

Physics with RAON

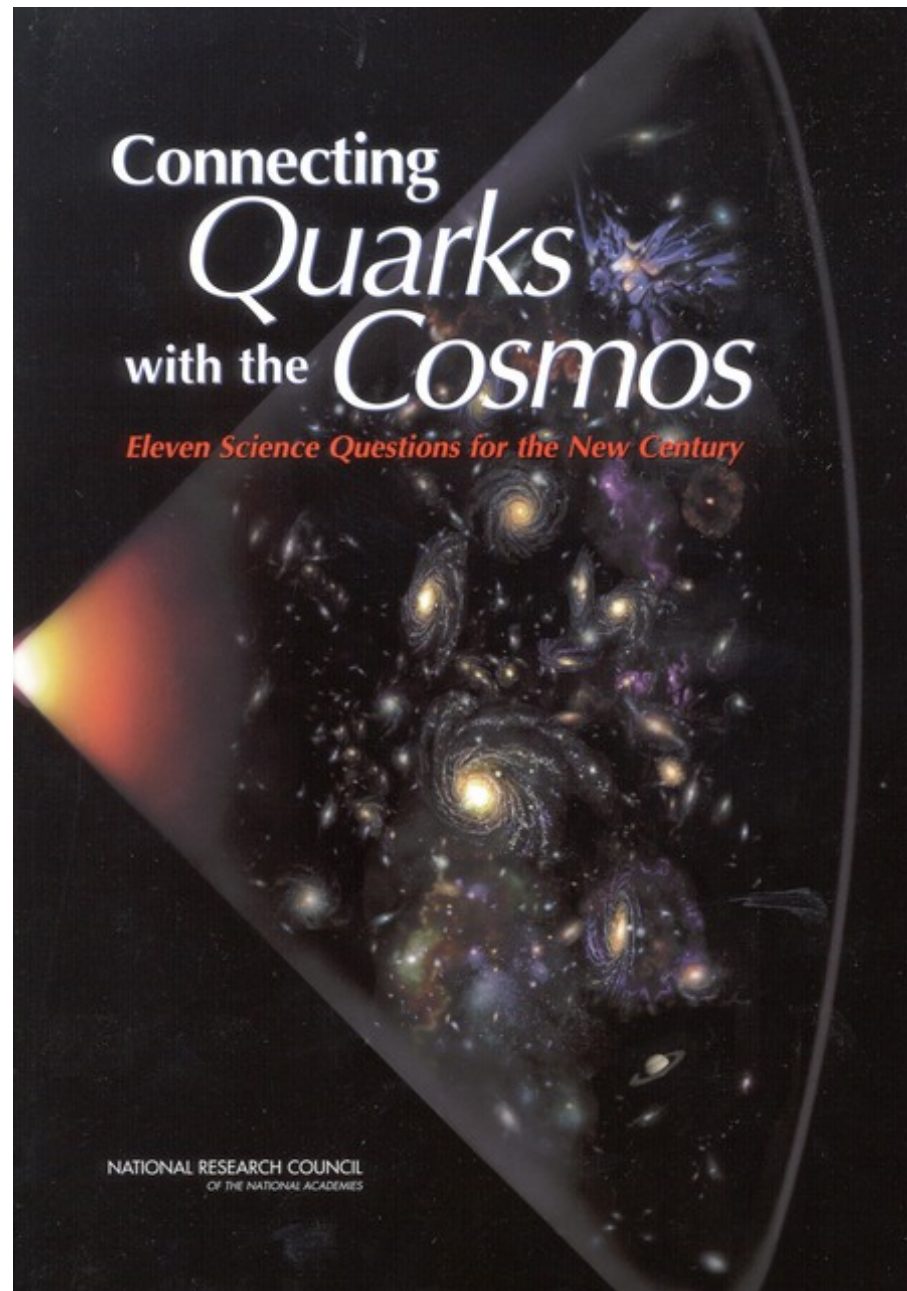
Seonho Choi

March 30, 2023
SNU NAPP Workshop, Kangneung

목차

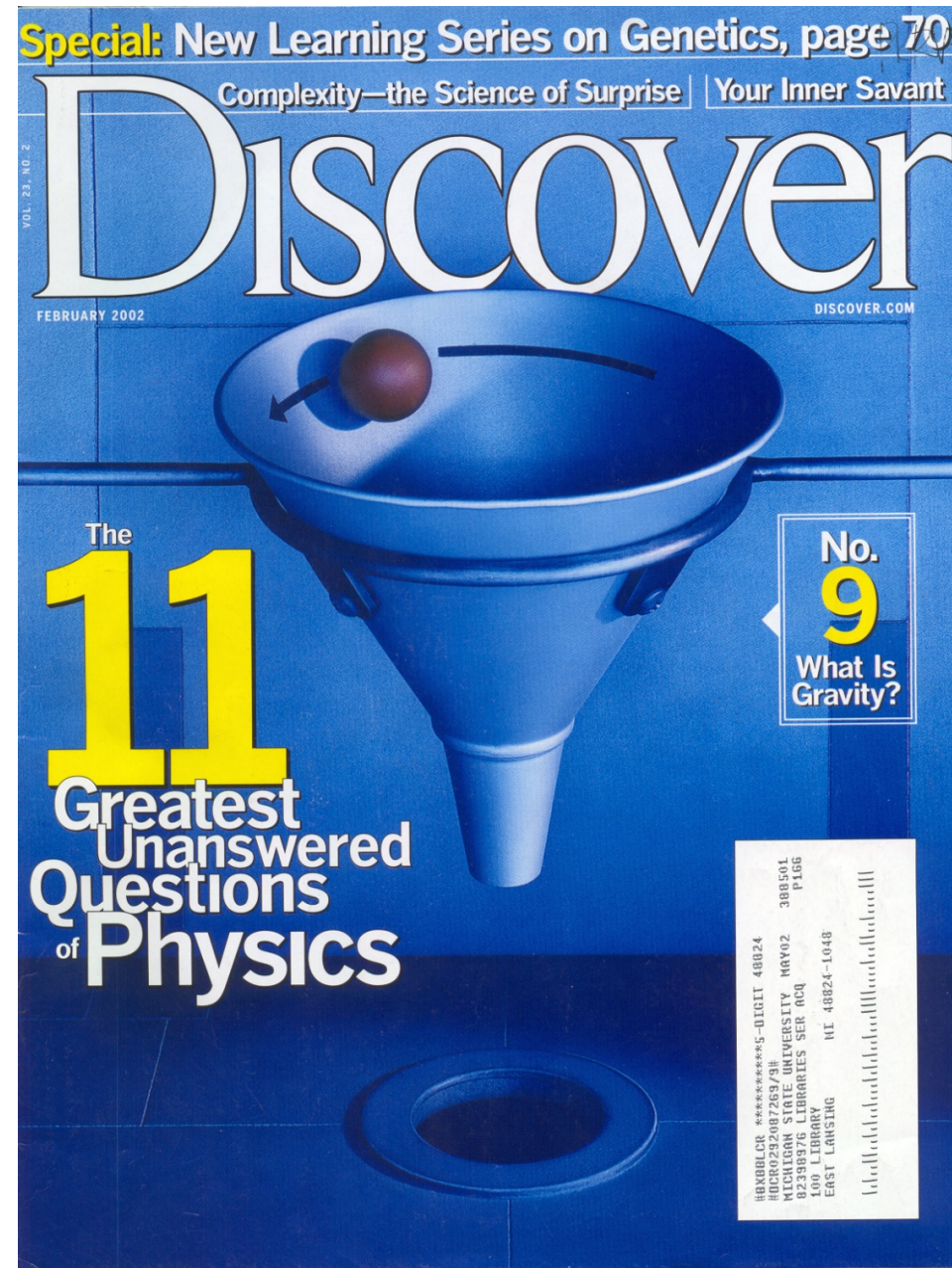
- 중이온가속기를 이용한 희귀동위원소 실험
 - Why RI?
 - 중이온가속기 (RAON)
 - RI 실험과 KoBRA Spectrometer
 - 여러가지 실험 아이디어
- 서울대학교 그룹의 연구 활동
 - 원자핵의 모양 연구
 - β - γ spectroscopy at RIBF
 - Laser Ionization Spectroscopy
 - Multi Nucleon Transfer 핵반응
- Summary & Outlook

11 Science Questions for the New Century



- National Research Council Committee on Physics of the Universe report: **Connecting Quarks with the Cosmos: 11 Science Questions for the New Century**

11 Unanswered Questions - Year 2002



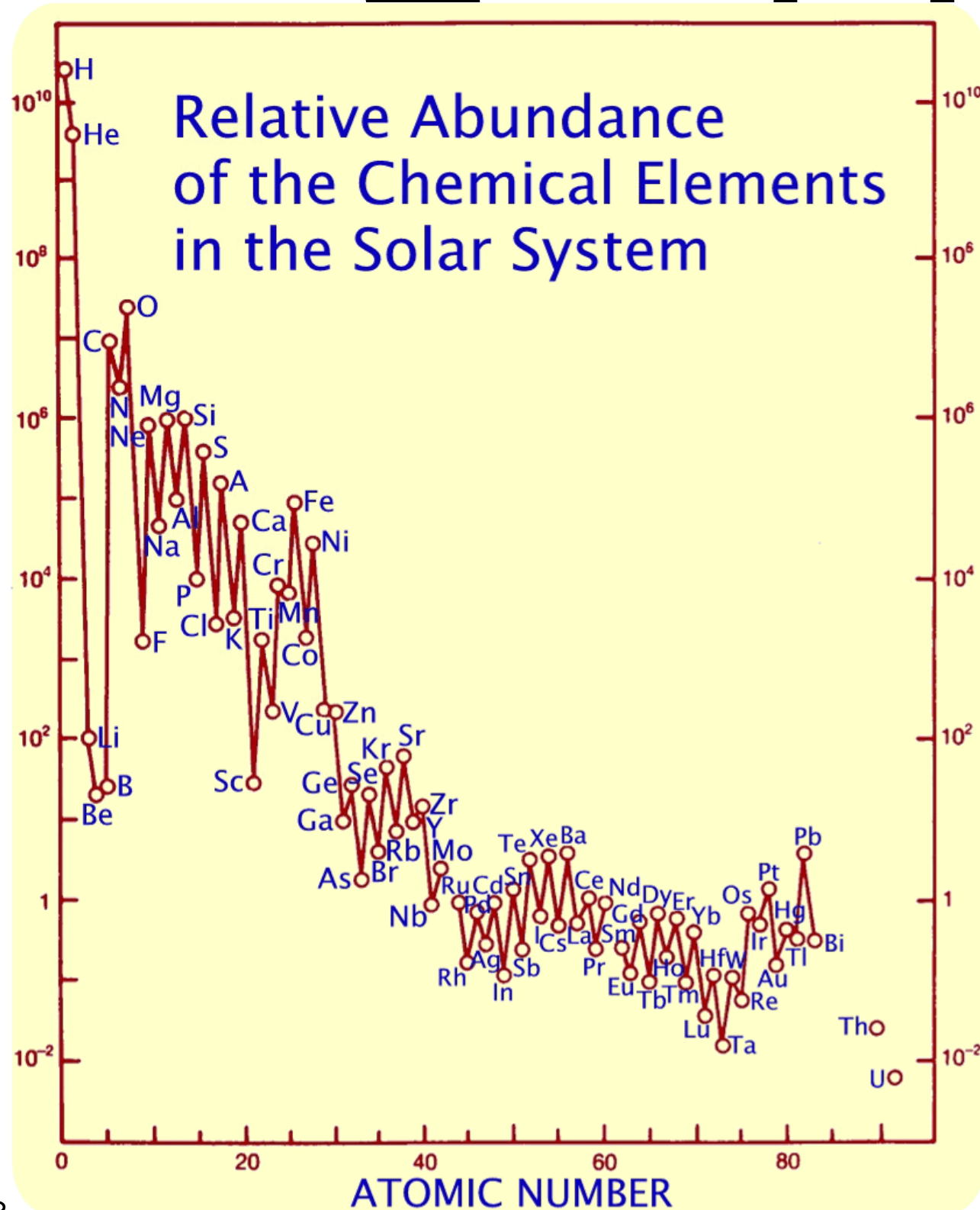
11 Unanswered Questions - February 2002

1. What is dark matter?
2. What is dark energy?
3. How were the heavy elements from iron to uranium made?
4. Do neutrinos have mass?
5. Where do ultrahigh-energy particles come from?
6. Is a new theory of light and matter needed to explain what happens at very high energies and temperatures?
7. Are there new states of matter at ultrahigh temperatures and densities?
8. Are protons unstable?
9. What is gravity?
10. Are there additional dimensions?
11. How did the universe begin?

연구의 목표

- No. 3 Question of Physics
 - 철 - 우라늄 까지의 원소들은 어떻게 만들어졌나?
- 빅뱅 직후 3분경과
 - 우주는 75% 수소, 25% 헬륨
- 현재의 우주
 - 원자번호 92번 우라늄까지 약 300여종의 원소 존재
- 빅뱅과 현재를 잇는 시나리오는?

원소의 구성 비율

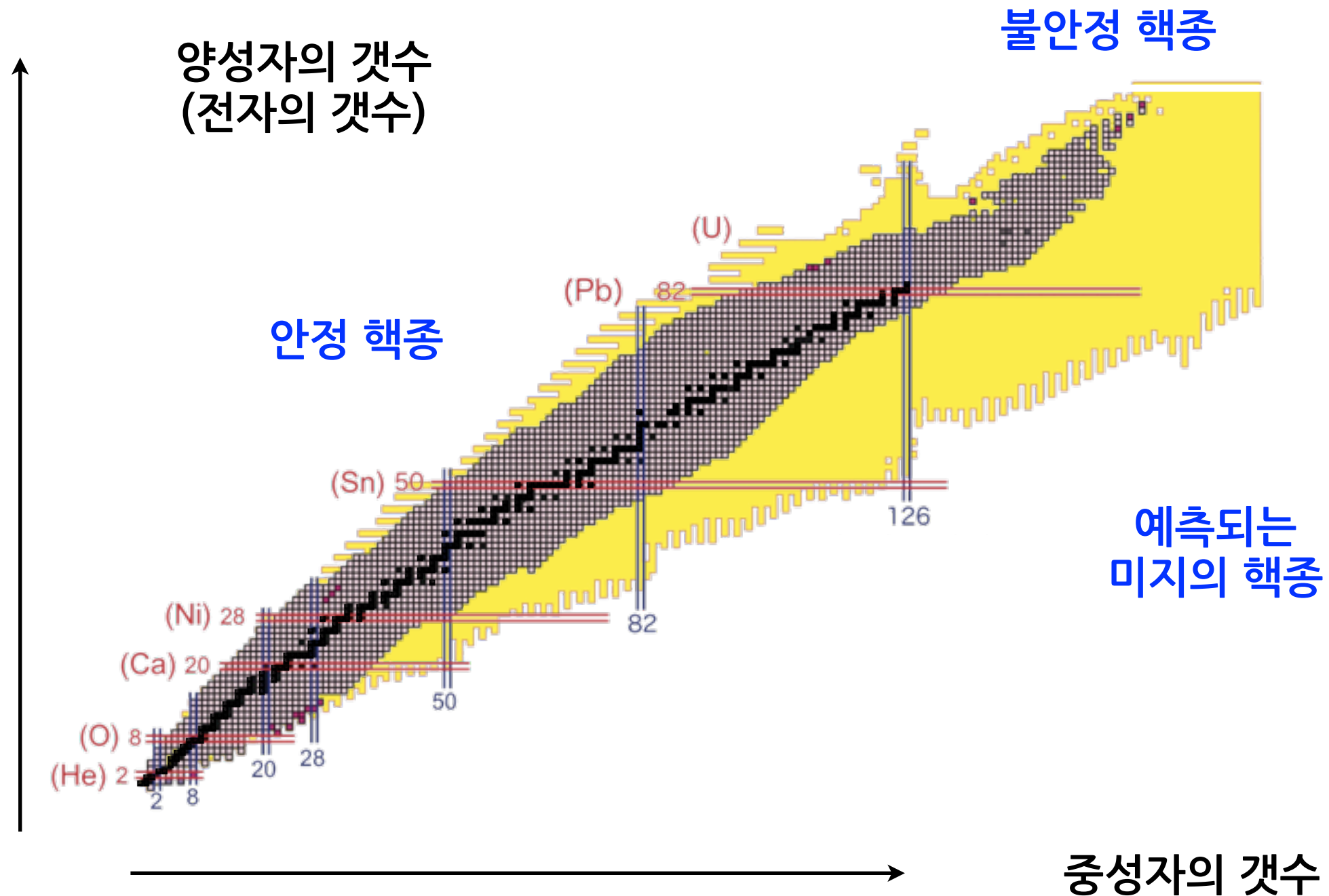


- 수소, 헬륨이 대부분
- 세번째 많은 산소는 수소의 약 1000분의 1
- 금은 철의 천만분의 1

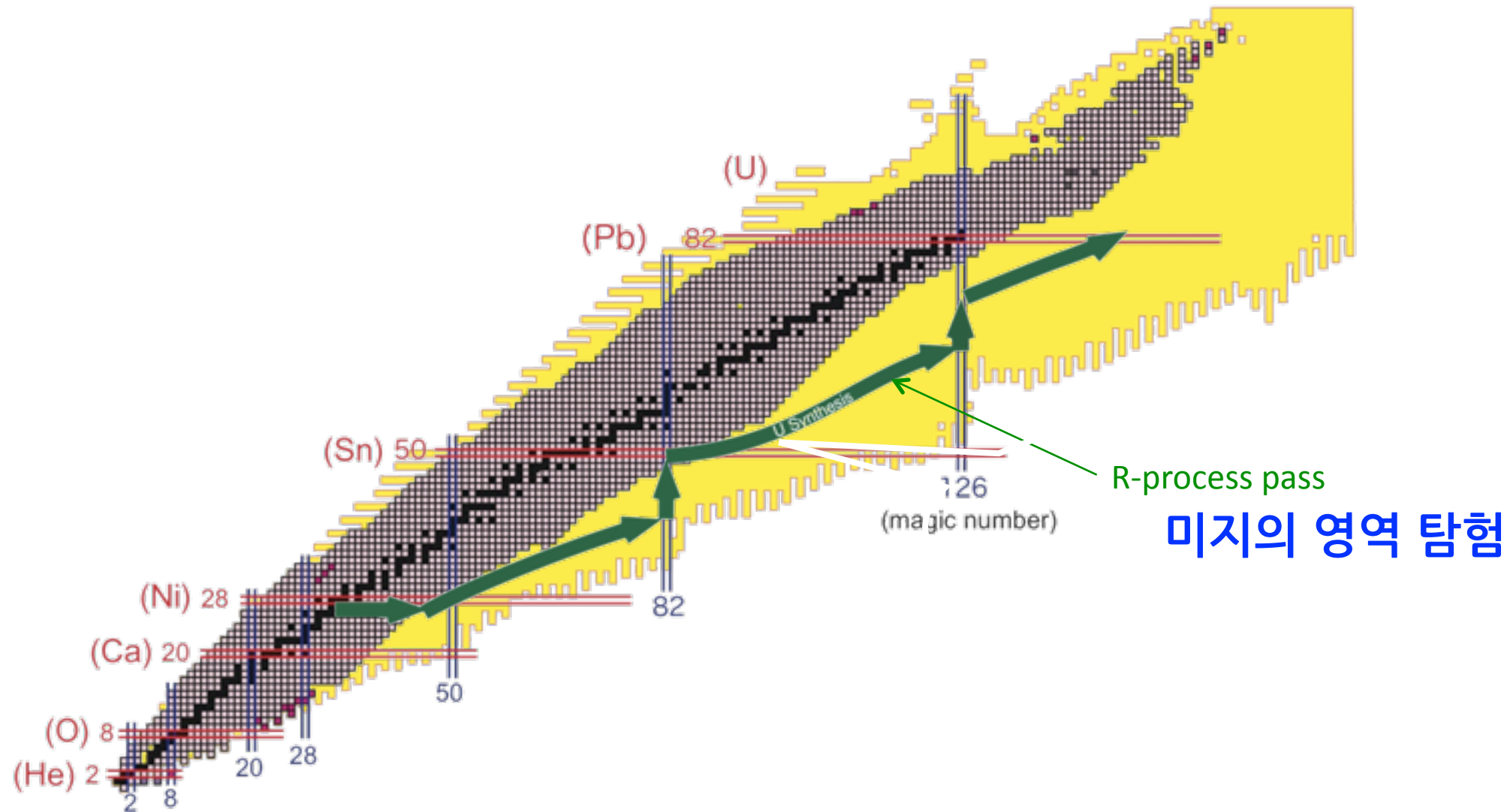
우주의 핵합성

- 별에서의 핵융합
 - 태양: 4개의 수소가 헬륨으로 핵융합 - 에너지 발생
 - 그 외 많은 별들: 헬륨 3개 = 탄소, 4개=산소 등 철까지의 원소 핵융합
- 그외의 핵반응
 - 양성자 융합: 빠른 융합, 느린 융합
 - 중성자 융합: 빠른 융합, 느린 융합
 - 헬륨 융합
 - 고에너지 광자(빛)에 의한 원자핵 파쇄
 - 무거운 원자핵의 분열
- 이들 다양한 핵반응에 의하여 현재의 다양한 원소 합성
- 실험실에서 재현, 연구

Chart of Nuclides

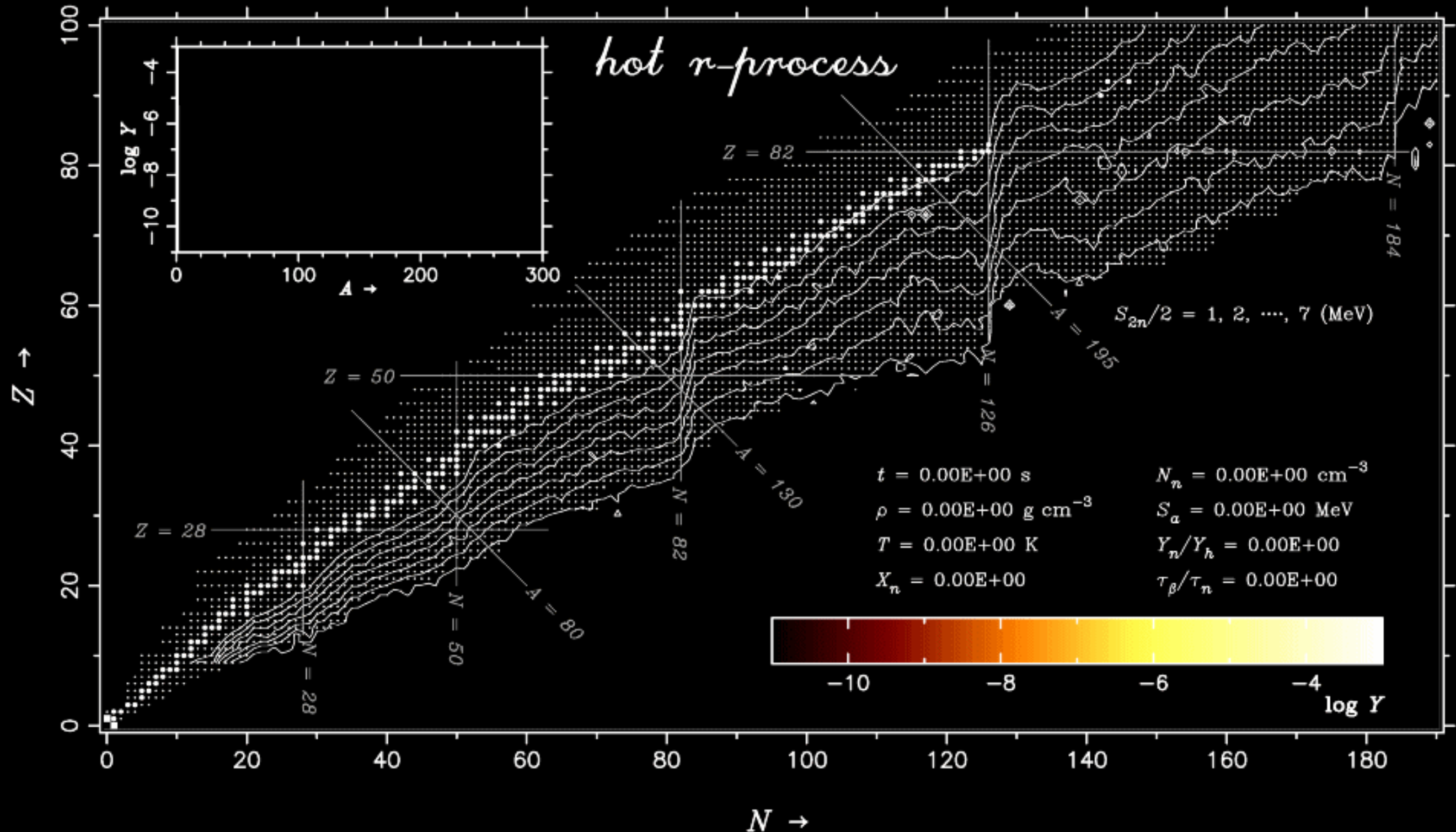


우라늄의 합성과정



중성자 흡수과정과 베타붕괴과정을 겪으며 미지의 영역을 지나서 합성.

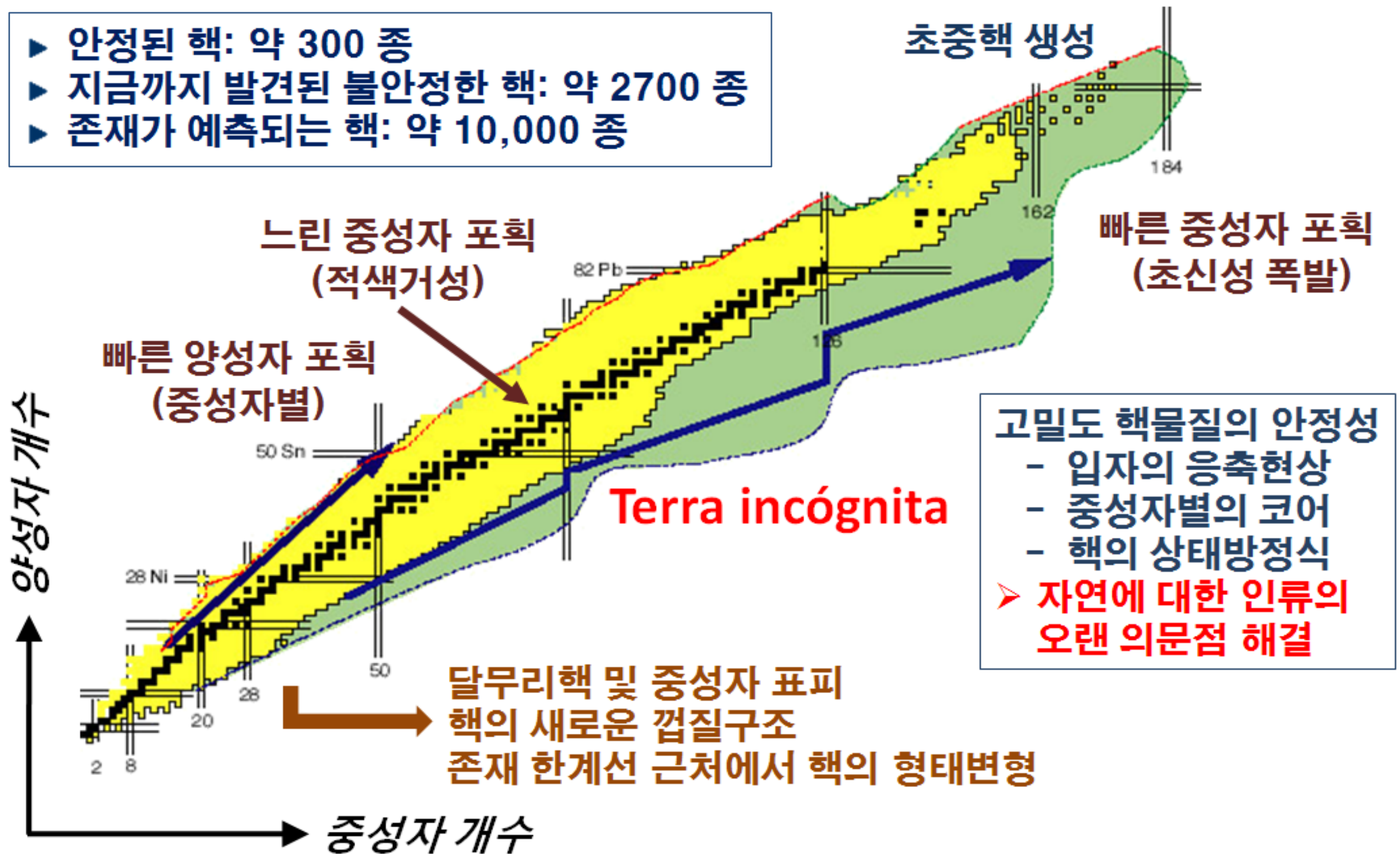
왜 희귀동위원소 빔(Rare Isotope Beam)이 필요한가?



by S. Wanajo

왜, 희귀동위원소인가?

- ▶ 안정된 핵: 약 300 종
- ▶ 지금까지 발견된 불안정한 핵: 약 2700 종
- ▶ 존재가 예측되는 핵: 약 10,000 종



중이온가속기 (RAON)

RAON

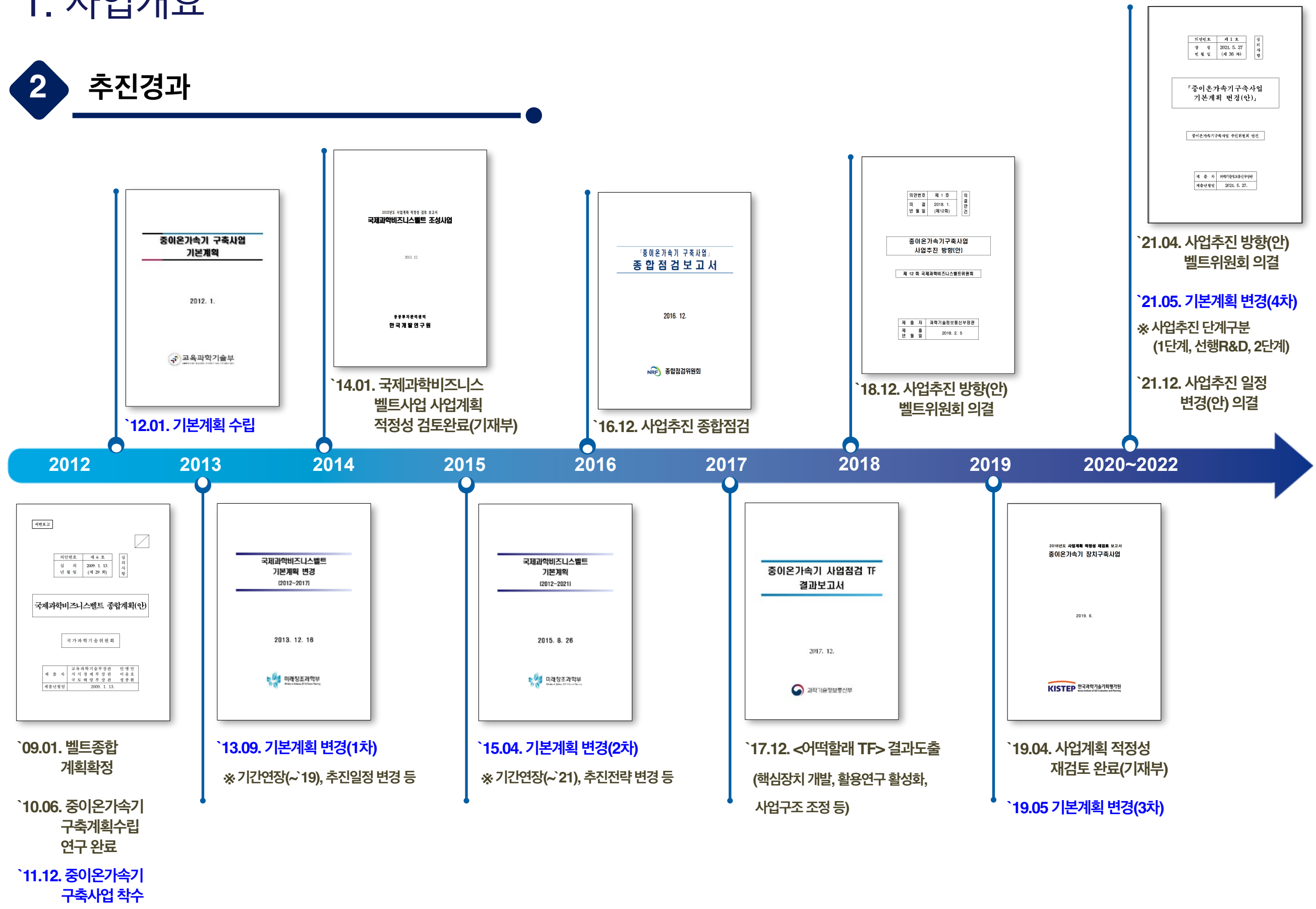


RAON



1. 사업개요

2 추진경과



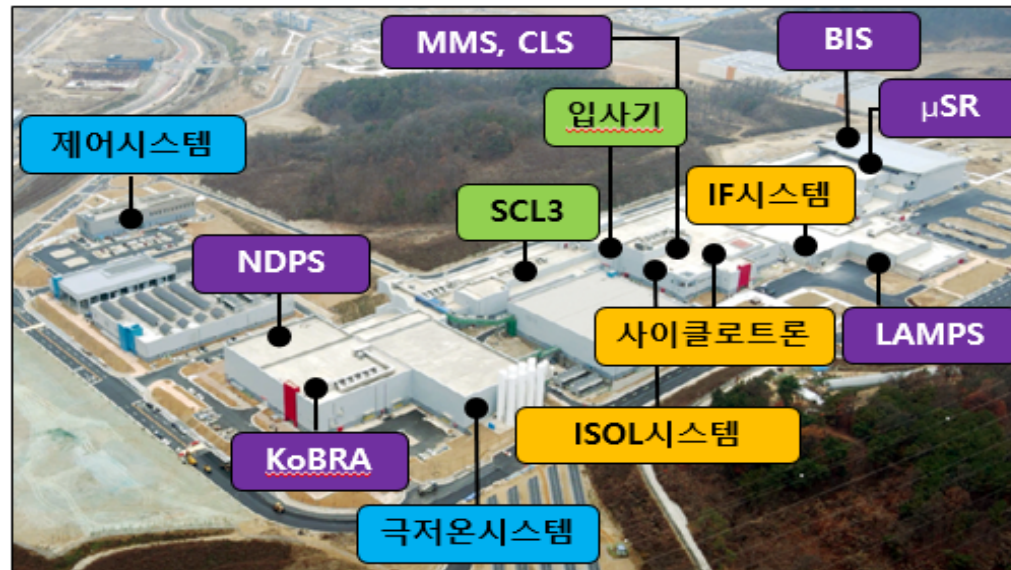
1. 사업개요

1 사업개요

사업
내용

단계별 사업추진 범위

1단계



2단계

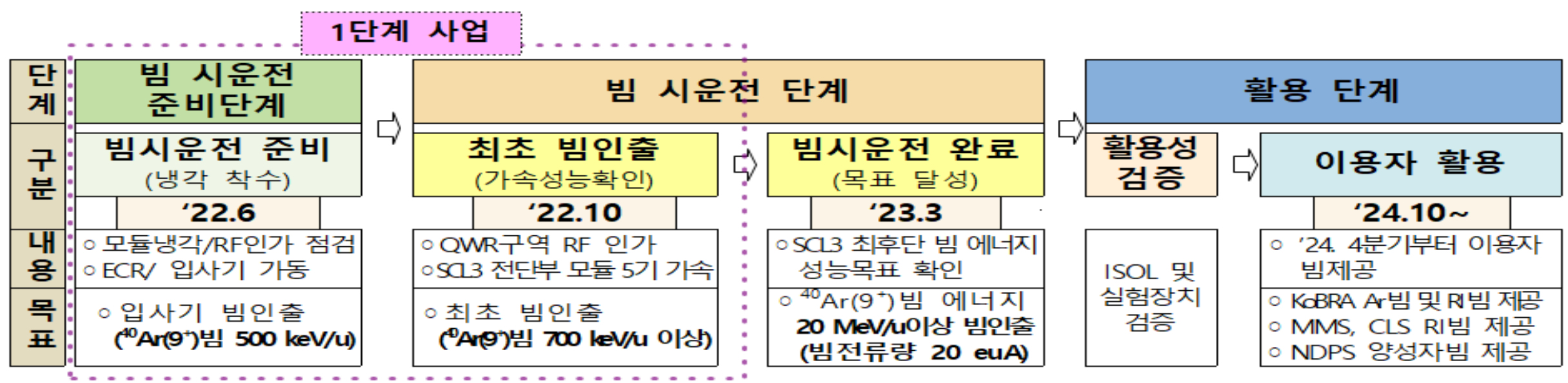


1단계 (저에너지+ 고에너지 일부장 치)	가속장치	·저에너지 가속장치(입사기, SCL3) 구축	‘22.12 예정
	기반장치	·가속장치 구동 기반장치(극저온시스템, 제어시스템) 구축	‘22.12 예정
	RI 생성장치	·희귀동위원소(RI) 생성장치(ISOL, IF, 사이클로트론) 구축	‘22.12 예정
	실험장치	·초저에너지, 저에너지, 고에너지 실험장치(7개) 구축	‘22.12 예정
	시설건설	·건물(10개동) 및 유틸리티(전기, 수도, 가스 등) 구축	‘21.06 완료
2단계	가속장치	·고에너지 가속장치(SCL2) 구축	선행R&D 후 추진

3. 향후계획

1 빔시운전 추진계획

개 요	·SCL3 초전도가속모듈 설치완료* 이후 극저온시스템 구동을 통한 냉각 및 RF 전력을 인가하여 SCL3 빔시운전 추진 * 터널내 모듈안착, 정렬, 빔라인 연결, 극저온시스템-모듈간 연결 및 KGS 검사
빔시운전 준비	·극저온시스템을 통한 모듈냉각, RF 전력 인가/점검 및 입사기* 출력 500 keV/u 빔을 SCL3로 제공 준비('22.6~9월) * 14.5 GHz ECR이온원, LEBT, RFQ, MEBT
최초 빔 인출	·모듈 냉각완료 및 QWR RF 인가를 통하여 SCL3 전단부 모듈 5기 가속 → 중이온빔 가속($^{40}\text{Ar}(9^+)$ 700keV/u 이상) 성능 검증('22.10월)
빔시운전 완료	·SCL3 전구간 빔 가속시험을 통해 최후단에서 구축목표 ($^{40}\text{Ar}(9^+)$ 빔 에너지 20 MeV/u이상 빔인출 (빔전류량 20 euA) 성능목표 확인('23.3월)



3. 향후계획

2 최초 빔 인출 및 빔시운전 일정

최초 빔 인출 추진 일정

최초 빔 인출 주요일정

중양제어 연동점검 (진행중)	냉각전 점검(진행중)	모듈열차폐체냉 각(9월초)	4.5K냉각 - QWR (9월말) - HWR (10월초)	RF인가 - QWR (10월말~) - HWR (11월중~)
-----------------------	----------------	-------------------	---------------------------------------	--

빔시운전 추진 일정(장치별)

구 분	1단계 '22				1단계이후 '23 '24							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
SCL3			SCL3 빔시운전 (700 keV/u ~ 20 MeV/u)			Ar 빔 제공			RI 빔 시운전 (SCL3→KoBRA)	양성자빔 제공		
KoBRA						Ar 빔 시운전			RI 빔 시운전			
ISOL	사이클로트론 장치시운전 ISOL 장치 시운전		RI 빔 시운전 (사이클로트론→ISOL)						RI 빔 시운전 (ISOL→SCL3)			
MMS			성능 최적화			RI 빔 시운전 (ISOL→MMS)			RI빔 시운전/ 성능개선 및 최적화			
CLS		설치	장치 시운전			RI 빔 시운전 (ISOL→CLS)			RI빔 시운전/ 성능개선 및 최적화			
NDPS		설치/장치 시운전				성능 최적화			성능 최적화			빔시운전

활용성 검증

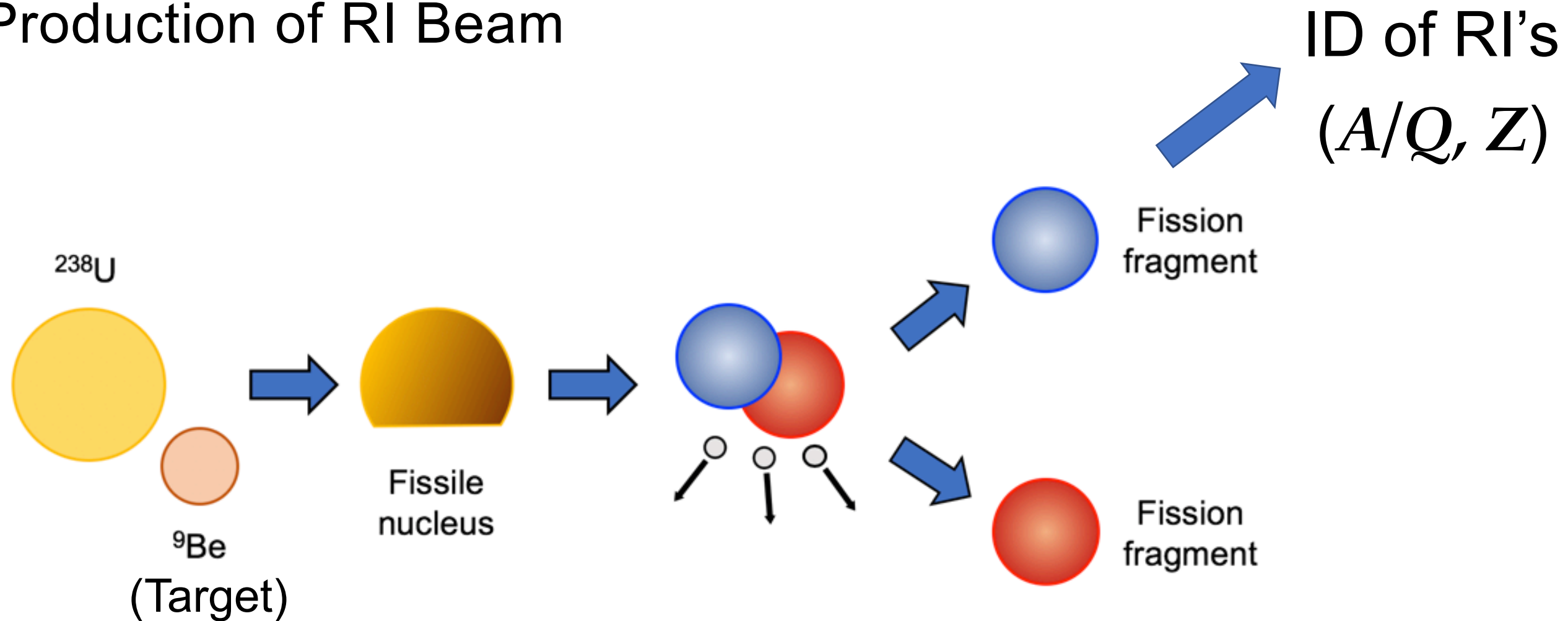
유지보수

유지보수

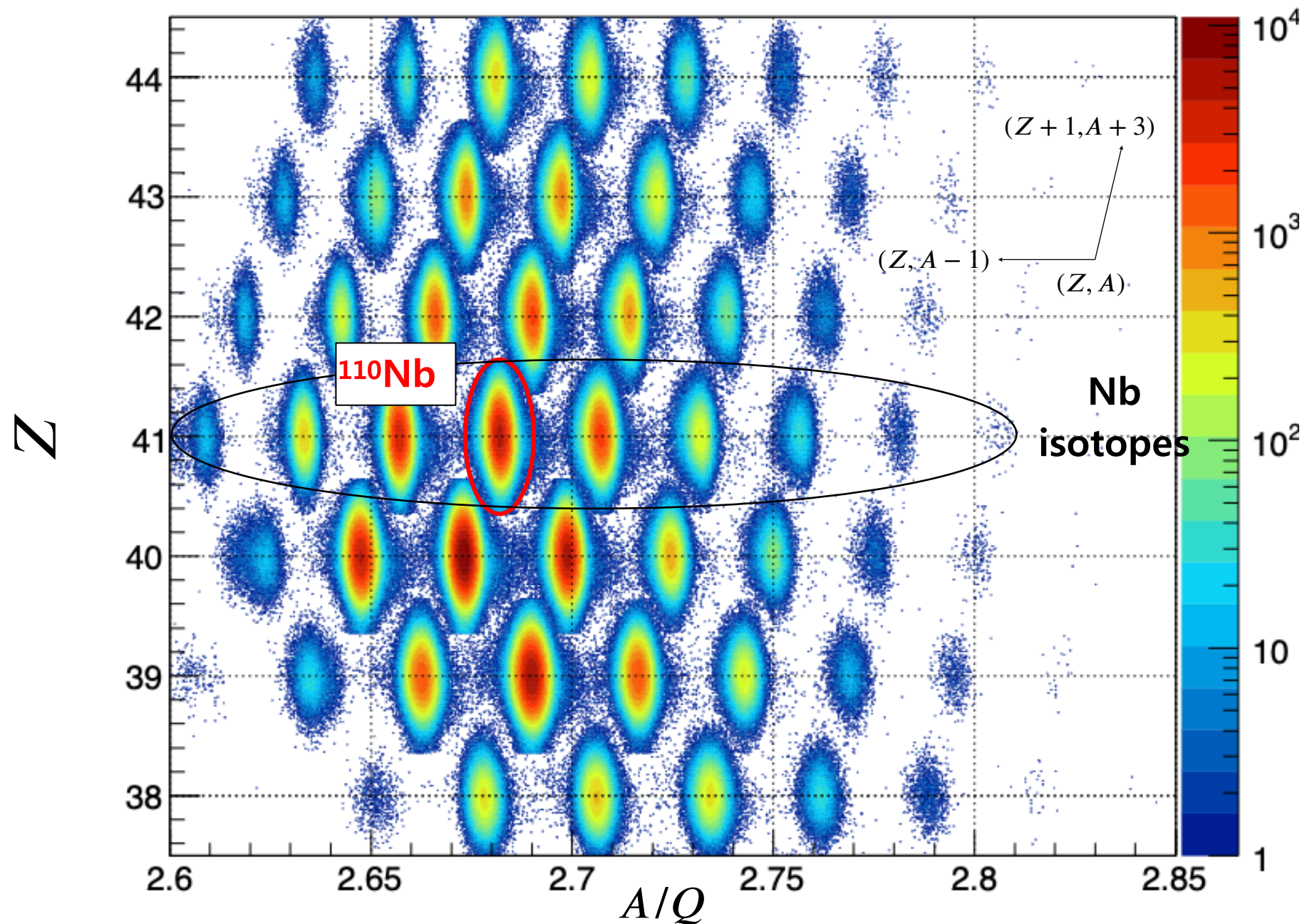
이용자
빔제공
/실험

Experiment

Production of RI Beam



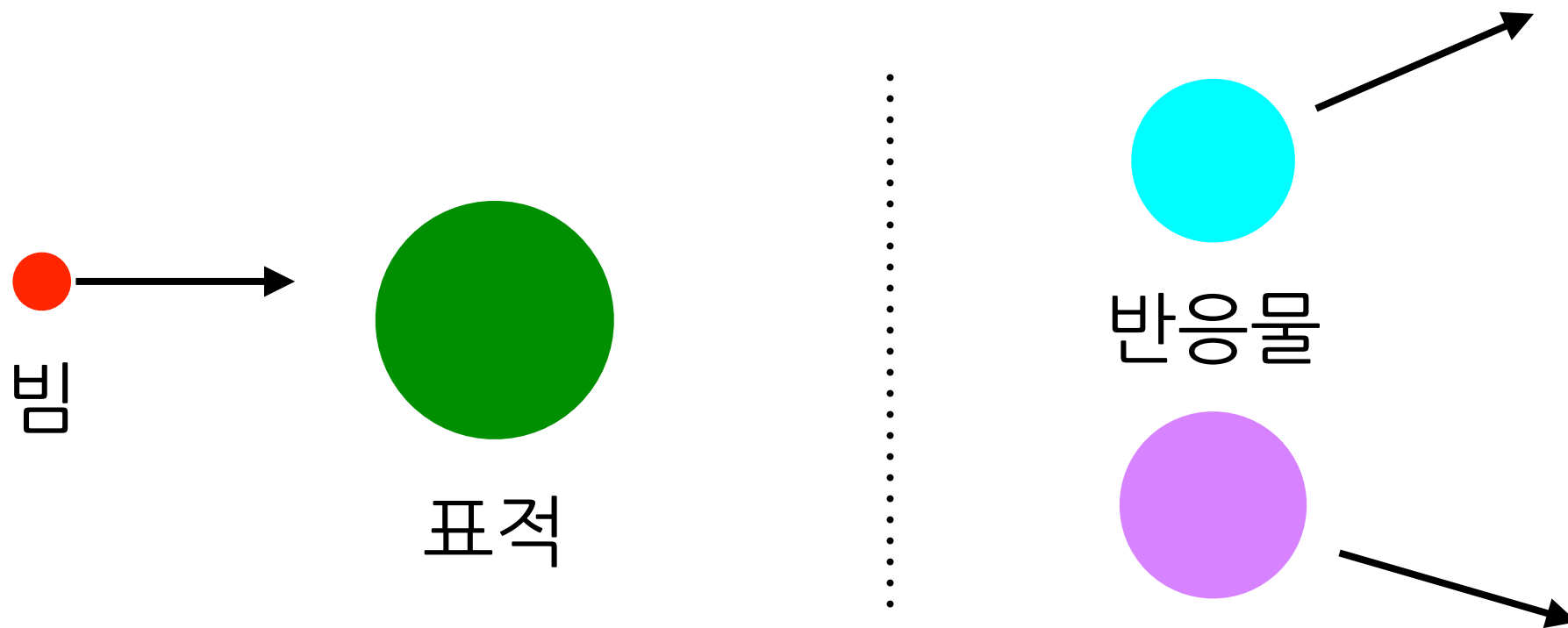
Identification of RI's



Experiment with RL Basics

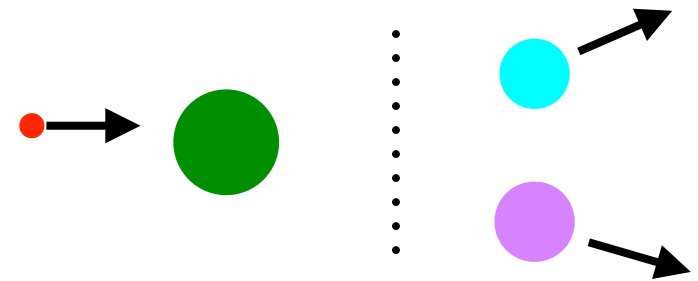
희귀동위원소 실험

- 통상의 핵물리학 실험

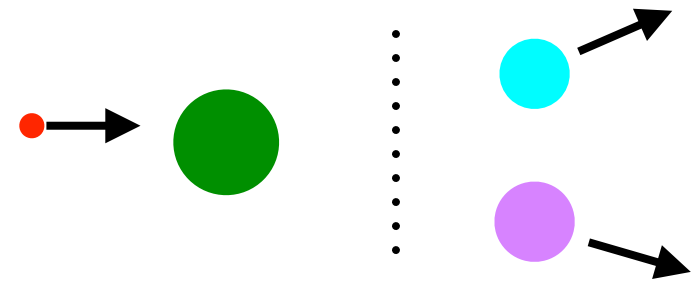


희귀동위원소 실험

- 빔 (가속 상태)
 - 주로 가벼운 입자들
 - 전자, 양성자
- 표적 (정지 상태)
 - 주로 무거운 원자핵들
 - 산소, 철, 납, 우라늄 등
 - 대부분 안정 원자핵



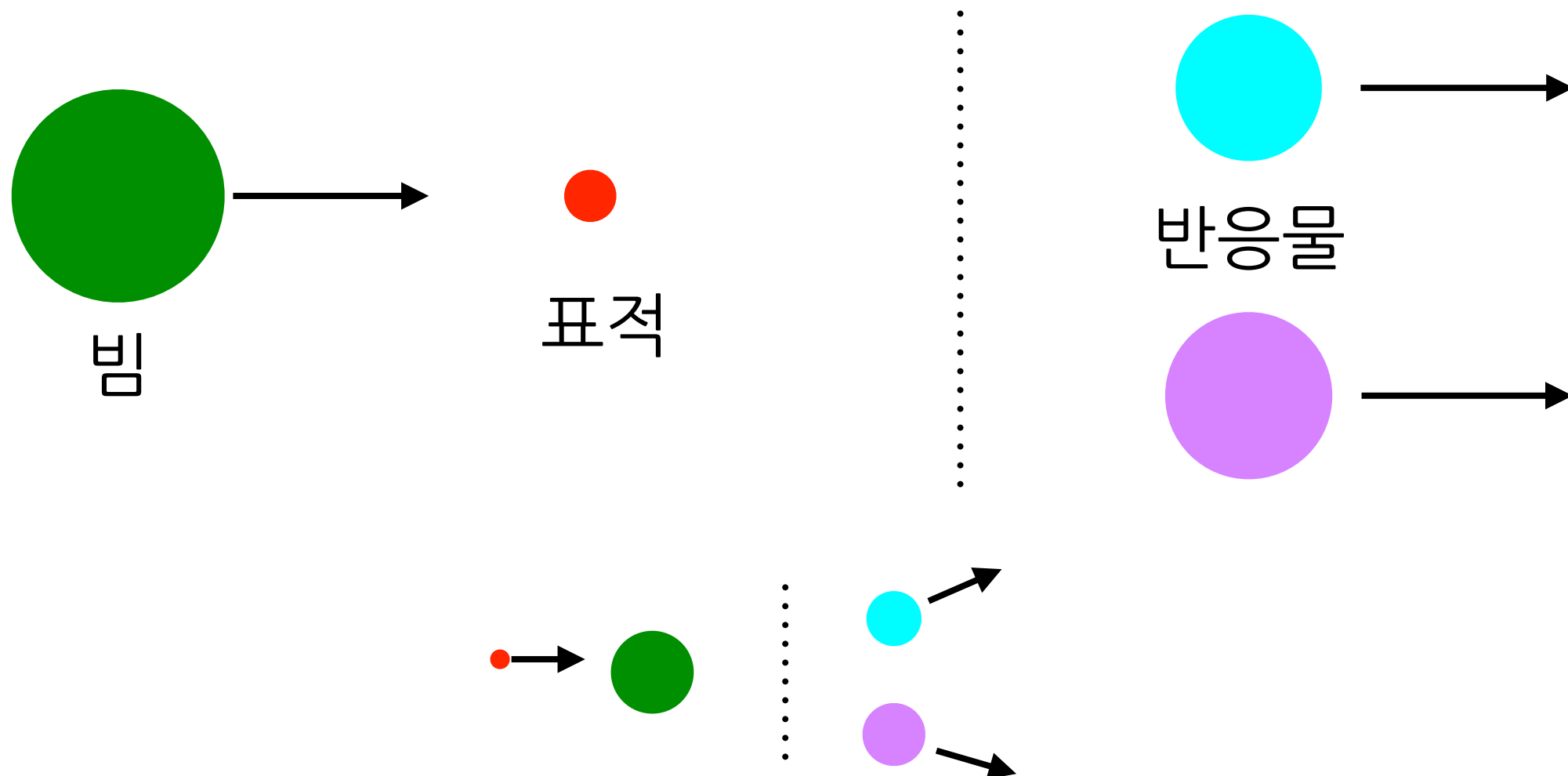
희귀동위원소 실험



- 반응물
 - 다양한 원자핵
 - 다양한 (산란) 각도
 - 0 도에서 180도까지 가능

희귀동위원소 실험

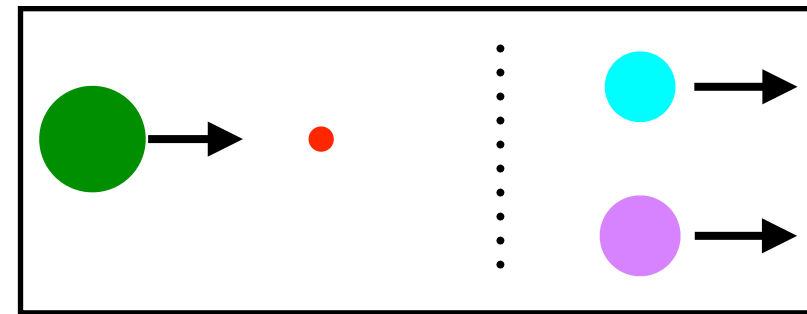
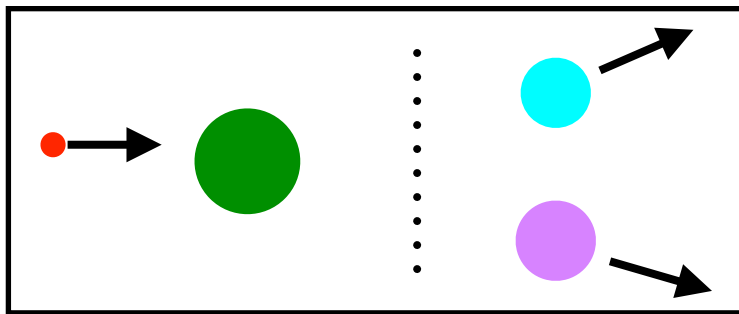
- 불안정 원자핵을 사용하는 실험



회귀동위원소 실험

- 빔 (가속 상태)
 - 회귀 동위 원소 (불안정 원자핵)
 - 대부분 무거운 원자핵
- 표적 (정지 상태)
 - 가벼운 표적: 양성자 등
 - 무거운 표적: 안정 원자핵 등

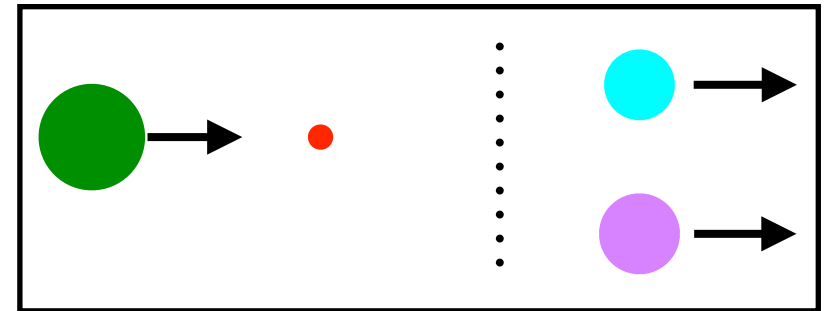
희귀동위원소 실험



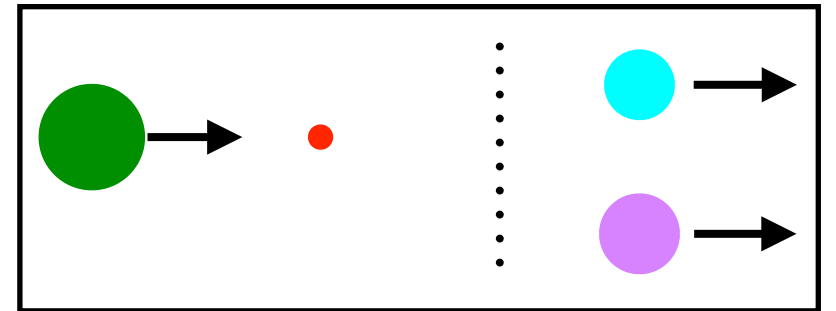
- 반응물
 - 대부분이 빔과 같은 방향으로 진행
 - 가벼운 반응물: 어느 정도의 각도 가능
 - 무거운 반응물: 빔과 구분하기 어려움

희귀동위원소 실험

- 무거운 반응물과 빔의 분리
- 근소한 속도차 (운동량의 차이)
- 근소한 각도차이
- 되튐 분리 스펙트로메타 (Recoil Separator) 필요
 - 자기장 속에서 반응물과 빔을 분리

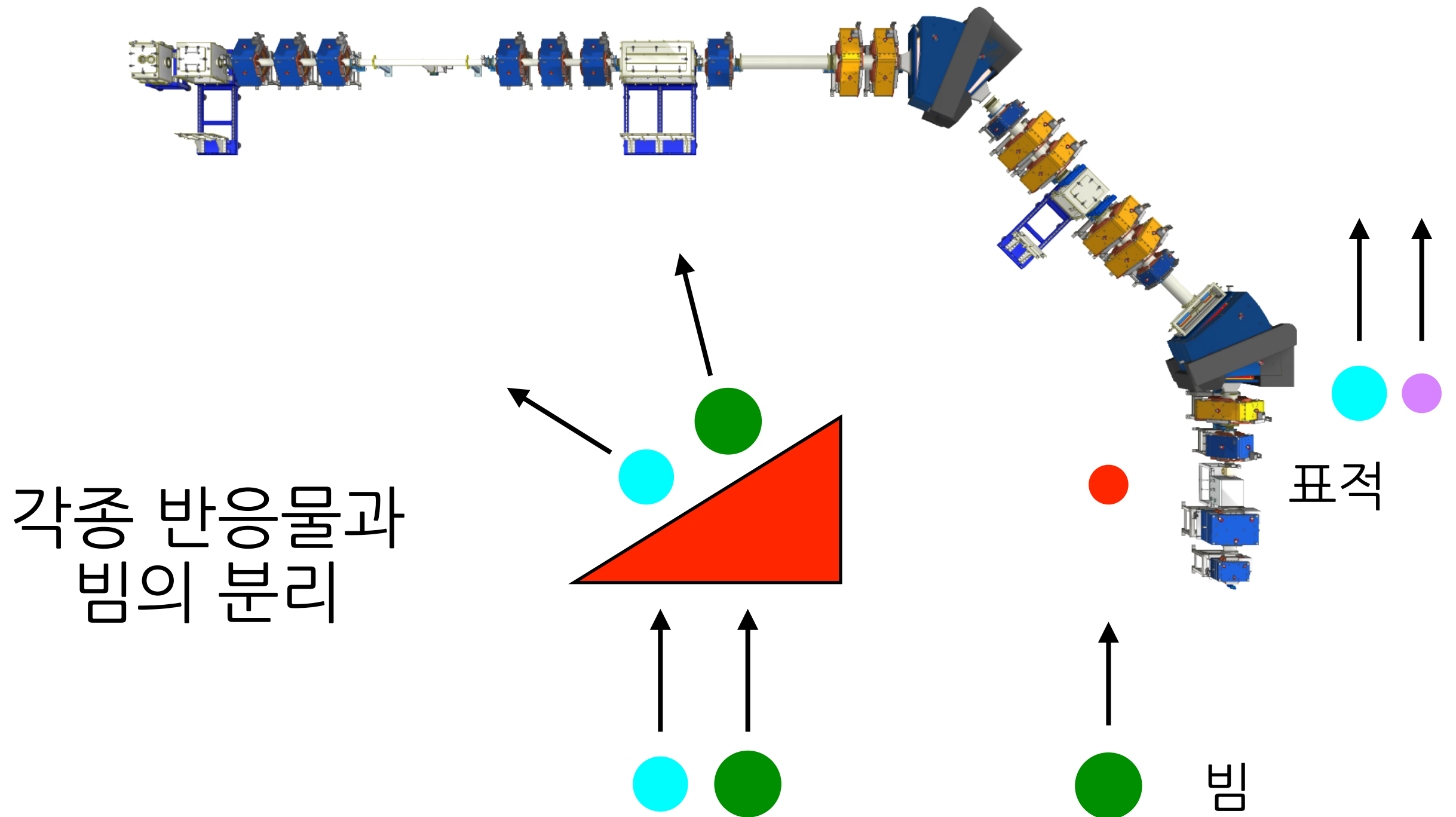


희귀동위원소 실험

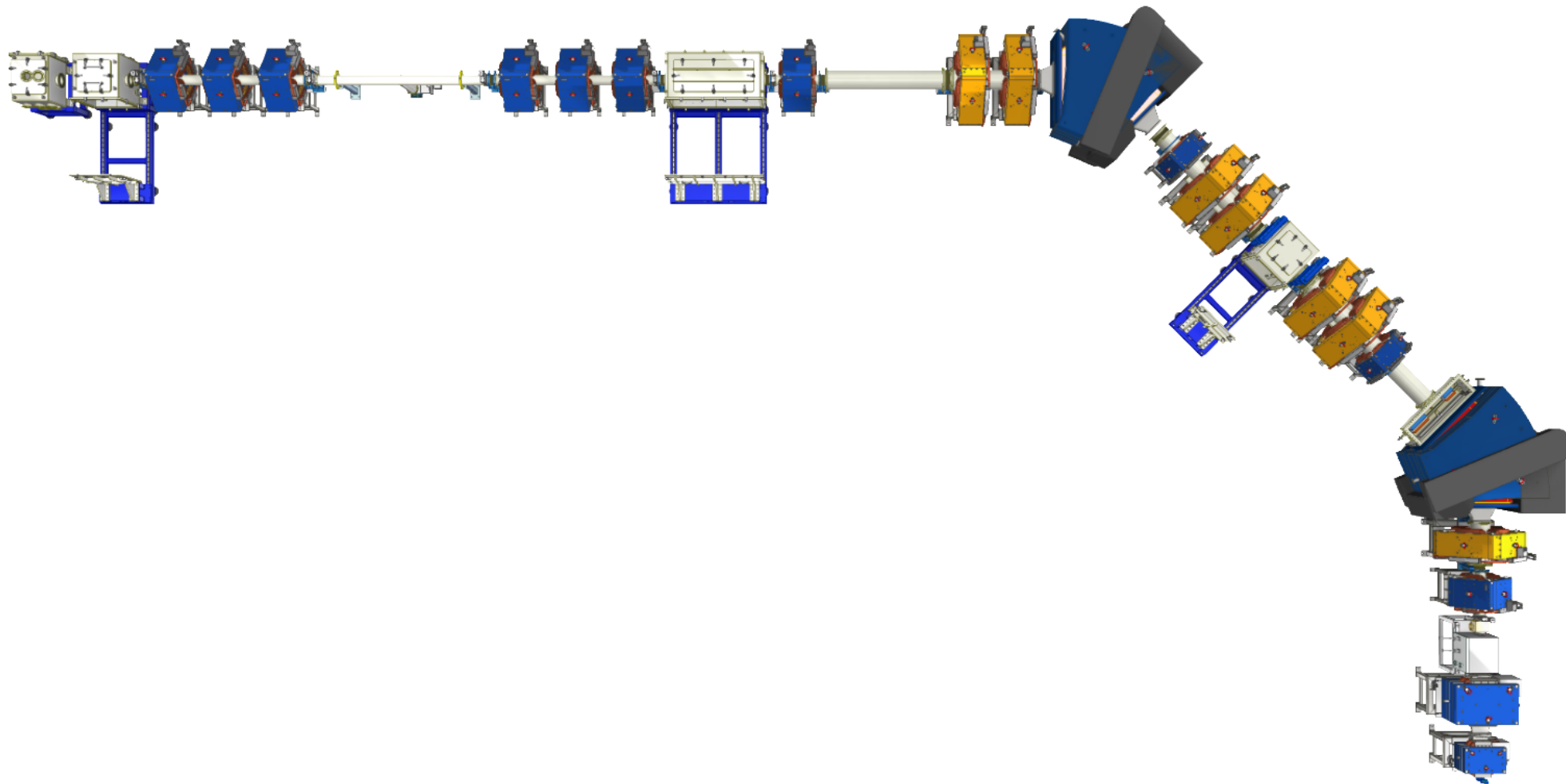


- 가벼운 반응물
 - 빔과 작은 각도로 퍼지는 현상
 - 빔 주위에 검출기를 설치하여 측정
 - 각도가 커질 수록 개수 급감
 - 빔 가까이 검출기 필요

Spectrometer의 역할



KoBRA Spectrometer @ RAON



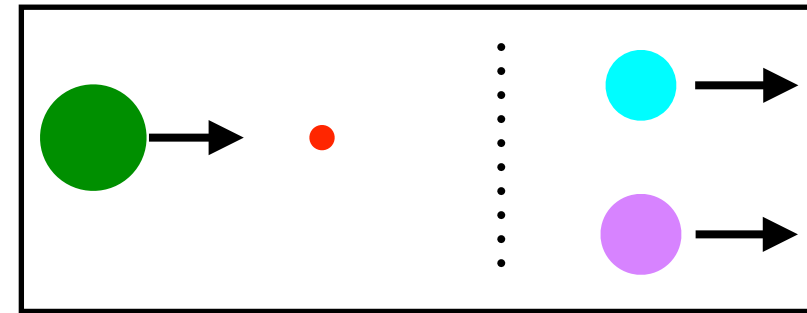
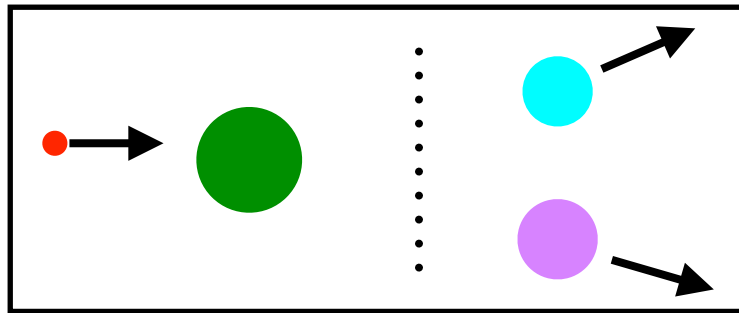
KoBRA Spectrometer



KoBRA 활용실험

- 무거운 희귀동위원소 + 가벼운 표적
- 주로 우주의 별 내부에서 일어나는 핵반응들
- 천체핵물리학 실험
- 우주에서 다양한 원소의 생성 과정 연구

KoBRA 활용실험



- 무거운 안정 동위원소 + 가벼운 표적
- 통상의 핵물리학실험으로 연구 가능
- 대부분의 핵반응은 이미 연구/발표
- 무거운 **불안정** 동위원소 + 가벼운 표적
- 새로운 발견의 가능성

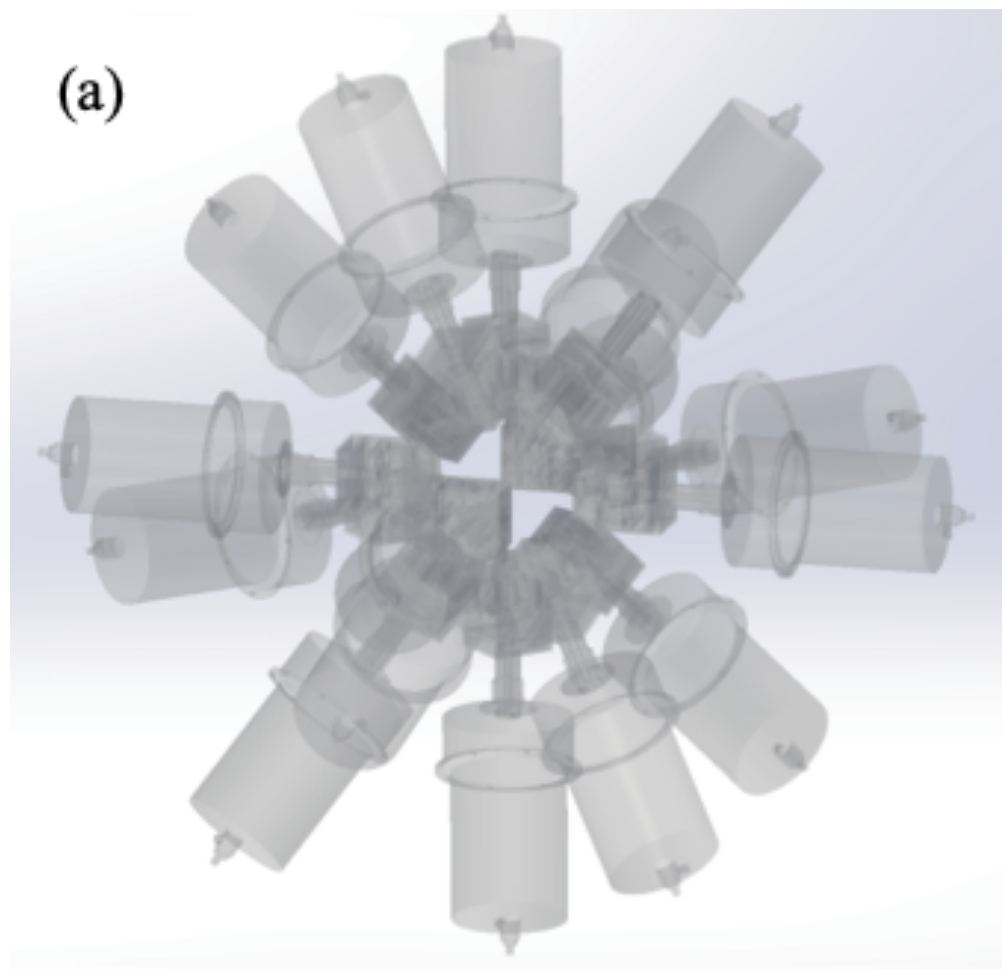
KoBRA 활용 실험

- 무거운 빔: 희귀 동위원소
- 가벼운 표적: 양성자, 중수소, 헬륨 등
- 빔과 표적의 충돌
 - 탄성 충돌
 - 비탄성 충돌
 - 핵융합
 - 핵자 1~2개의 이전(Transfer)
 - 등등

KoBRA Lol

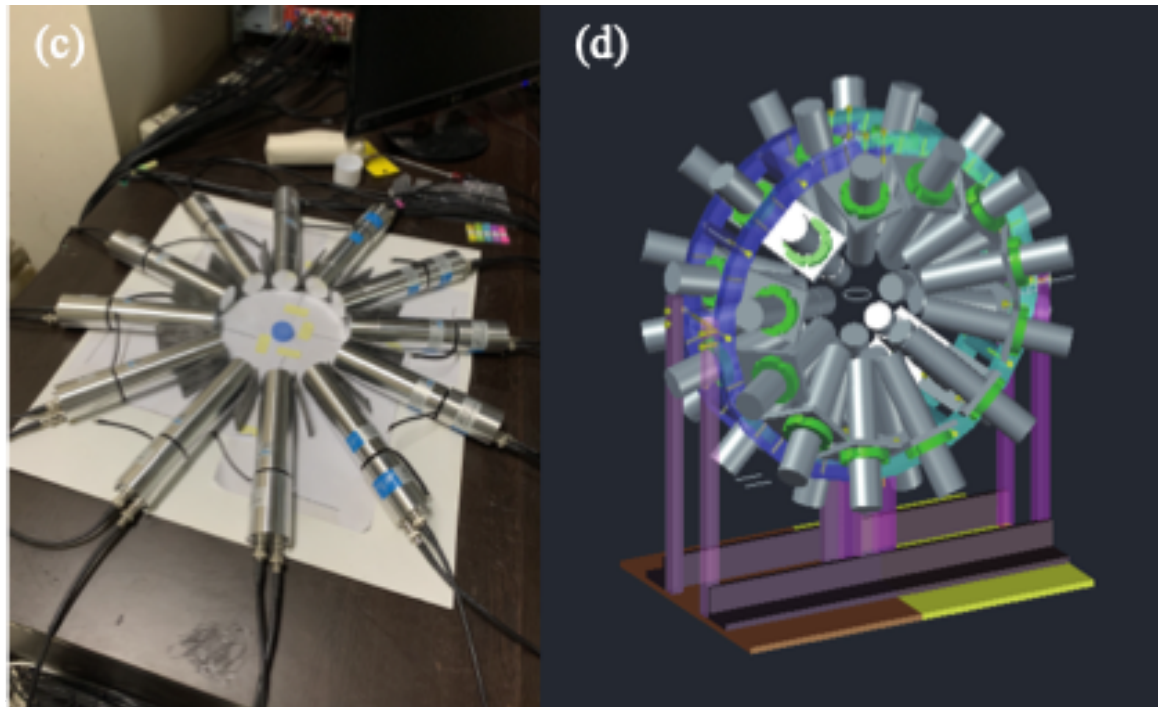
- Decay spectroscopy and Total Absorption Spectroscopy
- Decay spectroscopy and fast-timing measurements by using KHALA at RAON
- High-resolution in-beam γ -ray experiments at RAON
- Internal conversion electron spectroscopy
- Spectroscopy of proton, neutron and alpha emitters
- Study on neutron-deficient nuclei using proton-induced fusion evaporation
- 3n fusion-evaporation reactions to study mirror energy differences in $T_z = -3/2$ nuclei
- RI experiments probing isospin symmetry
- The study of lifetime of isotopes near doubly magic $N=Z$ nuclei ^{40}Ca
- Fusion reaction studies related to stellar evolution
- Systematic measurement of production cross sections using KoBRA spectrometer

High-resolution in-beam γ -ray experiments at RAON



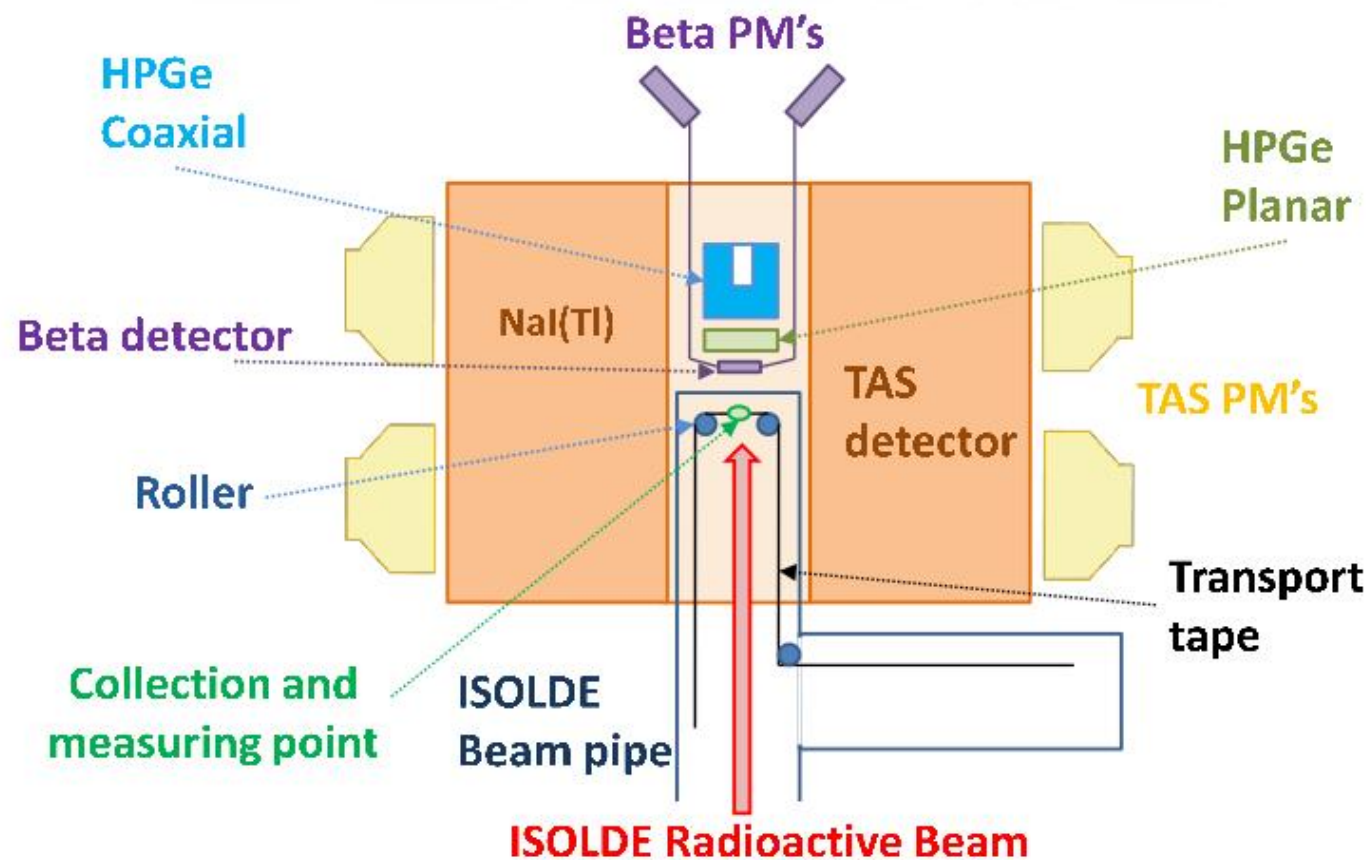
- 감마선 정밀측정 실험
- 핵자들 간의 상호작용, 핵의 구조 연구
- CENS의 고해상도 감마선 검출기 활용

Decay spectroscopy and fast-timing measurements by using KHALA at RAON



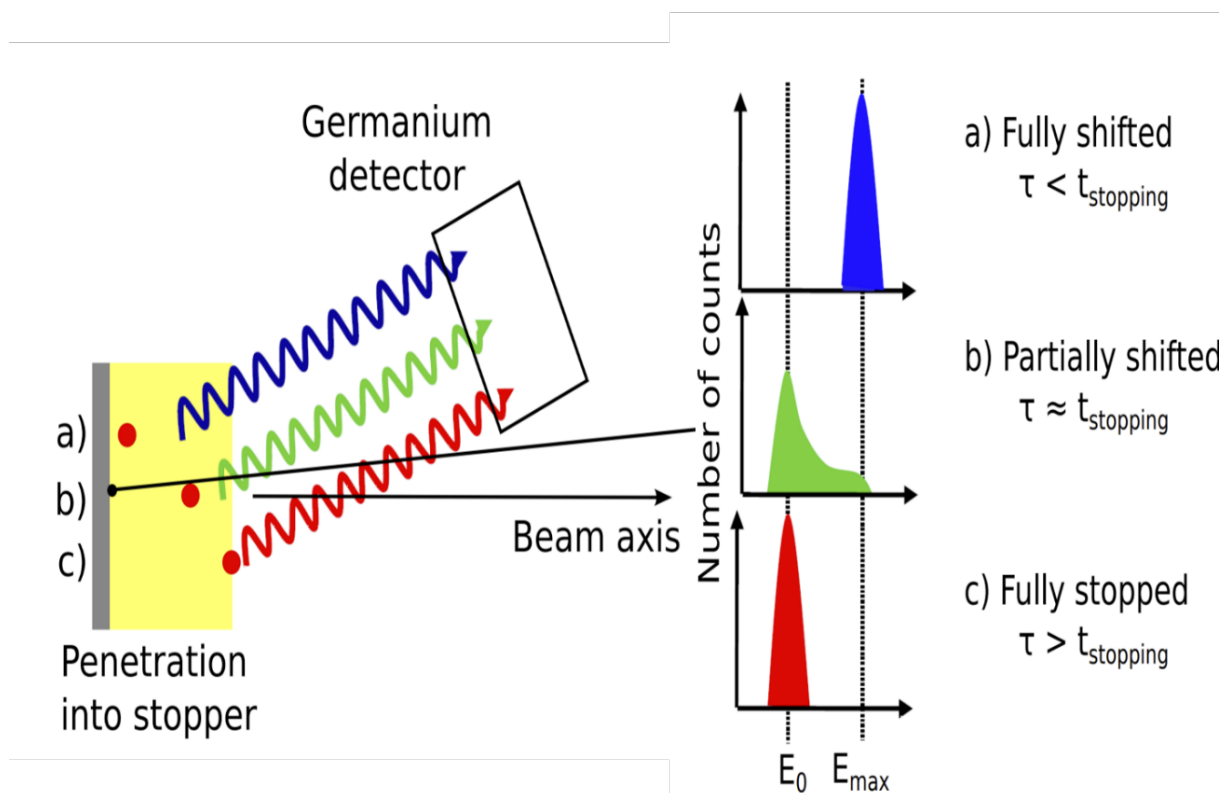
- 핵의 들뜬 상태의 수명 측정
- 내부 구조, 모양 등 연구

Decay Spectroscopy and Total Absorption Spectroscopy



- 핵의 모양에 대한 정보
- 핵분열 부산물들의 발생열량 측정
- 입자물리(중성미자)와의 연계

The study of lifetime of isotopes near doubly magic N=Z nuclei ^{40}Ca



- 양성자-중성자의 아이소스핀 대칭성 연구
- 불안정 원자핵의 수명을 측정하는 새로운 방법 연구/개발

새로운 실험 아이디어

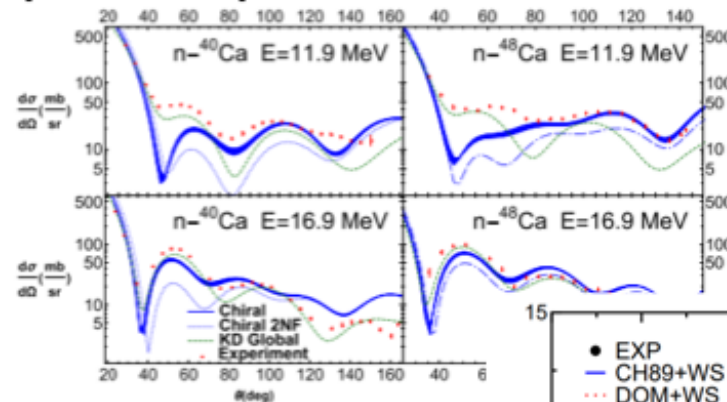
Optical Model Potentials for Exotic Nuclei

- Can we trust the Global Optical Model Potentials?

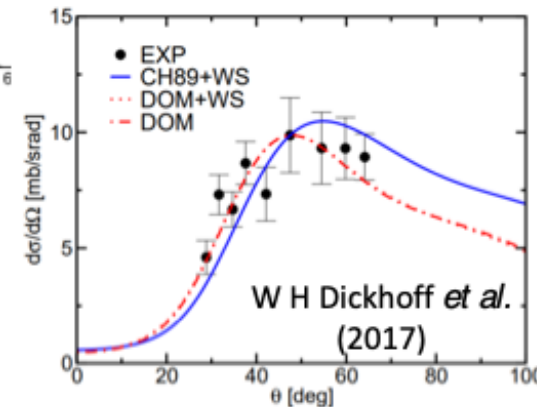
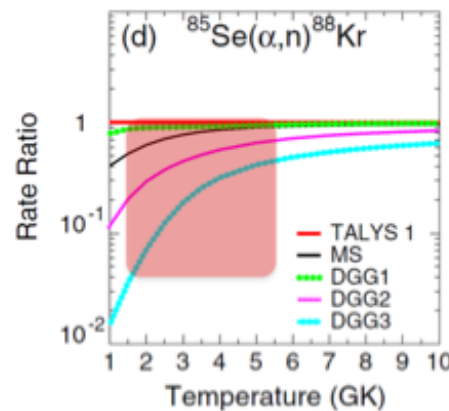
- Phenomenological GOMP
- Microscopic GOMP

- ✓ Broad range of lab energy using AToM-X or STAPK
- ✓ Using $^{16,18}\text{O}$, $^{20,22}\text{Ne}$ beams, (p,p), (d,d), (α , α) elastic scatterings will be measured.

Optical model potential from chiral effective field theory

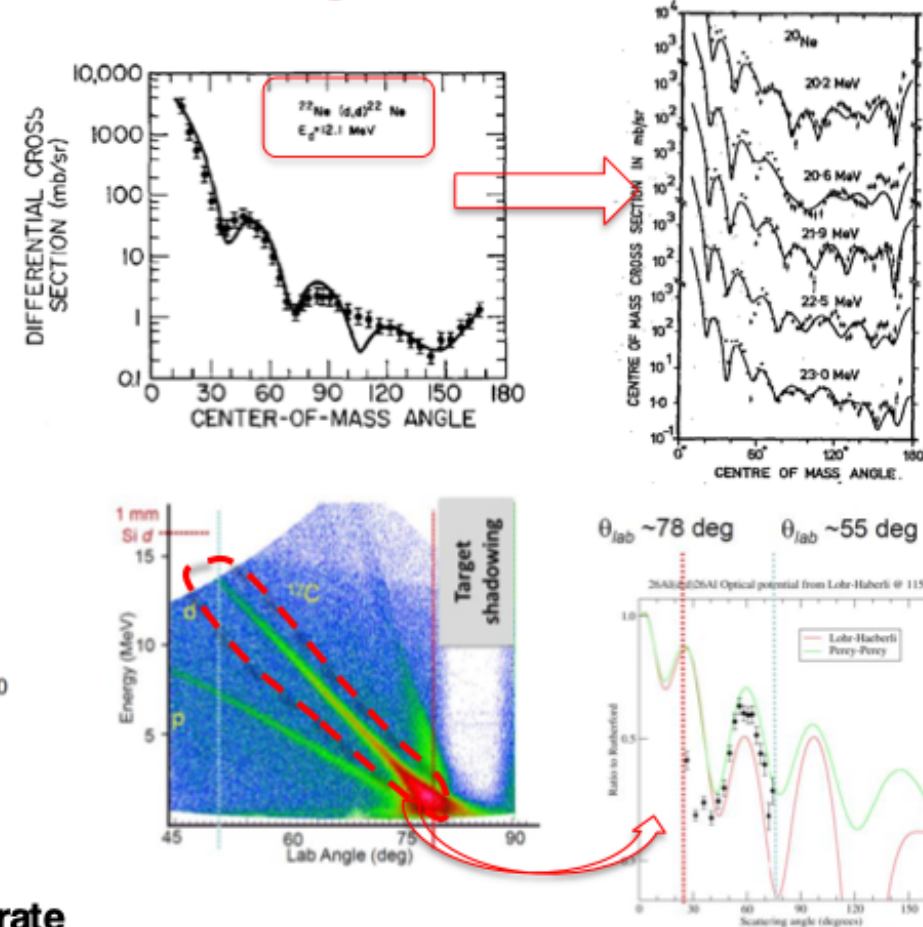


T.R. Whitehead *et al.* PRC (2020)



Angular distributions for $^{132}\text{Sn}(d,p)^{133}\text{Sn}$ ($E_d = 9.46$ MeV)

Uncertainty of $^{85}\text{Se}(\alpha,n)$ reaction rate



Nuclear Structures related to rp-process

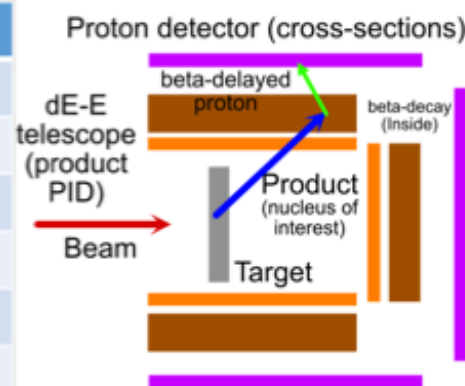
- Recoil isotope tagging after fusion evaporation reactions can provide spectroscopic properties of nuclei.

✓ Heavy-ion Fusion-evaporation

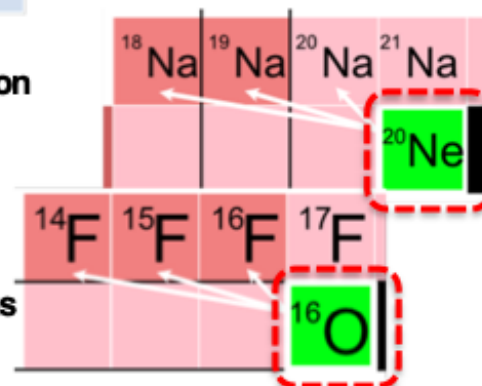
✓ Light particle induced fusion evaporation.

tar(pro,3n)	Beam	Target
^{33}Ar	^{12}C	^{24}Mg
^{37}Ca	^{12}C	^{28}Si
^{41}Ti	^{16}O	^{28}Si
^{45}Cr	^{16}O	^{32}S
^{49}Fe	^{12}C	^{40}Ca
^{53}Ni	^{16}O	^{40}Ca
^{57}Zn	^{20}Ne	^{40}Ca

Examples of recoils from
S beam + S target fusion evaporation



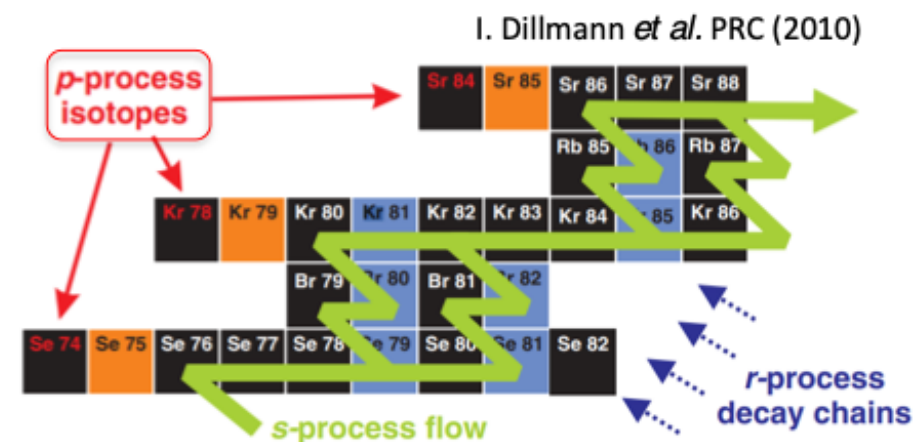
Examples of proton-induced reactions
to produce neutron-deficient nuclei



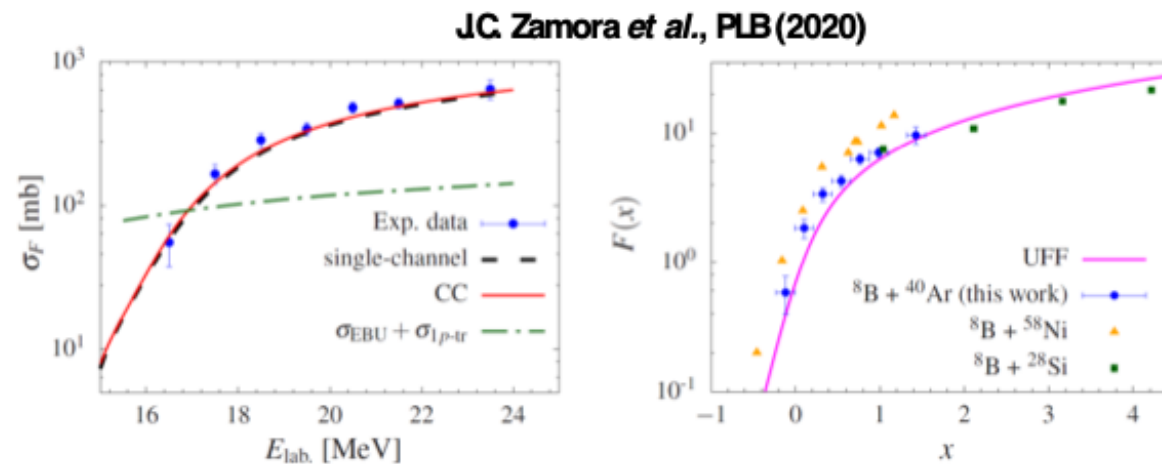
✓ $^{37,38}\text{Ar}(p,\gamma)^{38,39}\text{K}$: key reactions affecting
astrophysical condition of globular clusters

✓ $^{64}\text{Ge}, ^{68}\text{Se}, ^{72}\text{Kr}$: rp-process waiting point

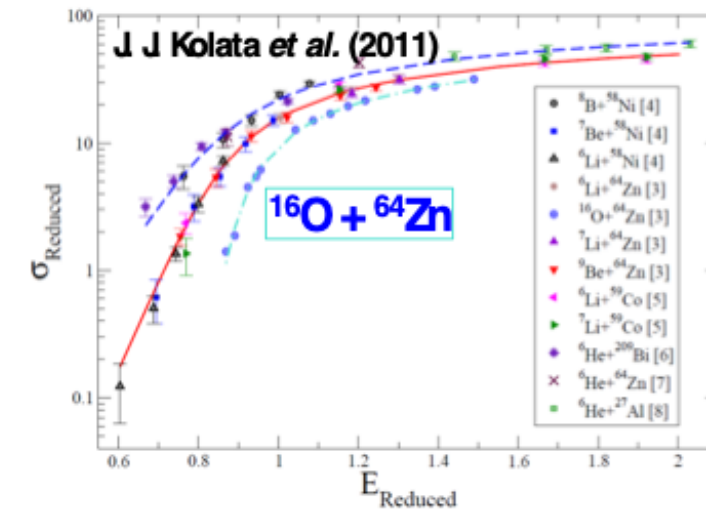
✓ $^{74}\text{Se}, ^{78}\text{Kr}, ^{84}\text{Sr}$: p-process isotopes



Fusion Reaction Mechanism related to Stellar Evolution

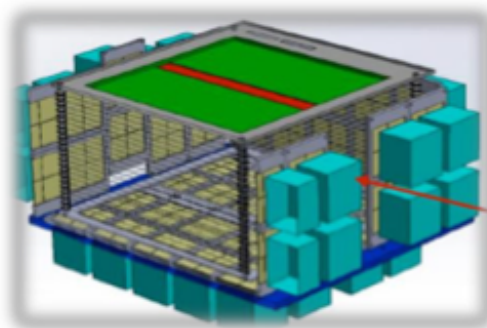


Total fusion excitation function for ${}^8\text{B} + {}^{40}\text{Ar}$.

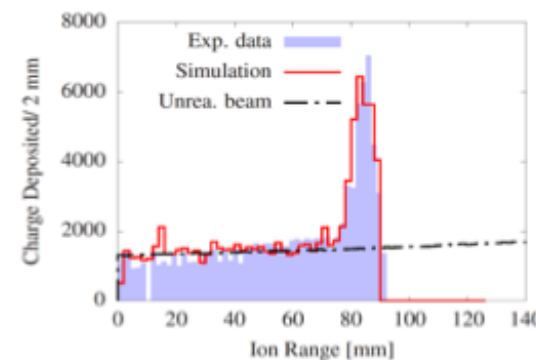


Reduced total reaction cross sections

${}^{16}\text{O} + {}^{40}\text{Ar}$ fusion cross sections??



Texas Active Target (TexAT) design



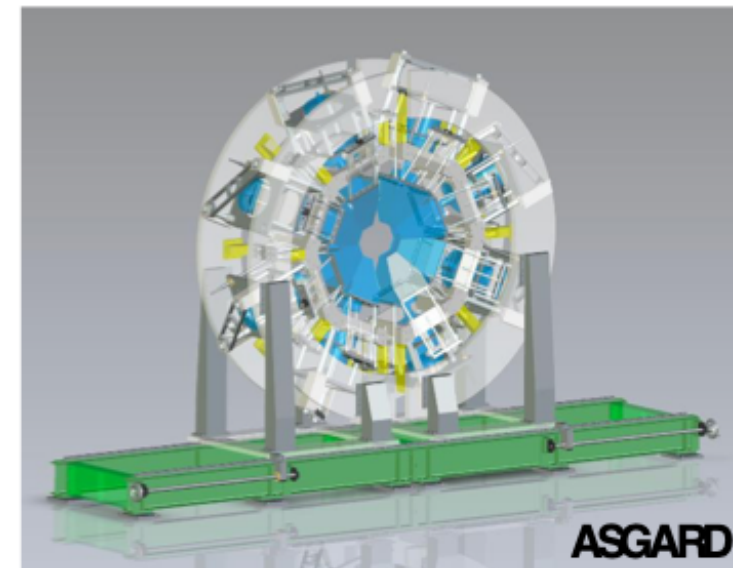
Ionization beam profile for a typical fusion event

✓ ${}^{20}\text{Ne} + {}^{20}\text{Ne}$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{16}\text{O}$ fusion cross sections to revisit the result of D. Shapira PRC(1983)

✓ Fusion cross sections with halo nucleus (${}^6\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$)

- ✓ **^{34}Si : Doubly Magic Nucleus**
- ✓ **^{32}Mg : Island of Inversion**
- ✓ **^{28}O : Doubly Magic Nucleus**
- ✓ **Many unknown spectroscopic properties**

https://www.nndc.bnl.gov



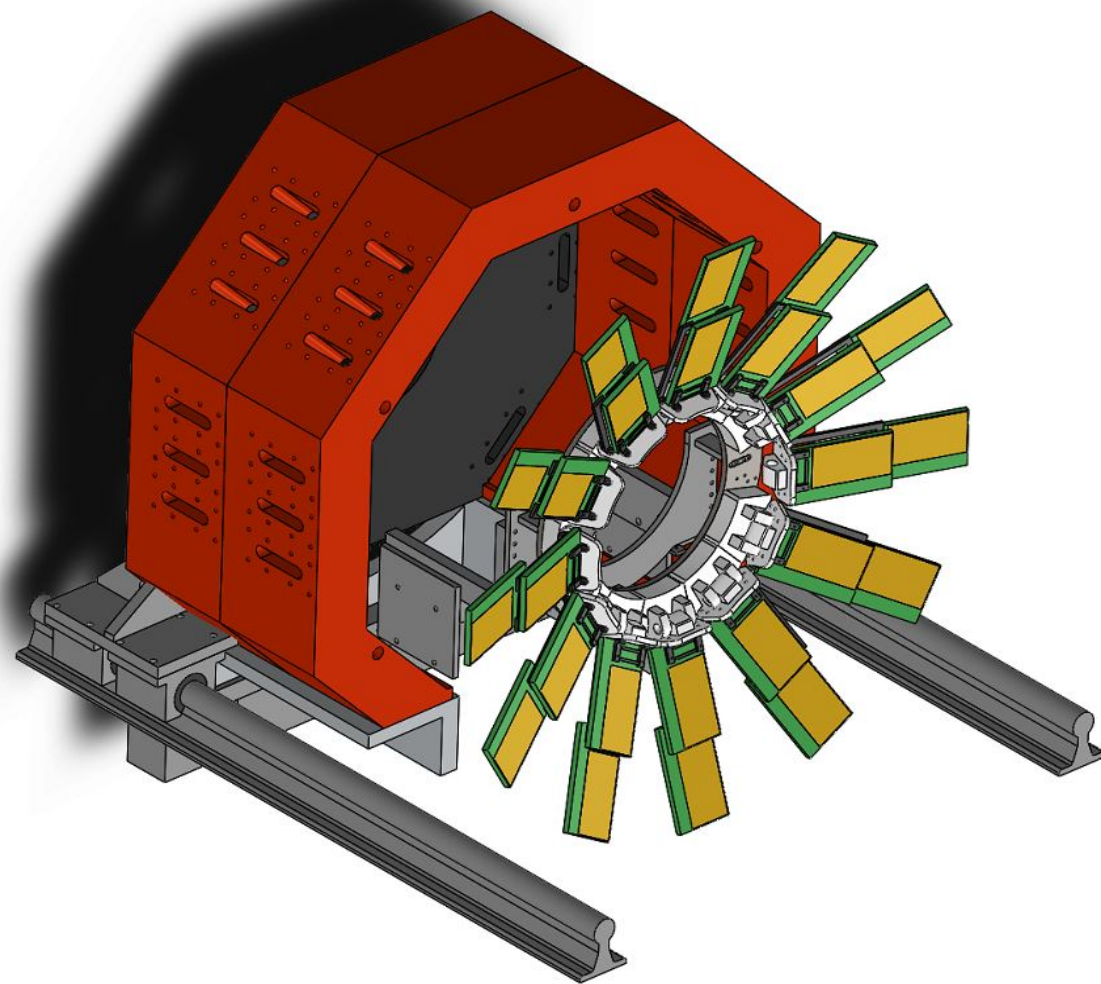
IBS Institute for
Basic Science

**CENTER FOR
EXOTIC NUCLEAR STUDIES**

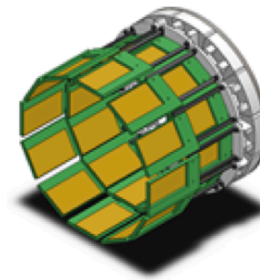
18

검출기 연구 개발

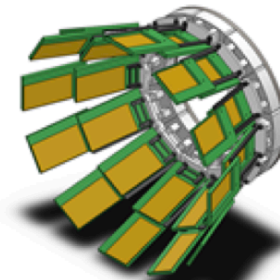
KoBRA 검출기



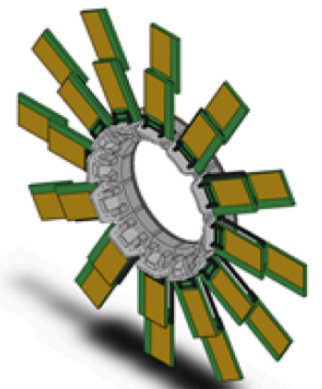
No Tilting



At a 20 Degree Tilt



At a 90 Degree Tilt

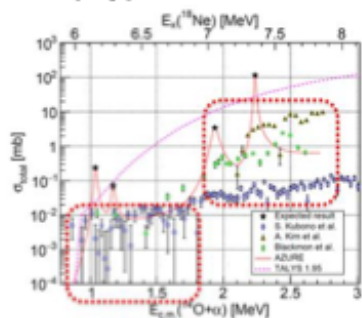


- 가벼운 반응물의 검출
- 빔의 단면적이 관건
- 구상/설계 진행중
- 제작예산 추가 확보 필요

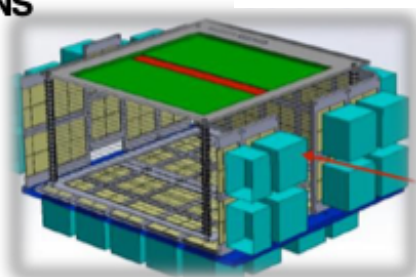
Active Targets for Nuclear Astrophysics Studies at RAON

✓ TexAT Active Target TPC detector Upgrade

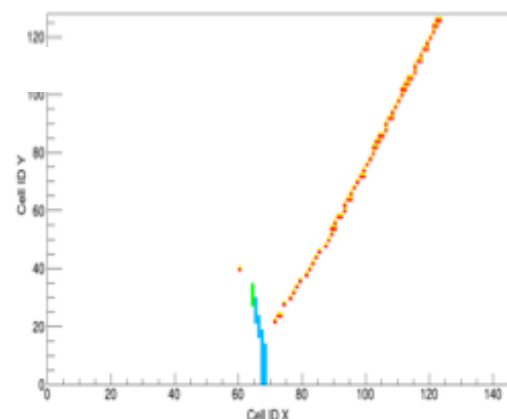
- $^{14}\text{O}(\alpha, p)^{17}\text{F}$ cross sections at CRIB/CNS



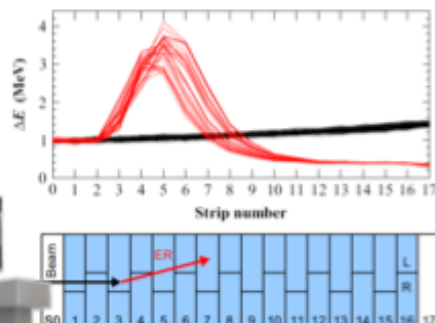
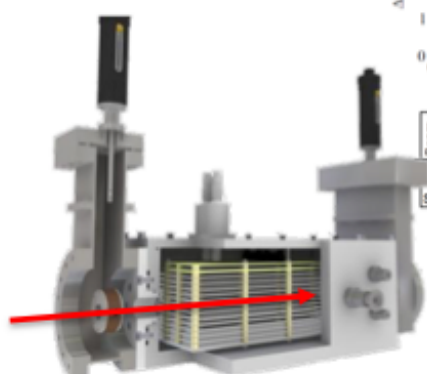
Previous measured data and calculated total cross sections of $^{14}\text{O}(\alpha, p)$ reaction



Texas Active Target (TexAT) design



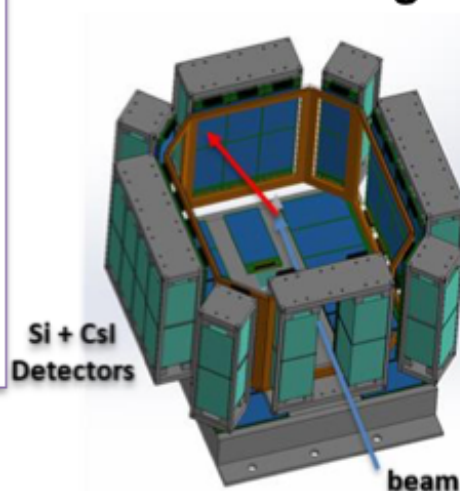
✓ Multi-Sampling Ionization Chamber (MUSIC) detector



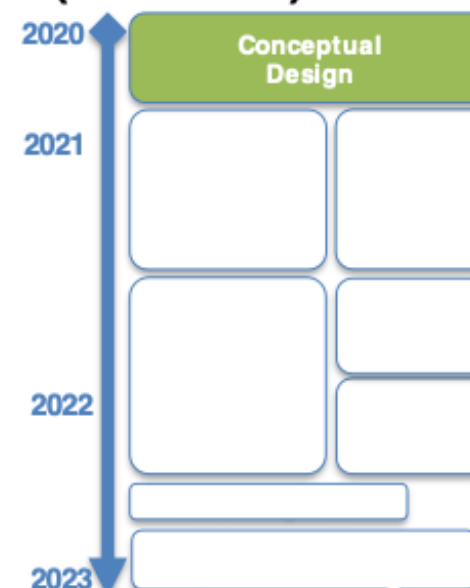
MUSIC Detector at ANL

(p, p)
 (d, d)
 (a, a)
 (a, p)
 (a, n)
fusion

✓ CENS Active Target TPC (aka AToM-X)

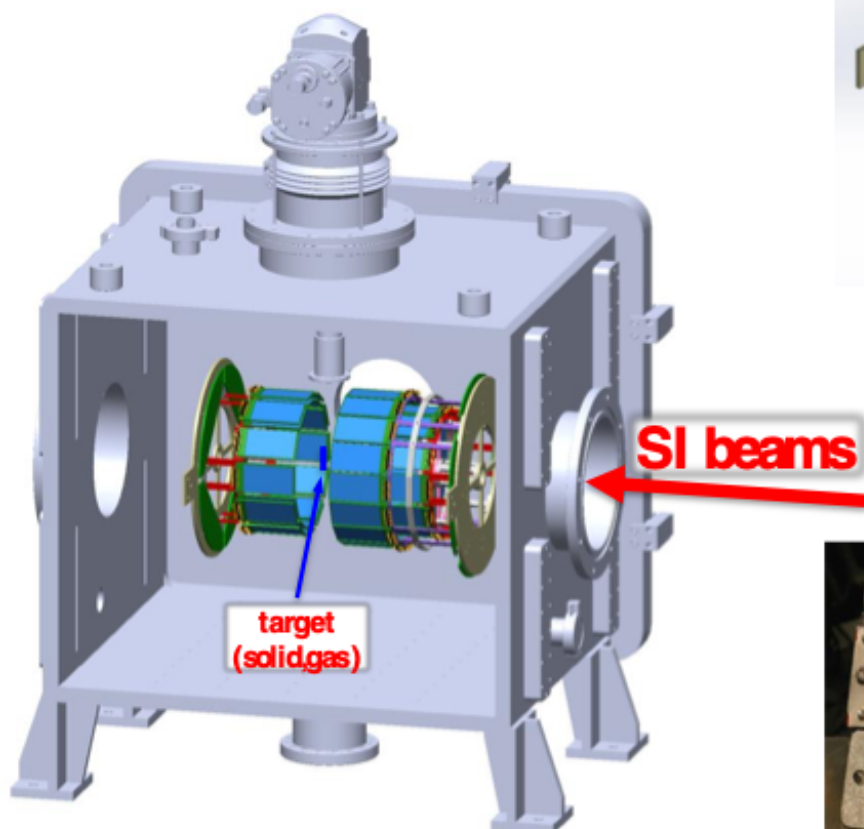


Conceptual Design of AToM-X

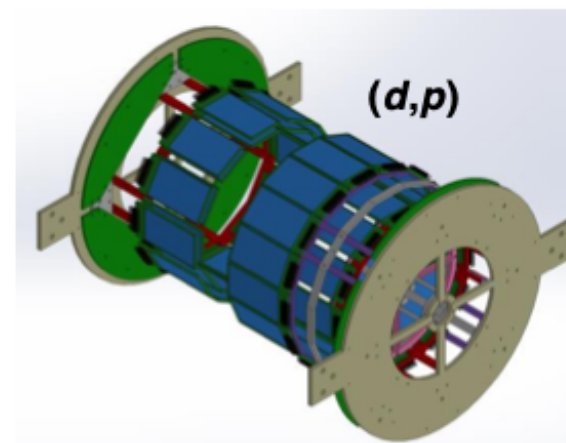


Targets and Detectors for Nuclear Astrophysics Studies at RAON

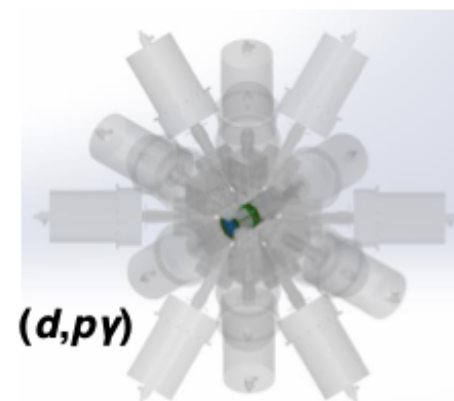
- ✓ Solid Targets: CH_2 , CD_2
- ✓ Gas Targets: H_2 , D_2 , ^4He , ^3He , N_2



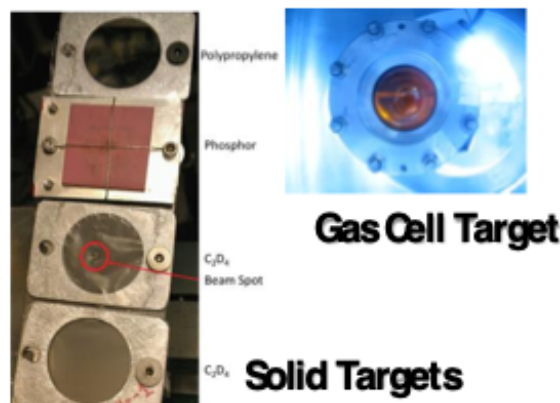
Conceptual Design of STARK chamber



Conceptual Design of STARK



Conceptual Design of STARK Jr. and ASGAR



Portable HPGe detectors

KoBRA 운용 초기 계획

- 다양한 검출기의 연구/개발/시운전
 - HPGe 검출기를 이용한 감마선 정밀 측정
 - LaBr 검출기를 이용한 불안정 원자핵의 수명 측정
 - Total Absorption Spectroscopy를 이용한 원자핵 붕괴 연구
 - Doppler Shift Attenuation 방법을 이용한 원자핵의 수명 측정
 - AToM-X, STARK 검출기 연구/개발
- 안정동위원소 빔을 이용한 Commissioning
 - 각종 실험 방법의 경험 축적
 - 핵구조 연구
 - RI 생성방법에 관한 연구

Commissioning 실험

- 안정 원자핵 빔
 - 기존의 실험들을 재현
 - 가속기, 검출기 등의 성능 검증
 - 측정 등 실험 기술의 고도화 및 검증
 - 관련 인력 양성

Commissioning

실험주제 발굴

- $^{12}\text{C} + \text{p} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{d}$
- $^{12}\text{C} + \text{p} \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{p}$
- $^{16}\text{O} + ^3\text{He} \rightarrow ^{19}\text{Ne}$ (핵융합)
- $^{19}\text{F} + ^3\text{He} \rightarrow ^{19}\text{Ne} + ^3\text{H}$

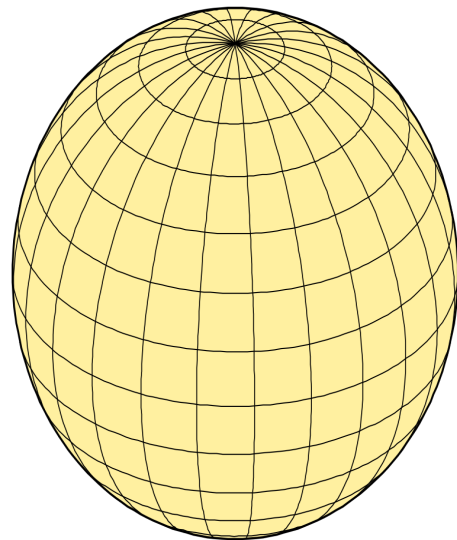
KoBRA Day-1 실험

- $^{18}\text{Ne} + p \rightarrow ^{17}\text{Ne} + d$
 - ^{18}Ne 빔이 양성자와 충돌하여 중성자 1개를 양성자에 주고 ^{17}Ne 이 되는 핵반응
- $^{18}\text{Ne} + p \rightarrow ^{16}\text{Ne} + t$
 - ^{18}Ne 빔이 양성자와 충돌하여 중성자 2개를 양성자에 주고 ^{16}Ne 이 되는 핵반응

Study of Nuclear Shapes

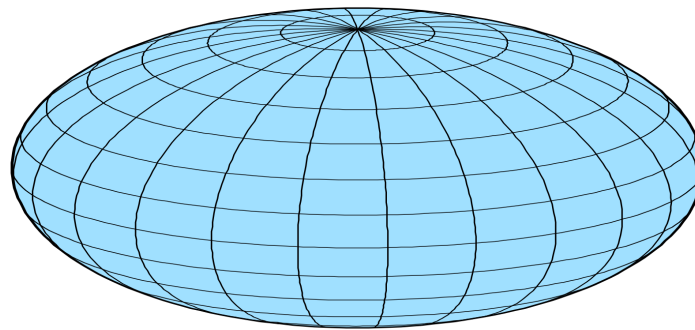
원자핵의 모양

Possible shapes of some deformed nuclei



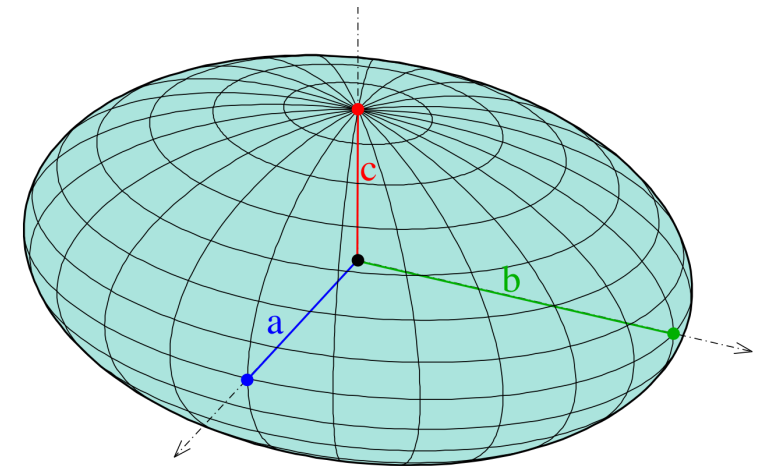
Prolate

$$\gamma = 0^\circ$$



Oblate

$$\gamma = 60^\circ$$

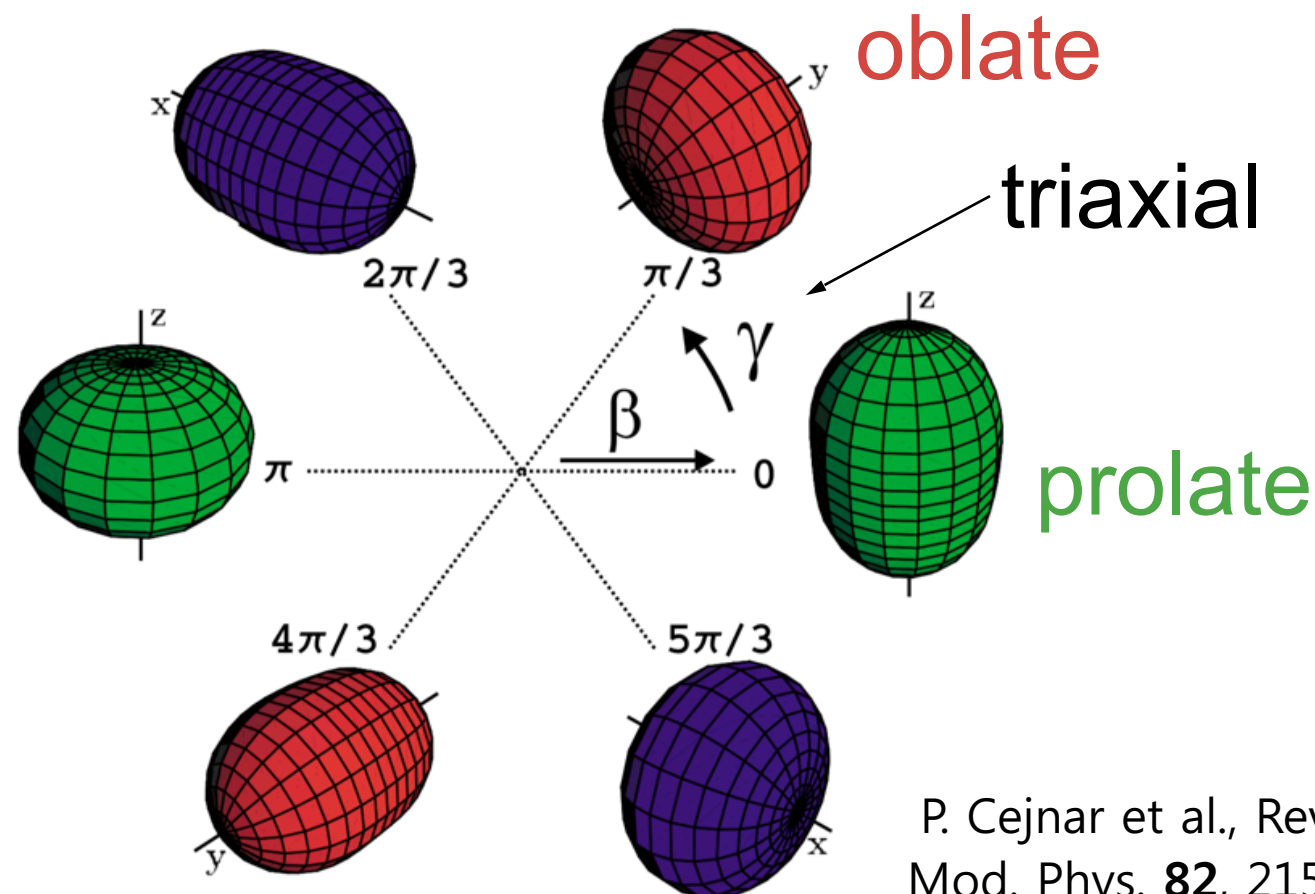


Triaxial

Degree of deformation: β , degree of asymmetry: γ

원자핵의 모양

‘Hill-Wheeler’ coordinate



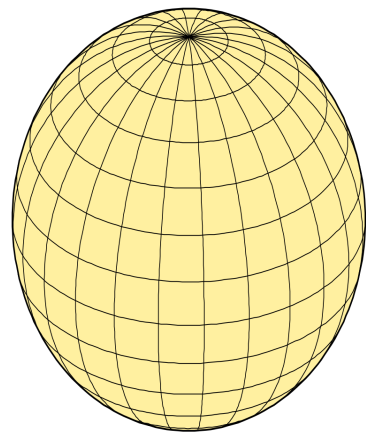
$$R = R_0(1 + a_{2m}Y_{2m}(\theta, \phi))$$

$$a_{20} = \beta \cos \gamma, \quad a_{22} = \frac{1}{\sqrt{2}}\beta \sin \gamma$$

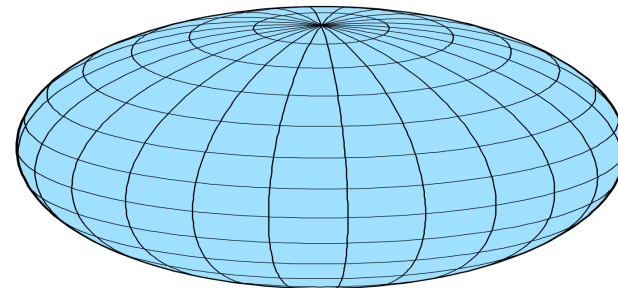
P. Cejnar et al., Rev.
Mod. Phys. **82**, 2155
(2010)

원자핵의 모양

Axially symmetric shapes are common.

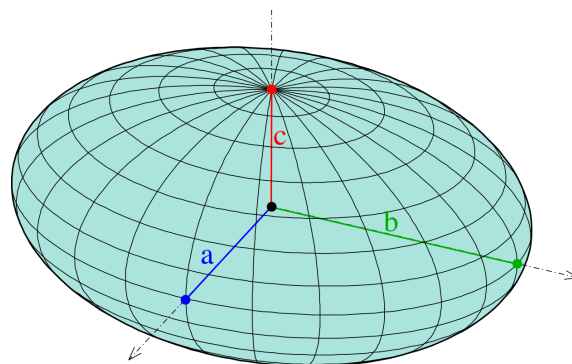


Prolate
(dominant)



Oblate

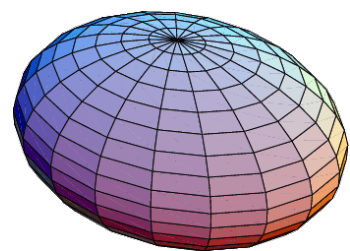
However, the existence of triaxial shape is ...



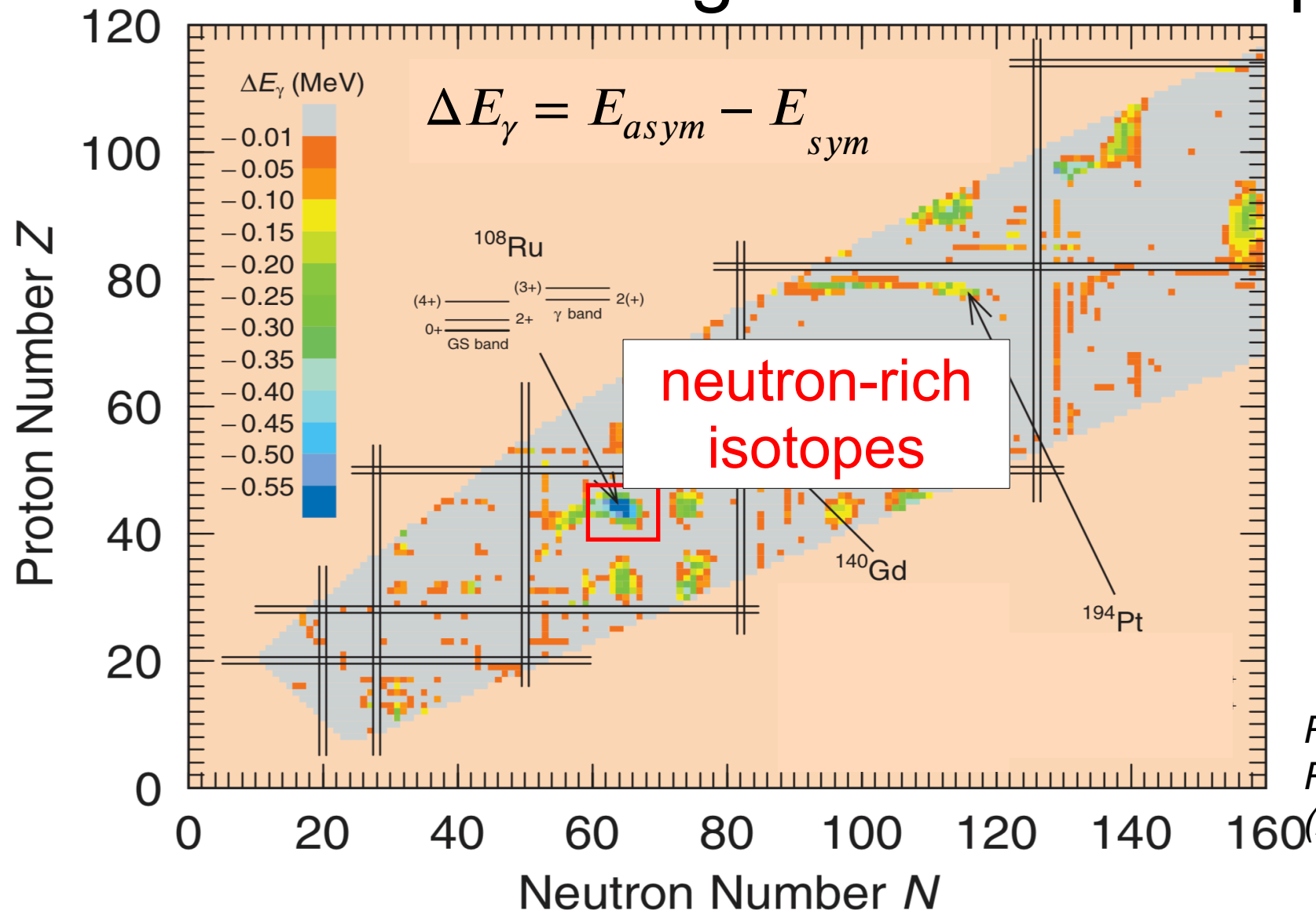
Triaxial ??

원자핵의 모양

Candidates of the triaxial ground-state shape



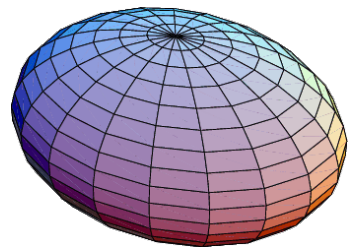
Triaxial
shape?



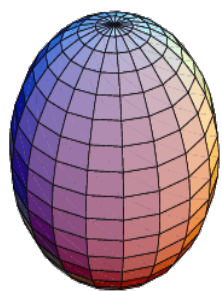
*P. Moller et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 162502 (2006)*

원자핵의 모양

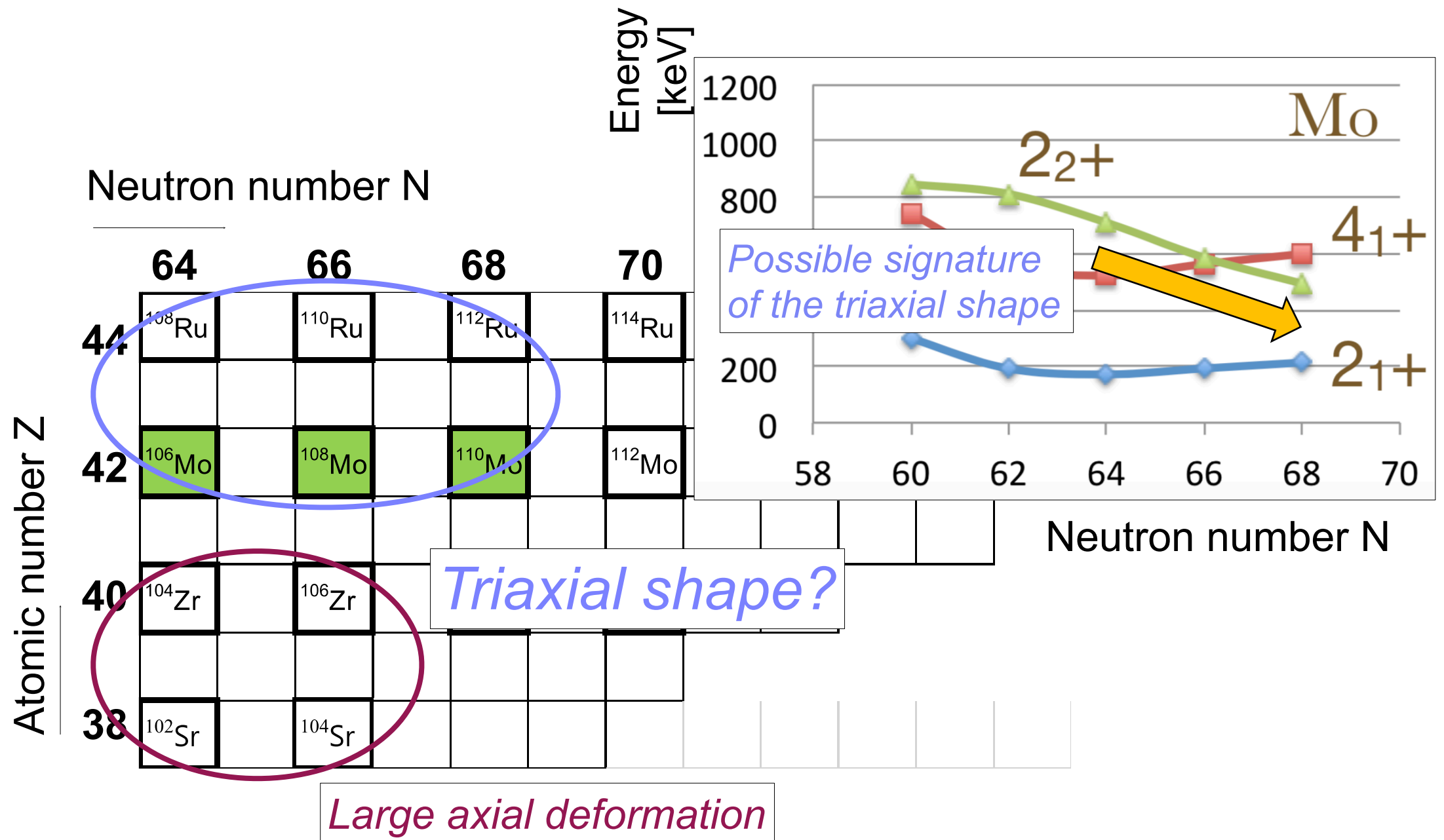
Nuclear chart around $A = 110$



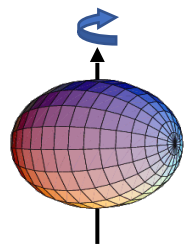
Triaxial
shape?



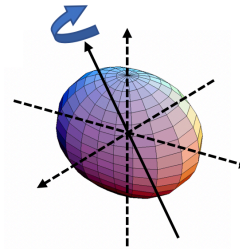
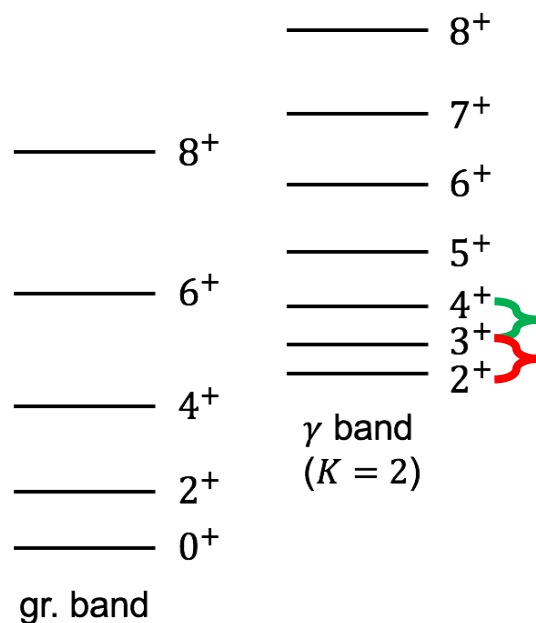
Axially
symmetri
c shape



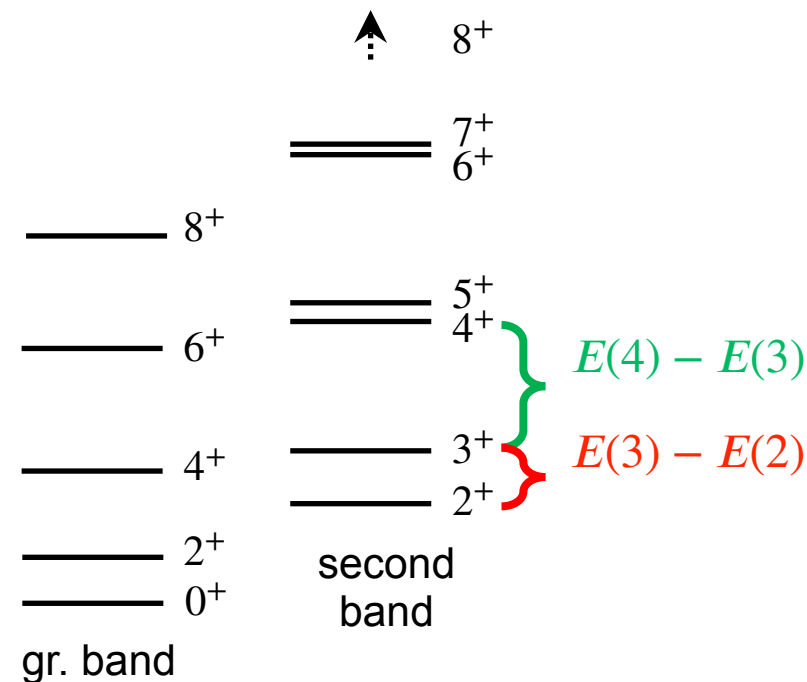
원자핵의 모양



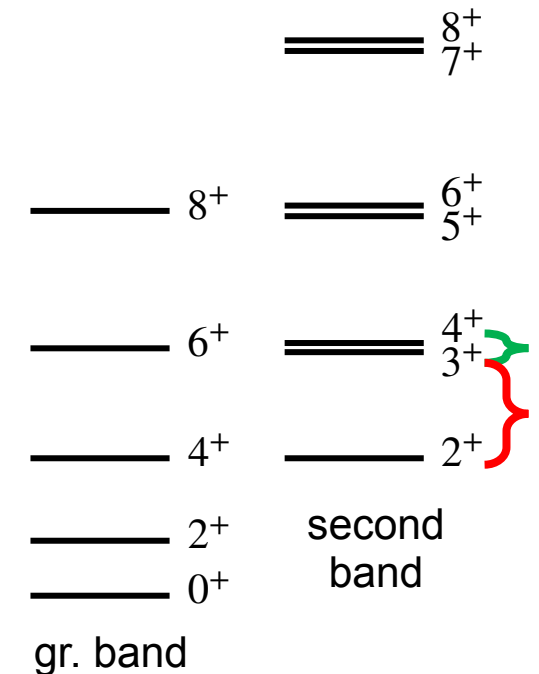
Axially symmetric rotor with γ -vibration



Rigid triaxial rotor model



γ -unstable rotor model



Level spacing in side band is different for each model

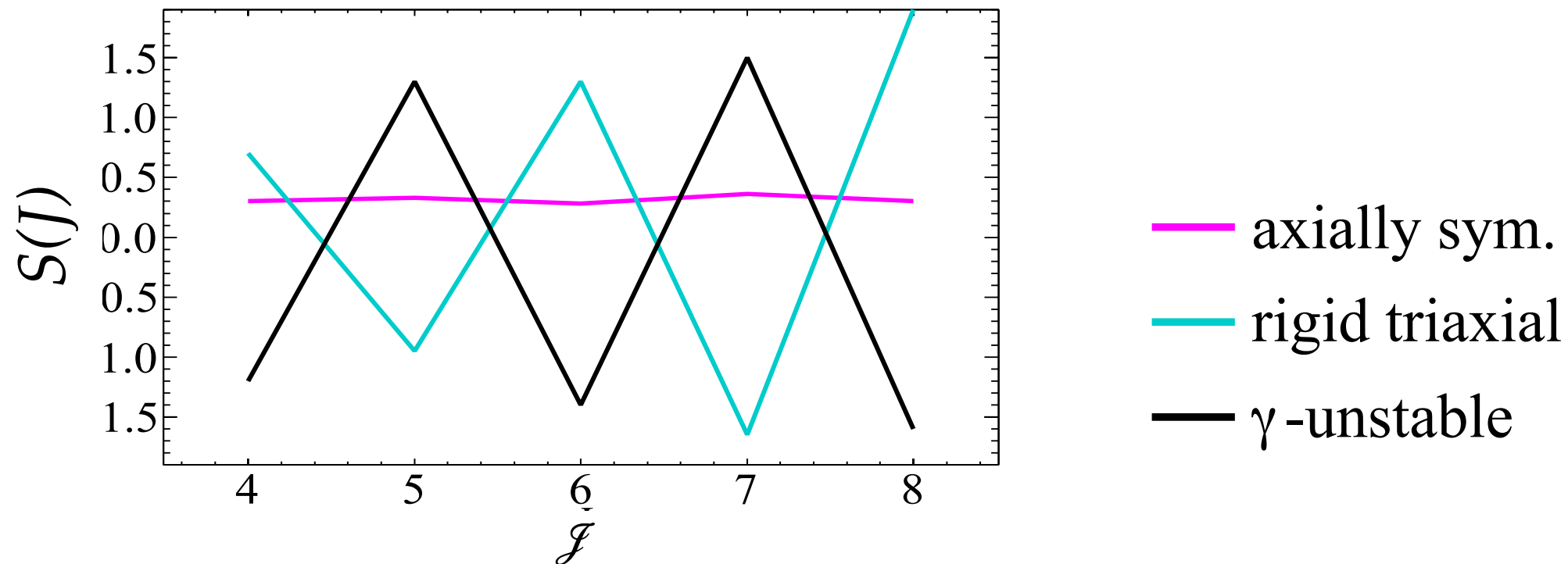
Define an indicator

$$S(\mathcal{J}) \equiv \frac{E_s(J)}{E(2_1^+)} = \frac{[E(J) - E(J-1)] - [E(J-1) - E(J-2)]}{E(2_1^+)}$$

원자핵의 모양

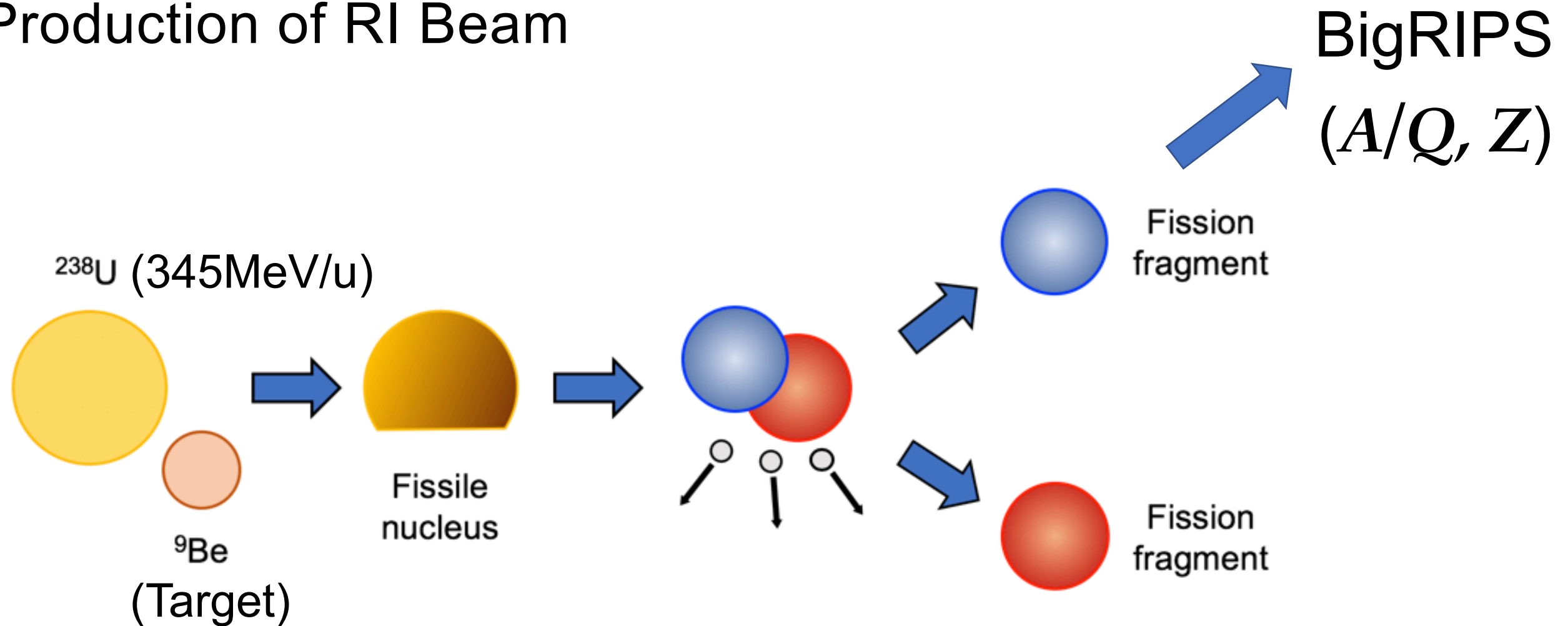
Energy staggering of γ -band

$$S(\mathcal{J}) \equiv \frac{E_s(J)}{E(2_1^+)} = \frac{[E(J) - E(J-1)] - [E(J-1) - E(J-2)]}{E(2_1^+)}$$

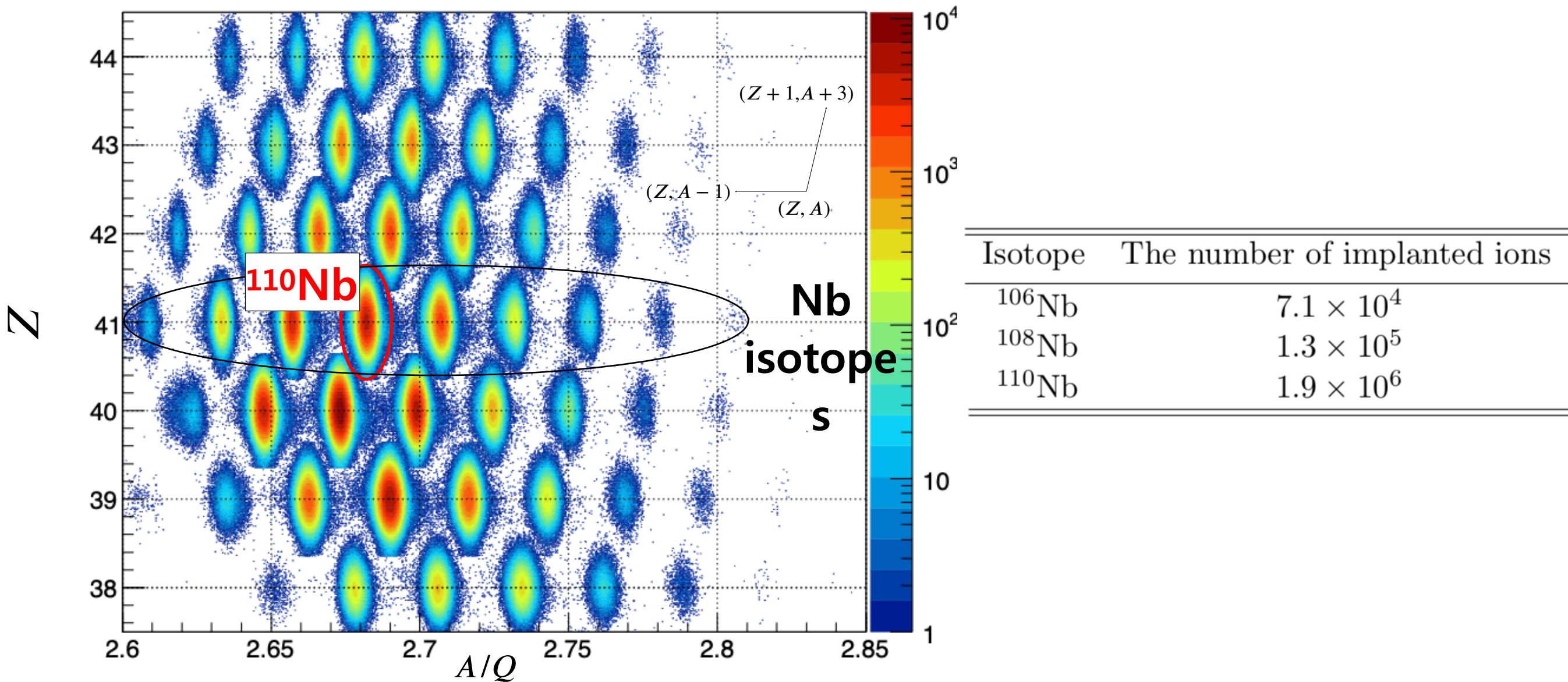


Experiment

Production of RI Beam

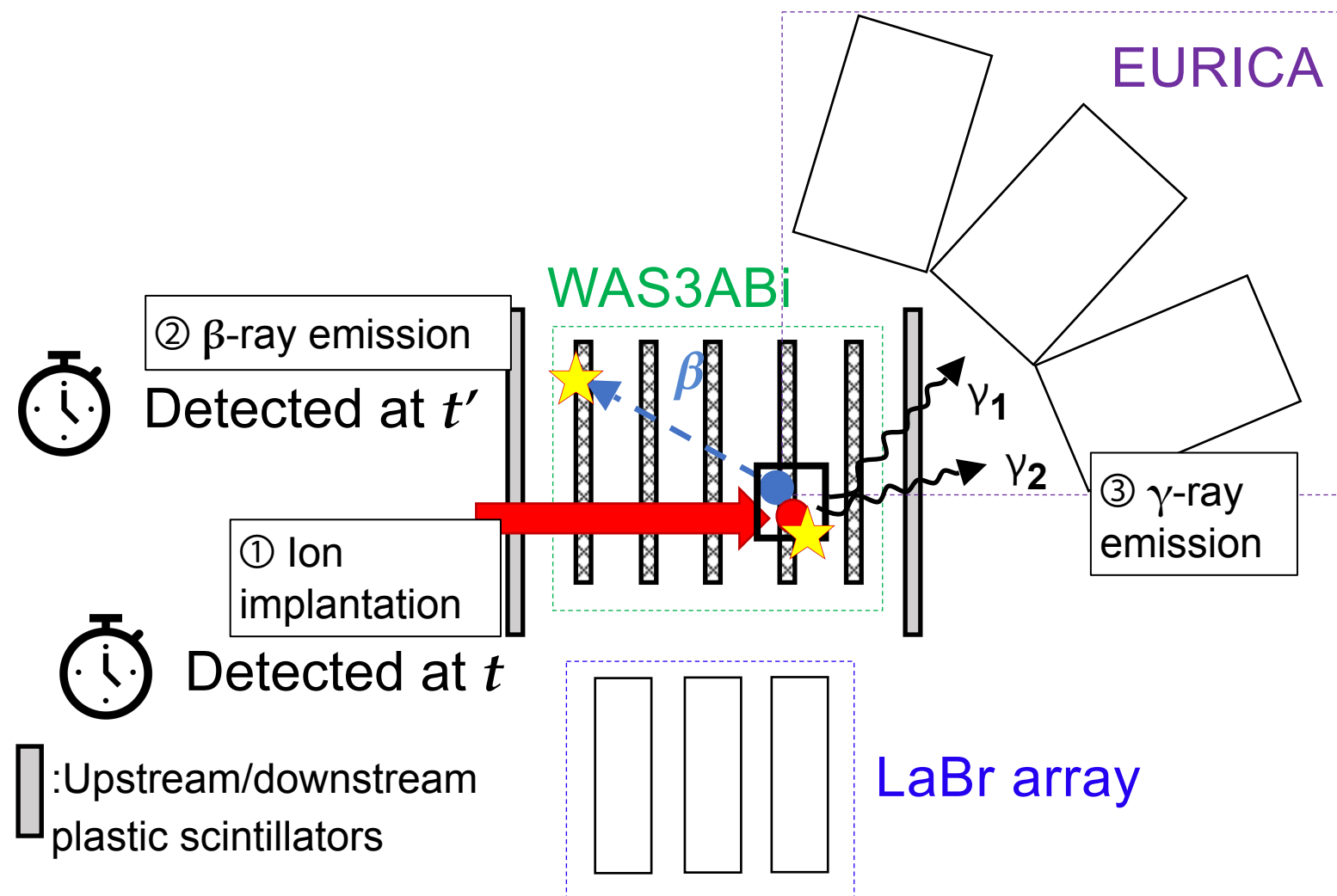


Experiment



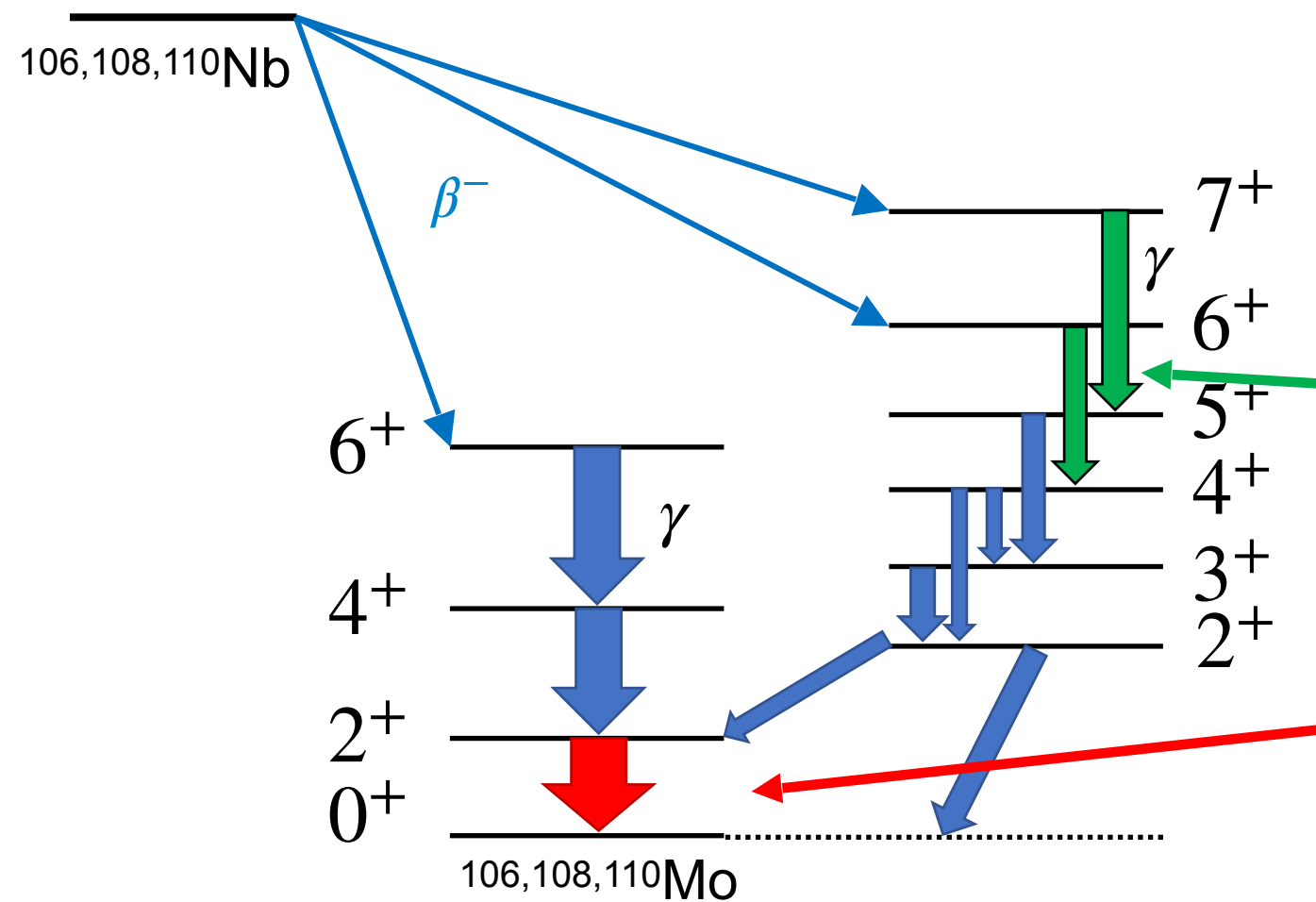
감마선의 측정

β - γ spectroscopy using EURICA



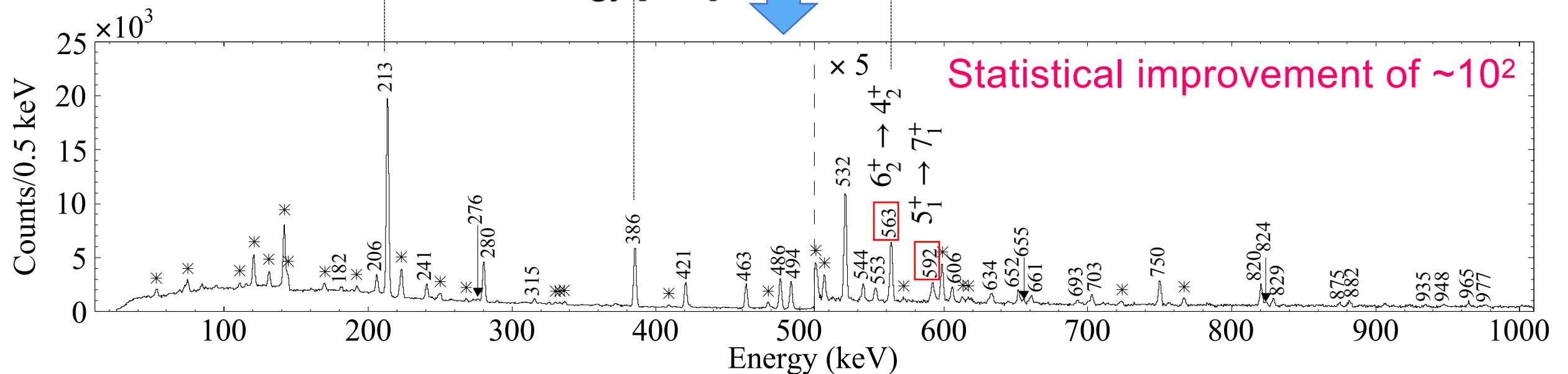
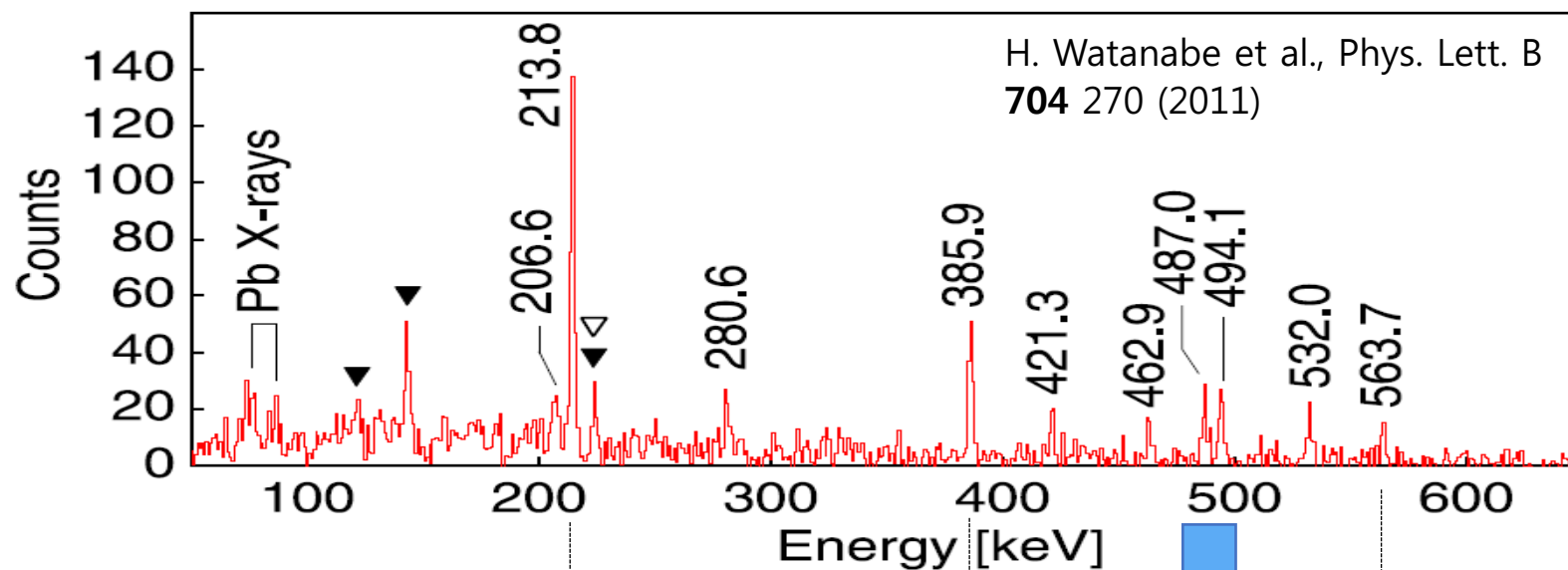
감마선의 측정

Observables in decay spectroscopy



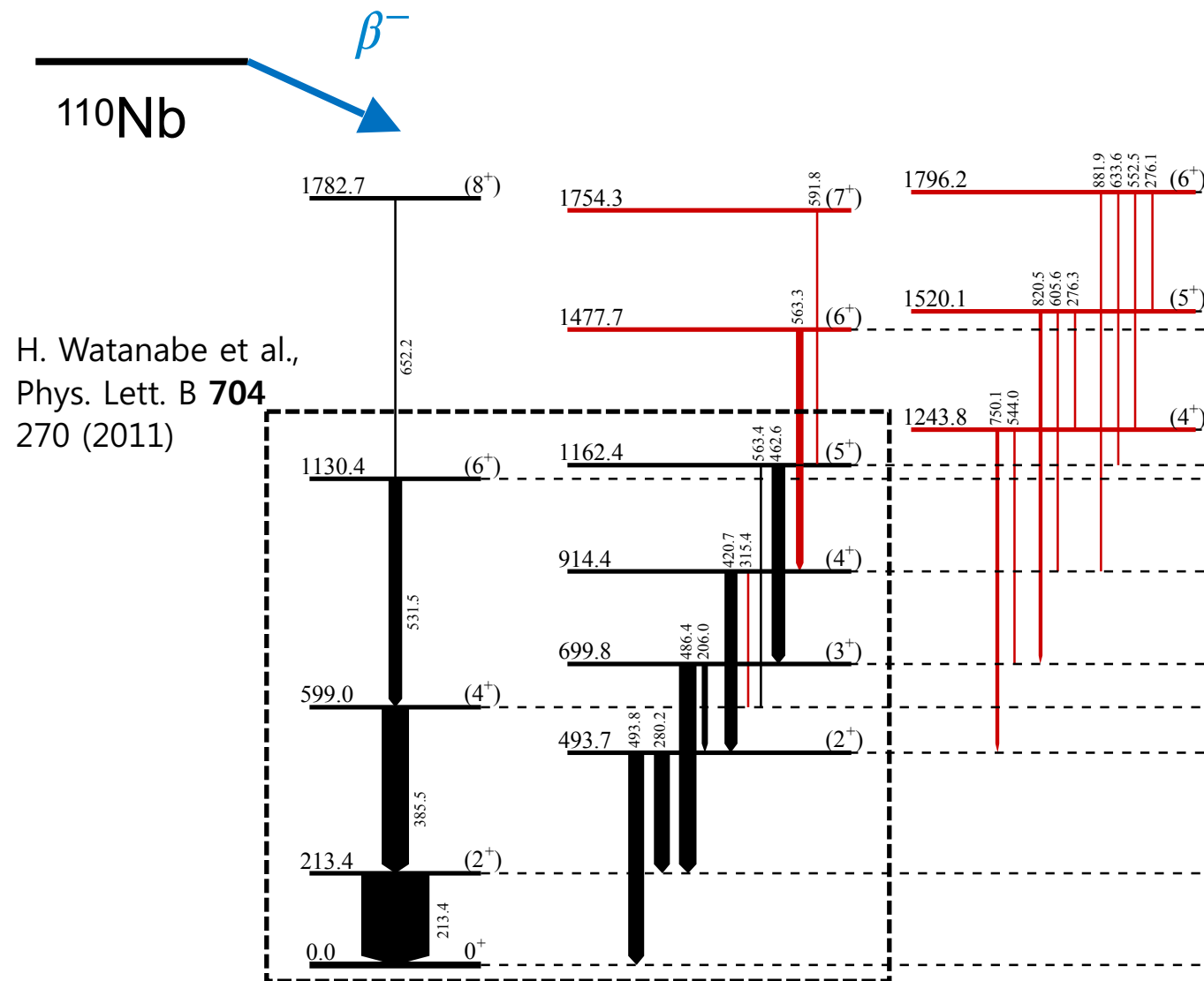
감마선의 측정

β -gated γ -ray spectrum of ^{110}Mo



원자핵의 모양

A partial level scheme of ^{110}Mo



H. Watanabe et al.,
Phys. Lett. B **704**
270 (2011)

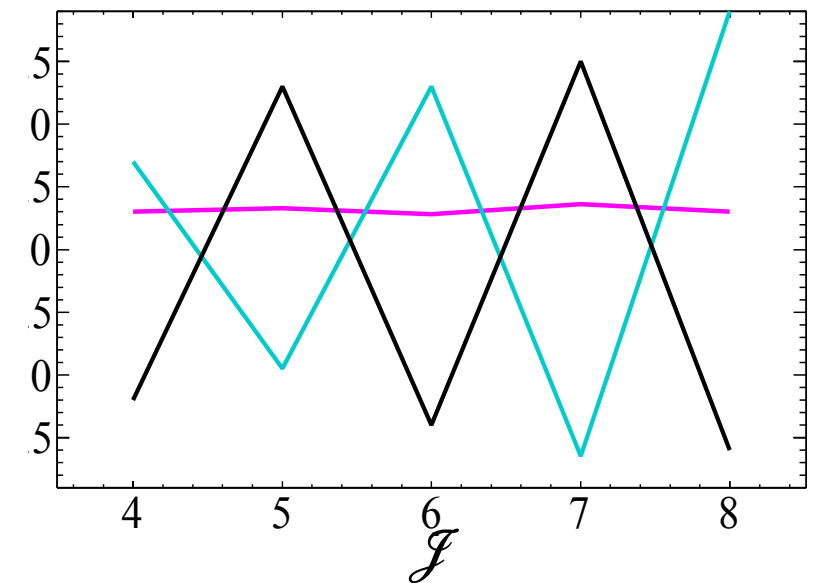
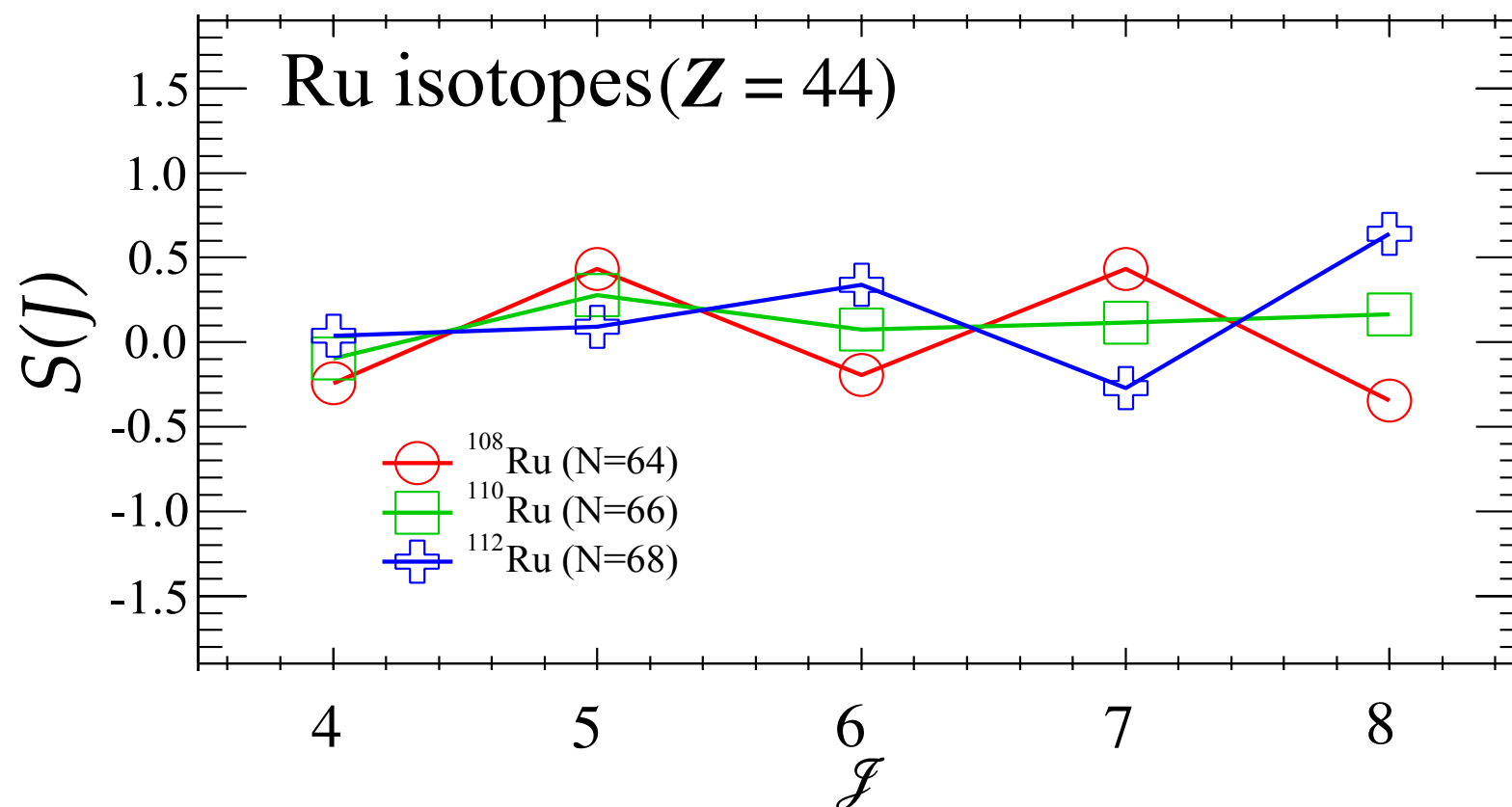
New results

- Observation of the 6^+ , 7^+ states in the second band
 - Observation of the third band ($\gamma\gamma$ -vibration?)
- Kinematic moment of inertia

Red lines: new levels and transitions

원자핵의 모양

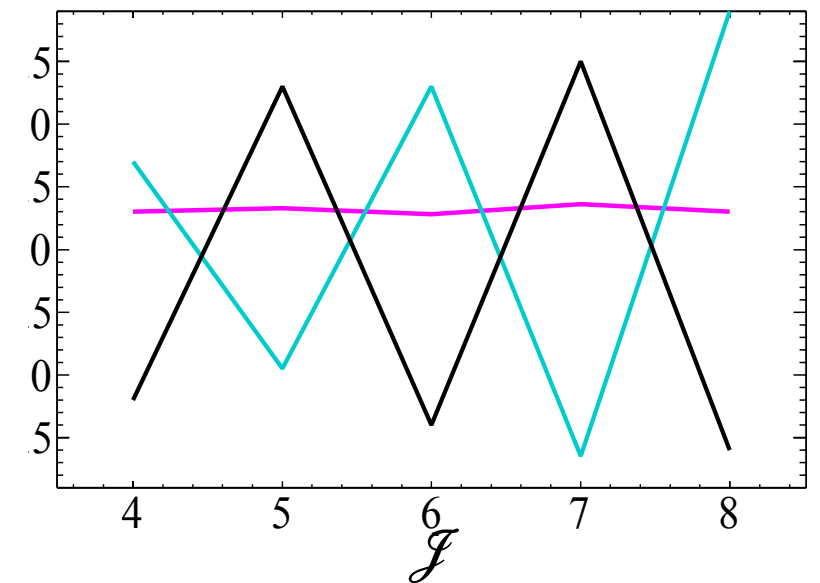
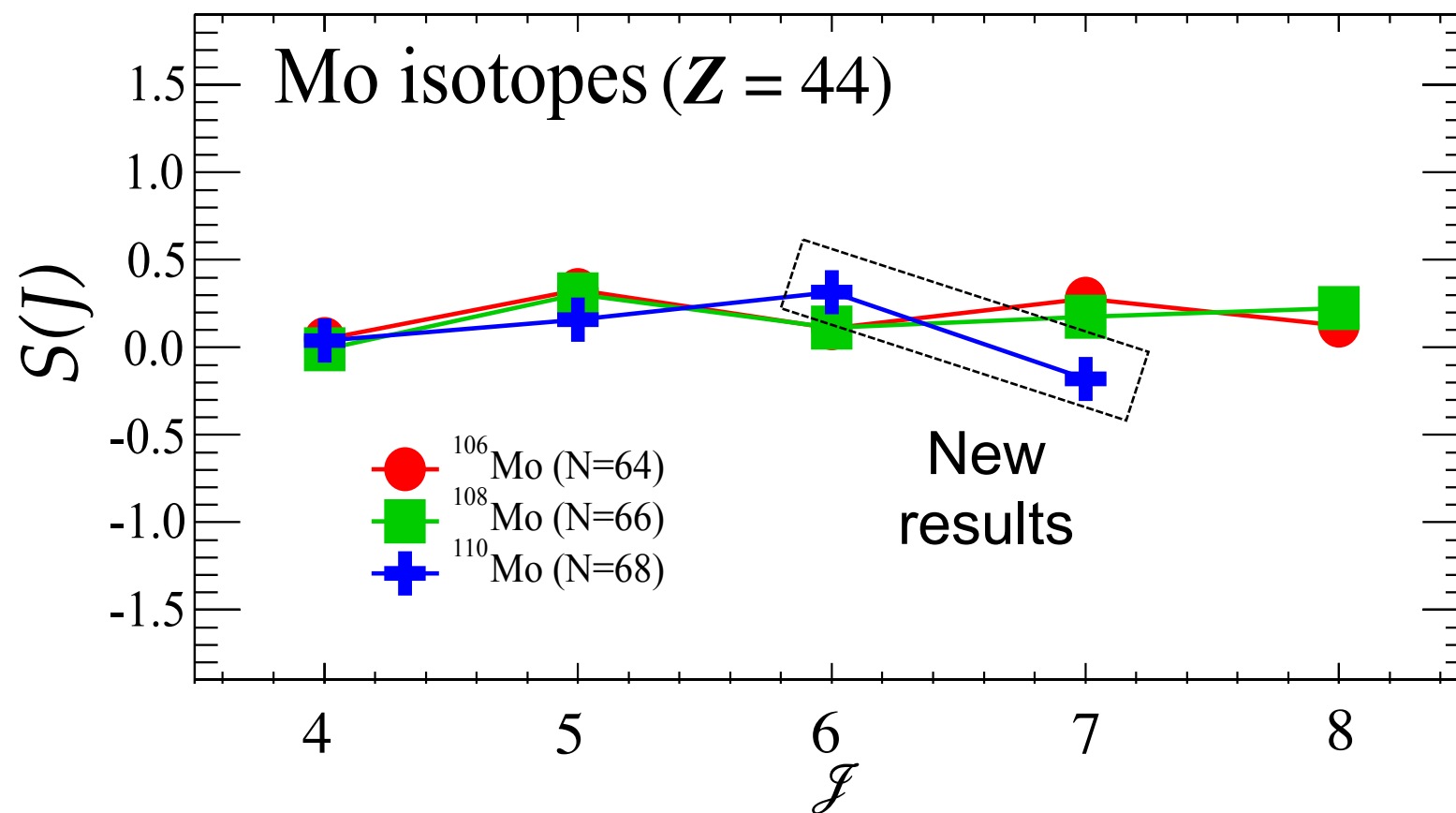
$S(J)$ of neutron-rich Mo, Ru, and Pd isotopes



— axially sym.
— rigid triaxial
— γ -unstable

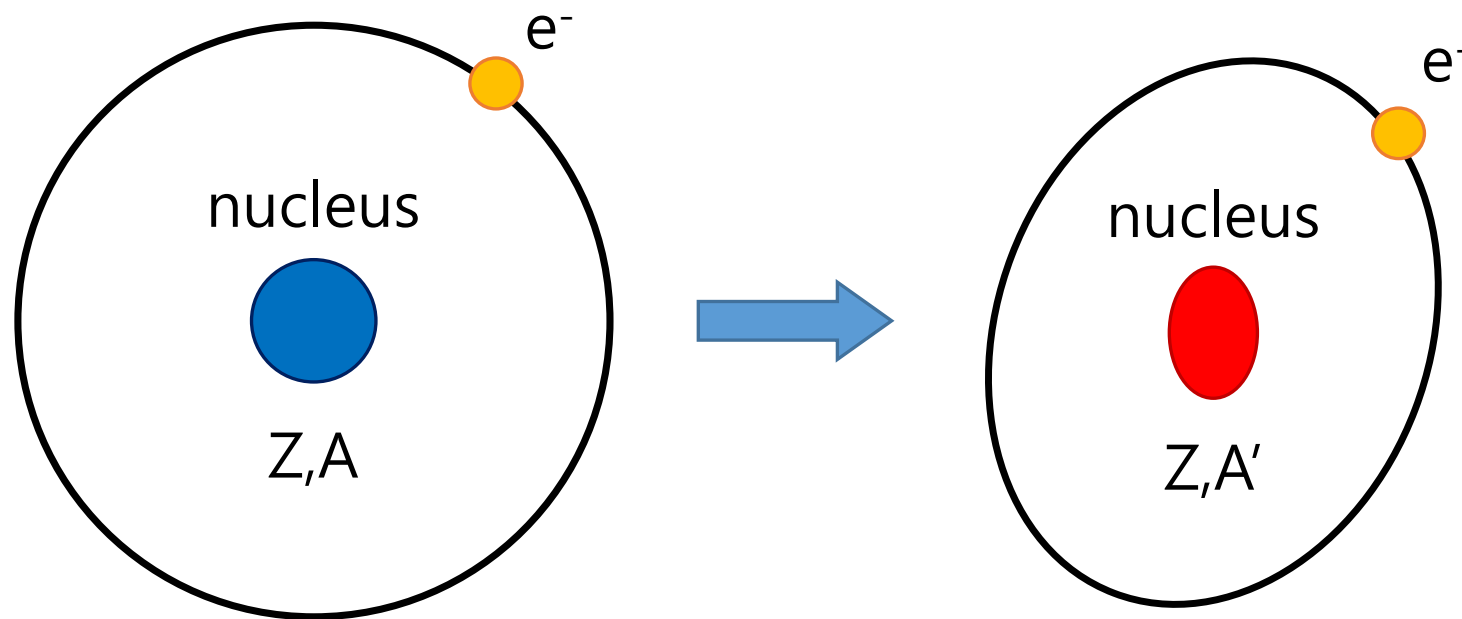
원자핵의 모양

$S(J)$ of neutron-rich Mo, Ru, and Pd isotopes



동위원소 원자스펙트럼 변화

동위원소의 원자 전자 에너지 준위의 변화



중성자 개수가 다른 원자핵

- 핵구조의 변화
- 전기 포텐셜 에너지의 변화
- 원자 에너지 준위의 변화

동위원소 원자스펙트럼 변화

$$\delta\nu^{A,A'} = \nu^{A'} - \nu^A$$

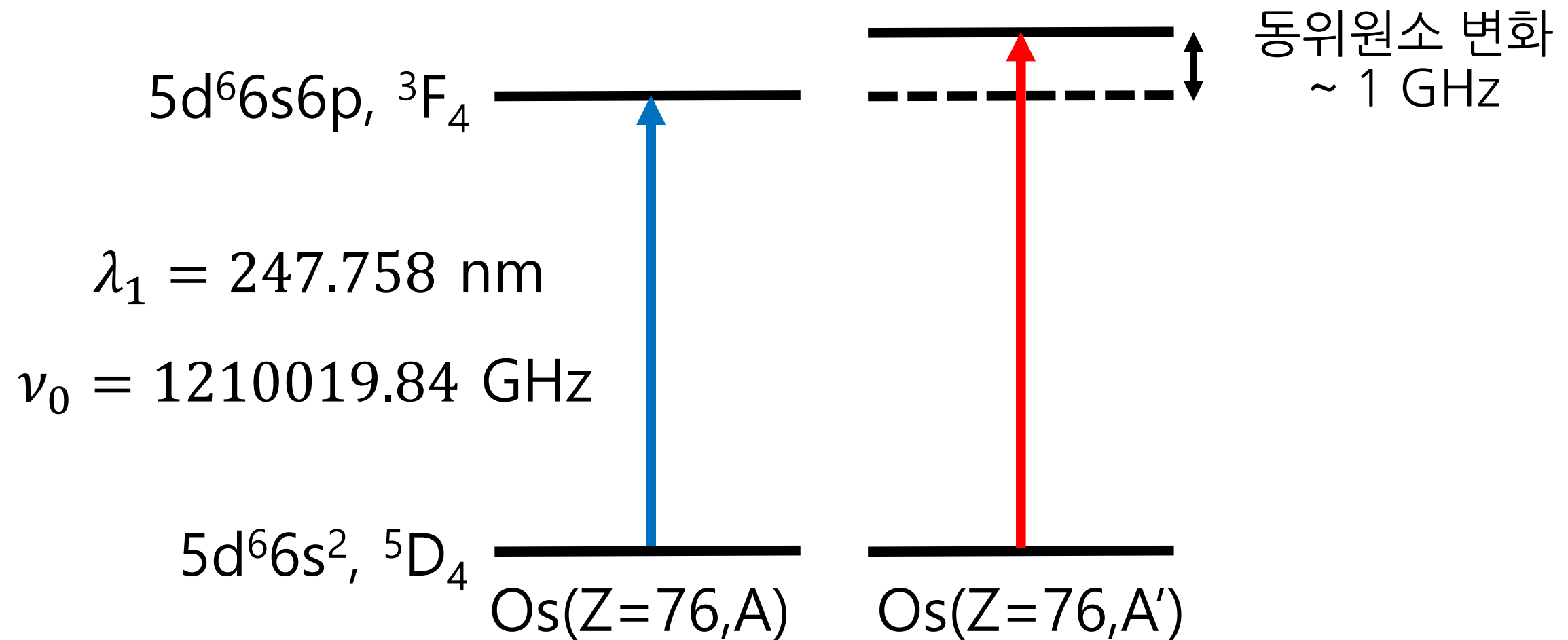
$$\delta\nu^{A,A'} = \text{Mass shift} + \text{Field shift}$$

$$\delta\nu^{A,A'} = \boxed{C_M \cdot \frac{A' - A}{AA'}} + \boxed{C_F \cdot (\delta\langle r^2 \rangle + \dots)}$$

원자핵 질량의 변화

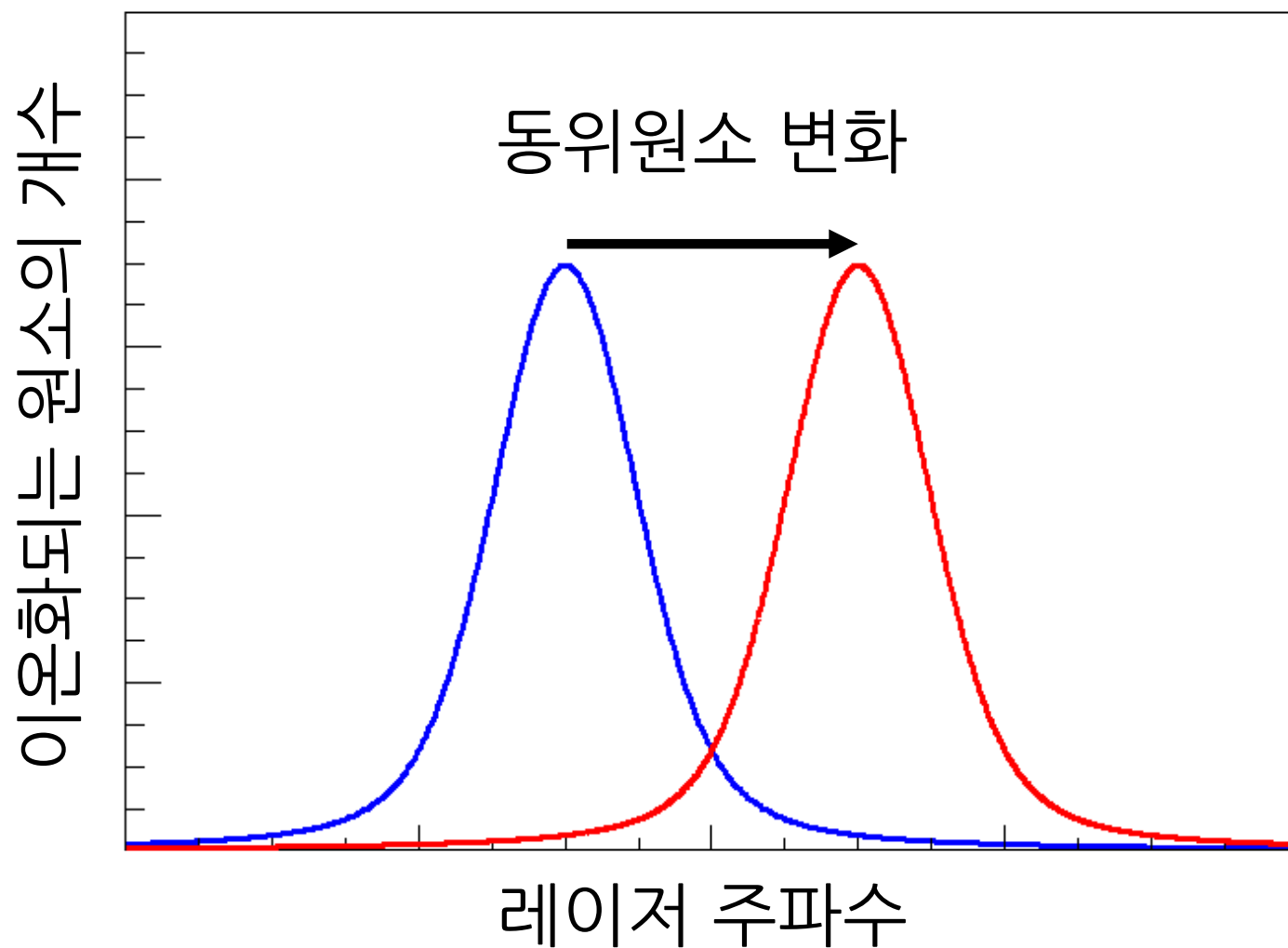
원자핵의 전하분포의 변화

레이저 스펙트로스코피



Os 동위원소의 레이저 스펙트로스코피

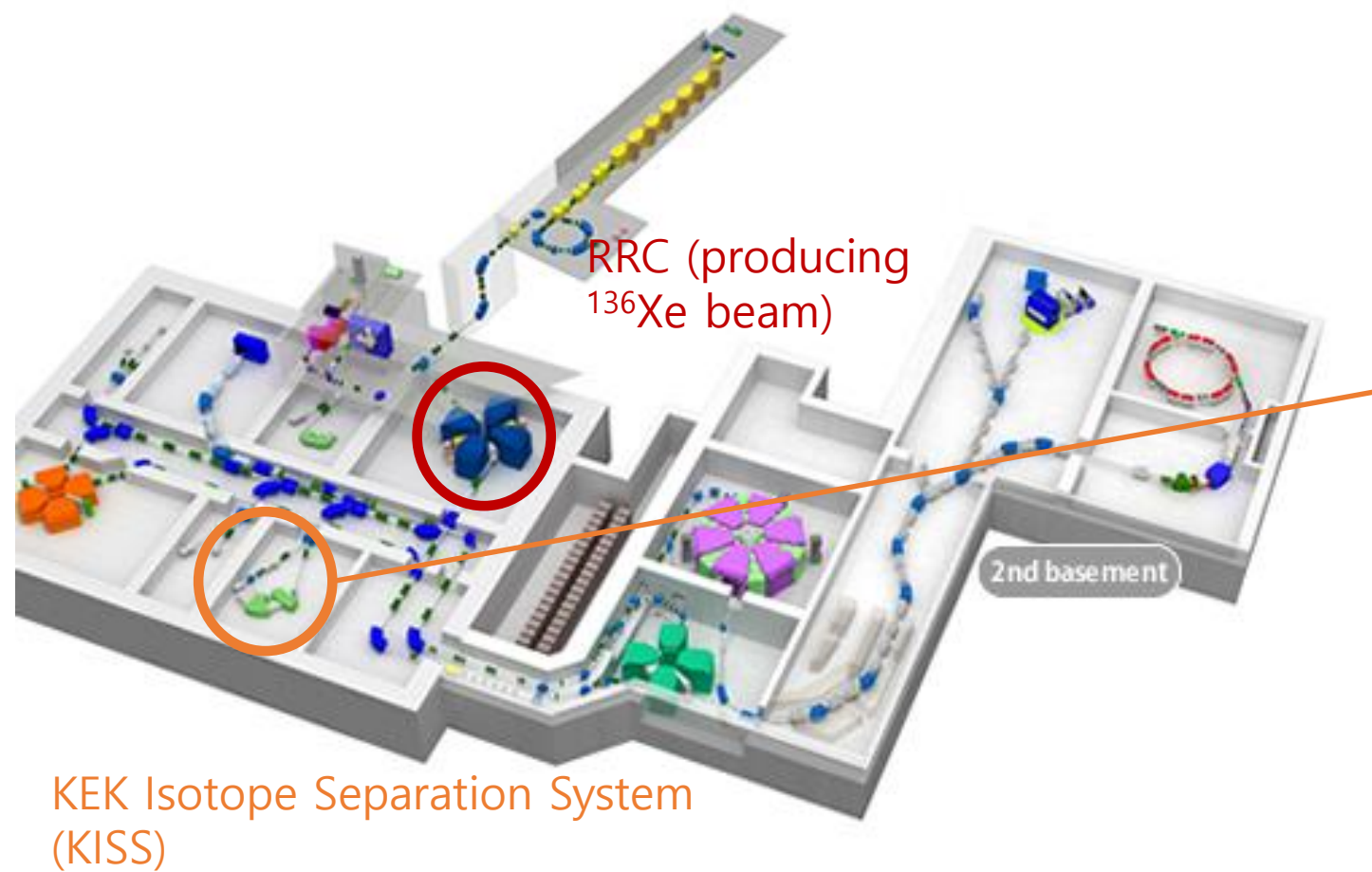
레이저 스펙트로스코피



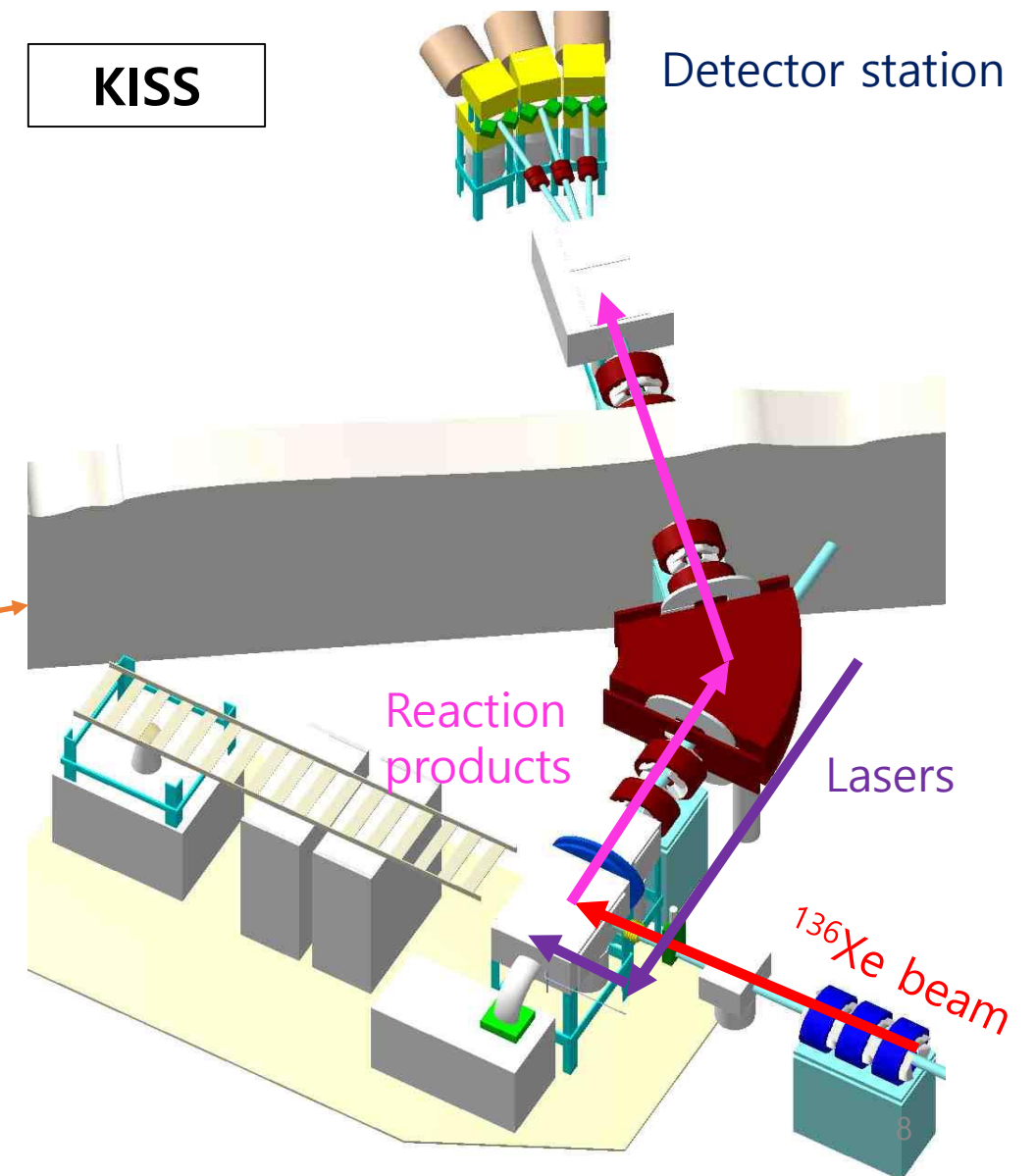
- 레이저 파장(주파수)에 따른 이온화되는 동위원소의 개수 측정
- 공명 파장(주파수)의 측정

일본 RIKEN 연구소의 KISS 시설

RIKEN RI Beam Factory

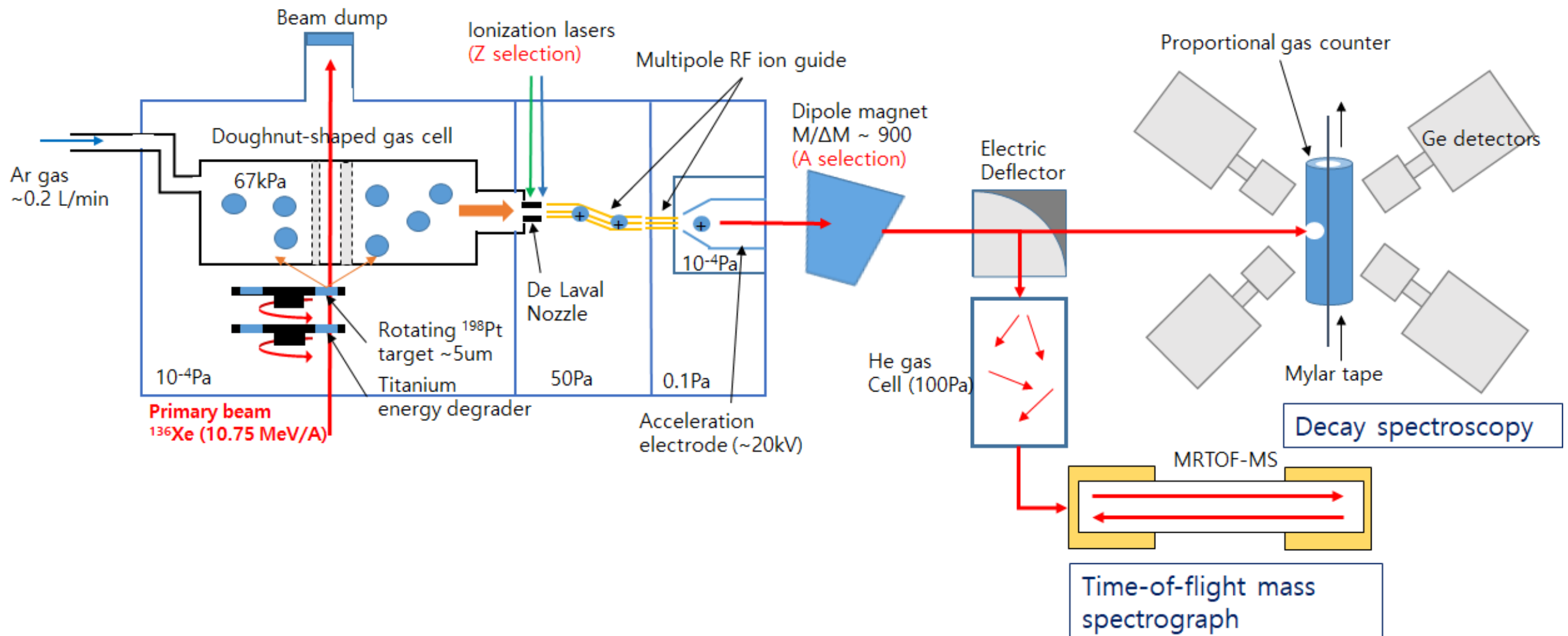


KISS



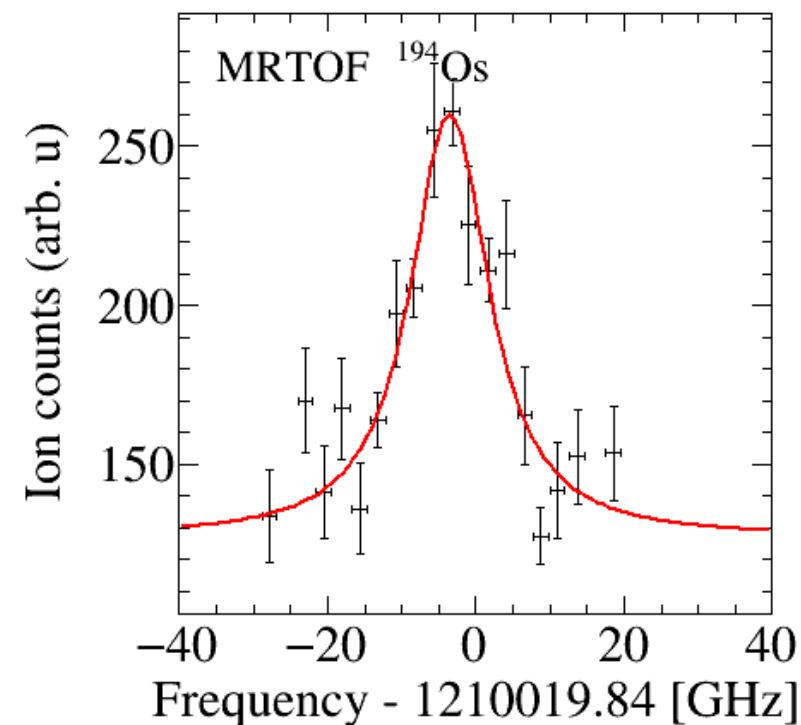
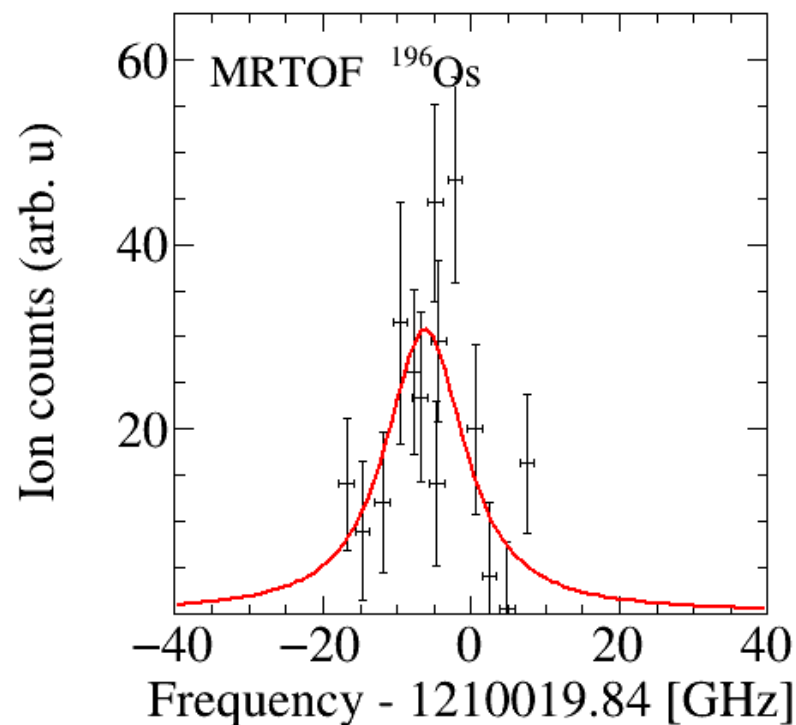
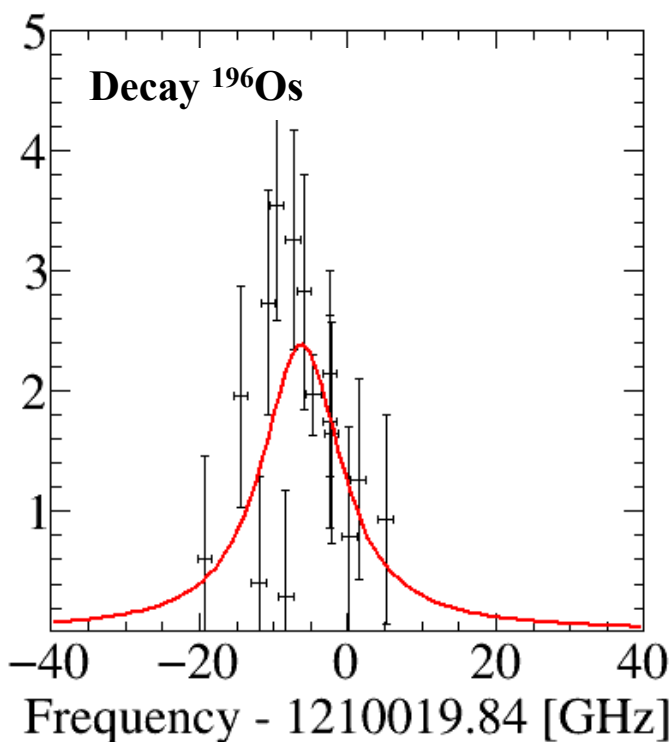
개념도

- 초미세구조의 레이저 스펙트로그래피



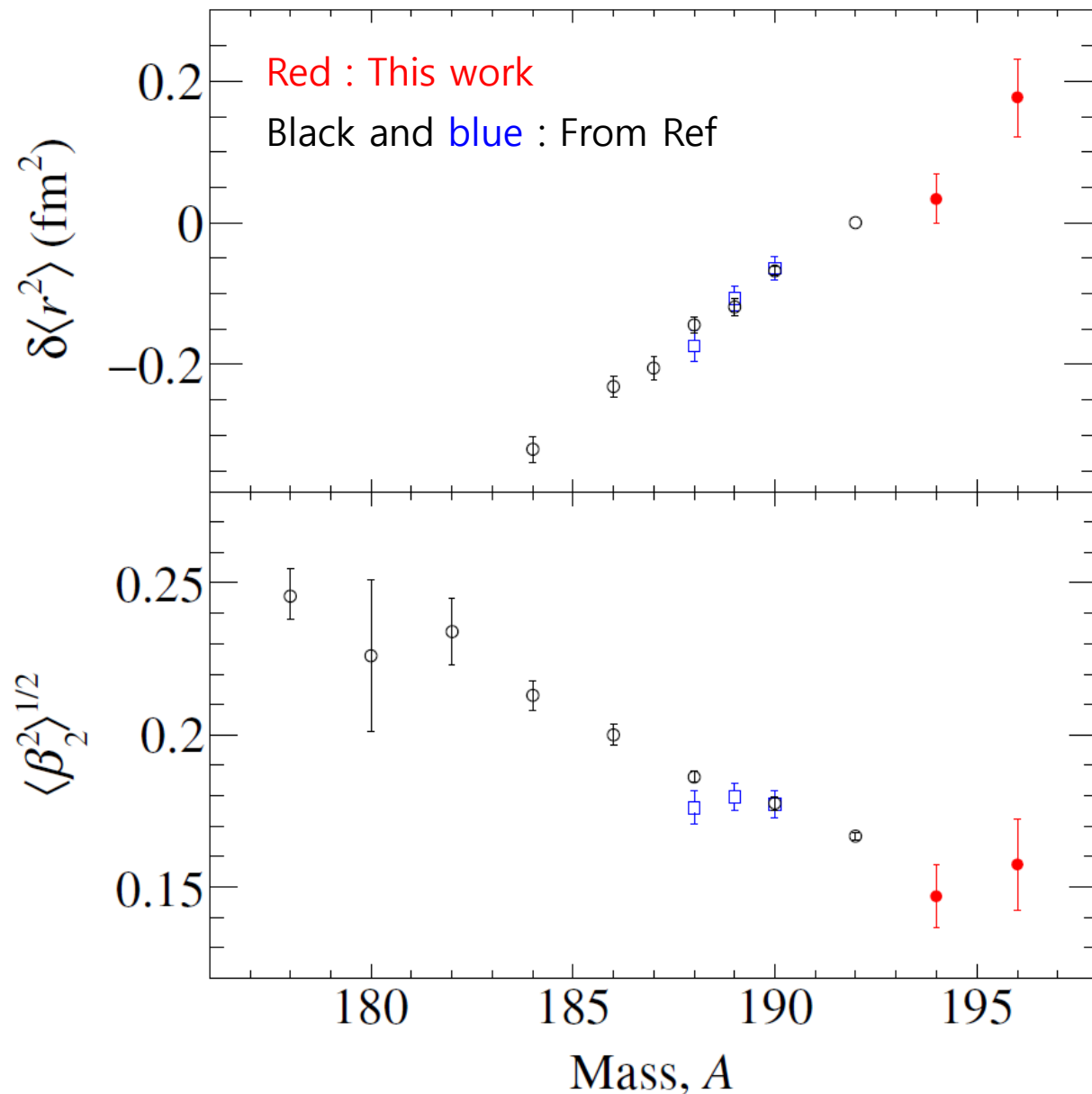
이온화 공명 곡선

이온화되는 원소의 개수



레이저 주파수

원자핵의 모양



H. Choi et al., Phys. Rev. C, 102, 034309 (2020)

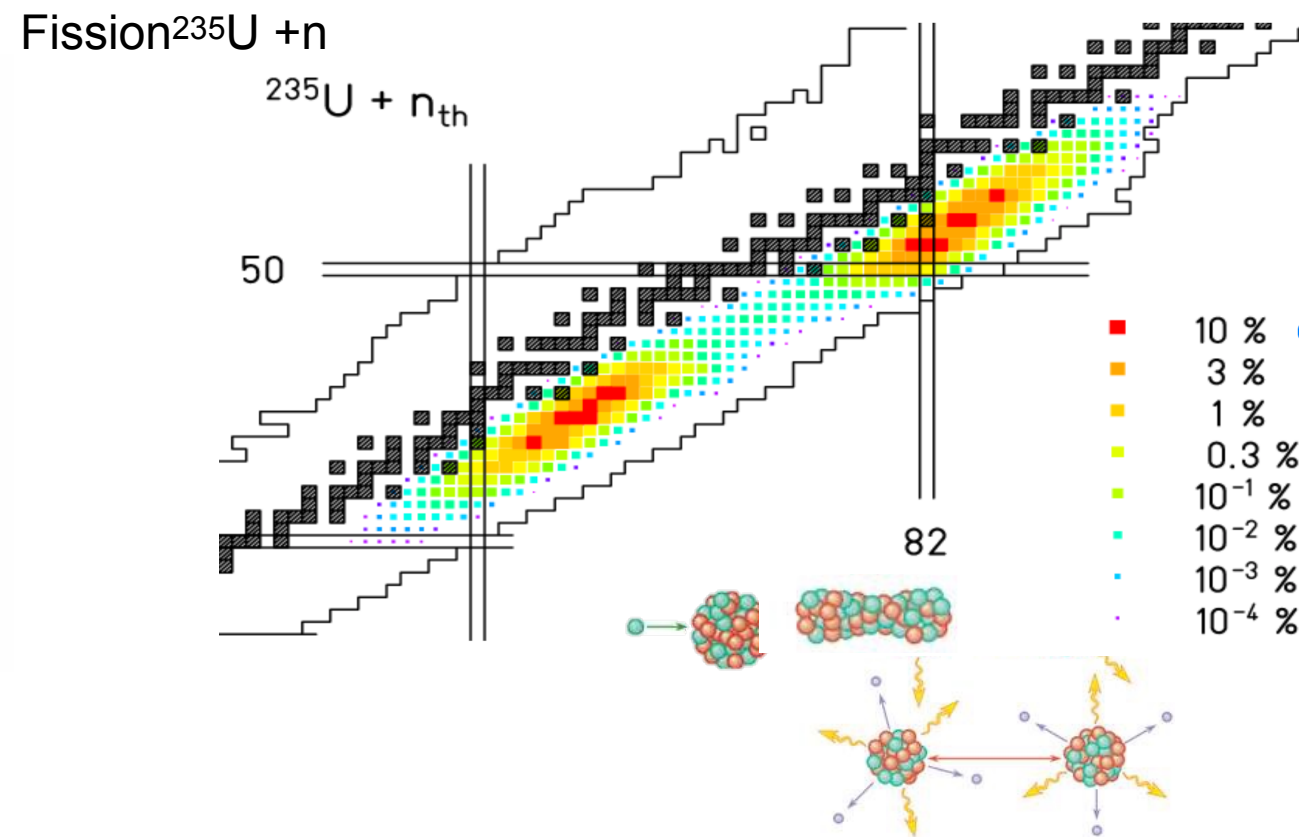
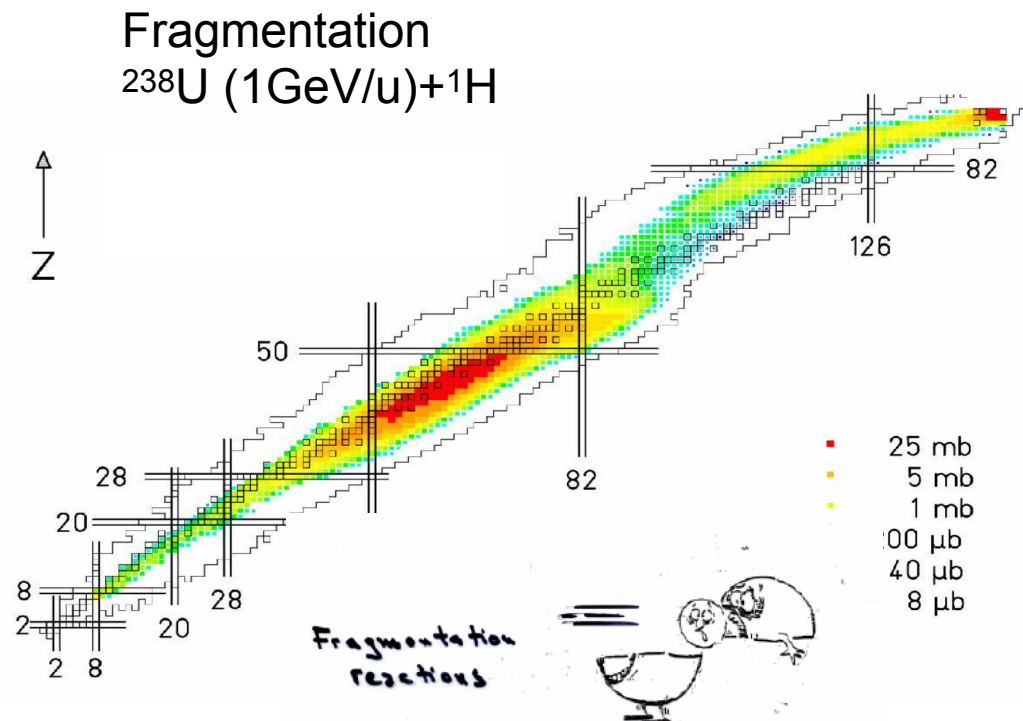
Table : $\langle \beta_2^2 \rangle^{1/2}$ values from this work and calculations

A	This work	Experiment	calculation			
			HF	SCCM	TRS	FRDM
194	0.147(10)	0.140(10)	0.14	0.14	0.16	0.153
196	0.157(15)	None		0.11	0.12	0.119

- $\delta\langle r^2 \rangle$ and $\langle \beta_2^2 \rangle^{1/2}$ are evaluated from IS, assuming axially deformed rotor
- $\langle \beta_2^2 \rangle^{1/2}$ of ¹⁹⁴Os is consistent with the recent experiment and theoretical calculations
- In the systematics, sudden change at A=194
→ shape transition to a less deformed configuration
- $\langle \beta_2^2 \rangle^{1/2}$ of ¹⁹⁶Os is experimentally determined for the first time
- Larger than theoretical predictions
→ possible broken axial symmetry

Multi-Nucleon Transfer 핵반응

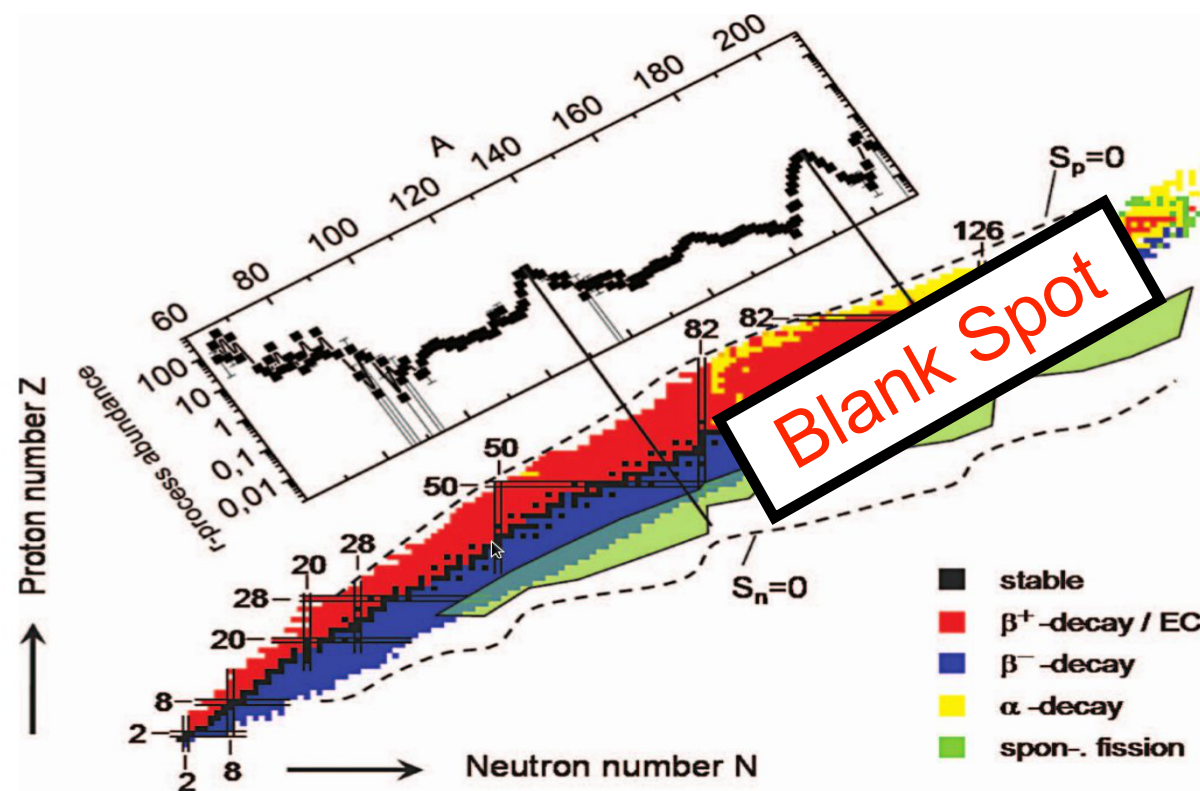
중성자 과잉 희귀동위원소 생성



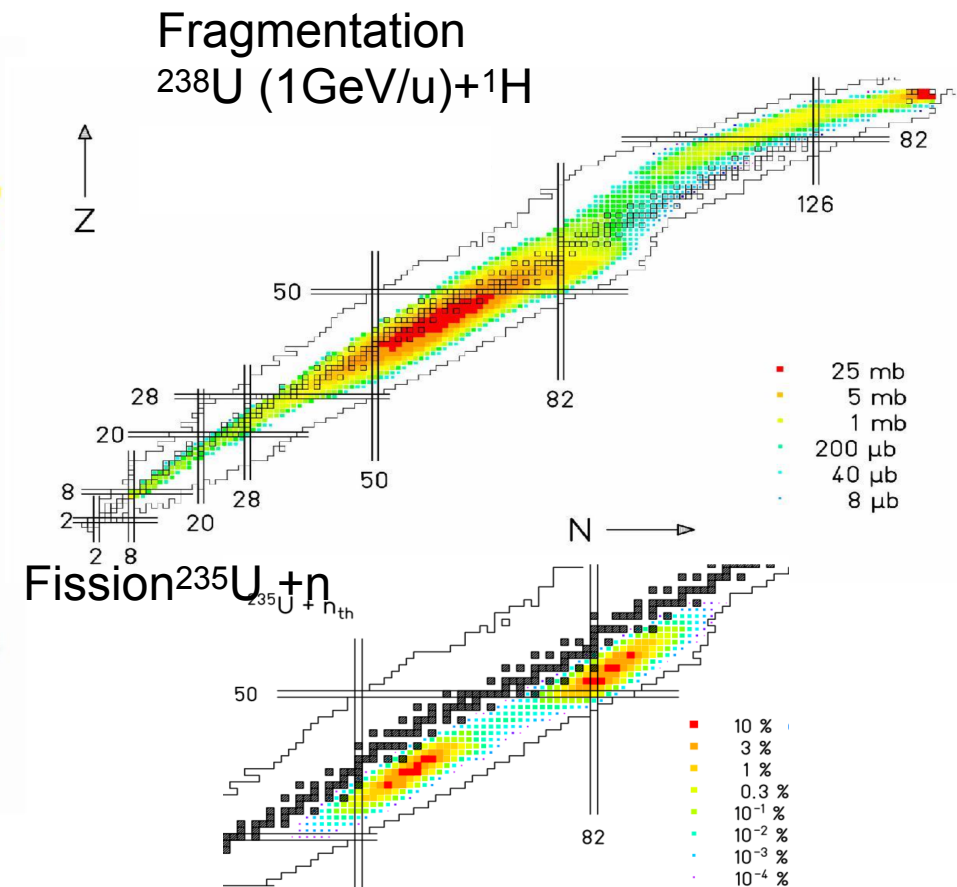
- 기존 방법에 의한 희귀동위원소 생성
- 넓지만 한정된 범위의 희귀동위원소 생성

Taïeb et al., NPA 724 (2003) 413
Ricciardi et al., PRC 73 (2006) 014607
Bernas et al., NPA 765 (2006) 197
Bernas et al., NPA 725 (2003) 213
Armbruster et al., PRL 93 (2004) 212701

N=126 빈공간

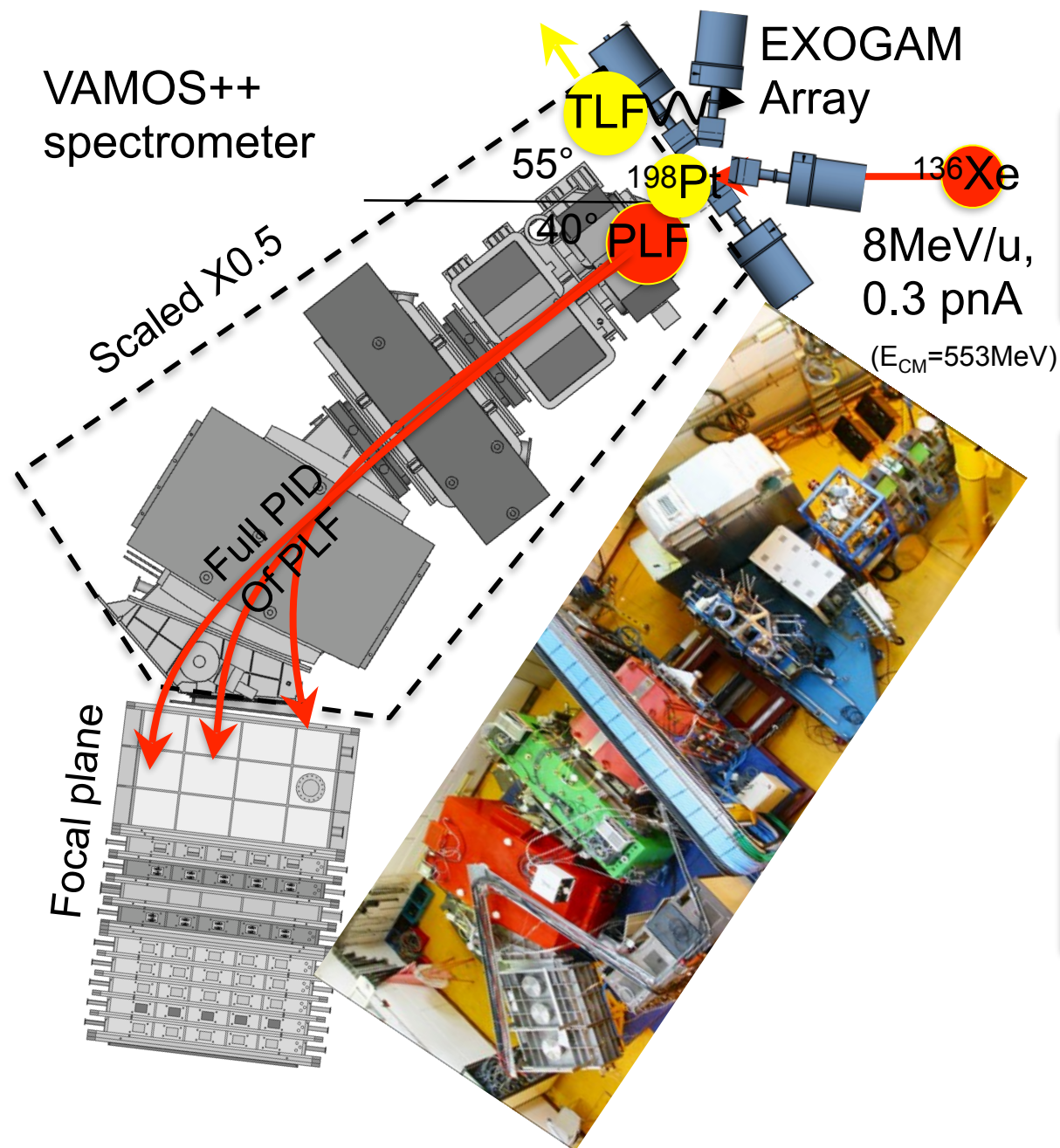


Reiner Krucken, Contemporary Physics Vol. 52, No. 2(2011) 101-120



- 통상의 방법으로 만들기 어려운 영역 → 부족한 연구 결과
- **MNT 반응을 이용하여 N=126 부근의 중성자 과잉 동위원소 생성 가능**

프랑스 GANIL 실험



Experimental Objective

Feasibility study for MNT for producing N~126
-> Cross section measurement of Pt-like

Challenges in measurement

1. Particle identification of PLF/TLF Z,A
2. Large spread (θ , $\mathbf{P}$) in reaction fragments

Solution

1. Wide acceptance spectrometer: VAMOS++
2. Ge detector-array : EXOGAM Ge clover array

Pathway for the Production of Neutron-Rich Isotopes around the $N = 126$ Shell Closure

Y. X. Watanabe,^{1,*} Y. H. Kim,^{2,3,†} S. C. Jeong,^{1,‡} Y. Hirayama,¹ N. Imai,^{1,§} H. Ishiyama,^{1,‡} H. S. Jung,¹ H. Miyatake,¹ S. Choi,^{2,3} J. S. Song,^{2,3,4} E. Clement,⁵ G. de France,⁵ A. Navin,^{5,||} M. Rejmund,⁵ C. Schmitt,⁵ G. Pollaro,⁶ L. Corradi,⁷ E. Fioretto,⁷ D. Montanari,⁸ M. Niikura,^{9,¶} D. Suzuki,^{9,**} H. Nishibata,¹⁰ and J. Takatsu¹⁰

¹*Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan*

²*Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*

³*Institute for Nuclear and Particle Astrophysics, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*

⁴*Institute for Basic Science, Daejeon 34047, Korea*

⁵*Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL), F-14076 Caen Cedex 5, France*

⁶*Dipartimento di Fisica, Università del Piemonte Orientale, I-125 Torino, Italy*

⁷*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy*

⁸*Dipartimento di Fisica, Università di Padova, I-35131 Padova, Italy*

¹⁰*Department of Physics, Osaka University, Osaka 560-0043, Japan*

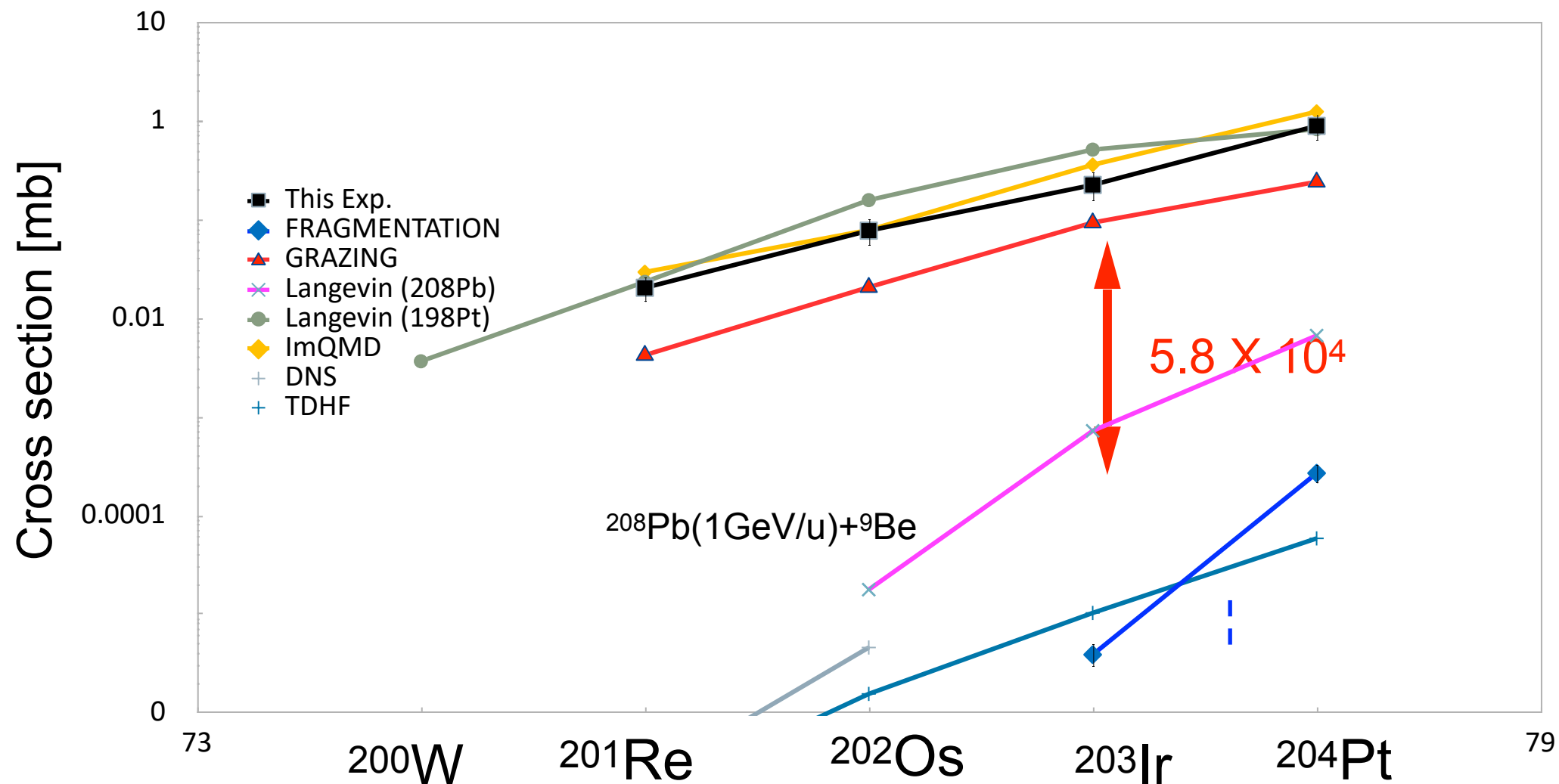
(Received 26 June 2015; published 23 October 2015)

Absolute cross sections for isotopically identified products formed in multinucleon transfer in the $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ system at ~ 8 MeV/nucleon are reported. The isotopic distributions obtained using a large acceptance spectrometer demonstrated the production of the “hard-to-reach” neutron-rich isotopes for $Z < 78$ around the $N = 126$ shell closure far from stability. The main contribution to the formation of these exotic nuclei is shown to arise in collisions with a small kinetic energy dissipation. The present experimental finding corroborates for the first time recent predictions that multinucleon transfer reactions would be the optimum method to populate and characterize neutron-rich isotopes around $N = 126$ which are crucial for understanding both astrophysically relevant processes and the evolution of “magic” numbers far from stability.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.115.172503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.172503)

PACS numbers: 24.10.-i, 25.70.Hi, 29.30.Aj

N=126 동위원소 생성



MNT 반응에서 충분한 개수의 동위원소 생성 가능 확인

→ 다음 단계 : N=126 동위원소들의 핵구조 연구

연금술의 비밀 풀릴까...금 원소합성 원자핵 생성

송고시간 | 2015-11-10 12:00



채새롬 기자

| 서울대 연구팀, 日·佛·伊와 공동연구 결과 발표

(서울=연합뉴스) 채새롬 기자 = 베일에 싸여 있는 금의 원소합성 과정에 중요한 역할을 하는 것으로 알려진 원자핵이 실험실에서 최초로 만들어졌다.

서울대는 물리천문학부 최선호 교수팀이 크세논과 백금을 충돌시켜 둘 사이의 여러 핵자가 이동하는 반응을 통해 중성자 개수가 126인 원자핵을 생성하고 이 단면적을 최초로 측정했다고 10일 밝혔다.

금과 백금 등을 포함해 아직 자연계에 존재하는 원소의 3분의 2는 그 생성원리가 제대로 밝혀지지 않은 상태다.

다만 과학자들은 우주에서 중성자수가 126인 불안정한 중성자 과잉핵(양성자 개수에 비해 특정범위를 넘어 중성자가 더 많은 원자핵)들이 차례로 붕괴하는 과정에서 금이나 백금 등이 만들어졌다고 추측할 뿐이다.

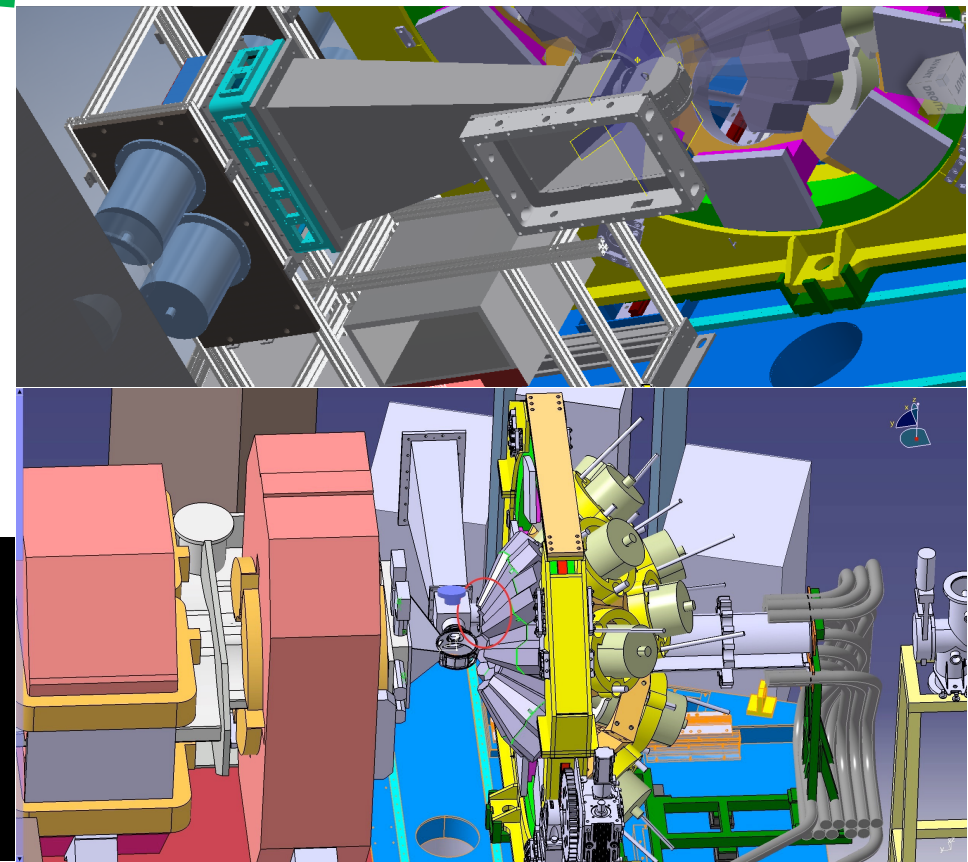
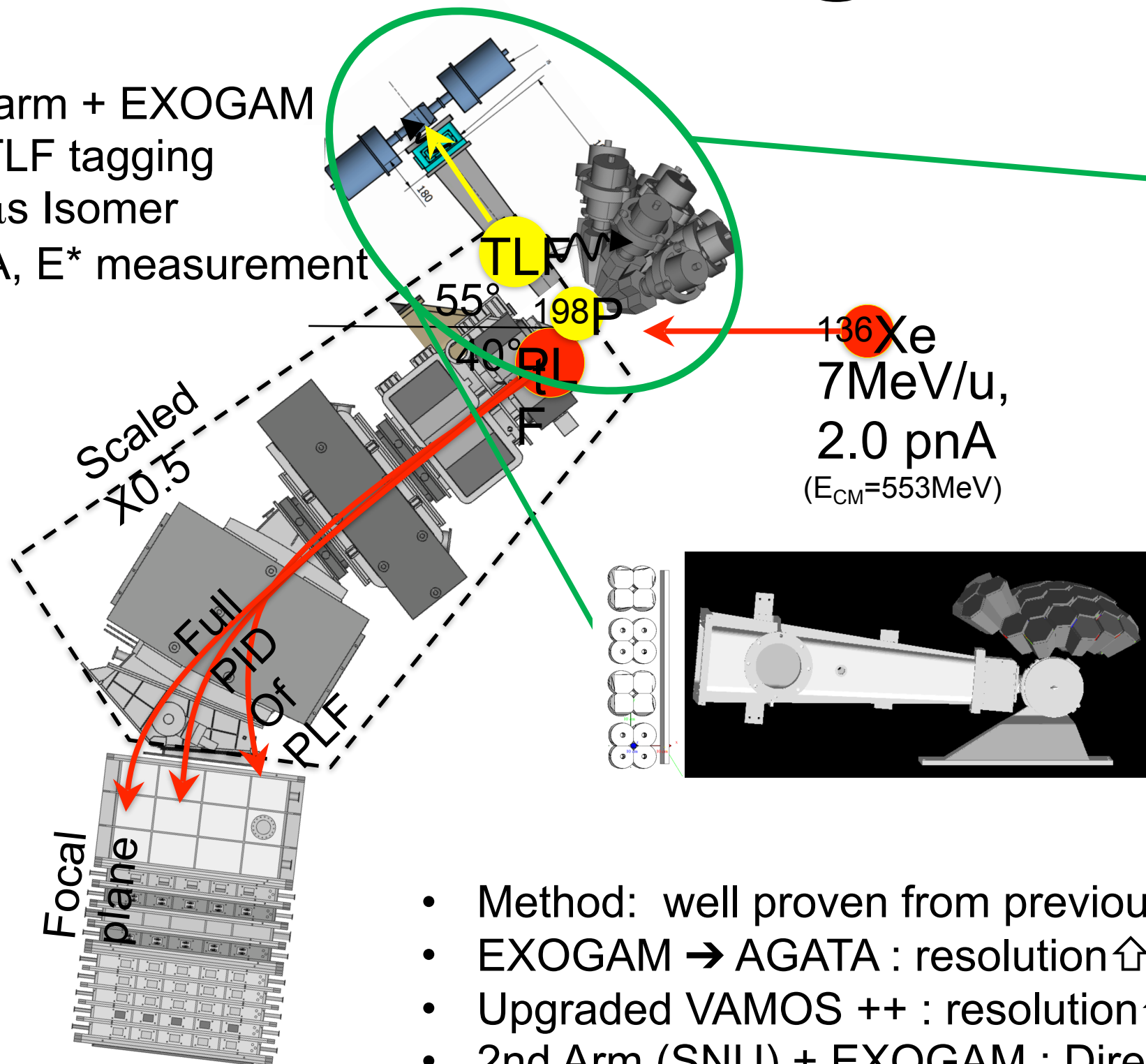
때문에 과학계에서는 이 이론을 증명하기 위해 우선 중성자수가 126인 원자핵을 만들려고 노력해왔으나 그동안 성공하지 못했다.

프랑스 GANIL 실험 2

2nd arm + EXOGAM

→ TLF tagging

- μ s Isomer
- A, E* measurement



- Method: well proven from previous experiment!
- EXOGAM → AGATA : resolution $\uparrow$ + efficiency $\uparrow$
- Upgraded VAMOS ++ : resolution $\uparrow$ + Count rate $\uparrow$
- 2nd Arm (SNU) + EXOGAM : Direct TLF tagging

요약 및 정리 1

- RAON 1단계 완공
 - 저에너지 실험용 빔 공급 입박
 - RAON+KoBRA를 활용하는 연구 주제는 지속적으로 발굴 중
 - Loi 11건 + 추가적인 실험 아이디어 구상
- 실험에 필요한 장비, 검출기 등의 연구 개발
 - 현재 구상/설계 진행
 - 핵구조, 핵반응 연구에 필요한 종합적인 연구 가능
- 안정동위원소를 활용한 Commissioning
 - RAON 및 KoBRA의 성능 확인, 개선
 - 각종 실험장비, 검출기 등의 성능 확인
 - 다양한 실험방법에 관한 연구/개발, 경험 축적
- 희귀동위원소 빔을 활용한 연구 준비

요약 및 정리 2

- 서울대학교 그룹의 연구 활동
 - 해외 중이온가속기를 이용한 연구
 - EURICA @ RIBF
 - Laser Ionization Spectroscopy @ KISS
 - Multi-Nucleon Transfer @ GANIL
 - 중이온가속기 활용 연구 인력 양성
 - 8명의 박사 졸업: 송정석, 추경호, 김선지, 김윙희, 황종원, 하정수, 배성한, 채현우, 최현석
 - 지속적인 인력 양성 필요

감사합니다