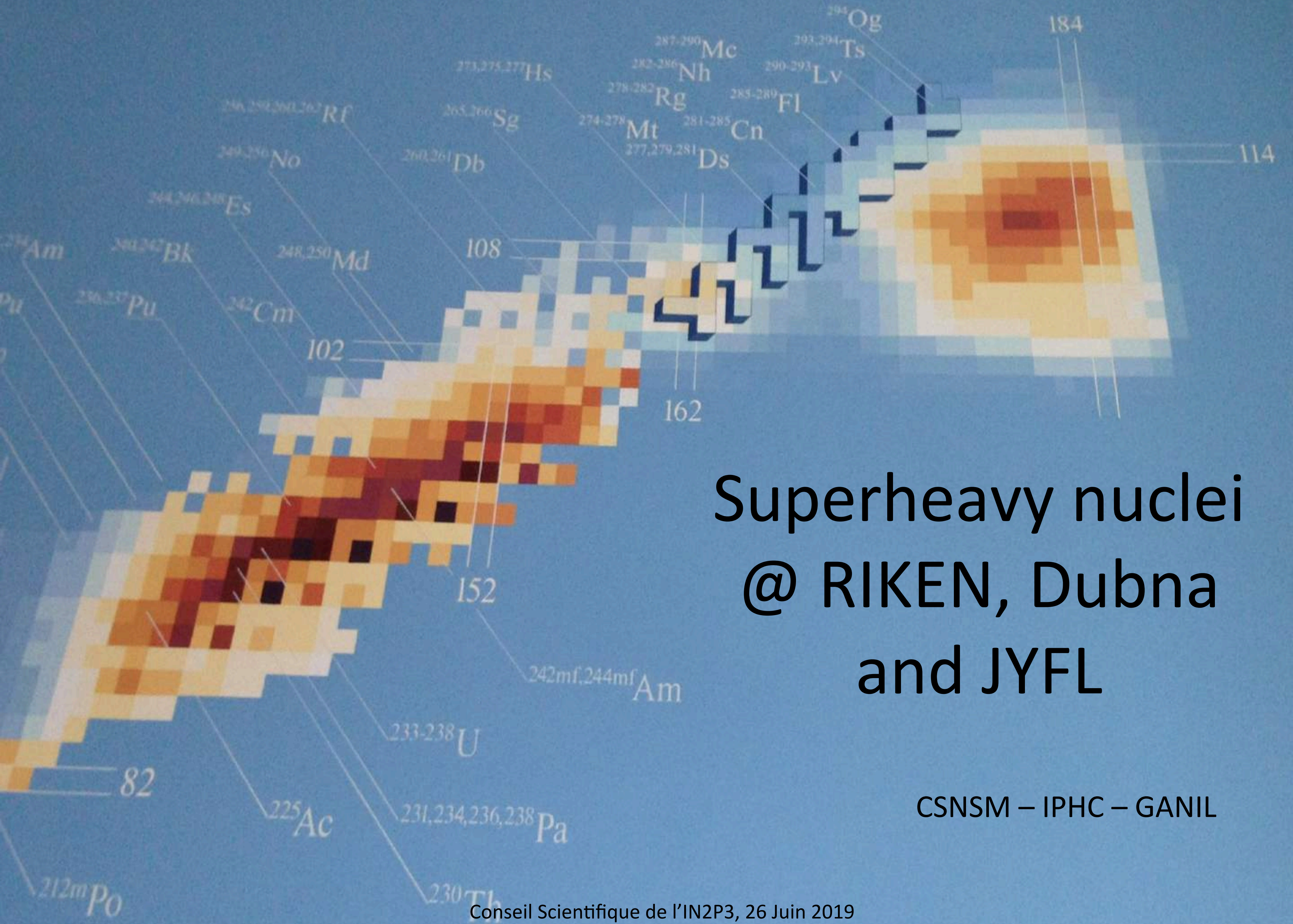
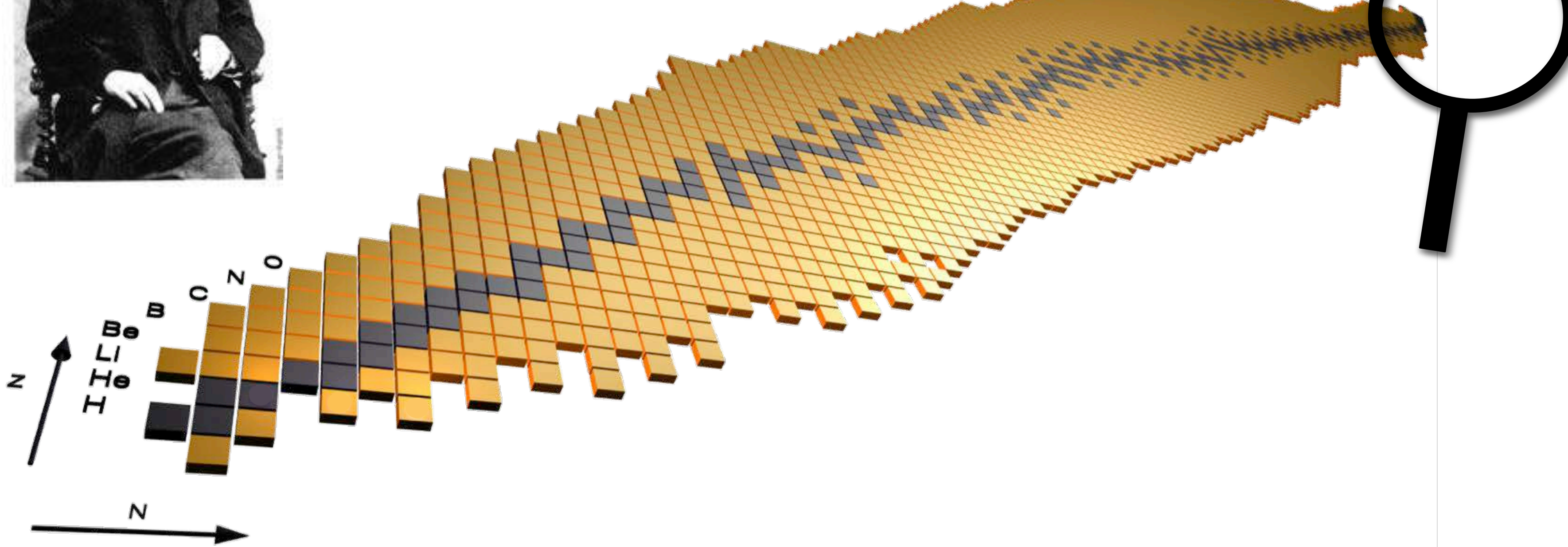


Superheavy nuclei @ RIKEN, Dubna and JYFL

CSNSM – IPHC – GANIL

Motivations

How many elements ?

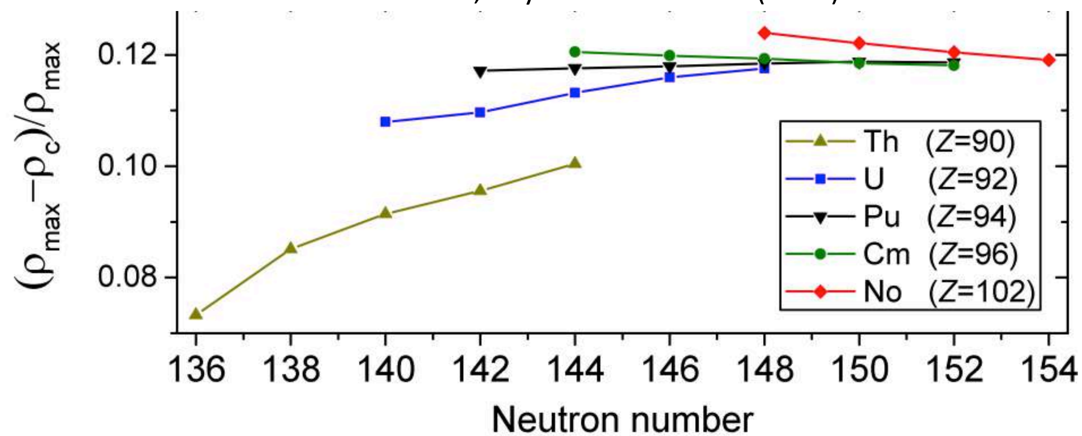


Properties of matter in extreme conditions of mass & charge ?
Limits of the nuclear chart ?

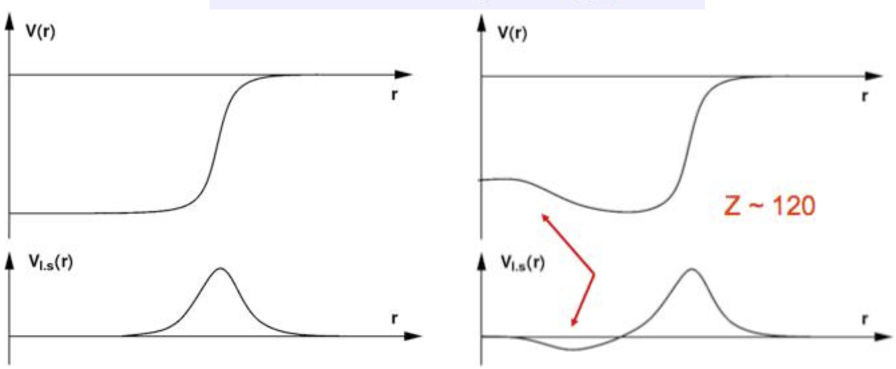
Theoretical challenge

- Large density of states
- Strong Coulomb field

S. Raeder et la., Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 232503

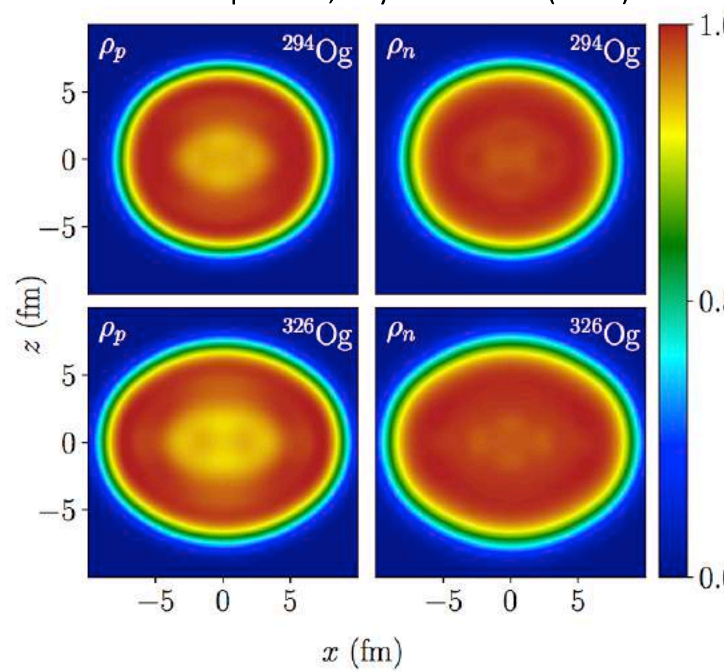


$$V_{l.s}(r) = -\frac{1}{r}\frac{\partial V(r)}{\partial r}$$

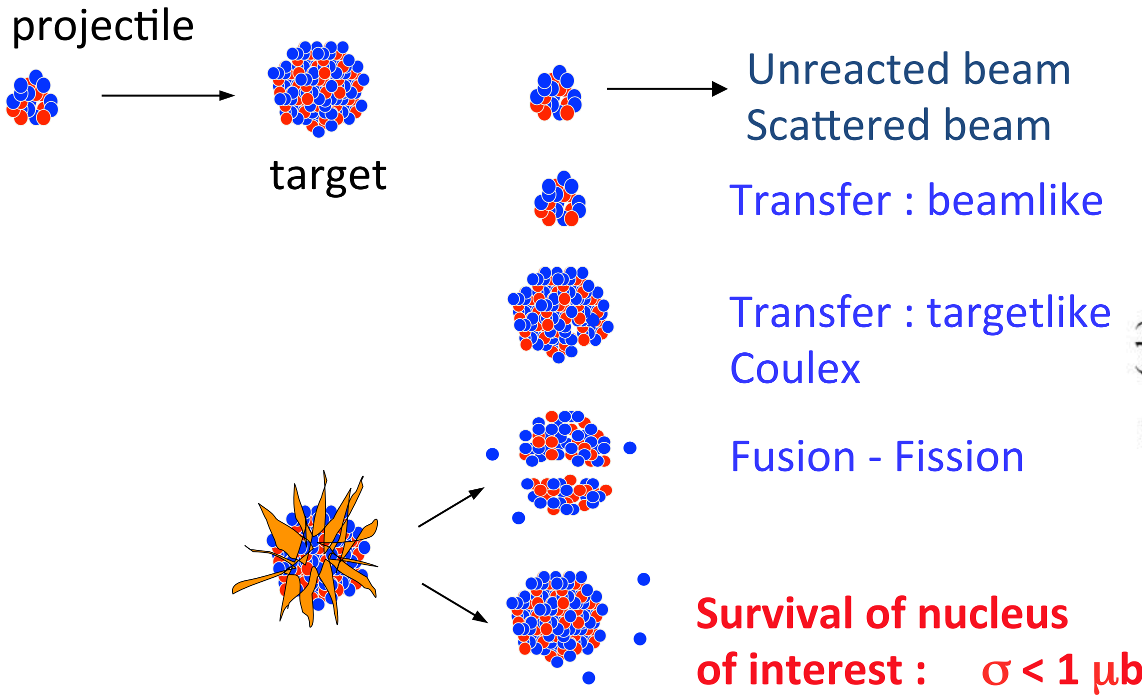


Total spin-orbit spliting depends on the location of the radial wavefunctions

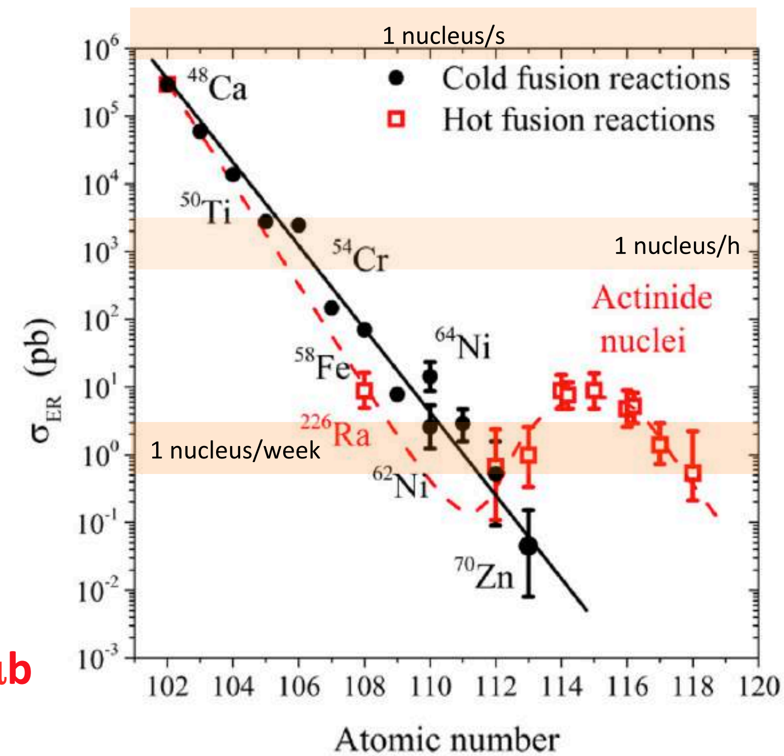
B. Schuetrumpf et al., Phys. Rev. C 96 (2017) 024306

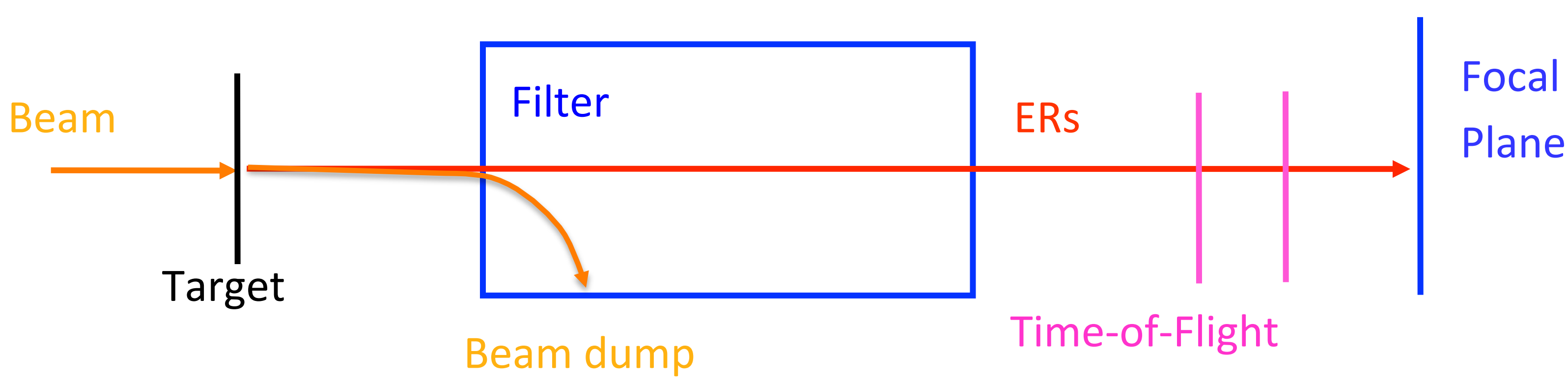


Experimental challenge

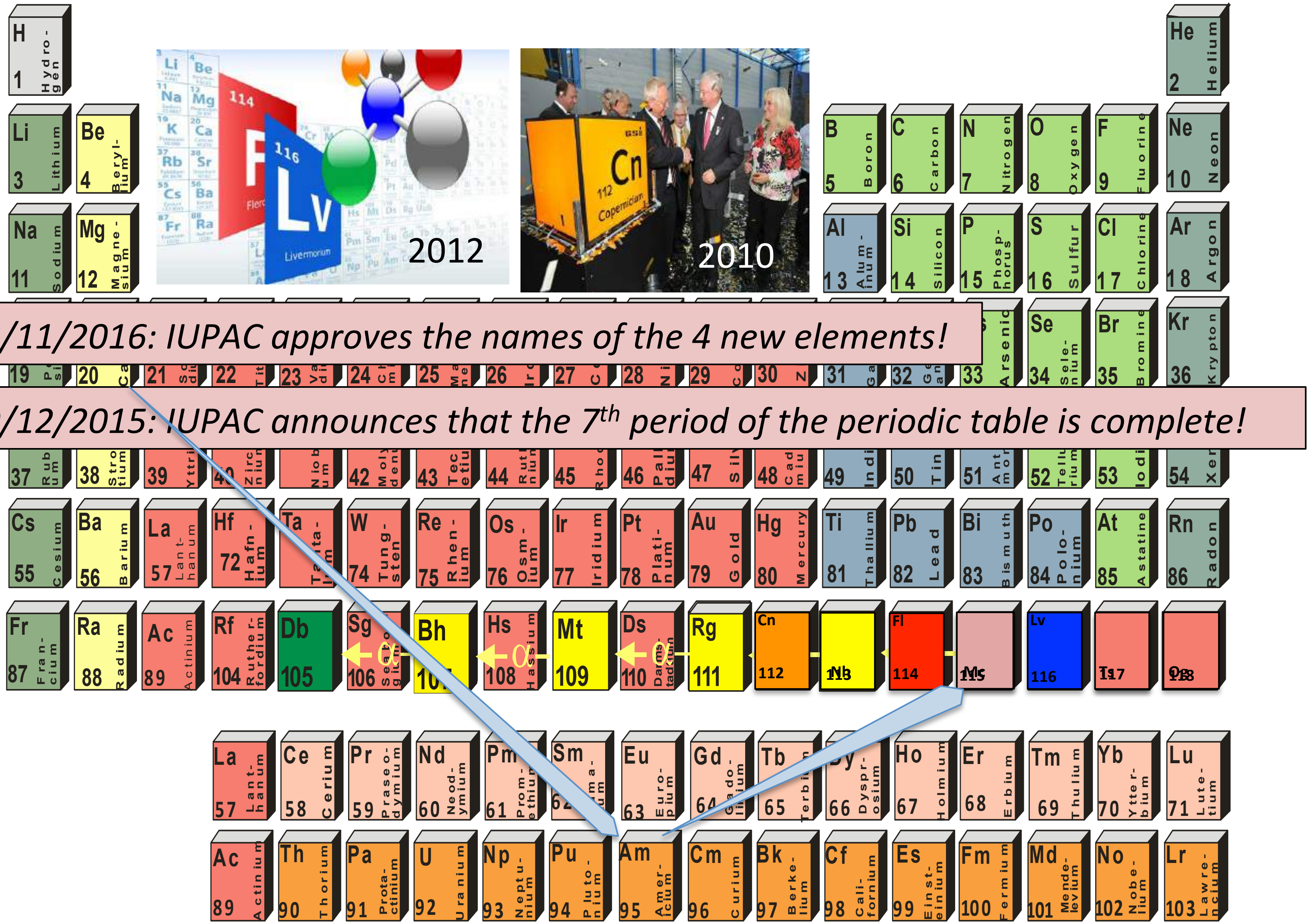


M.G. Itkis et al., Nucl. Phys. A 944 (2015) 204





Making the heaviest elements

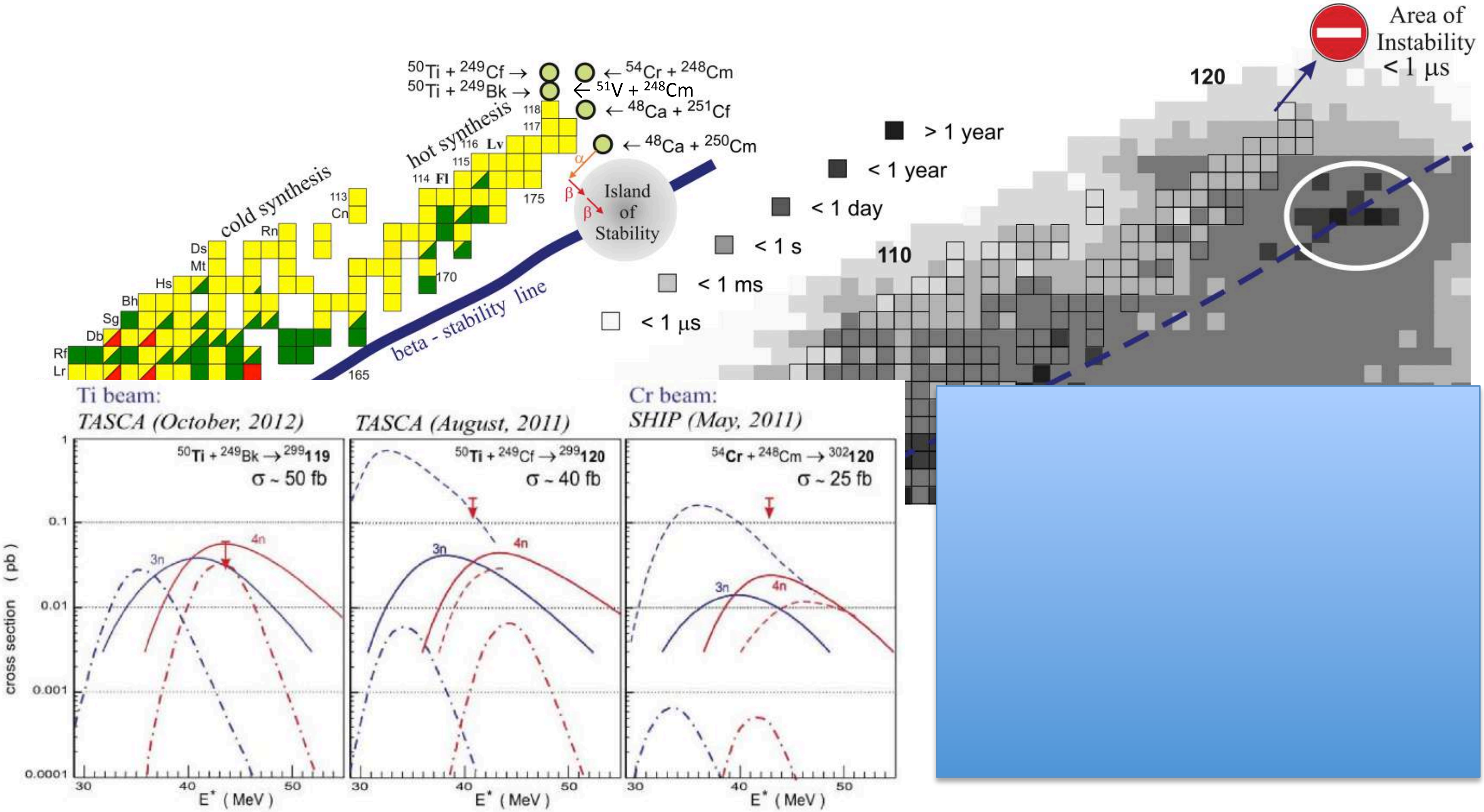


28/11/2016: IUPAC approves the names of the 4 new elements!

30/12/2015: IUPAC announces that the 7th period of the periodic table is complete!

What next ?

V. Zagrebaev et al., Acta Phys. Pol. B 45 (2014) 291



V. Zagrebaev et al., Journal of Physics: Conference Series 420 (2013) 012001

Cross sections (broad range of predictions) ?

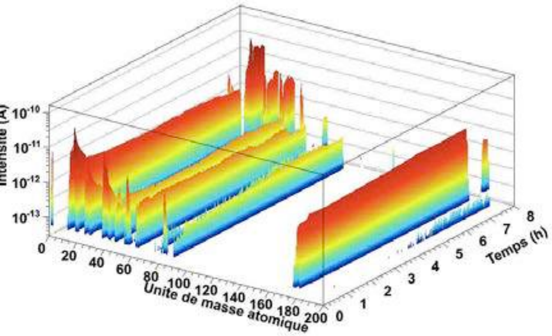
Excitation functions: Optimal beam energy ?

Intense heavy-ion beams via the Metal Ions from VOlatile Compounds method

H. Koivisto, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res B **94** (1994) 291

MIVOC compounds of enriched ^{50}Ti (J. Rubert, J. Piot et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res B **276** (2012) 33)

	^{50}Ti beam out of source		on target	trans.	cons.
JYFL ECRIS2	19 eμA (11^+) = 1.7 pμA	==>	0,044 pμA	2,6%	~0,6 mge/h
GANIL ECR4	28 eμA (10+) = 2.8 pμA	==>	0,450 pμA	16,0%	~0,2 mge/h
DUBNA ECR4M	55 eμA (5+) = 11.0 pμA	==>	0,490 pμA	4,5%	~0,6 mge/h
RIKEN RILAC	15 eμA (11+)= 1.6 pμA	==>	0.500 pμA	30,0%	~0,5 mge/h



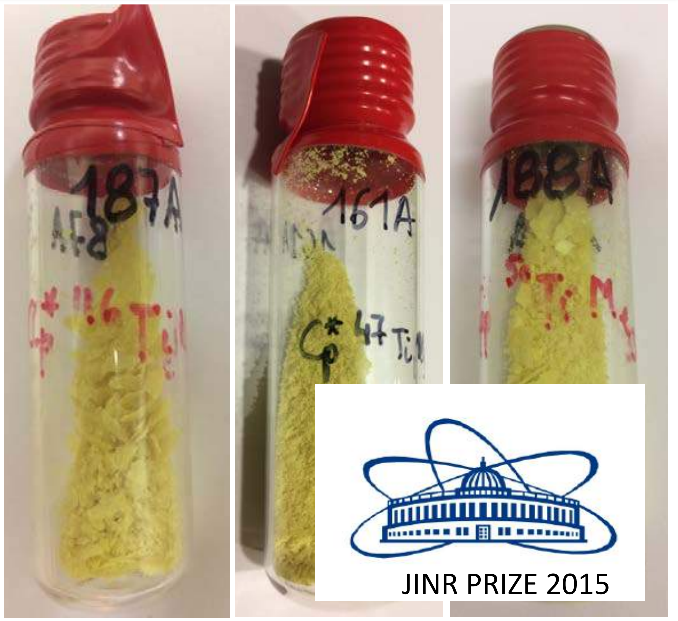
MIVOC method:
Intensity, stability, reliability
& low material consumption

^{51}V beam sucessfully tested in RIKEN 2017

^{46} & ^{47}Ti isotopic MIVOC beams since 2017

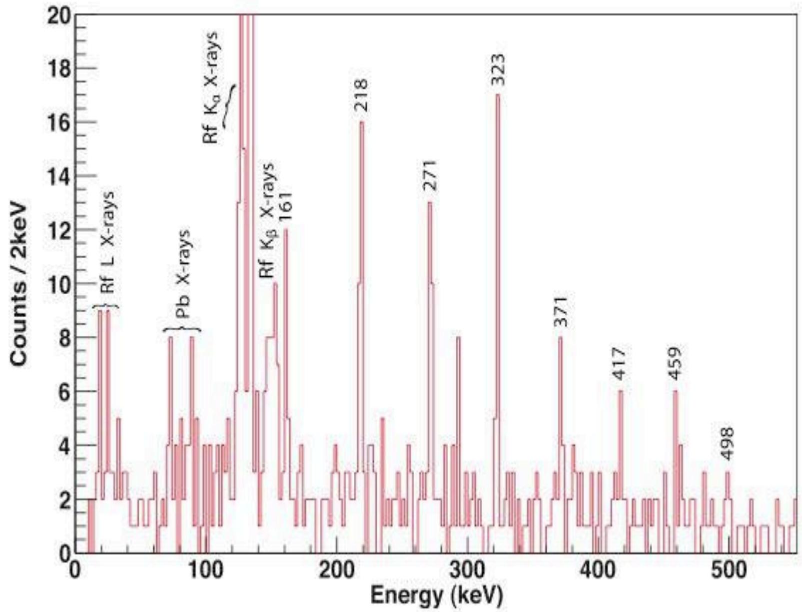
^{54}Cr beam sucessfully tested in Dubna 2018

Metallic beams for next generation of SHE !



Beams for synthesis, spectroscopy & chemistry

P.T. Greenlees, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 012501



First prompt spectroscopy of a superheavy nucleus ^{256}Rf @ JYFL

^{46}Ti beam to prepare the chemistry of Nh (113) @ FLNR:

^{46}Ti + ^{141}Pr -> Thallium (Nh homologue)

Synthesis program @ RIKEN (2014-)

$^{50}Ti + ^{248}Cm \rightarrow ^{295}Og + 3n$

^{50}Ti from IPHC, acceletaed by RILAC (0.5 pμA)

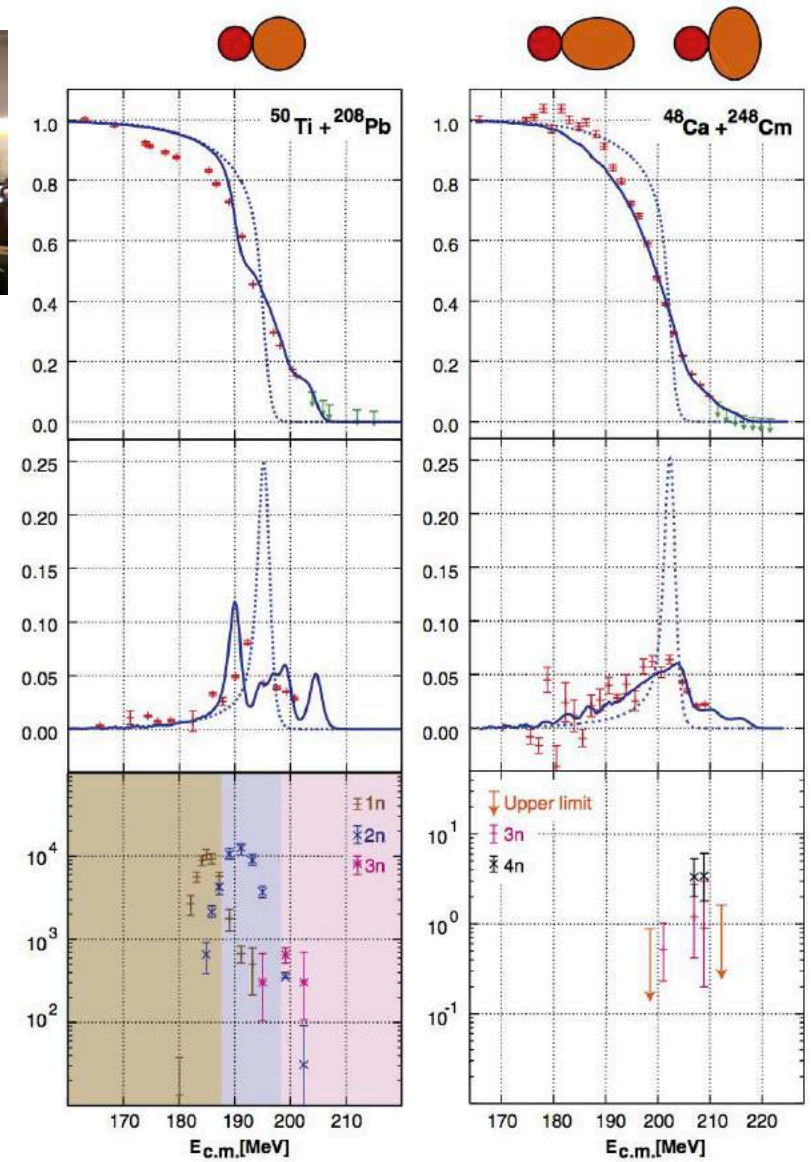
No events – upper limit unpublished

$^{51}V + ^{248}Cm \longrightarrow ^{299-x}Uue + xn$

^{51}V from IPHC, beam accelerated by RRC cyclotron

Optimal beam energy determined by barrier distribution run

Several camapigns since 2017, ongoing



T. Tanaka et al., Journal of the Physical Society of Japan 87 (2018) 014201

Perspectives

2020: Start of the SHE Factory @ DUBNA & new RILAC @ RIKEN

Metallic ions beams of ^{50}Ti, ^{51}V & ^{54}Cr (MIVOC + Inductive oven)
-=> up to 10 pμA on target !

Unique ^{248}Cm, ^{249}Bk & $^{249\text{-}251}Cf$ targets

-=> two parallel programs in Dubna and RIKEN (with IN2P3 teams)

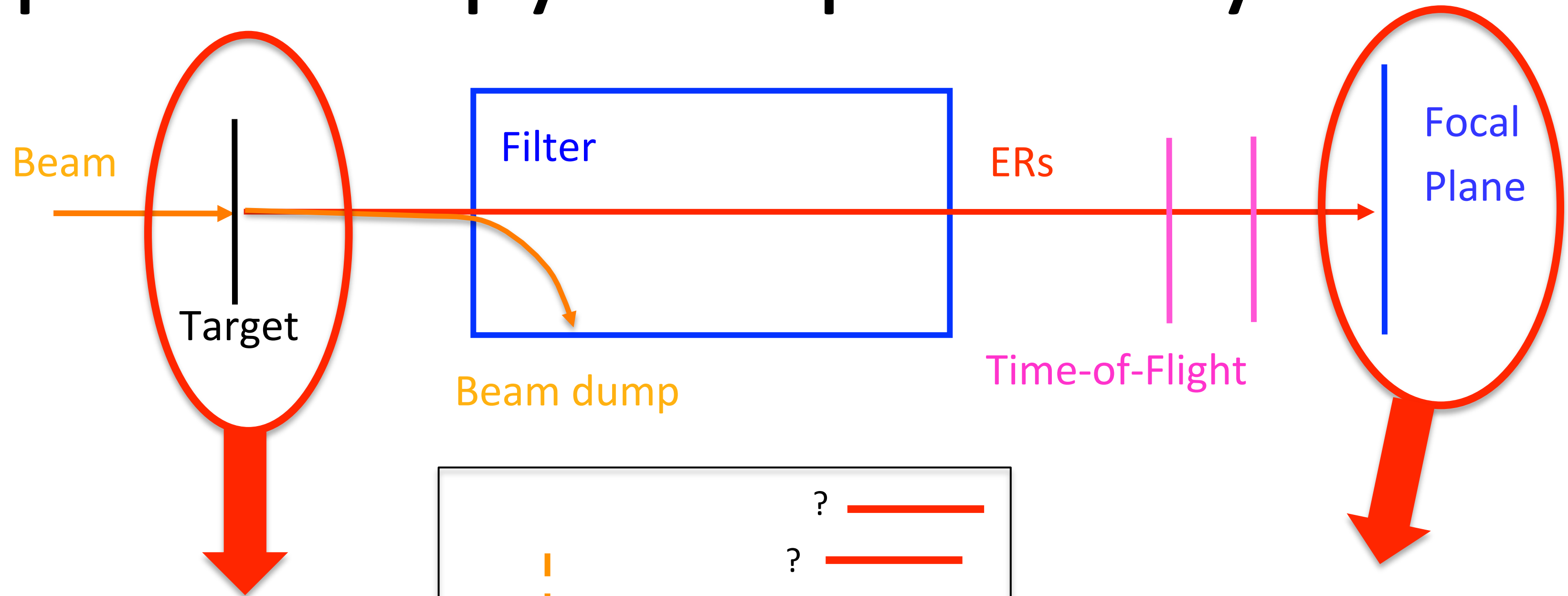
E119, E120 campaigns …

R&D to enable the use of an ^{254}Es target for synthesis

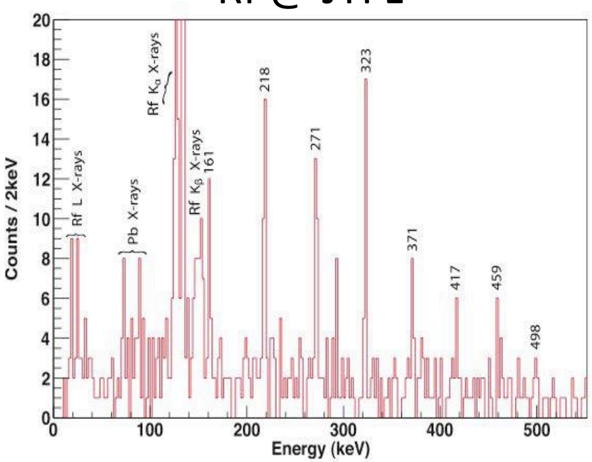
Ongoing R&D on Uranocene for multinucleon transfer

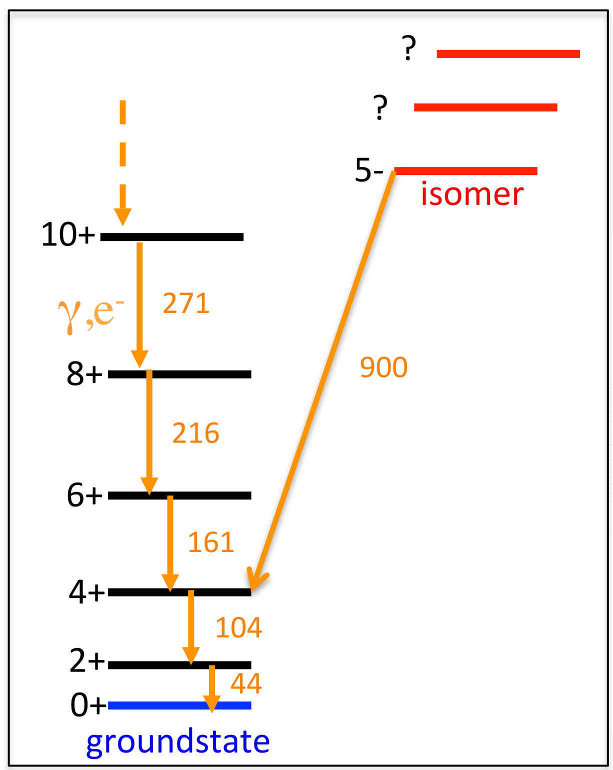
Reach more neutron-rich SHE with Multinucleon transfer
-=> potential discovery and study or many tens of new SHE

Spectroscopy of super heavy nuclei

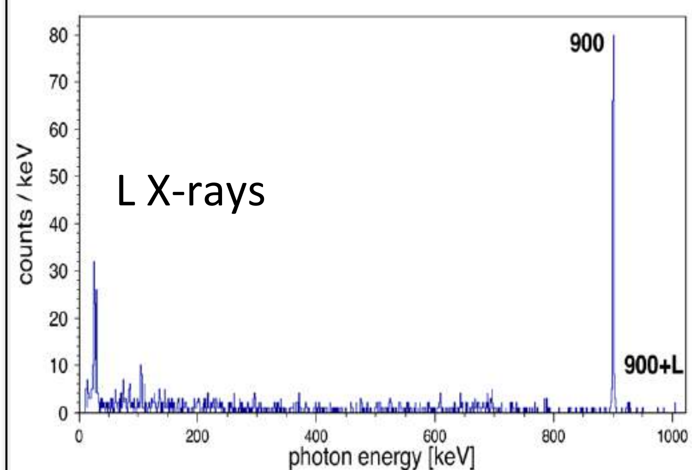


^{256}Rf @ JYFL





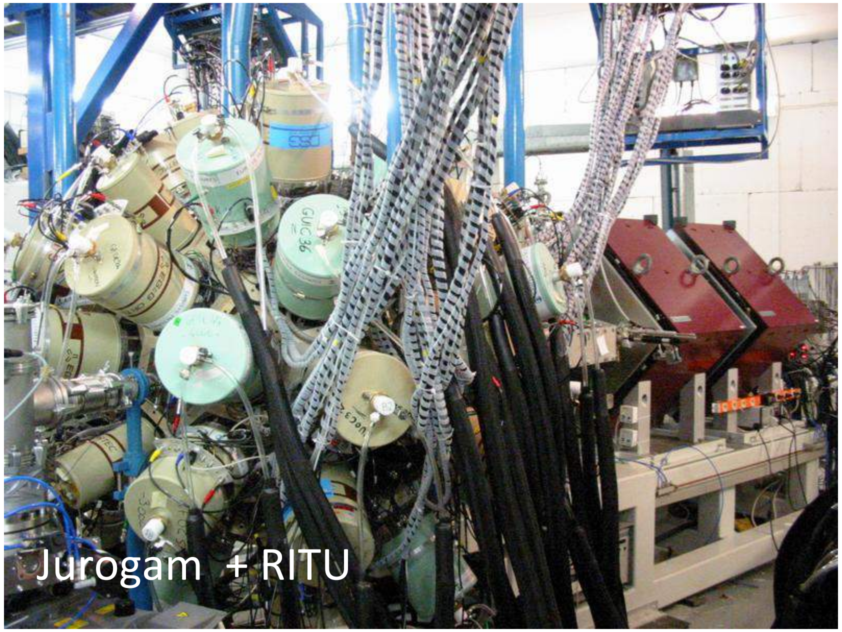
^{256}Rf @ FLNR (2018)

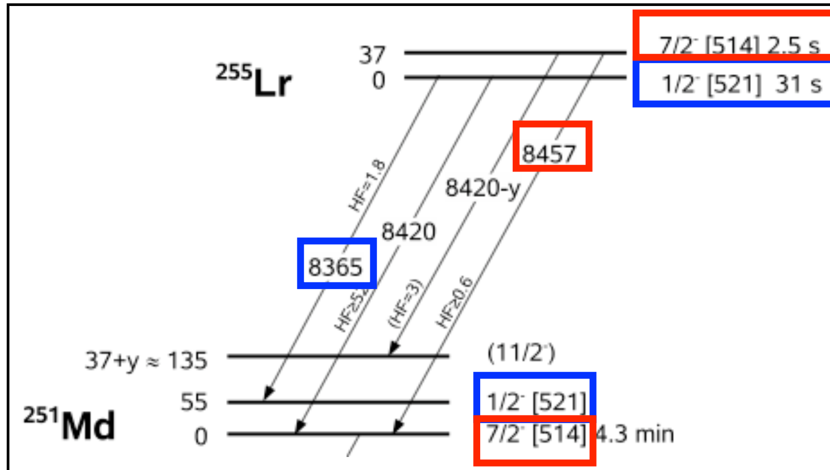


P.T. Greenlees, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 012501
J. Rubert, PhD thesis, Université de Strasbourg (2013)

K. Hauschild et al., in preparation

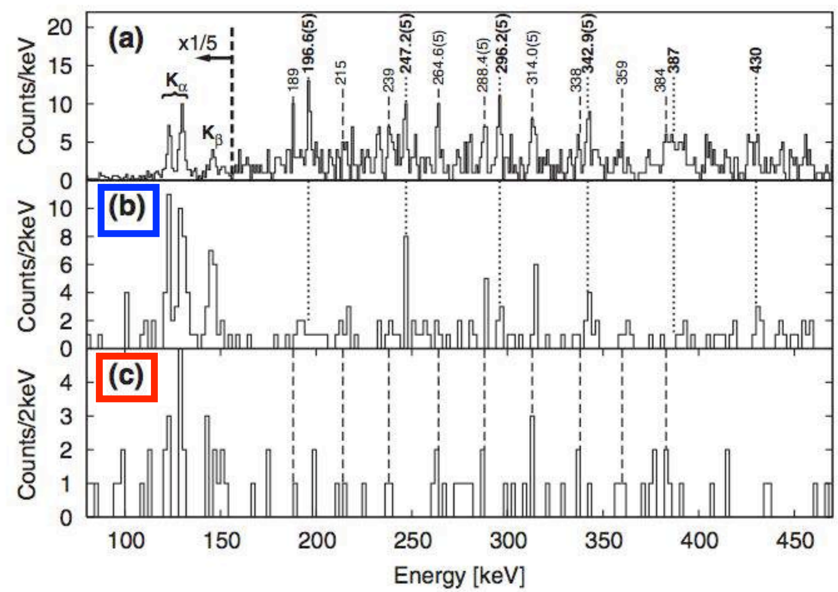
Prompt spectroscopy @ JYFL



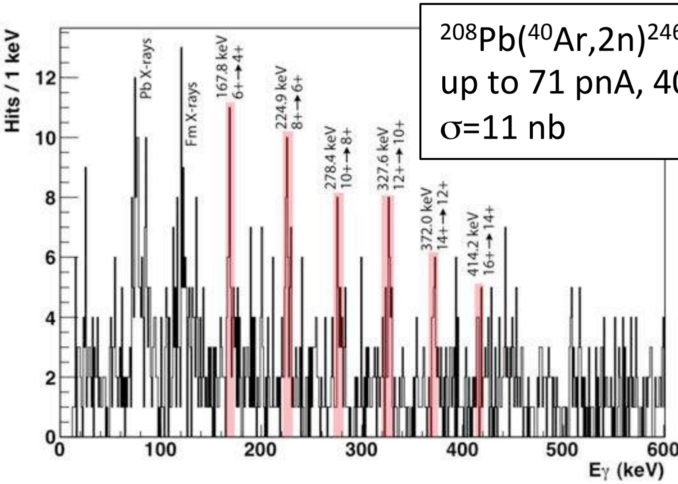


A. Chatillon et al., Eur. Phys. J. A30 (2006) 397

S. Ketelhut et al., Phys. Rev. Lett. 102, 212501 (2009)



J. Piot et al., Phys. Rev. C85 (2012) 041301(R)



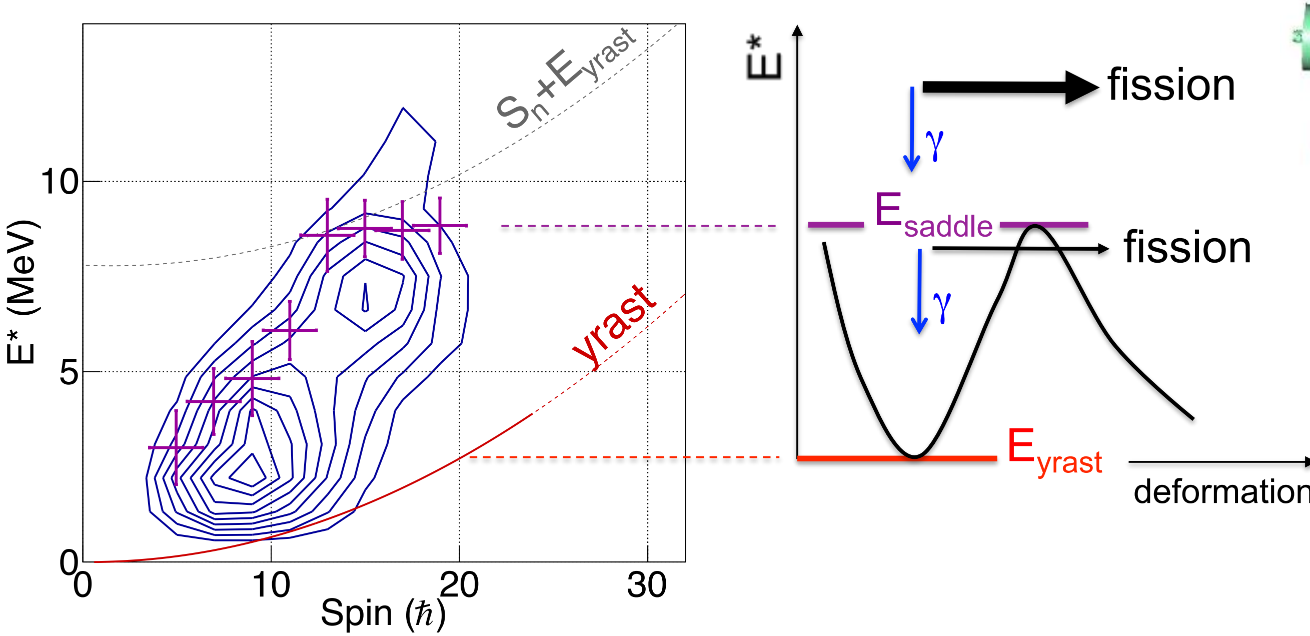
^{208}Pb(^{40}Ar,2n)^{246}Fm
up to 71 pnA, 40 kHz
σ=11 nb

TNT2-D

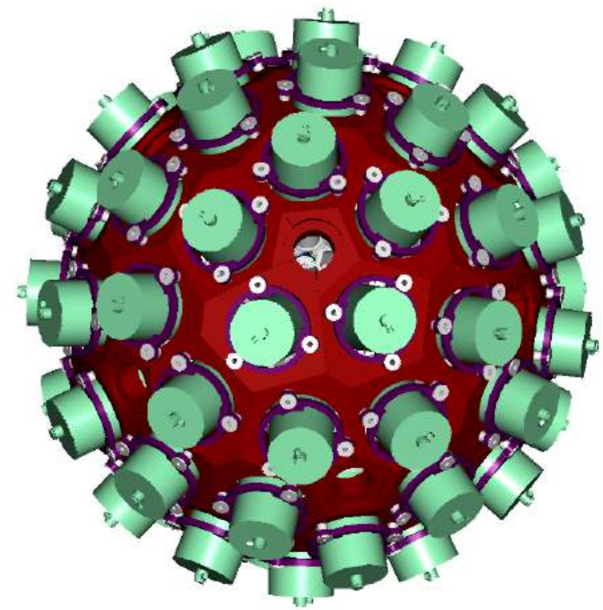
Perspectives

AGATA (3-4π) @ RITU (also VAMOSGF) -> increased γ^n

Calorimetric efficiency: fission barriers



G. Henning et al., Phys. Rev. Lett. 113, 262505 (2014)



Polarization capabilities: search for M1 resonances in superheavy nuclei

Decay spectroscopy at FLNR

2004: **G**amma **A**lpha **B**eta **R**ecoil **I**nvestigations with the **EL**ectromagnetic **A**nalyser (CSNSM-FLNR-IPHC)

K. Hauschild, A.V. Yeremin, O. Dorvaux, A. Lopez-Martens et al., Nucl. Instr. Meth. A 560 (2006) 388

Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова.
Делегация французских ученых обсуждает с дирекцией лаборатории планы будущих совместных экспериментов

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions.
A delegation of French scientists discusses with the Laboratory's leaders prospects of mutual experiments

НАУКА СОДРУЖЕСТВО ПРОГРЕСС
ДУБНА

ЕЖЕНЕДЕЛЬНИК ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Газета выходит с ноября 1957 года ♦ № 6 (3895) ♦ Пятница, 15 февраля 2008 года

21 февраля в Доме международных совещаний открывается

103-я сессия Ученого совета

С докладом о выполнении рекомендаций 102-й сессии Ученого совета и об основных результатах деятельности Института в 2007 году выступит директор член-корреспондент РАН А. Н. Сисакян.

О работе и развитии базовых установок ОИЯИ будет представлено несколько докладов и сообщений: работа базовых установок в 2007 году – Г. Д. Ширков, ход работ по модернизации реактора ИБР-2 – А. В. Виноградов, развитие комплекса нейтронных спектрометров на реакторе ИБР-2 – А. М. Балагуров, развитие циклотронного комплекса Лаборатории ядерных реакций – Г. Г. Гульбекян, ИРЕН: состояние дел и график работ – В. Н. Швецов, проект «Нуклотрон-М» – Г. В. Трубников, о ходе подготовки проекта NICA/MPD – В. Д. Кекелидзе.

Доклад о подготовке пятилетней партнерской программы ОИЯИ – ЦЕРН представит Н. А. Русакович.

С планами участия ОИЯИ в проекте FAIR на сессии выступят А. Д. Коваленко (ускорительная техника) и А. Г. Ольшевский (создание спектрометров и участие в физической программе).

О рекомендациях ПКК доложат председатели комитетов Я. Нассальски, В. Грайнер, В. Навроцик.

Участники сессии утвердят решение жюри о присуждении премий ОИЯИ за 2007 год.

В повестку сессии вошли также выборы директора ЛИТ и заместителя директора ЛТФ.

Сессия завершит свою работу 22 февраля.

● Интервью в номер

Эксперименты на ускорителях ЛЯР

В Лаборатории ядерных реакций продолжается программа исследований на пучках ускорителей тяжелых ионов и комплекса радиоактивных ядер DRIBs. Об этом рассказал корреспонденту еженедельника «Дубна» заместитель директора лаборатории А. Г. ПОПЕКО.

Недавно в интервью вашей газете по итогам программного комитета по ядерной физике профессор З. Хофманн высоко отозвался о научной значимости программы по спектроскопии трансфермиевых элементов. В эти дни в ЛЯР совме
ков из Франц
на сепаратор
трометре GA
римент по из
топов резерф
водит работа
мерения прод
общей сложн
ют участие с
ков из сотруд
бораторий. Г
запланирован
дернизации у
с целью повь
ности.
Во второй

должались эксперименты с пучком гелия-6, получаемого на ускорительном комплексе DRIBs (руководитель А. В. Фомичев). После модернизации циклотрона У400М интенсивность пучка даже пришлось ограничивать. Теперь предстоит модер-

Наш адрес в Интернете

- Intense beams
- Dedicated beam time
- Availability of exotic targets

JINR PRIZE 2007

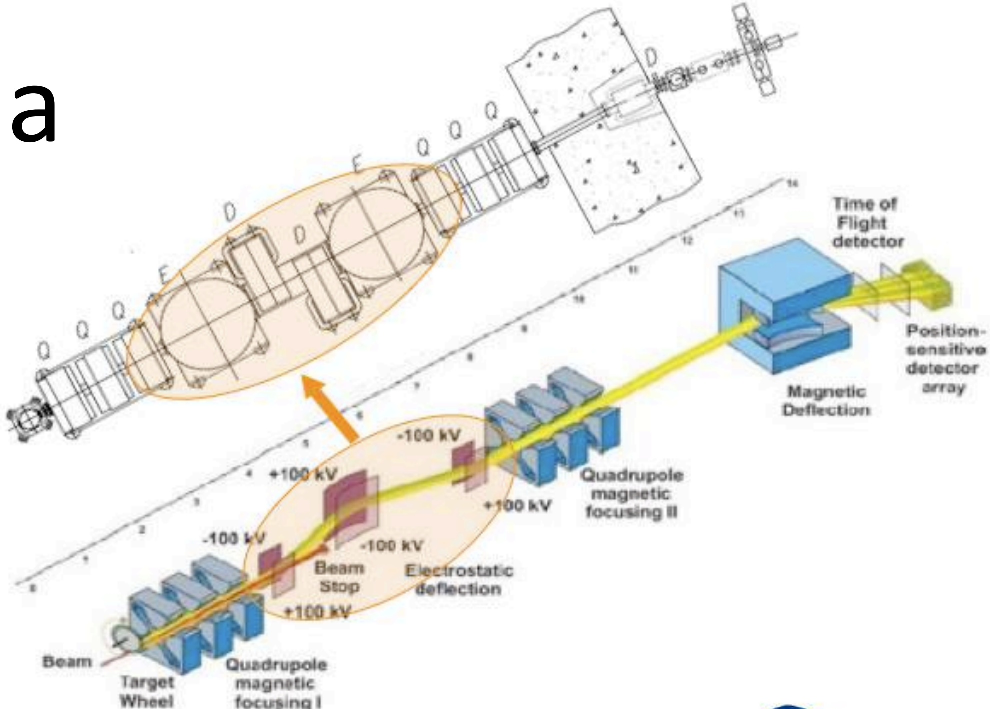
SHELS@Dubna

VASSILISSA (Energy filter)

➔SHELS (velocity filter)

Gain in transmission, especially for asymmetric reactions

A. Popeko et al., Nucl. Instr. Meth. B 376 (2016) 140



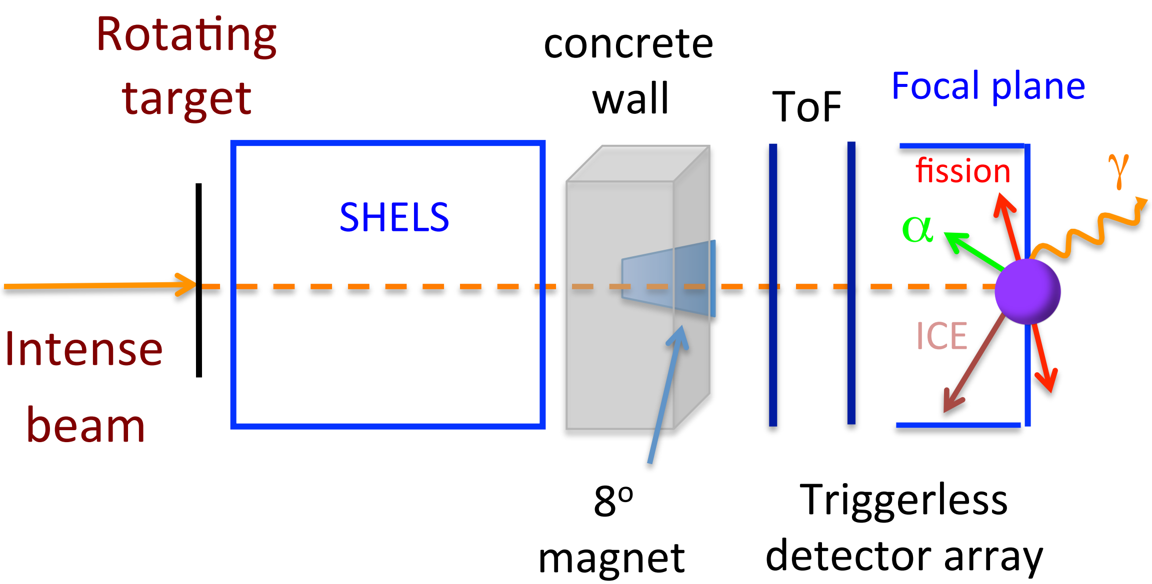
JINR PRIZE 2015

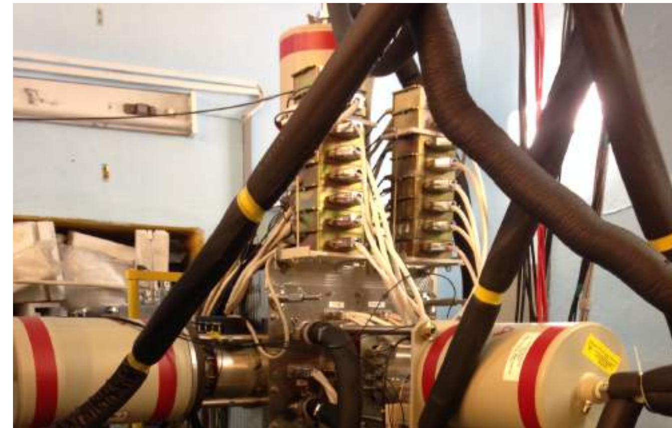
ANR-SHELS (2006-2010) & Russian Foundation for Basic Research

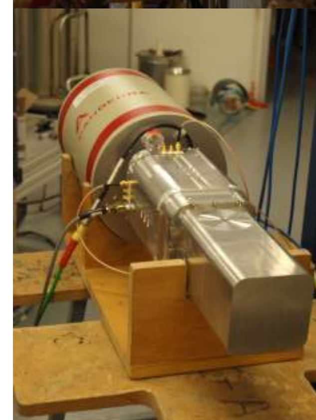
ANR

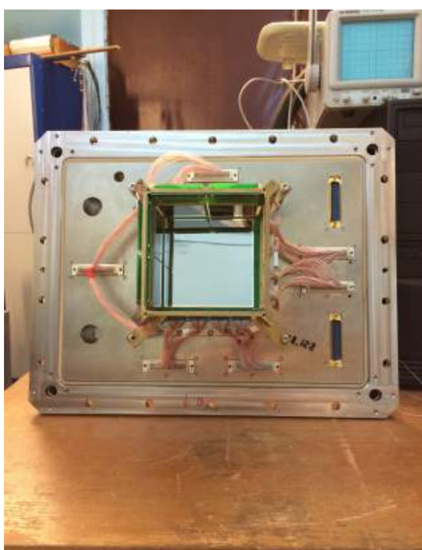
GABRIELA@SHELS

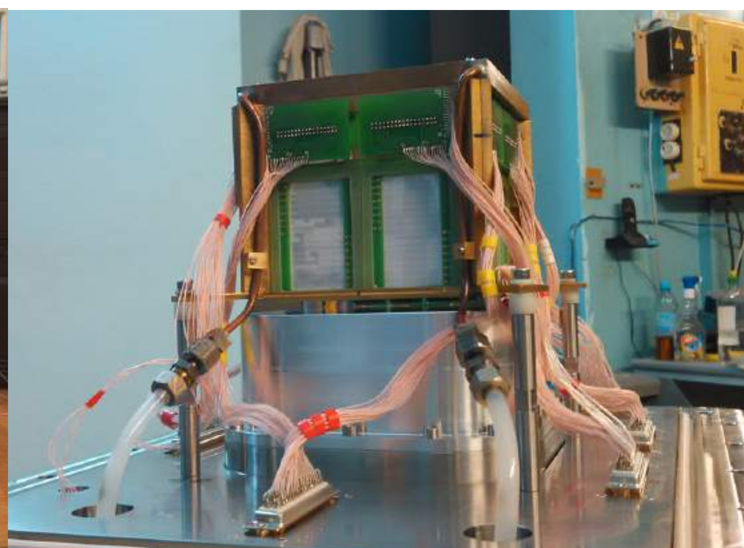
ANR-CLODETTE (2013-2017) & RFBR

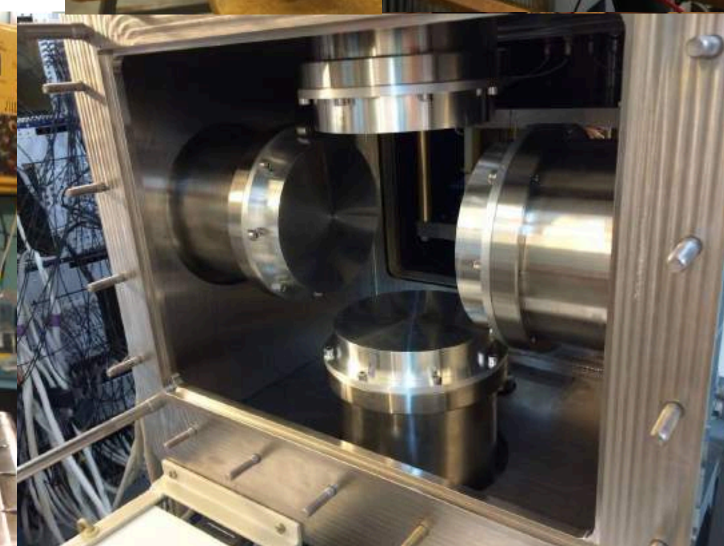








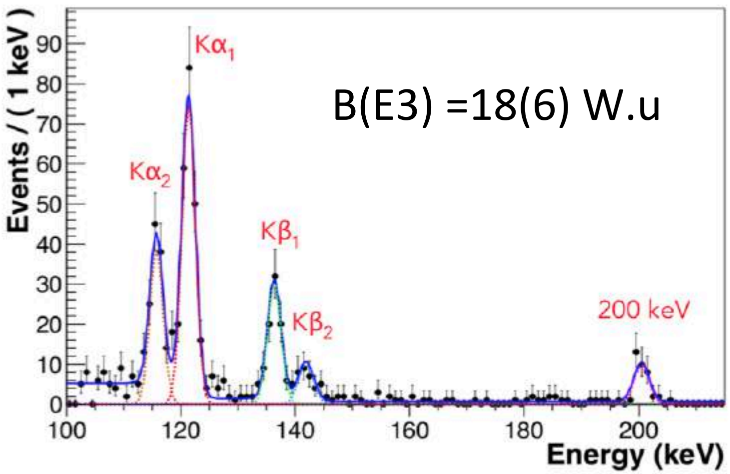


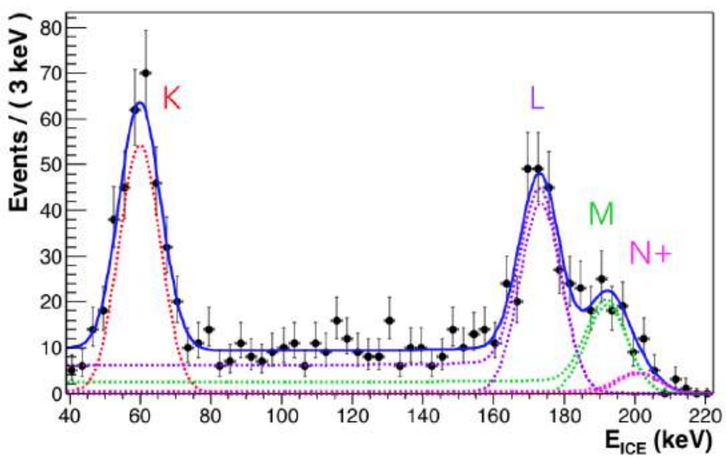


Structure & reaction studies

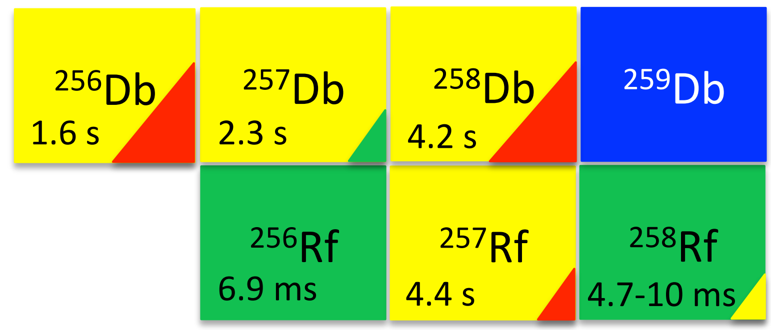
γ and ICE decay of an isomer in ^{251}Fm : evidence for octupole collectivity

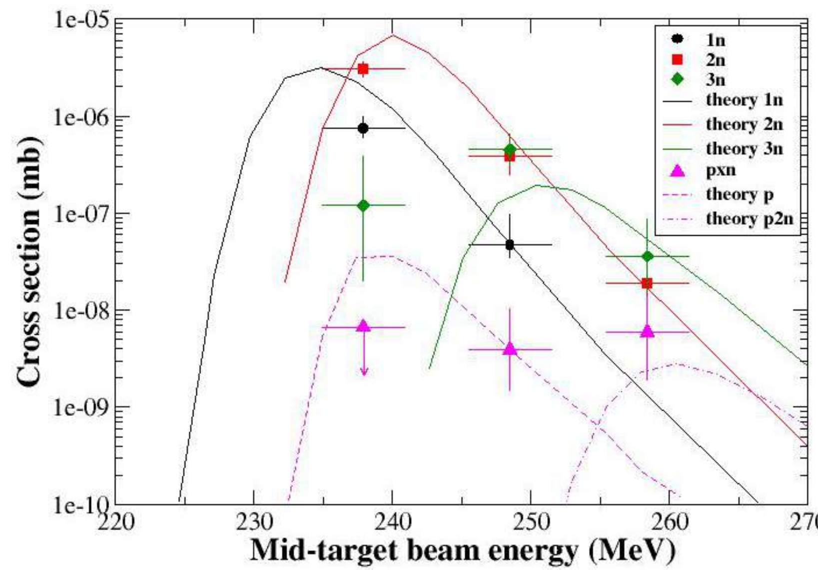
K. Rezynkina et al., Phys. Rev. C 97 (2018) 054332
PhD thesis (Université Paris Saclay)





^{50}Ti + ^{209}Bi → $^{259\text{-}xn}$Db

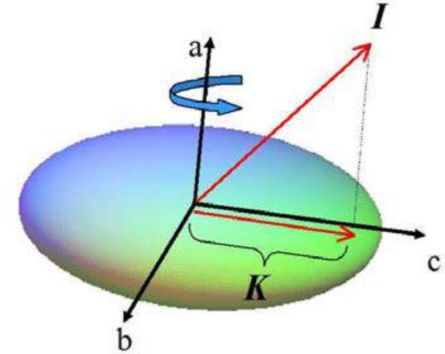


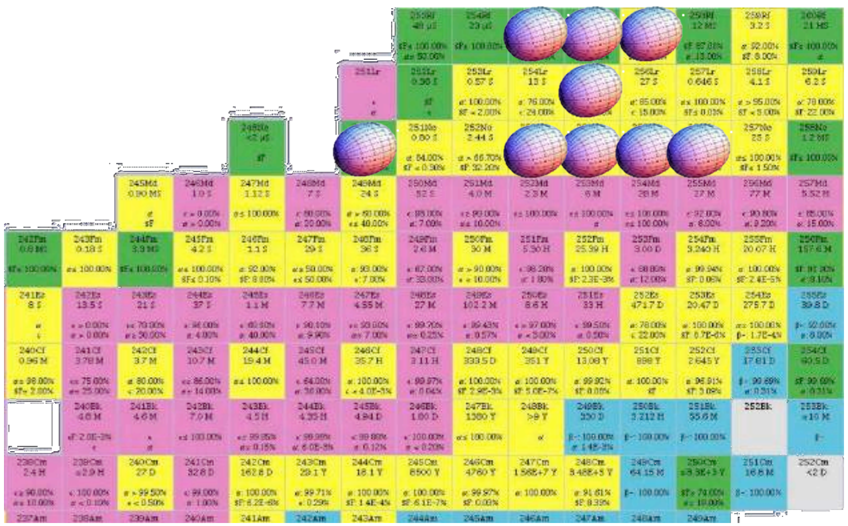


^{50}Ti + ^{209}Bi → ^{258,256}Rf: 5 events observed

→ σ ~ 5 pb

K-isomer studies



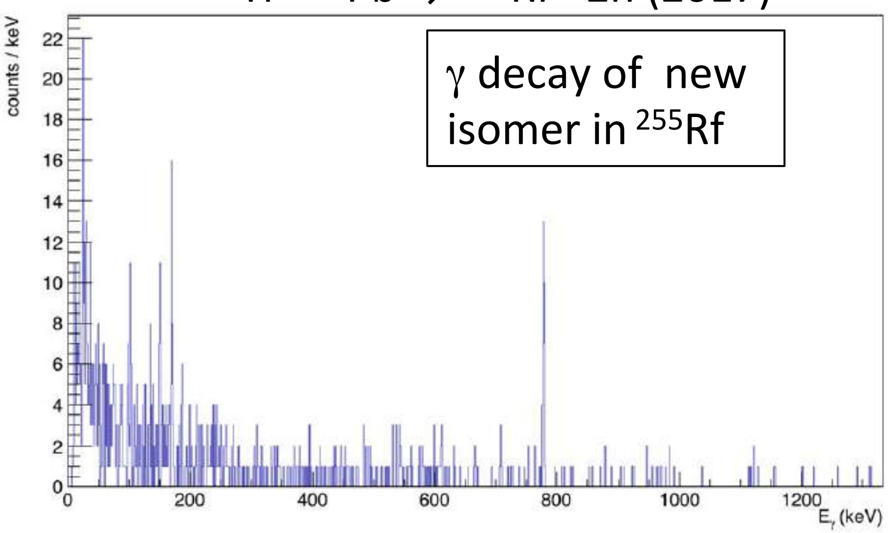


Best examples of K-conserving decays In the nuclear chart

Excellent probes of shell structure

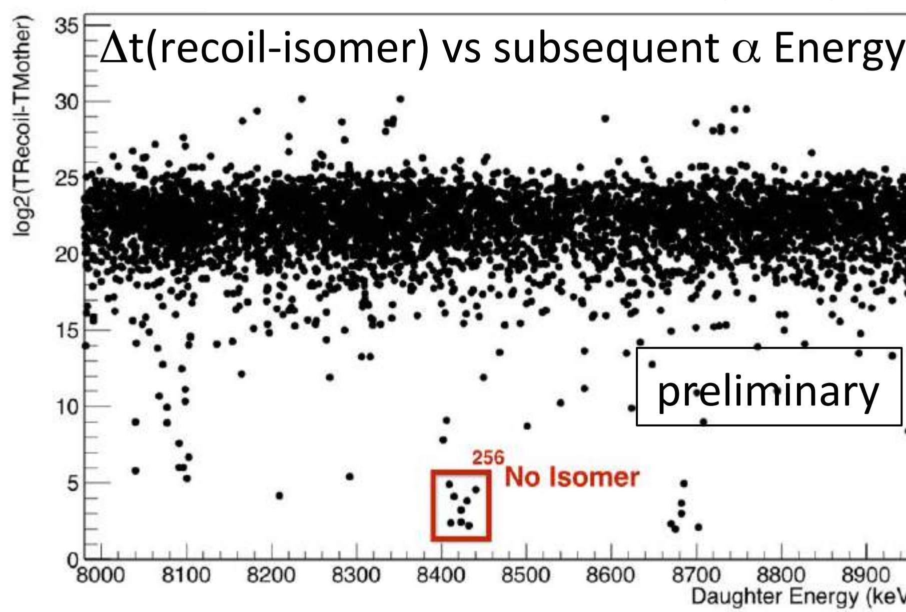
Enhanced stability with respect to fission ?

$^{50}Ti+^{207}Pb \rightarrow ^{255}Rf + 2n$ (2017)



R. Chakma, PhD thesis (Université Paris Saclay)

$^{22}Ne + ^{238}U \rightarrow ^{256}No + 4n$ (2019)



K. Kessaci, PhD thesis (Université de Strasbourg)

Perspectives

- Search for rare decay modes
  - e.g. fission branch from K isomers
- Detailed (high statistics) spectroscopic studies
  - from Fm up to Sg using heavy and light beams

$\sigma \geq 0.1$ nb for decay

$_{78}$Pt, $_{79}$Au, $_{80}$Hg, $_{81}$Tl, $_{82}$Pb, $_{83}$Bi targets

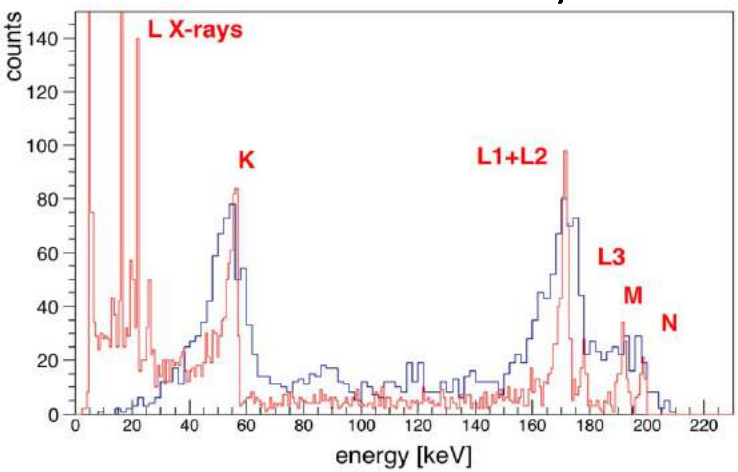
$_{90}$Th, $_{92}$U, $_{94}$Pu, $_{95}$Am, $_{96}$Cm, $_{98}$Cf targets

107				253 Bh	254 Bh	255 Bh	256 Bh	257 Bh	258 Bh	259 Bh	260 Bh	261 Bh	262 Bh	263 Bh	264 Bh	265 Bh	266 Bh	267 Bh	268 Bh
106				252 Sg	253 Sg	254 Sg	255 Sg	256 Sg	257 Sg	258 Sg	259 Sg	260 Sg	261 Sg	262 Sg	263 Sg	264 Sg	265 Sg	266 Sg	267 Sg
105				251 Db	252 Db	253 Db	254 Db	255 Db	256 Db	257 Db	258 Db	259 Db	260 Db	261 Db	262 Db	263 Db	264 Db	265 Db	266 Db
104				250 Rf	251 Rf	252 Rf	253 Rf	254 Rf	255 Rf	256 Rf	257 Rf	258 Rf	259 Rf	260 Rf	261 Rf	262 Rf	263 Rf	264 Rf	265 Rf
103				249 Lr	250 Lr	251 Lr	252 Lr	253 Lr	254 Lr	255 Lr	256 Lr	257 Lr	258 Lr	259 Lr	260 Lr	261 Lr	262 Lr	263 Lr	264 Lr
102				248 No	249 No	250 No	251 No	252 No	253 No	254 No	255 No	256 No	257 No	258 No	259 No	260 No	261 No	262 No	263 No
101	244 Md	245 Md	246 Md	247 Md	248 Md	249 Md	250 Md	251 Md	252 Md	253 Md	254 Md	255 Md	256 Md	257 Md	258 Md	259 Md	260 Md	261 Md	
100	243 Fm	244 Fm	245 Fm	246 Fm	247 Fm	248 Fm	249 Fm	250 Fm	251 Fm	252 Fm	253 Fm	254 Fm	255 Fm	256 Fm	257 Fm	258 Fm	259 Fm	260 Fm	
				146		148		150		152		154		156		158		160	

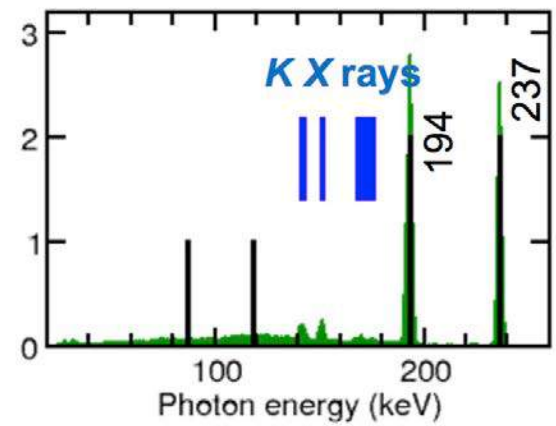
Perspectives

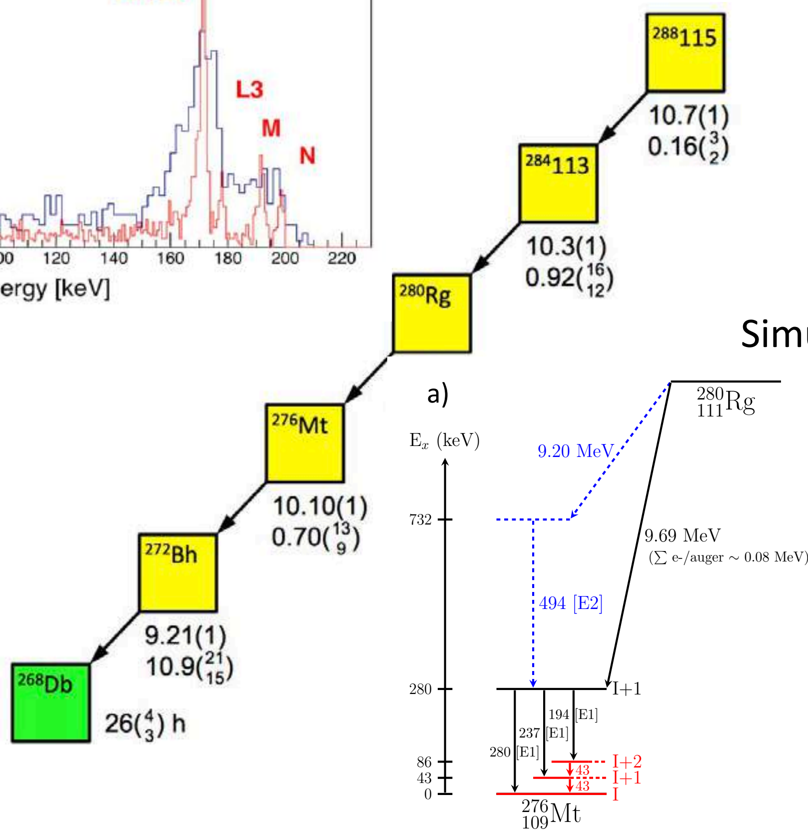
- Upgrade of GABRIELA to digital GABRIELA with enhanced Xray & ICE sensitivity

^{251}Fm isomer decay

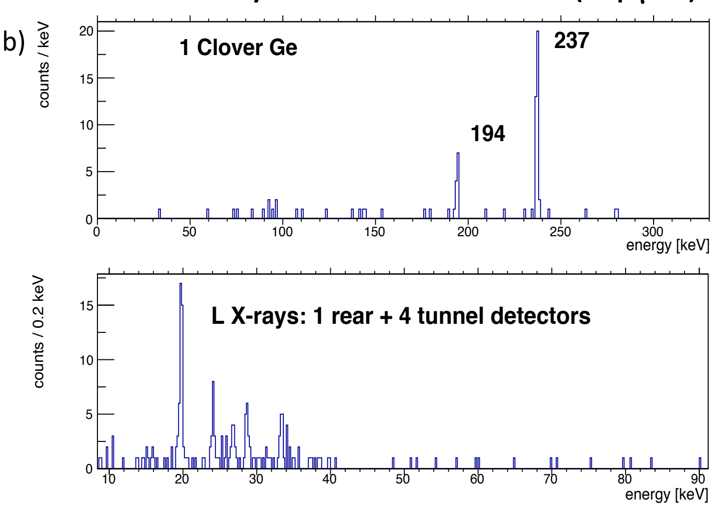


D. Rudolph et al., Phys. Rev. Lett. 111, 112502 (2013)
Confirmed by: J.M. Gates et al, Phys. Rev. C 92, 021301 (2015)





Simulations: 60-day ^{48}Ca + ^{243}Am run (5 pμA)



Conclusions & Outlook

- SHE research is a challenging field requiring long beam times, intense beams and technological innovations (chemistry, detectors, electronics, targets…)
- Longstanding in2p3 research programs in the field
- Experience & expertise, which has been/will be applied to other projects (S3 and SIRIUS @ SPIRAL2)
- Successful collaborations in Dubna, JYFL and RIKEN
- New results & discoveries are foreseen