

RAON-4: Collinear Laser Spectroscopy(CLS)

**중이온가속기 활용 국제공동연구기획사업
연차 워크숍**

CLS Group

2021. 11. 18

RAON-4 (CLS)

■ 연구개발목표

국제 협력을 통해 가속된 동위원소를 대상으로 레이저 분광 (CLS) 측정 연구를 수행하여, 향후 RAON에서 이를 활용할 수 있는 **전문인력 양성**

■ 성과목표

RAON에 적용될 레이저 분광 측정 기술 확보 및 CLS 운용 관련 국제 경쟁력 확보 방안 마련

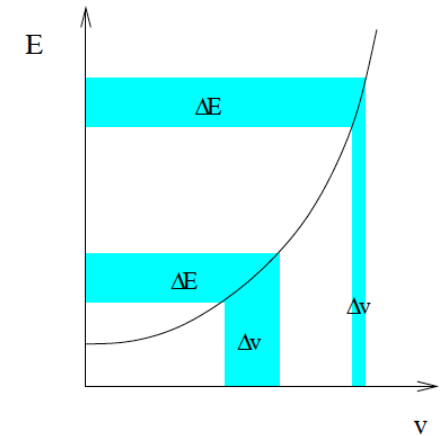
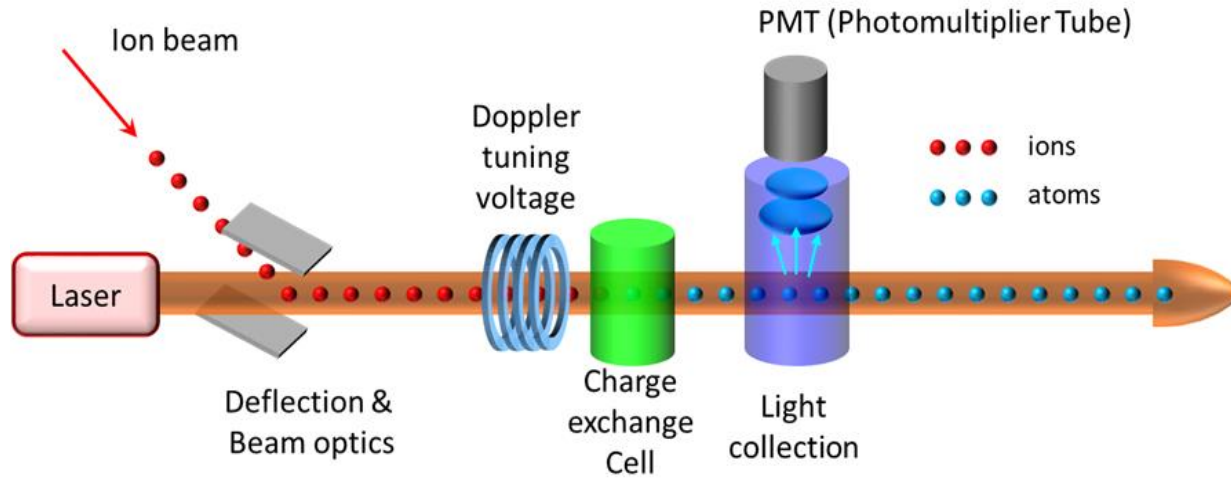
■ 연구내용

- 해외 중이온 가속기 연구소와 협력하여 RAON에서 활용할 수 있는 CLS 장치 공동 개발
 - 해외 가속기 연구소와의 교류협력 방안 수립
 - 국제공동연구 과제 발굴 및 수립
 - 국제공동연구 과제를 통한 대학원생 및 박사 후 과정 인력 양성
- CLS 활용 관련 **미래 연구 주제 발굴**
 - 해외 시설에서 진행되는 CLS 실험과 차별화된 실험 제안

■ 연구성과물:

- 국제공동연구 과제계획서
- 연수결과보고서
- 출판논문
- 연구의향서

Fast beam Collinear Laser Spectroscopy (CLS)

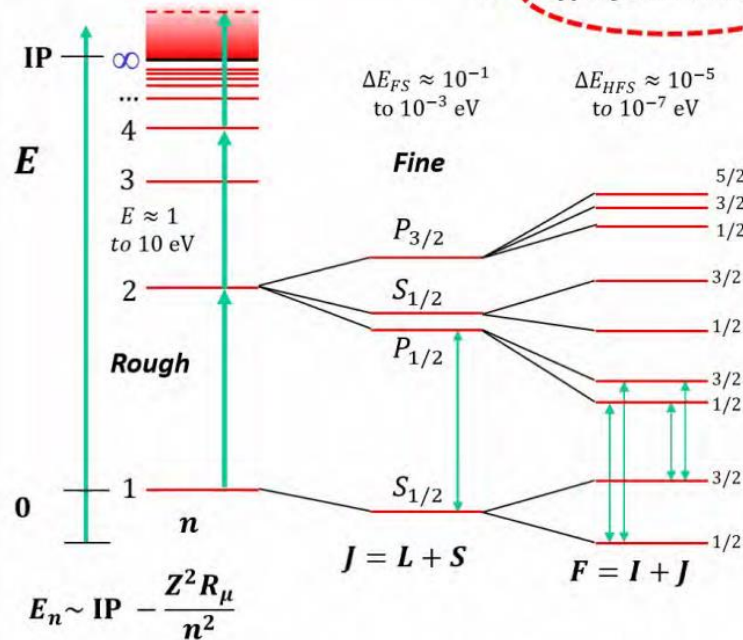


(a) Reduction of velocity spread with increase of beam energy

고분해능 레이저 분광(CLS)을 통한 원자핵 연구

Atomic Structure & High Resolution Spectroscopy

1. FS & HFS

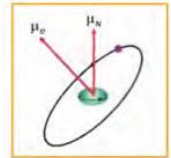


& **Hyperfine Structure**

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$$

$$\Delta E_{HFS} = \Delta E_\mu + \Delta E_Q$$

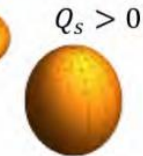
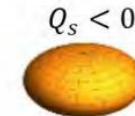
$$= A \cdot \frac{C}{2} + B \cdot \frac{3(C+1) - 2I(I+1)J(J+1)}{8I(2I-1)J(2J-1)}$$



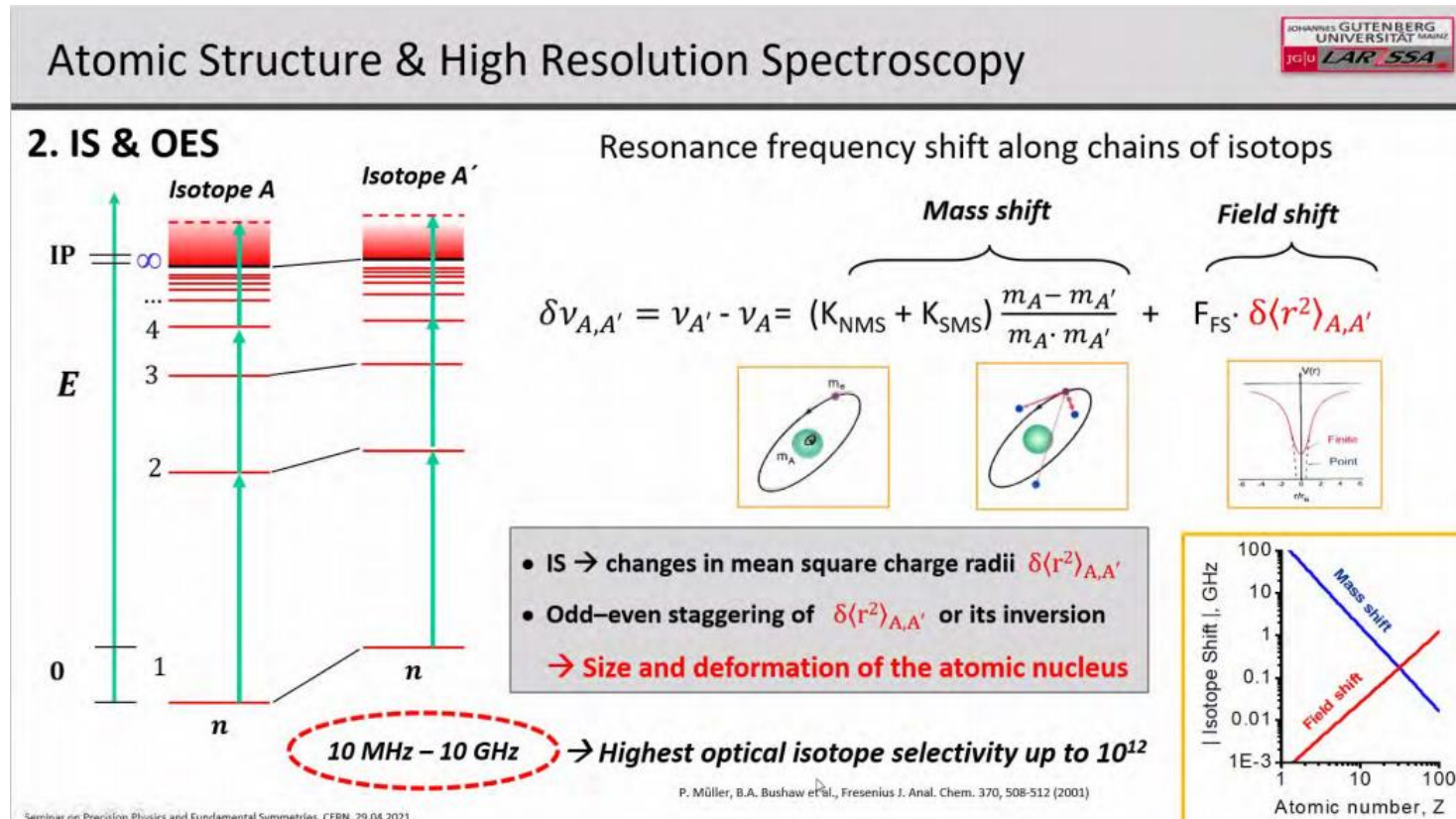
Magnetic dipole & Electric quadrupol
moment of the atomic nucleus

$$A = \frac{\mu_I \cdot \overline{H(0)}}{I \cdot J}$$

$$B = e \cdot Q_s \left\langle \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right\rangle_{r=0}$$



핵의 크기 및 변형 연구



Laser Spectroscopy on Exotic Isotopes along the Nuclear Chart

Towards a complete understanding of nuclear structure
through **resonant interactions** between laser light and atoms

Occurrence of flip flop behaviour
of nuclear shape in Hg ($Z=80$)

Verification of a nuclear
sub-shell closure at $Z = 64$

Evidence for tri-axial nuclear
shapes (^{112}Cd -region)

Charge radii of halo
nuclei (^{11}Li -region)

^{11}Li

Proof of isomerism - shape
coexistence (^{65}Ni -region)

High res. spectroscopy
of actinides towards
Super Heavies ($Z \geq 100$)

Detection of nuclear octupole
deformation (^{225}Ra -region)

Primary Prerequisites:

- Isobarically pure preparation of the exotic isotopes
- High resolution studies on rare commonly short lived species
- once again: knowledge of the atomic structure of exotic element

H.-J. Kluge, W. Nörtershäuser / Spectrochim Acta B 58, 1031 (2003)

K. Blaum, J. Dilling and W. Nörtershäuser, Phys. Scr. T152 (2013)

H.-J. Kluge, Physik Journal 19 (8/9), 48 (2020)

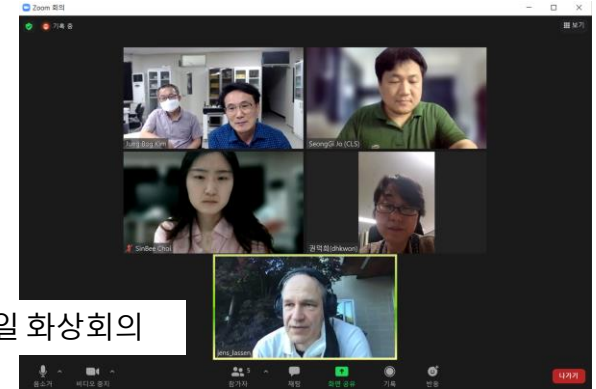
RAON-4 (CLS) 국제공동연구그룹

• 국내 그룹

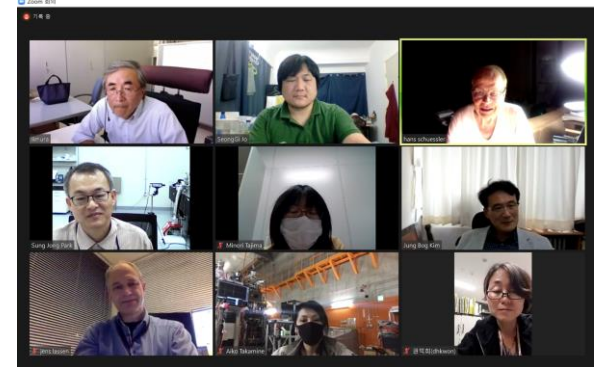
- 김중복 (한국교원대학교)
- 권덕희 (한국원자력연구원)
- 조성기 (중앙대학교)
- 최신비 (한국교원대학교)
- 국내 전문가 확보 예정

• 해외 그룹

- Jens Lassen, Phil Levy, Alex Gottberg (TRIUMF)
- Aiko Takamine (RIKEN)
- Imura (JAEA)
- Bruce Marsh (CERN ISOLDE)
- Klaus Wendt (Mainz University)
- Kei Minamisini (MSU)
- Hans Schuessler (Texas A&M)

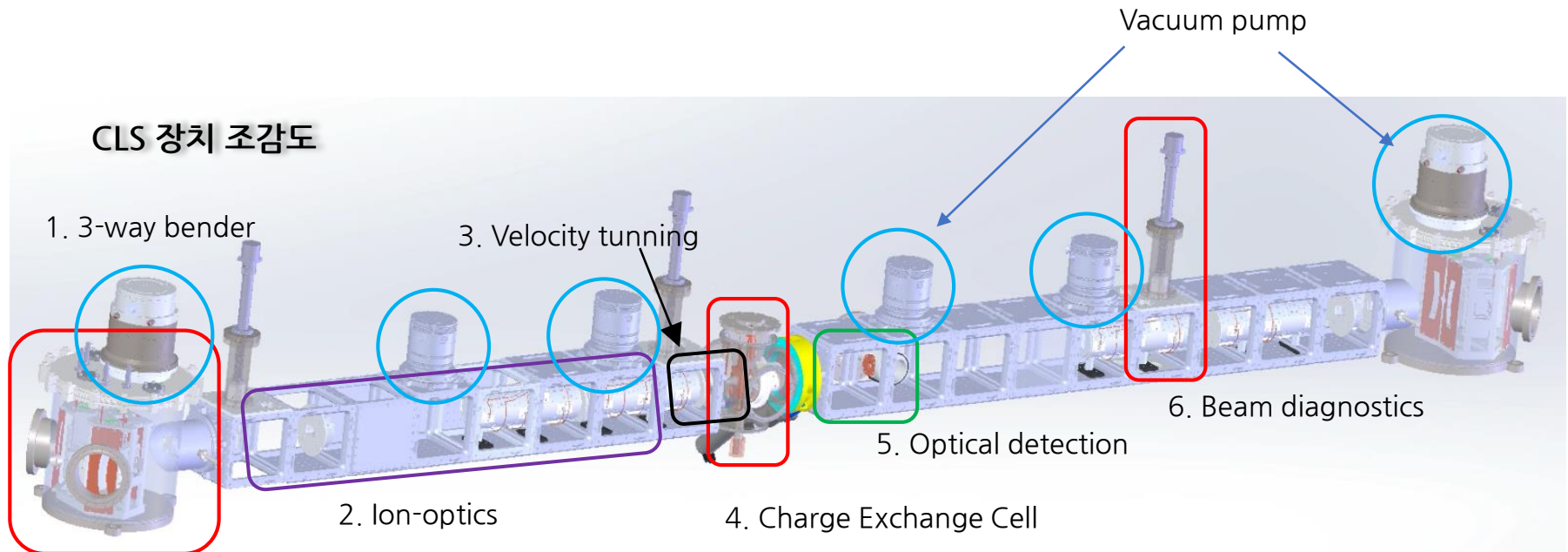


2021년 6월 24일 화상회의



2021년 10월 14일 화상회의

주요 연구 성과: CLS 장치 구축 과정 참여

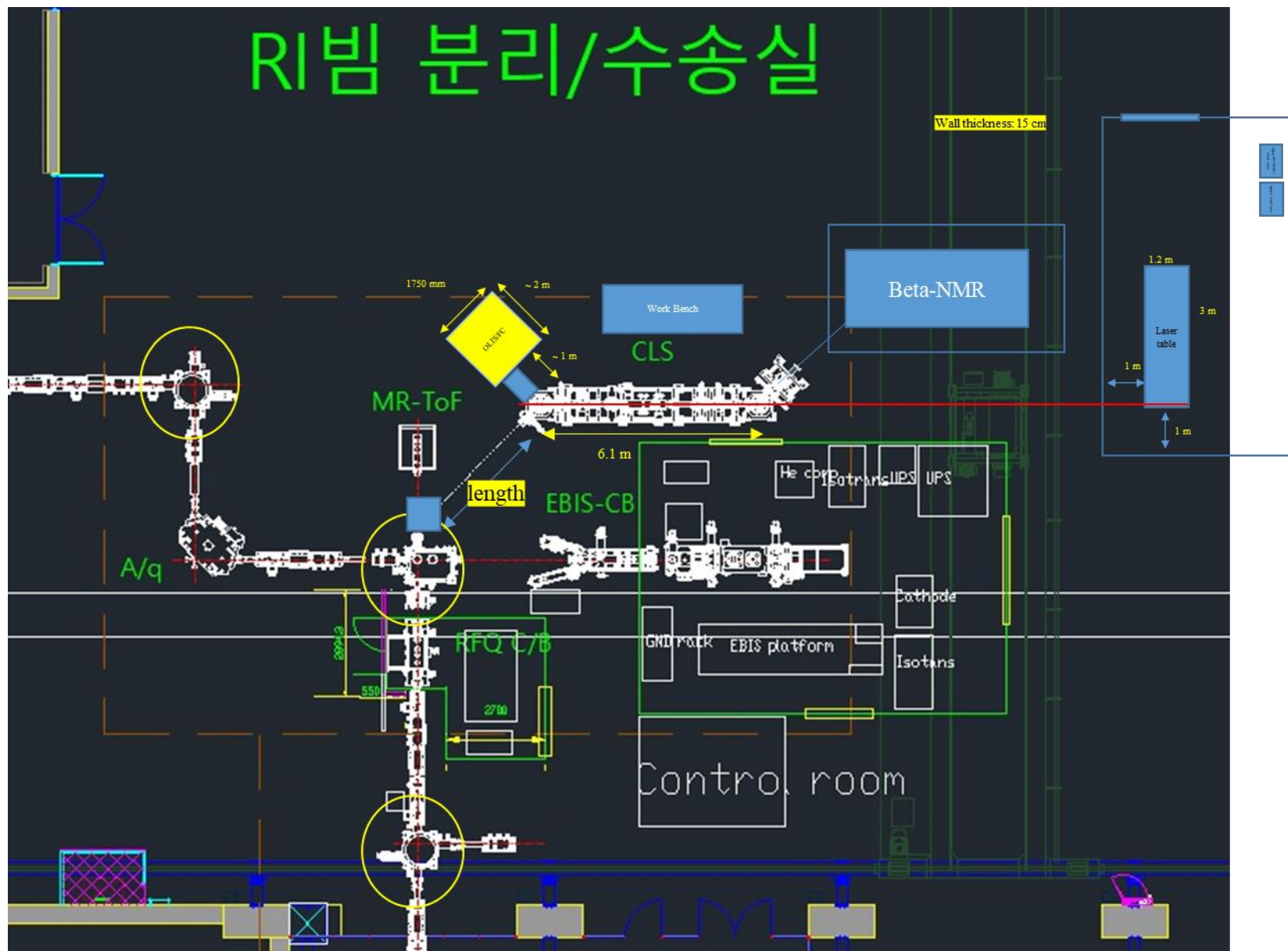


1. 3-way bender: Ion-Beam(IB)의 진행 경로를 휘어 laser와 동축상으로 진행하게 함
2. Ion-optics: 자기장을 이용해 IB의 모양 조절
3. Velocity tuning (Accelerator/Decelerator): IB에 고전압 전기장을 가하여 속도 조절 (약 ± 10 kV)
4. Charge Exchange Cell: IB를 Rb의 증기 제트 사이로 통과시켜 전하 교환을 통해 중성화 함
5. Optical detection part: 레이저와 원자빔 또는 이온빔이 반응하여 발생하는 광신호 측정
6. Beam diagnostics: Faraday-Cup (IB의 전하량 측정) + Beam profile monitor (IB의 모양 측정)

▪ TRIUMF 에서 공동연구 수행

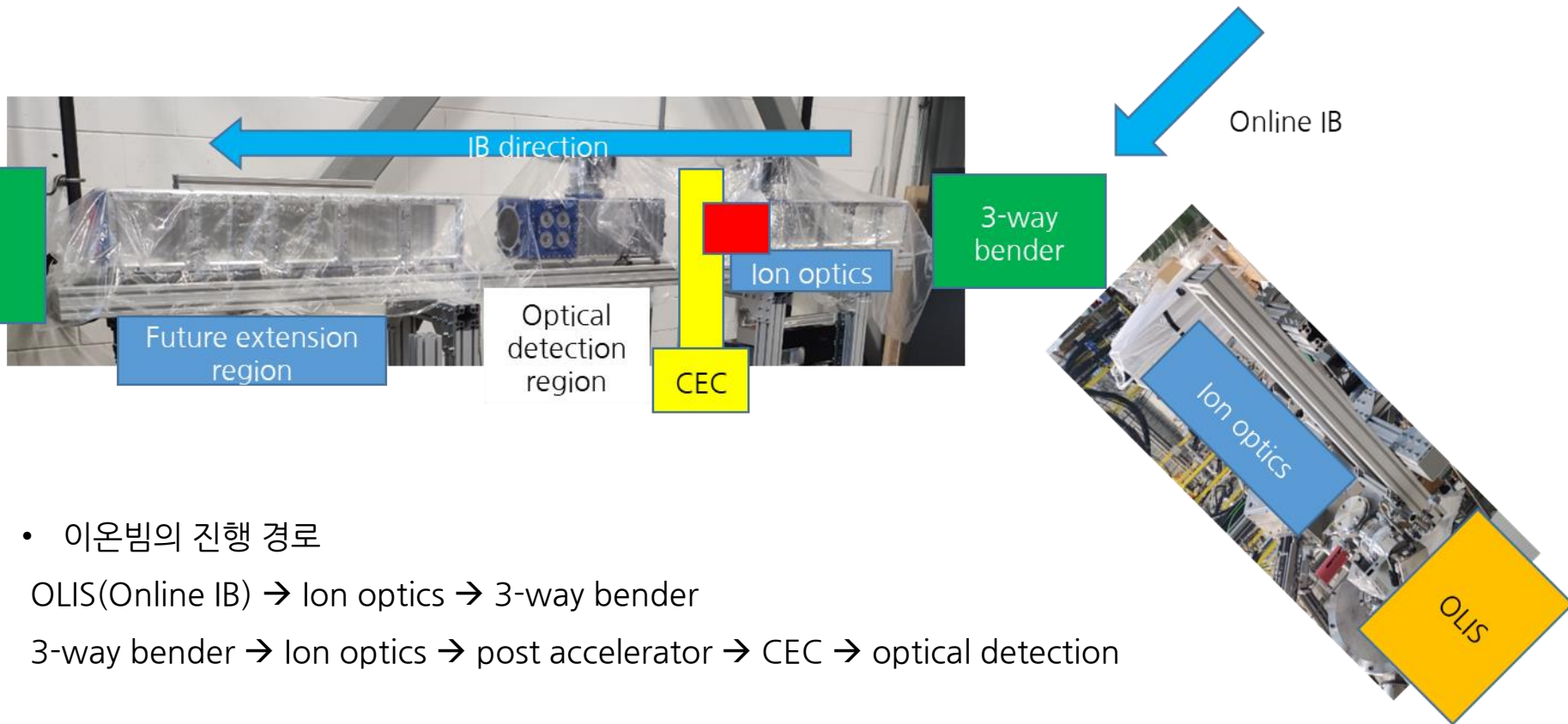
- 박사 후 연구원 TRIUMF에 파견하여 CLS 장치 공동 연구개발에 참여 - 전문인력 양성 차원
- RISP와 TRIUMF간 MOU 체결 및 CLS 제작을 위한 MOU 부속서 체결

CLS system in RAON experimental hall



주요 연구 성과

CLS system 장치 구축 중 (12월 납품 예정)



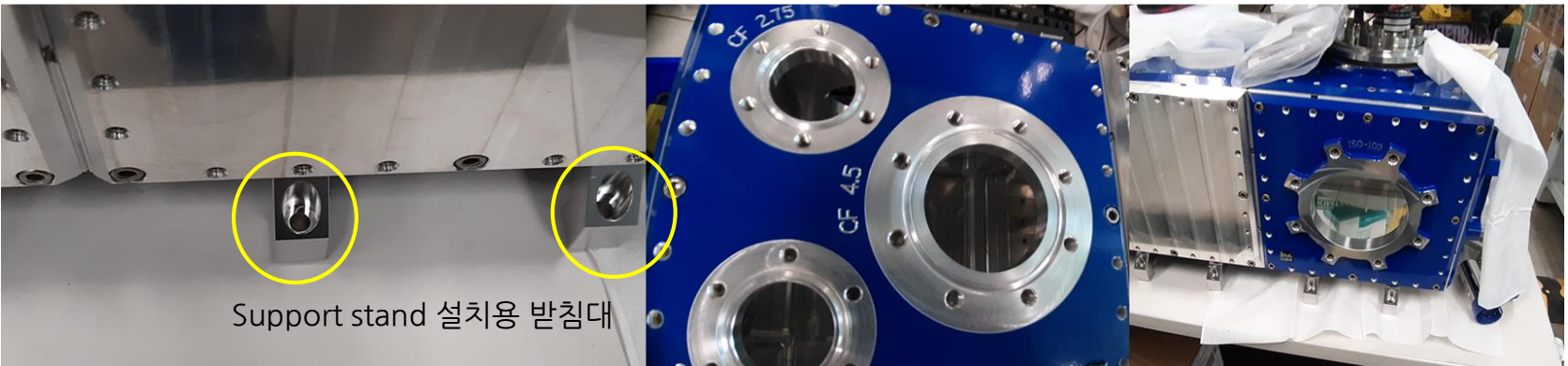
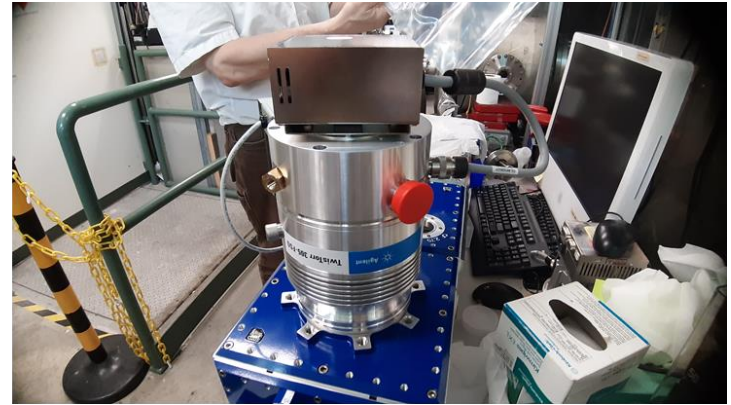
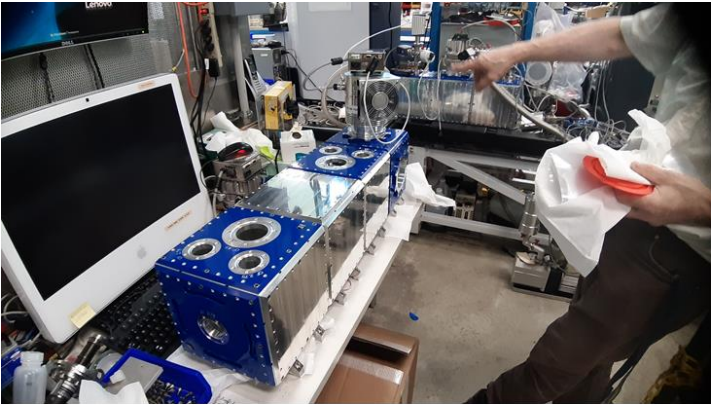
- 이온빔의 진행 경로

OLIS(Online IB) → Ion optics → 3-way bender

3-way bender → Ion optics → post accelerator → CEC → optical detection

주요 연구 성과

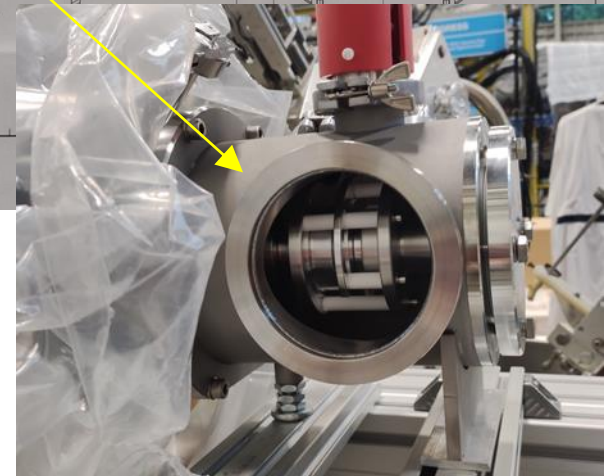
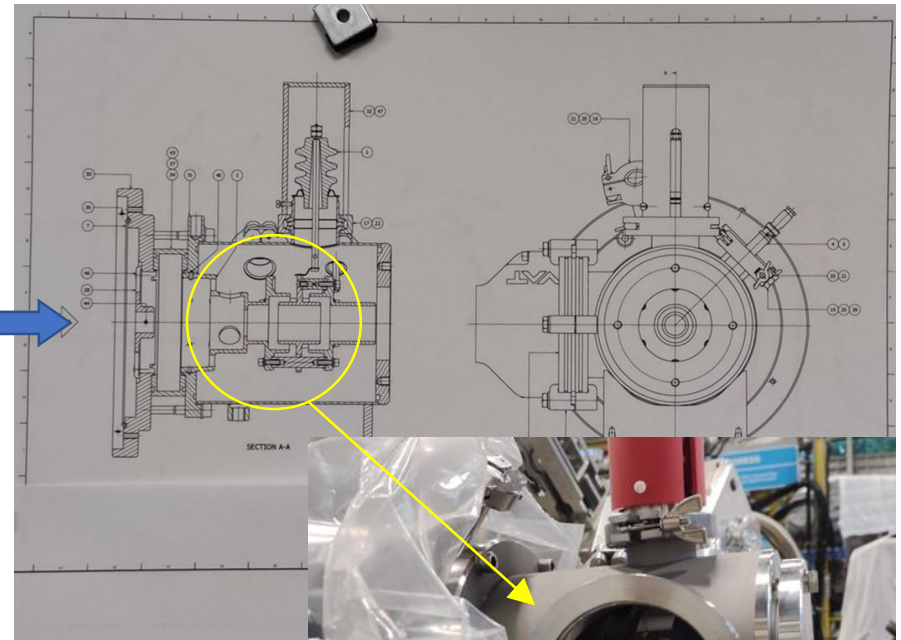
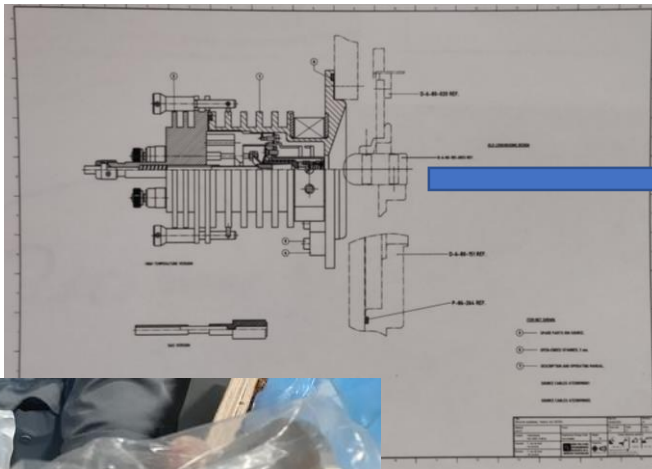
진공 시스템



- TRIUMF의 TISA 빔라인과 RAON의 CLS system에 사용할 진공 cube, 터보 분자 펌프 들의 사진
- Stand와 연결할 받침대와 내부 실험 장치와 연결할 flange hall, 진공 펌프와의 연결 flange hall 들을 보여준다.

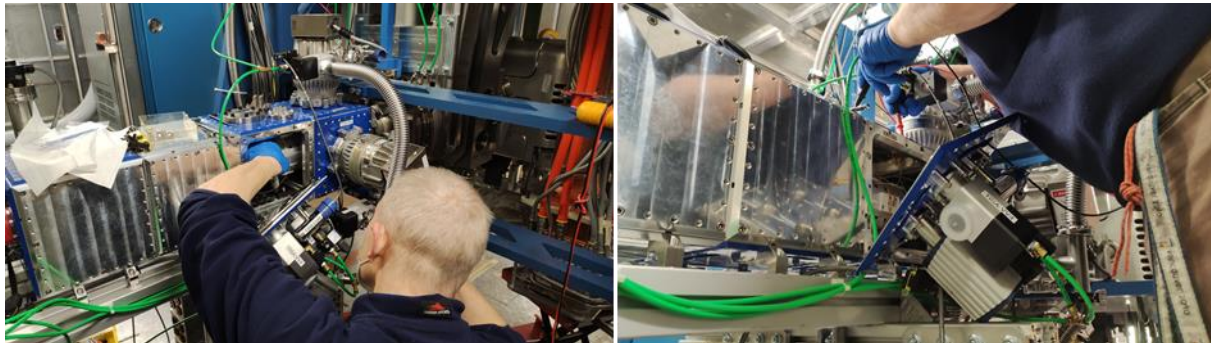
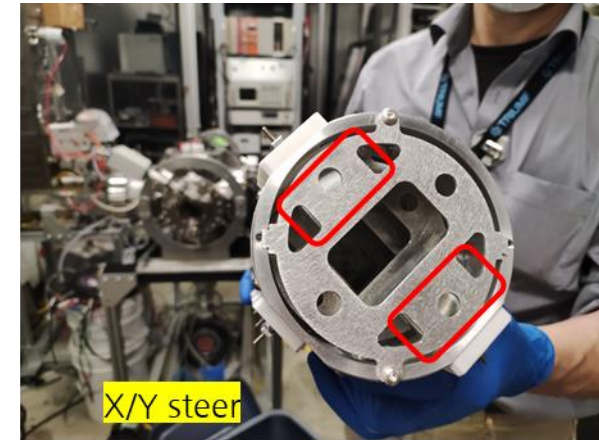
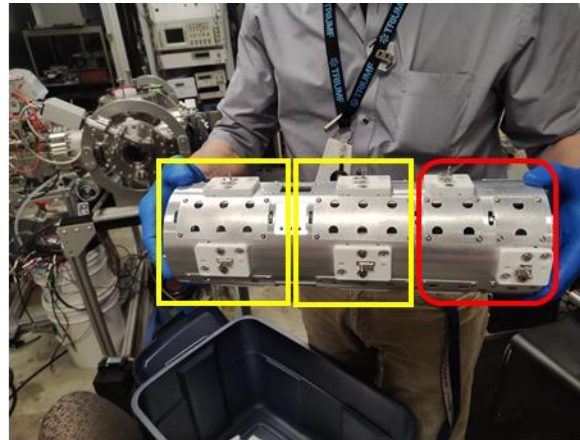
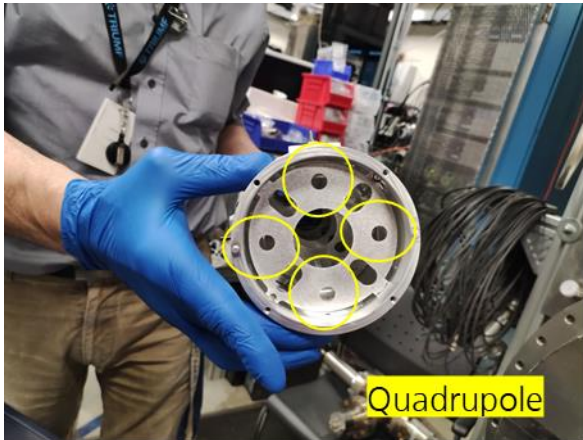
주요 연구 성과

Off-Line Ion Source (OLIS)



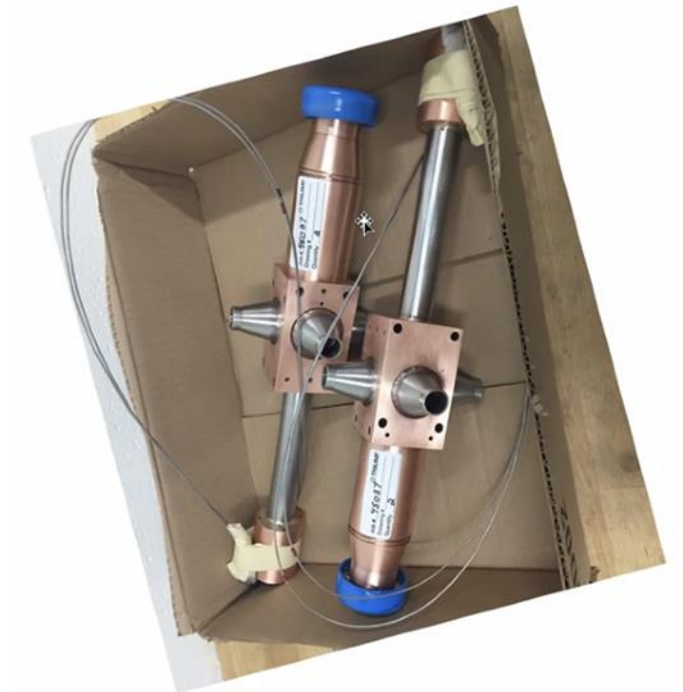
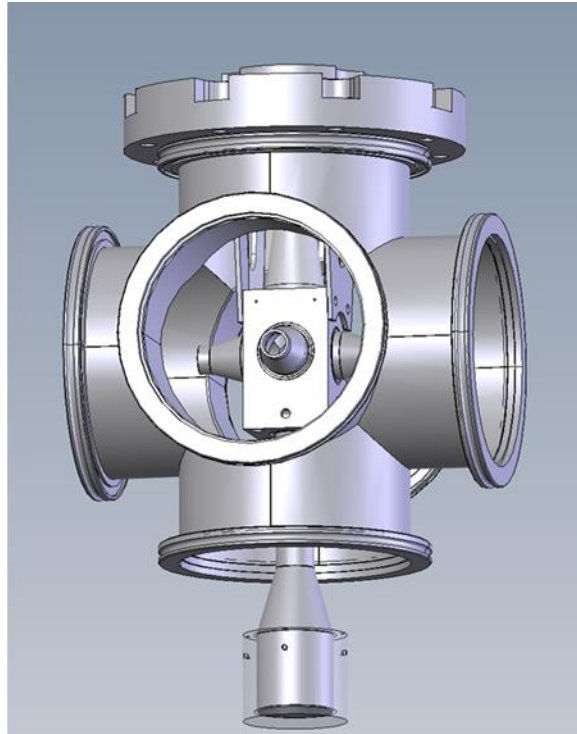
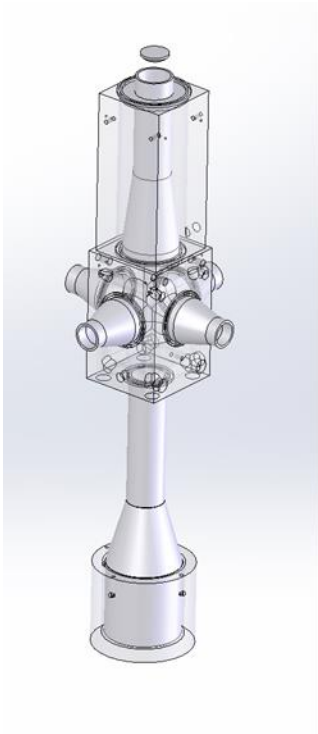
주요 연구 성과

Ion optics unit (Quadrupole, X/Y steer)



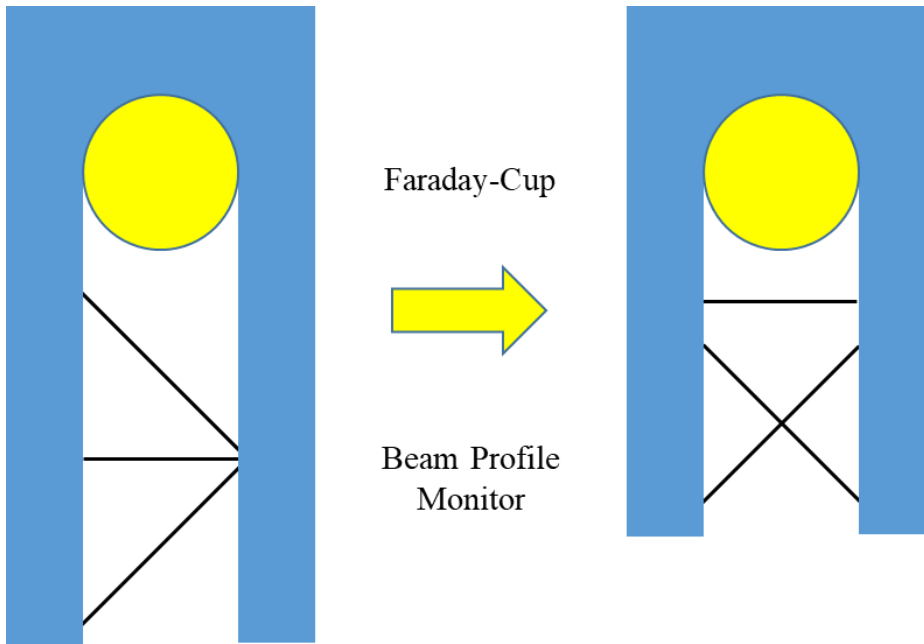
주요 연구 성과

Charge exchange cell (CEC)

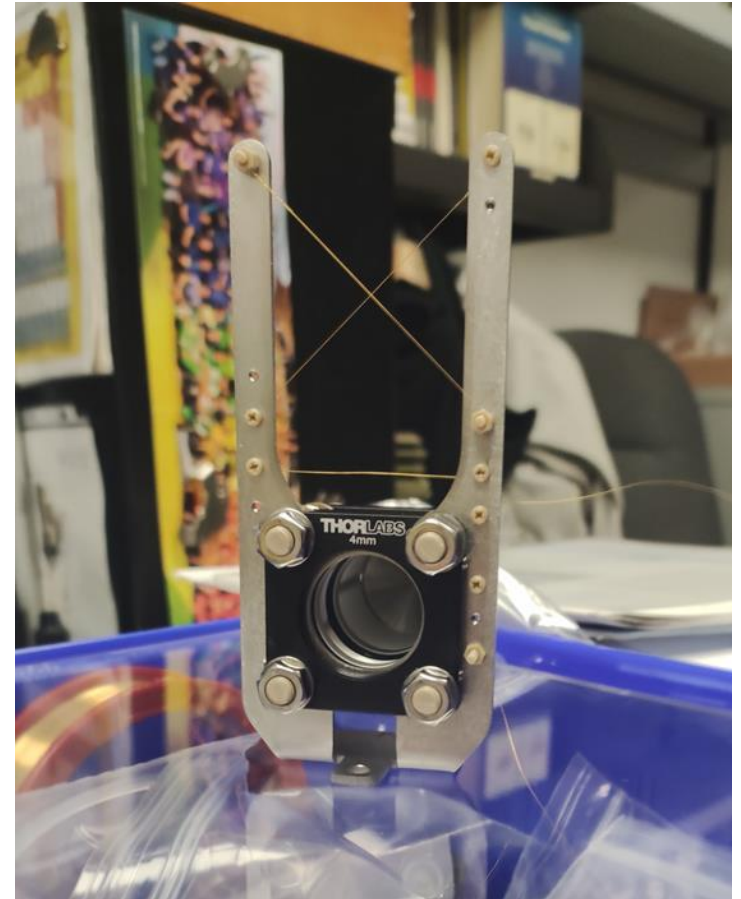


주요 연구 성과

빔 진단장치 (FC, BPM) 디자인 변경



- Faraday-Cup (FC): IB current 측정
- Beam Profile Monitor (BPM): IB 형태 측정
- TISA beam line에서 테스트 후 CLS 장치용 제작 예정



2021 주요 실적

• 그룹 회의

- 2021년 6월 24일 (TRIUMF와 CLS 공동 연구개발 회의) : 온라인 Zoom Meeting 프로그램을 통하여 Jens Lassen (TRIUMF) / 김중복, 박성중, 조성기, 최신비 등이 참석하여 CLS 장치의 현재 진행사항과 제작 방안 논의
- 2021년 10월 14일 (La 이온빔을 이용한 국제 공동연구 회의): 온라인 Zoom Meeting 프로그램을 통하여 Texas A&M University _ TAMU (Schuessler), Japan Atomic Energy Agency _ JAEA (Iimura), RIKEN (Takamine, Tajima), TRIUMF (Lassen), IBS (Park, Jo), KNUE (Kim), KAERI (Kwon) 등이 참석하여 La 이온빔을 이용한 국제 공동연구 방안 협의
- 2021년 11월 11일 (La 이온빔을 이용한 국제 공동연구 회의): 온라인 Zoom Meeting 프로그램을 통하여 RIKEN (Tajima), JAEA (Iimura), TRIUMF (Lassen), IBS (Park, Jo), KNUE (Kim, Choi) 등이 참석하여 현재 CLS 제작 현황을 확인하고 앞으로 연구 활용 계획을 논의

• 해외 기관과의 교류협력 성과

- 캐나다 TRIUMF 연구소와 CLS 장치 공동개발을 위한 MOU 부속서 체결 완료

• 해외 활용 시설에 연구원 파견 성과

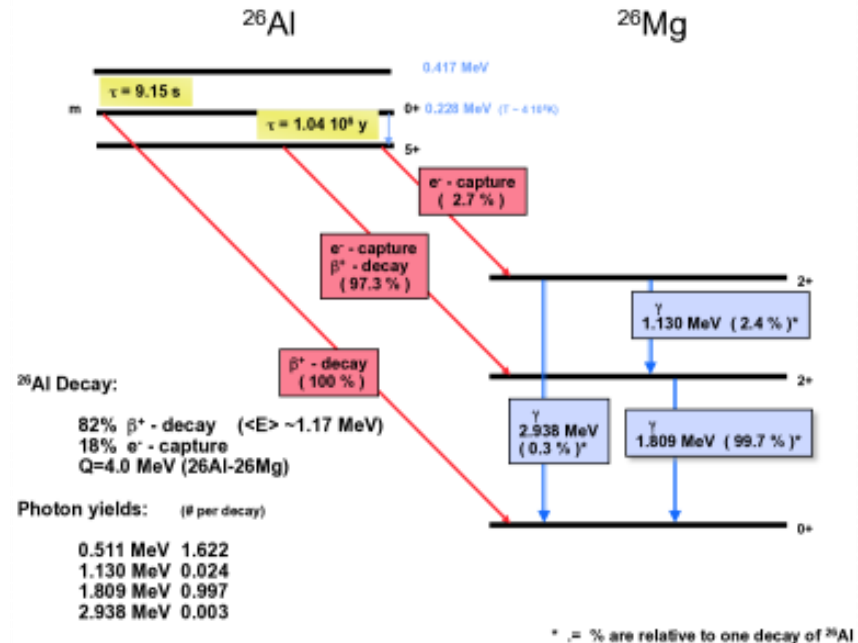
- 박사 후 연구원을 캐나다 TRIUMF 연구소에 파견함 (2021. 1 - 2021. 12)

• 글로벌 네트워크 구축

- TRIUMF (캐나다) : 장치제작 및 운영을 위해 인력파견 (박사 후 연구원)
- RIKEN (일본) : CLS 설계 및 제작 자문

초기 실험 주제 발굴

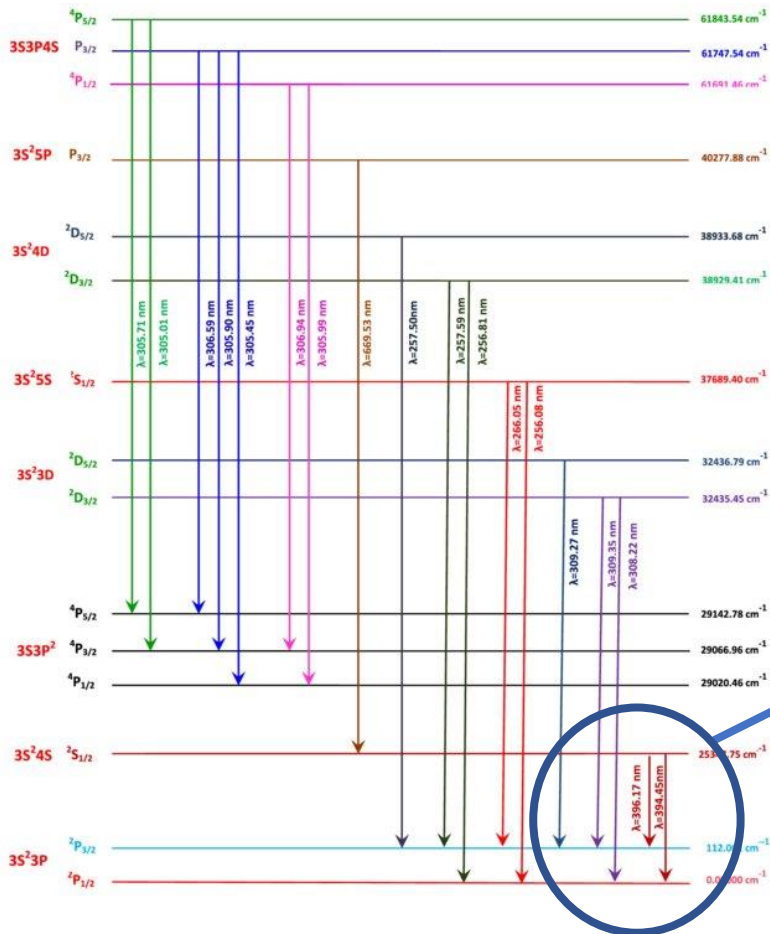
왜 알루미늄?



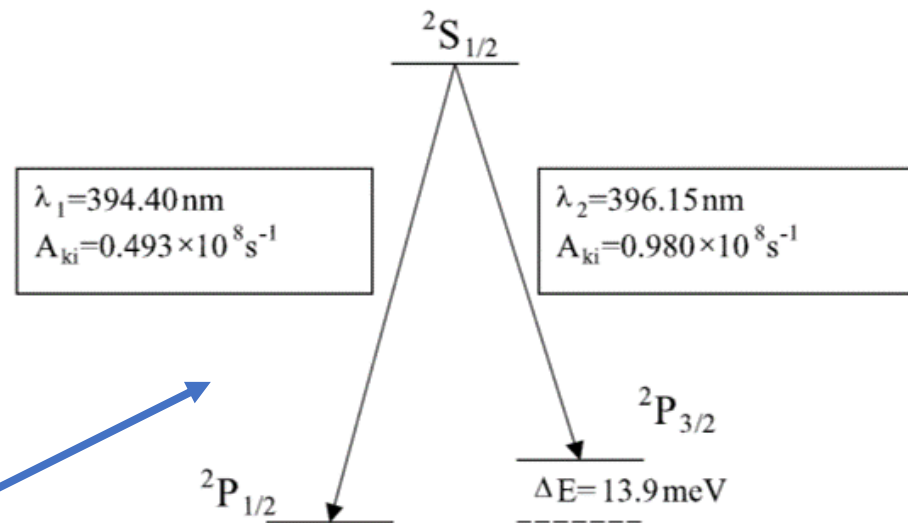
1. Al은 핵에서 중성자 결핍 측면뿐 아니라 중성자 방출에 가까운 중성자 과잉 측면에서도 흥미로운 원소, 핵 구조와 정밀 핵질량 측정에서도 흥미로운 RI(rare isotope)
2. 방사능 Al의 동위원소 중 ^{26}Al 이 가장 안정된 동위원소로 반감기가 717,000년이며 ^{26}Mg 으로 붕괴. 반감기만 보면 성간 물질에서 발견 불가능할 것으로 예상하지만, 우주에서 날라오는 양성자선에 의해 대기 중의 아르곤이 붕괴되어 ^{26}Al 이 극미량 생성됨.
3. ^{26}Al 대 ^{10}Be 의 비율은 10^5 년에서 10^6 년 사이의 시간대 방사선 연대 측정.
4. RAON의 ISOL 레이저 이온 소스 (RILIS)를 통하여 만들어 낼 수 있는 좋은 후보

초기 실험 주제 발굴

■ 방사성 동위원소 Si 대상 CLS 연구를 위한 준비



중성 원자와 레이저 준비 필요



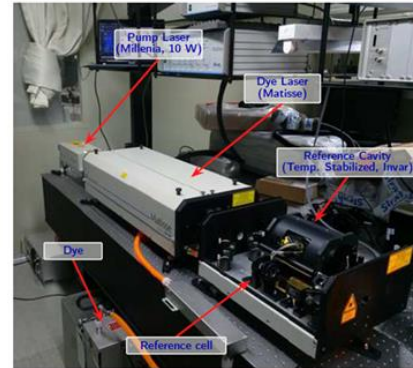
초기 실험 주제 발굴

■ 방사성 동위원소 AI 대상 CLS 연구를 위한 준비

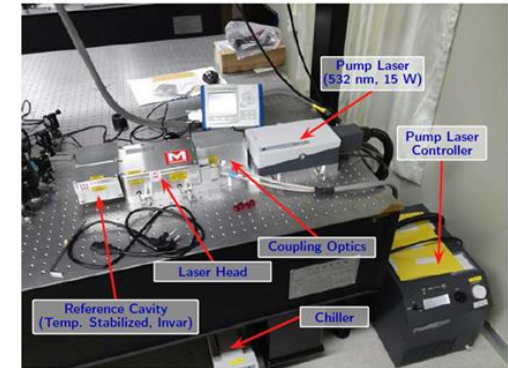


Hollow Cathode Lamp

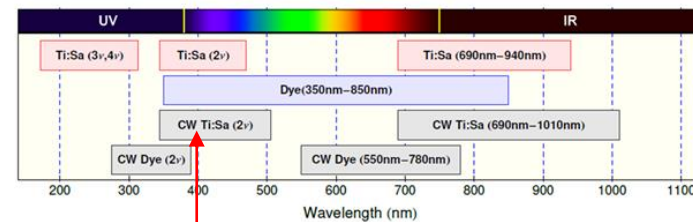
레이저 파장이 원자 전이선과 공명을 일으키는지 모니터링



Dye Laser



Ti:Sa Laser



필요한 레이저 파장

CLS 실험은 오프라인 소스에서 발생한 AI 이온을 대상으로 할 예정임

LOI 실험 주제 발굴

Collinear fast beam laser spectroscopy on neutron rich La isotopes to explore the onset and evolution of triaxiality in nuclear ground states

Jens Lassen¹, Rouhong Li¹, Hans A. Schuessler², SeongGi Jo¹, Jung Bog Kim³, Sinbee Choi³, Sung Jong Park⁴, A. Takamine⁵, M. Tajima⁵, M. Wada⁵, H. Iimura⁶, Duckhee Kwon⁷

1 TRIUMF – Canada's Particle Accelerator Laboratory, Vancouver BC, V6T2A3, Canada

2 Dept. of Physics & Astronomy, Texas A&M University, College Station TX, 77843-4242, USA

3 Korea National University of Education

4 IBS

5 Atomic Physics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

6 Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

7 Korea Atomic Energy Research Institute

Spokesperson: Jung Bog Kim

Contactperson: SungJong Park



The neutron deficient La isotopes 에 대하여

The axially asymmetry parameters were calculated from Total Routhian Surfaces (TRS).

핵이 axially asymmetric 모양일 것이라 예상 함

- 이론 결과를 검증하기 위하여 neutron deficient La isotopes ($Z=57$) 의 hyperfine structure (HFS)와 isotope shifts를 **collinear fast-beam laser spectroscopy (CLS)** 로 측정함
- ^{137}La , ^{135}La 와 ^{133}La [7]를 대상으로 JAEA에서 시작하고 ^{131}La 에 대한 연구를 TRIUMF ISAC 시설을 이용하여 계속함.
- ^{131}La [8] 의 HFS 측정 → 최초로 바닥상태에서 **triaxiality** 를 관측함

PHYSICAL REVIEW C 68, 054328 (2003)
Nuclear moments and isotope shifts of ^{135}La , ^{137}La , and ^{138}La by collinear laser spectroscopy
H. Imura, M. Koizumi, M. Miyabe, M. Oba, T. Shibata, and N. Shinohara
Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan
Y. Ishida
Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0106, Japan
T. Horiguchi
Hiroshima International University, Kurose-cho, Hiroshima 724-0695, Japan
H. A. Schuessler
Department of Physics, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA
(Received 15 August 2003; published 26 November 2003)
The isotope shifts and hyperfine-structure-splitting constants of the $6s^2\ ^1S_0$ - $5d6p\ ^3D_1$ ($\lambda=538.2\text{ nm}$) and $5d^2\ ^3P_2$ - $5d6p\ ^1D_2$ ($\lambda=548.4\text{ nm}$) transitions of La s have been measured by collinear laser-ion-beam spectroscopy for the accelerator-produced isotopes ^{135}La and ^{137}La , and for the naturally occurring isotopes ^{139}La and ^{138}La . The magnetic moments of the ground states of the isotopes ^{135}La and ^{137}La have been determined to be $\mu(135)=+3.70(9)\mu_N$ and $\mu(137)=+2.700(15)\mu_N$, respectively, and the quadrupole moments to be $Q(135)=-0.4(4)\text{ e b}$ and $Q(137)=+0.2(3)\text{ e b}$. The ratio of the magnetic dipole coupling constants $A(138)/A(139)$ of the level $5d6p\ ^3D_1$ has shown a $-0.35(23)\%$ hyperfine anomaly with respect to the NMR ratio of the nuclear g factors. The change in the mean-square nuclear charge radius determined from the isotope shift between ^{139}La and ^{135}La is $\delta\langle r^2\rangle^{139/135}=0.08(3)\text{ fm}^2$. This value is smaller than the predictions made by the finite-range droplet model or by the Hartree-Fock plus BCS calculation.
DOI: 10.1103/PhysRevC.68.054328 PACS number(s): 21.10.Ft, 21.10.Ky, 21.60.-n, 27.60.+j

Cocolios 석사 학위 논문
pdf 파일 공유함

Möller and co-workers 들은 finite-range liquid-drop model (FRLDM) 로
axial asymmetry [9] 계산

new deformation parameters를 찾아 냄

Asymmetric parameter

FRLDM 과 TRS 두 모델 기반 계산 결과 차이 발생 (β_2 와 γ parameters 값들 차이 발생)

Quadrupole deformation parameter

- large triaxiality is predicted for ^{129}La from TRS, while axial symmetry from FRLDM. In order to clarify the deformation of ^{129}La and even more neutron-deficient La isotopes, we are now planning to extend the laser spectroscopy to these nuclides.

실험으로 확인할 필요 발생

Science goals (or Physics case)

- Search for evidence of triaxiality in the atomic hyperfine structure spectra to provide experimental evidence for predicted structures and shape coexistence.
- Nuclei exhibiting shape coexistence and or octupole deformations are candidates for physics beyond the standard model such as parity non-conservation.

Summary

- 핵 분광 자료는 과학, 공학, 응용(의료) 분야의 기초 자료로서 매우 중요함.
- CLS 국제공동연구그룹을 구성하여 국제공동연구를 추진함.
- 2년간 캐나다 TRIUMF 시설에 박사후 연구원을 파견하여 CLS 분야 신진 연구 인력을 양성함. 박사과정 생 파견도 있었으나 중간에 유학으로 전환
- 2명의 석사과정이 이 분야에 들어오고 후에도 더 들어올 예정임.
- 추가적인 이용자 확보 필요.

2021년 12월에 CLS 시스템이 설치됩니다.
2022년에는 CLS 신호를 측정할 예정입니다.
오늘 발표한 내용들을 연구할 날을 손꼽아봅니다.

감사합니다.