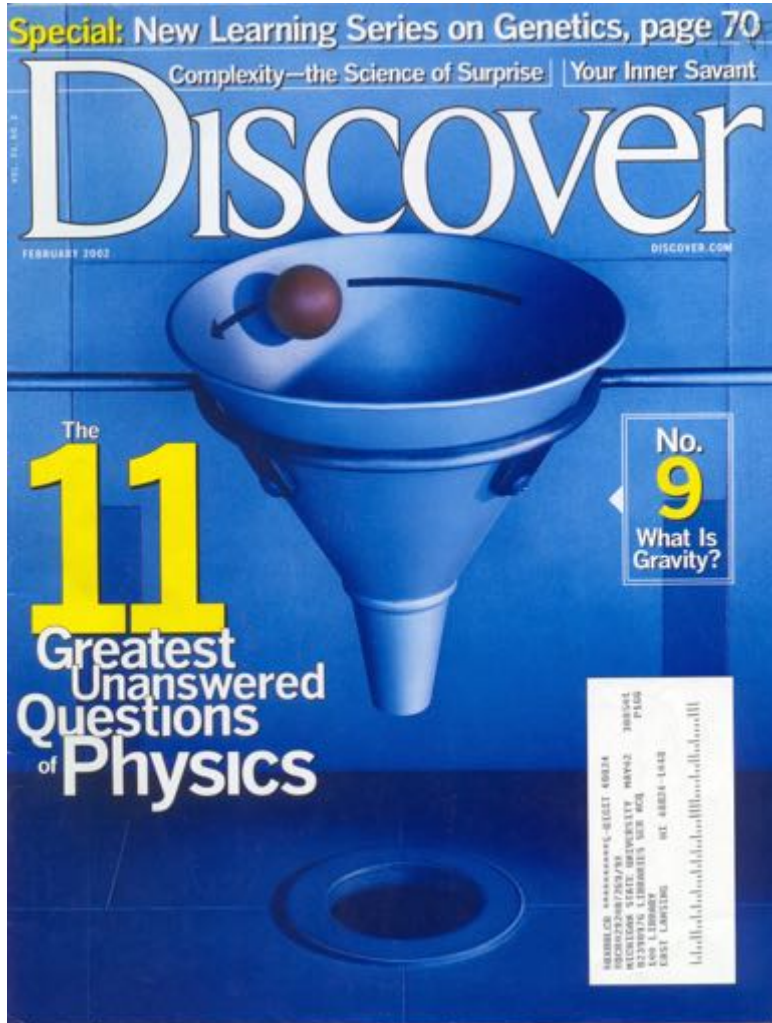


KoBRA 활용 연구

중이온 가속기 활용 국제공동연구기획사업 연차 워크숍

2021. 11. 18

연구의 목표



- 물리학의 위대한 질문 3/11
 - 철 - 우라늄까지의 원소들은 어떻게 만들어졌나?
- 빅뱅 직후 3분경과
 - 우주는 75% 수소, 25% 헬륨
- 현재의 우주
 - 원자번호 92번 우라늄까지 약 300여종의 원소 존재
- 빅뱅과 현재를 잇는 시나리오는?

우주에서 일어나고 있는 다양한 핵반응들

- 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

■ 연구개발목표

저에너지 핵물리 분야에서의 KOBRA 활용 방안을 개발하고 전문인력을 양성하고, 국제공동연구 과제를 발굴하여, 해외 시설을 이용한 실험을 통해 국제 경쟁력 확보 방안을 마련한다.

■ 성과목표

저에너지 핵물리 분야에서의 KOBRA 활용 전문인력 양성 및 활용 분야 국제 경쟁력 확보 방안 마련

■ 연구내용

- KOBRA 활용 전문인력 양성
 - 해외가속기 연구소와 구체적인 교류협력 방안 수립
 - KOBRA 활용 관련 **국제공동연구 과제 발굴** 및 수립
- KOBRA를 이용한 실험 제안 및 측정 장치 제안
 - 저에너지 RI빔을 이용하여 양성자 과잉 및 중성자 과잉 핵구조, 핵천체물리, 핵반응 실험 수행
- KOBRA 활용 분야의 국제 경쟁력 확보

KoBRA 공동연구그룹

• < 국내 연구진 >

- 이화여자대학교 : 한인식, 김다히, 김선지, 허장용, 박수연, 한세용, 임선인
- 호서대학교 : 문창범
- 고려대학교 : 박향규, 방정배
- 서울대학교 : 최선호, 윤성철, 채현우, 하정수, 배성한, 최현석, 손용현
- 성균관대학교 : 채경육, 우엔 응옥 듀이, 차수미, 김두현, 우엔 김 위엔
- CENS (IBS): 한인식(단장) 외 다수 연구원

• < 해외 공동 연구진 >

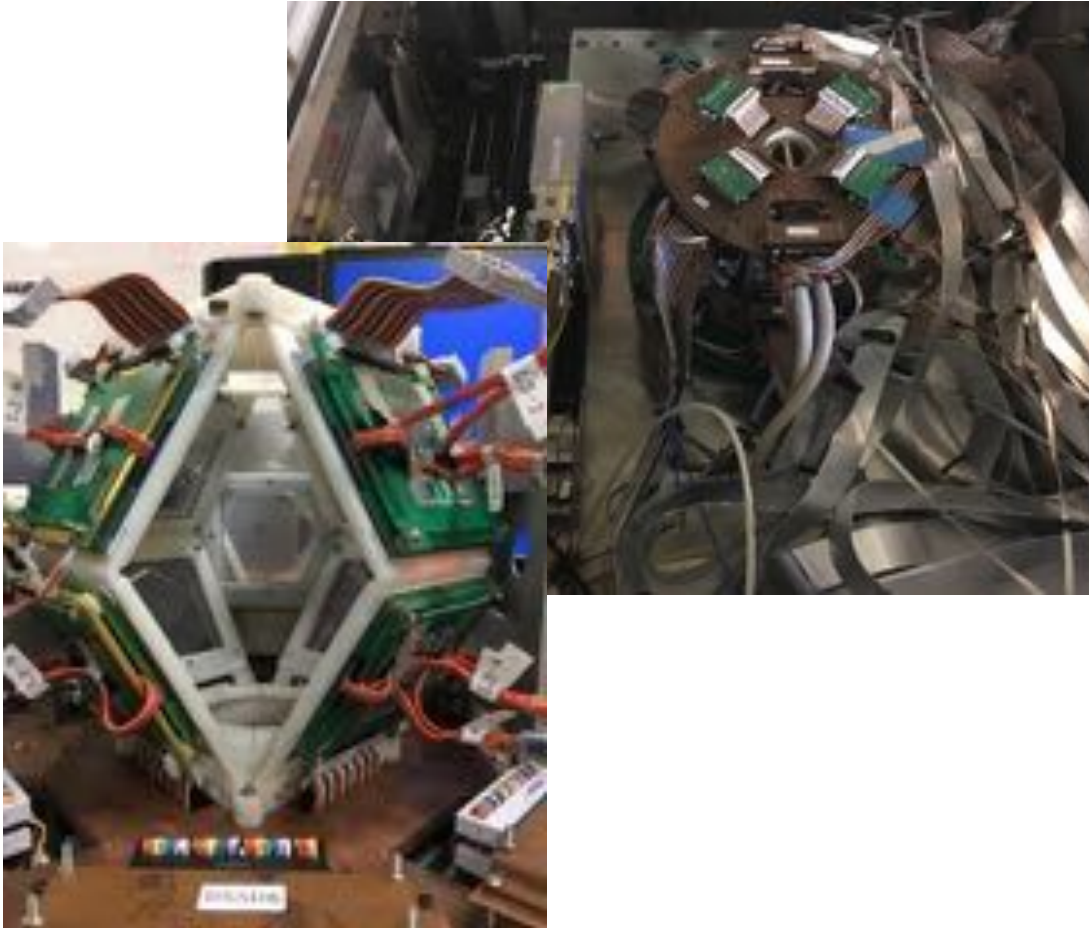
- CNS: Hidetoshi YAMAGUCHI, Seiya Hayakawa
- SAMURAI: Tomohiro Uesaka, Takashi Nakamura
- Kyushu University: Takashi Teranishi
- University of Notre Dame: Dan Bardayan
- JINR FLNR: Andrey Fomichev, Sergey Krupko
- Texas A&M: Gregory Rogachev
- KEK: Hiroari Miyatake, Watanabe
- GANIL: Antoine Lemasson

공동연구 - JINR (러시아)



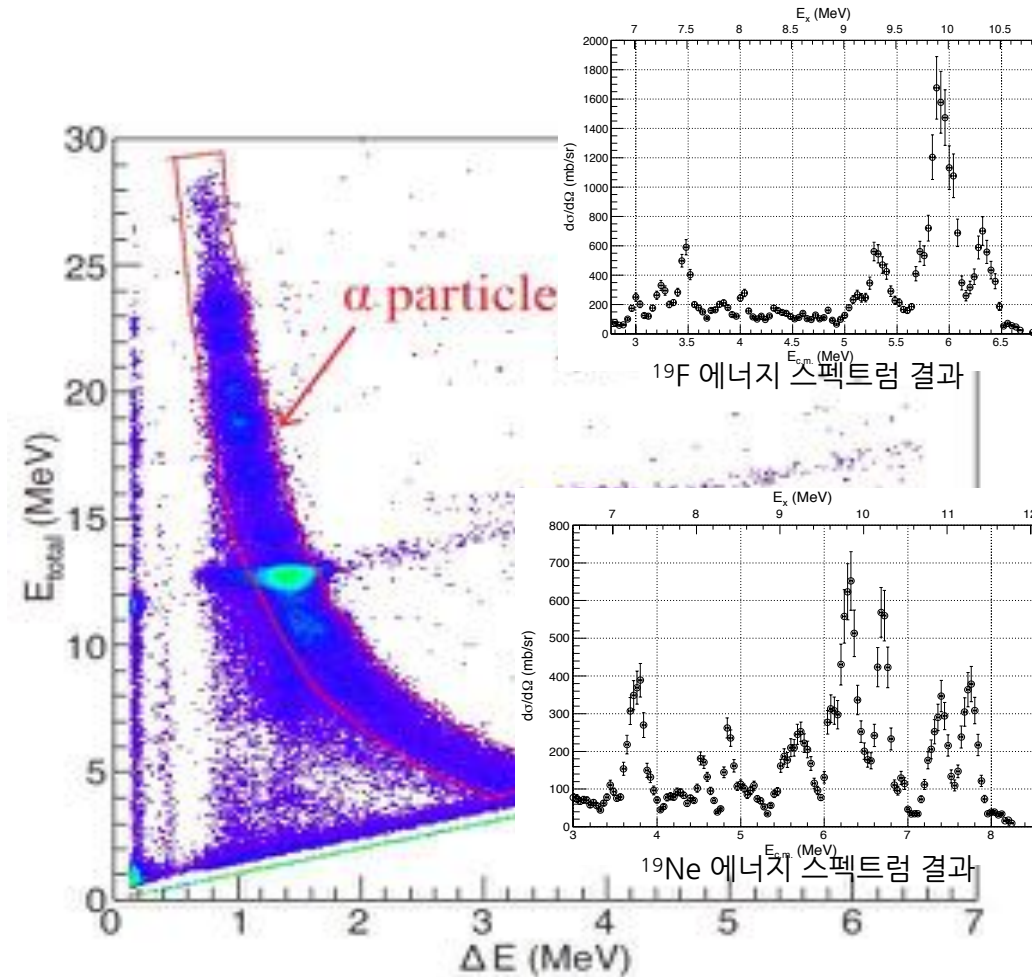
- Cathode 간격 2.5 mm, 10×10 cm² 크기의 PPAC 3대 제작
- 30 Torr 내부 압력 테스트 진행 및 안정화 확인
- Time resolution: 0.7 ns
- Position resolution: 최대 0.37mm

공동연구 - 동경대학교(CRIB)



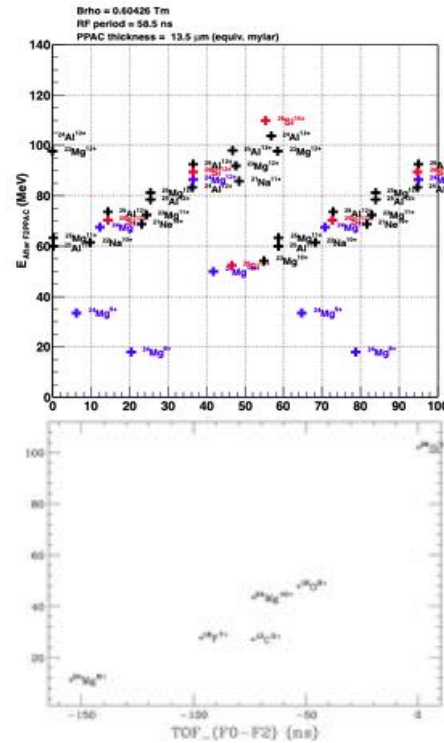
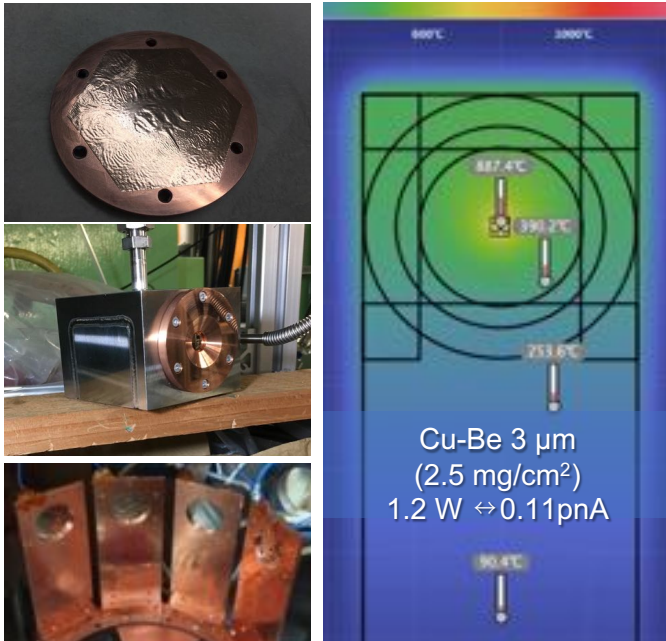
- $^{24}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ 핵반응률 및 ^{26}Si 핵구조 연구를 위한 $^{25}\text{Al}(p, p)^{25}\text{Al}$ 실험 수행 (CRIB)
- Proton halo system 연구를 위한 $^8\text{B}+^{120}\text{Sn}$ 실험 참여 (CRIB)
- ^{19}Ne 핵구조 분석을 위한 각도별 R-matrix 분석 진행

공동연구 - 동경대학교 (CRIB)



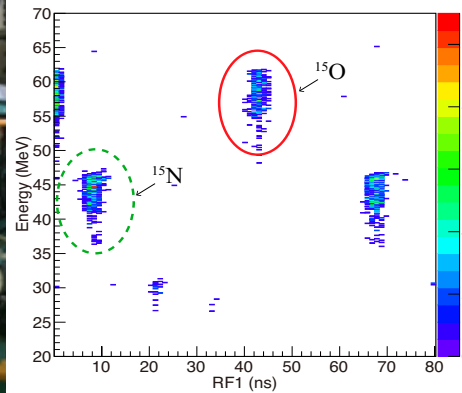
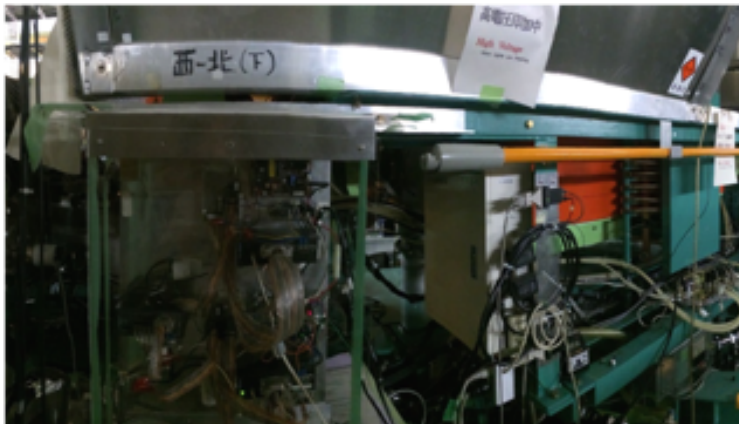
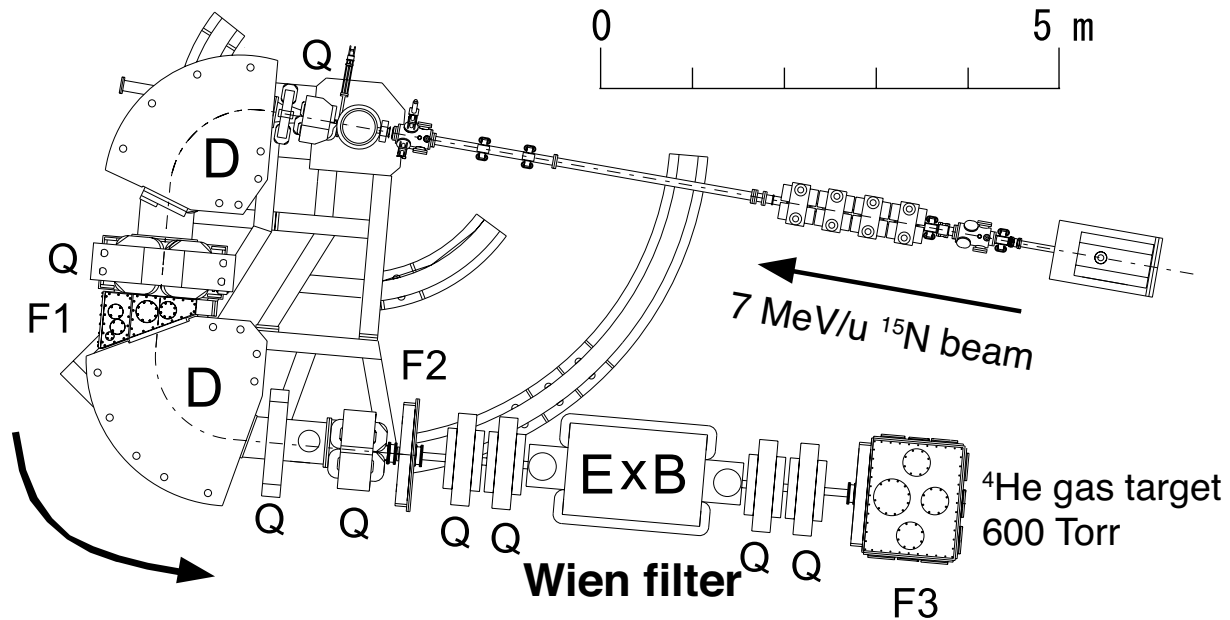
- $^{15}\text{O}(\alpha, \alpha)^{15}\text{O}$ 및 $^{15}\text{N}(\alpha, \alpha)^{15}\text{N}$ 실험 분석 완료
- ^{19}Ne 의 양성자 문턱에너지 근방의 공명준위 파라미터 획득
- ^{19}Ne 공명준위 파라미터를 이용한 $^{18}\text{F}(p, \alpha)^{15}\text{O}$ 반응률 계산 진행
- 양성자과다핵자(^{19}Ne) 및 중성자과다핵자(^{19}F)에서의 핵구조 연구 진행
- ^{19}Ne 및 ^{19}F 근방 동위원소 핵데이터 수집을 통한 KoBRA 활용 실험 구상

공동연구 - 동경대학교 (CRIB)

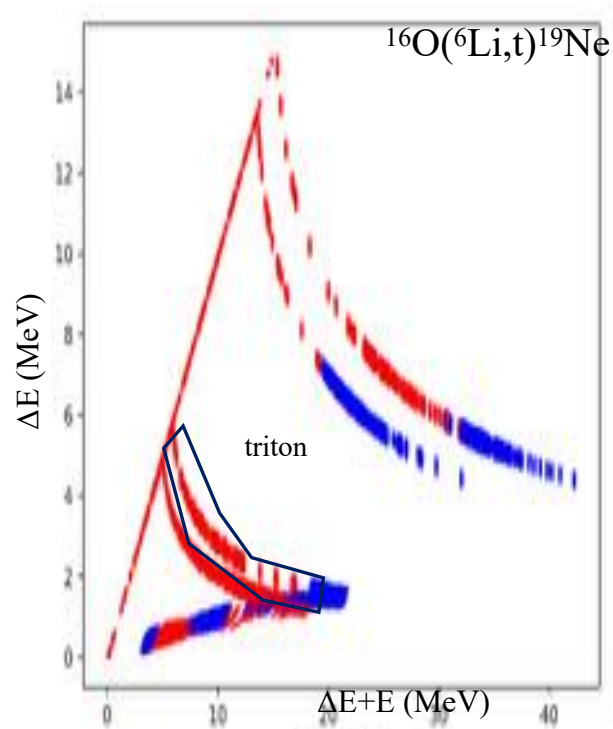


- CRIB 설비를 활용하여 양성자과잉 ^{26}Si 방사성 중이온 빔 생성 실험 수행
- 고순도, 고밀도의 방사성 중이온 빔 생성법 고안
- $^{26}\text{Si} + \alpha$ 산란실험 빔 타임 획득
- CRIB에서 수행할 $^{26}\text{Si}(a,a)^{26}\text{Si}$ 및 $^{26}\text{Si}(a,p)^{29}\text{P}$ 실험을 위한 ^{26}Si 빔 생성 최적화 파라미터 탐색: 5.2 MeV/u, 59% 순도, 4.7×10^4 pps 달성
- production target chamber의 window로 사용할 수 있는 최적의 재료에 대한 heat durability 연구: Mo, Ti, Havaer, CuBe 박막 테스트 진행. Mo 박막을 최종적으로 선정

공동연구 - 동경대학교 (CRIB)

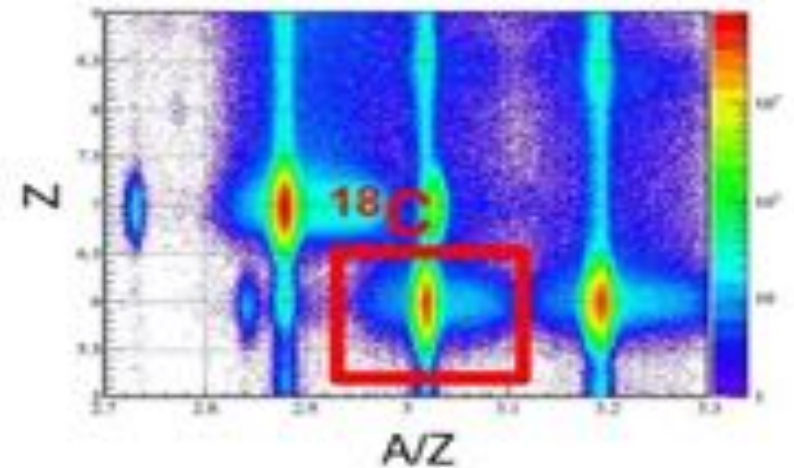


공동연구 - 큐슈 대학교 (일본)



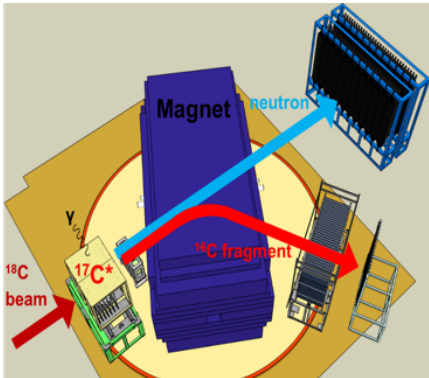
- $^{16}\text{O}(^6\text{Li}, t)^{19}\text{Ne}$ 핵자전달반응 측정 실험을 통한 ^{19}Ne 핵구조 연구 (큐슈대학교)

공동연구 - RIKEN SAMURAI (일본)

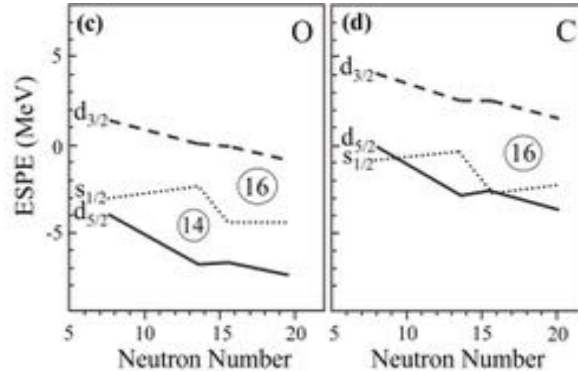


^{18}C 빔 Particle Identification 결과

- - ^{17}C 관련 핵데이터 수집
- - $\text{C}(^{18}\text{C}, ^{17}\text{C}^*)$ 실험 분석을 통한 PID(Particle Identification) 진행 완료
- - ^{17}C 중성자 문턱에너지 근방의 핵구조 연구 분석 진행

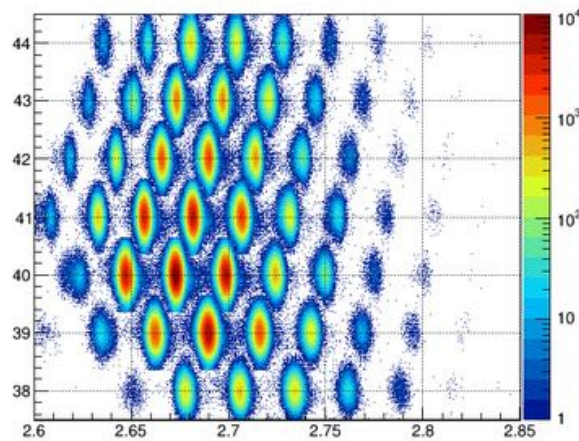


$\text{C}(^{18}\text{C}, ^{17}\text{C}^*)$ 실험 모식도

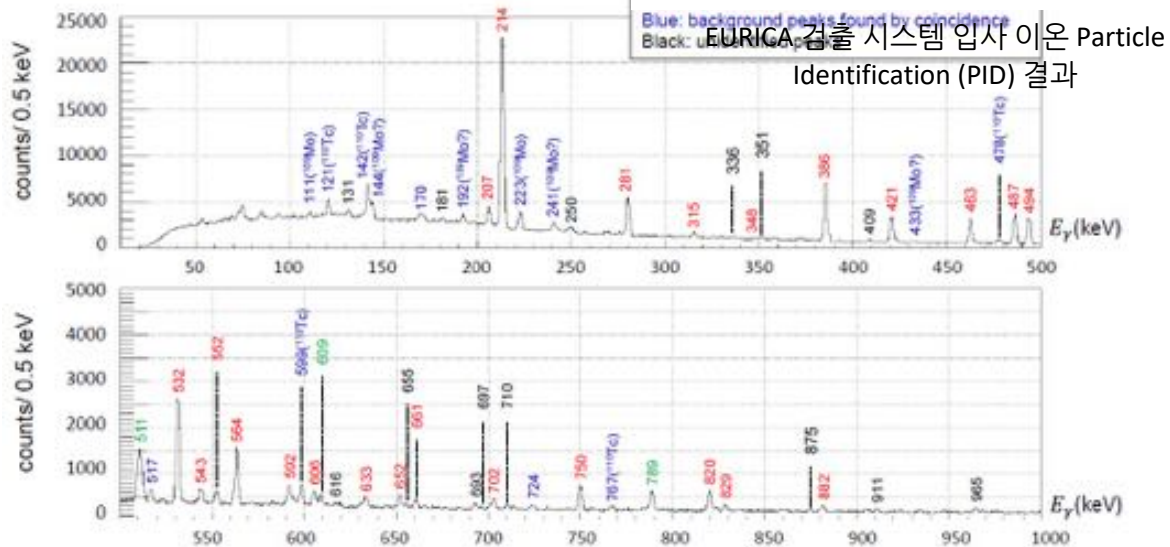


중성자수에 따른 effective single particle energy
(핵데이터 수집)

공동연구 - RIKEN EURICA (일본)

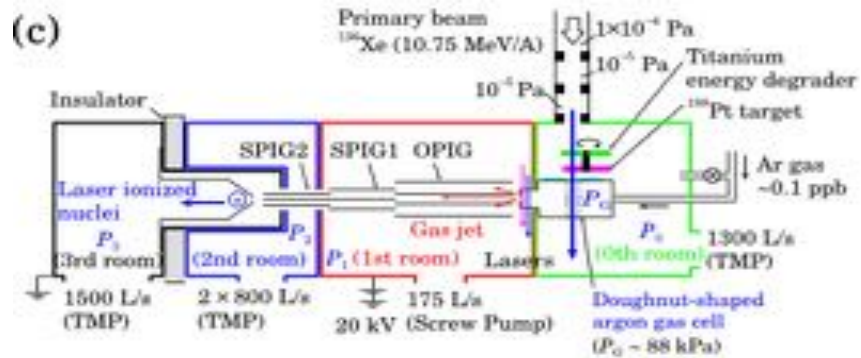


- EURICA 실험 분석을 통한 베타-감마 분광학 연구 참여
- ^{110}Mo 감마선 스펙트럼 분석을 통한 $\gamma\gamma$ -band 발견
- 베타선 트래킹(Tracking) 알고리즘 개발을 통한 백그라운드 데이터 제거

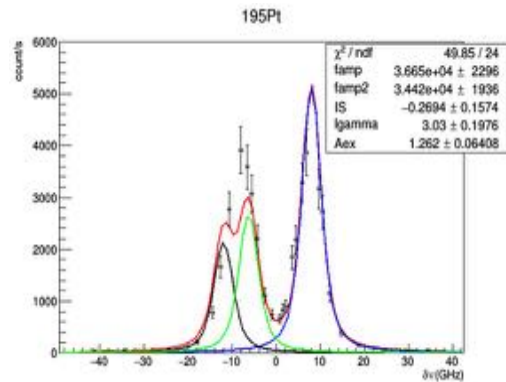


^{110}Mo 감마선 스펙트럼

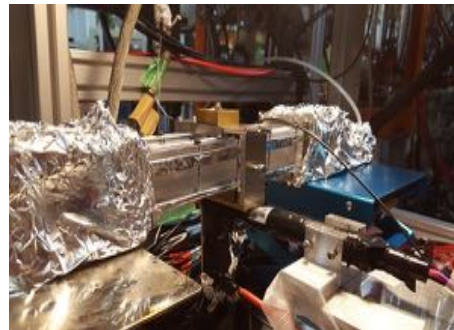
공동연구 - KEK WNSC (일본)



^{136}Xe 빔을 이용한 ^{195}Pt 연구 실험 모식도



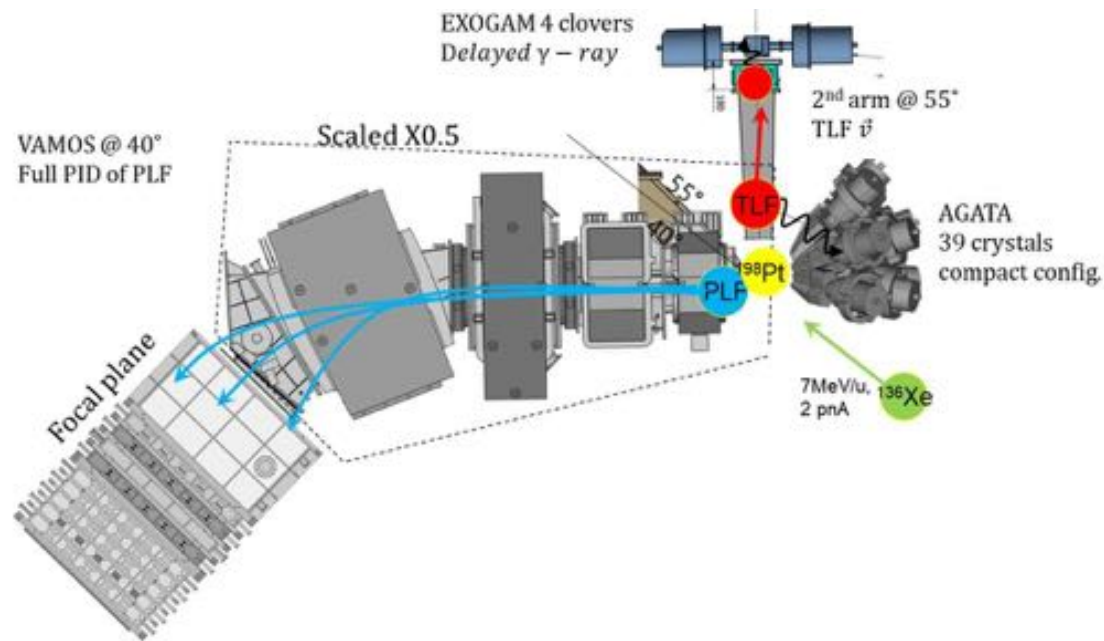
^{195}Pt 스펙트럼을 triple Voigt function으로 피팅한 결과



가스 타겟 위치 분해능 측정 모습

- R-process 과정의 WP(waiting point)핵자 이해를 위한 KISS 장치 이용 실험 참여
- 가스 타겟의 위치 분해능 및 N/S 비율 측정
- ^{195}Pt 핵자 데이터 분석 참여

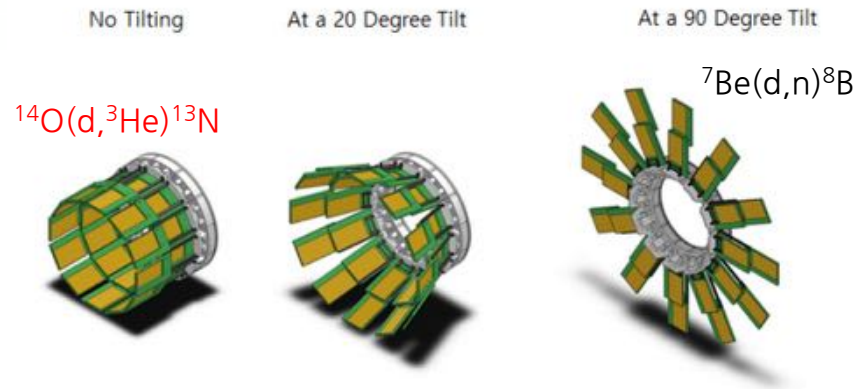
공동연구 - GANIL (프랑스)



- VAMOS 스펙트로메타와 EXOGAM 감마 검출기를 이용한 RI 구조 연구
- Multi-Nucleon Transfer 방법을 통한 새로운 RI 생성법 이용 ($\text{Xe} + \text{Pt}$)
- 실험제안서 제출, 2020.09 PAC 심의 통과 빔타임 획득
- 2021.06 실험 수행

KoBRA 실험용 검출기 설계

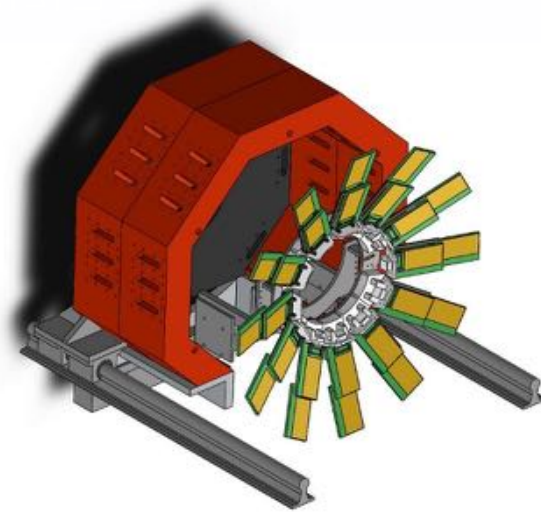
검출기 디자인 연구



- 실험 방법과 목적에 따라 재배열이 가능하도록 설계
- 검출기 재배열을 통한 forward 각분포 연구 진행

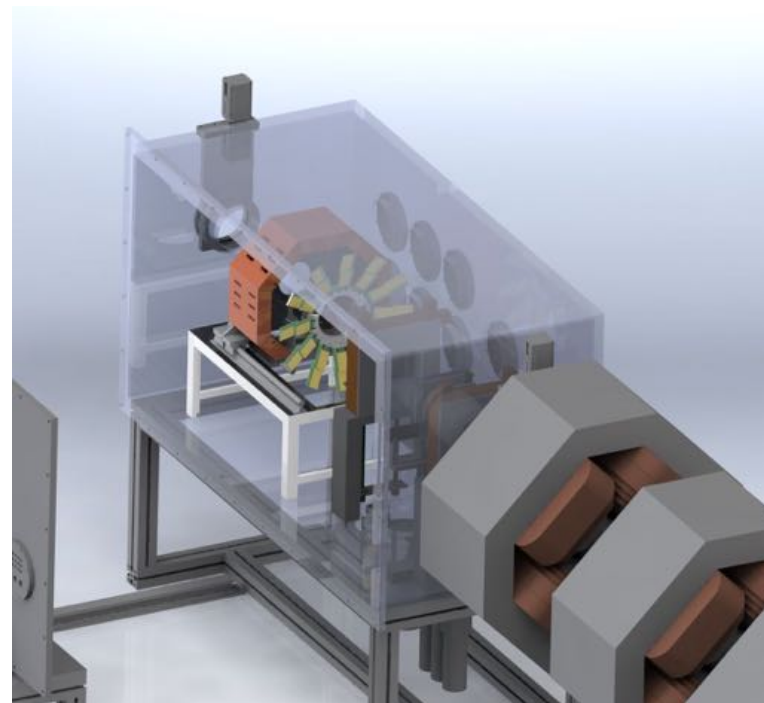
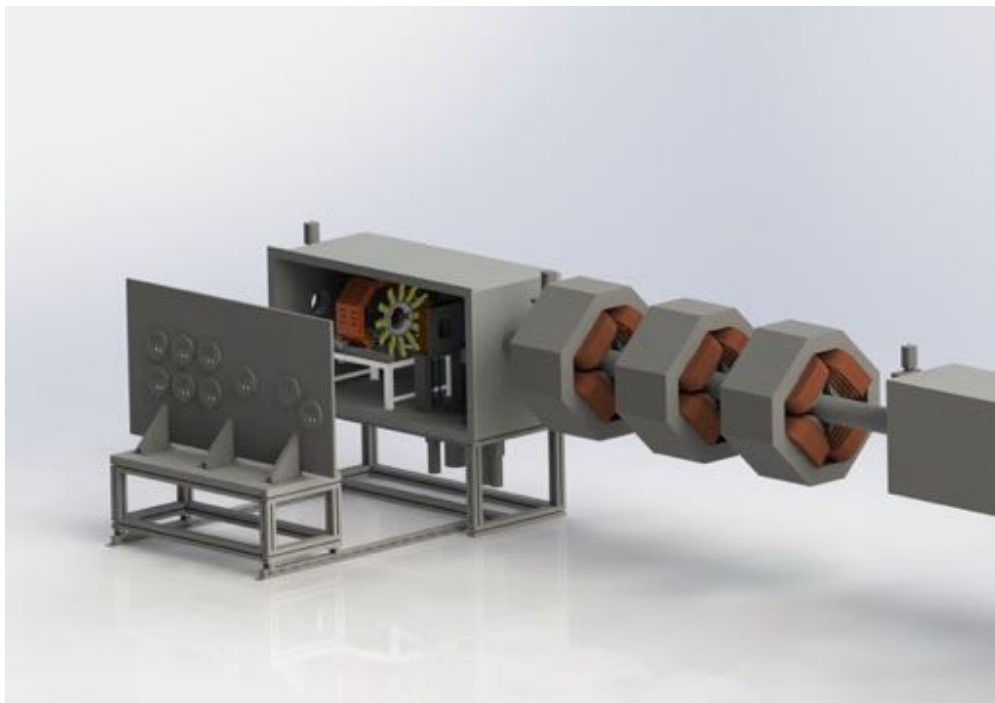
조건	
검출기 기울기	20°
검출기-표적 거리	8 cm
검출기중앙으로부터의 거리	33 cm
가능한 각분포	45°~76°

검출기 지지구조 확보



- 검출기를 지지할 수 있는 구조물 설계
- 검출기 및 일렉트로닉스 구조물을 손쉽게 이동할 수 있는 레일 디자인 및 설계
- (d,p), (d, ^3He), (d,t), (d,n), (p,d), (p,t) 등의 다양한 핵자 전달반응에 이용할 수 있는 유연한 검출기 지지구조 확보

KoBRA 실험용 검출기 설계

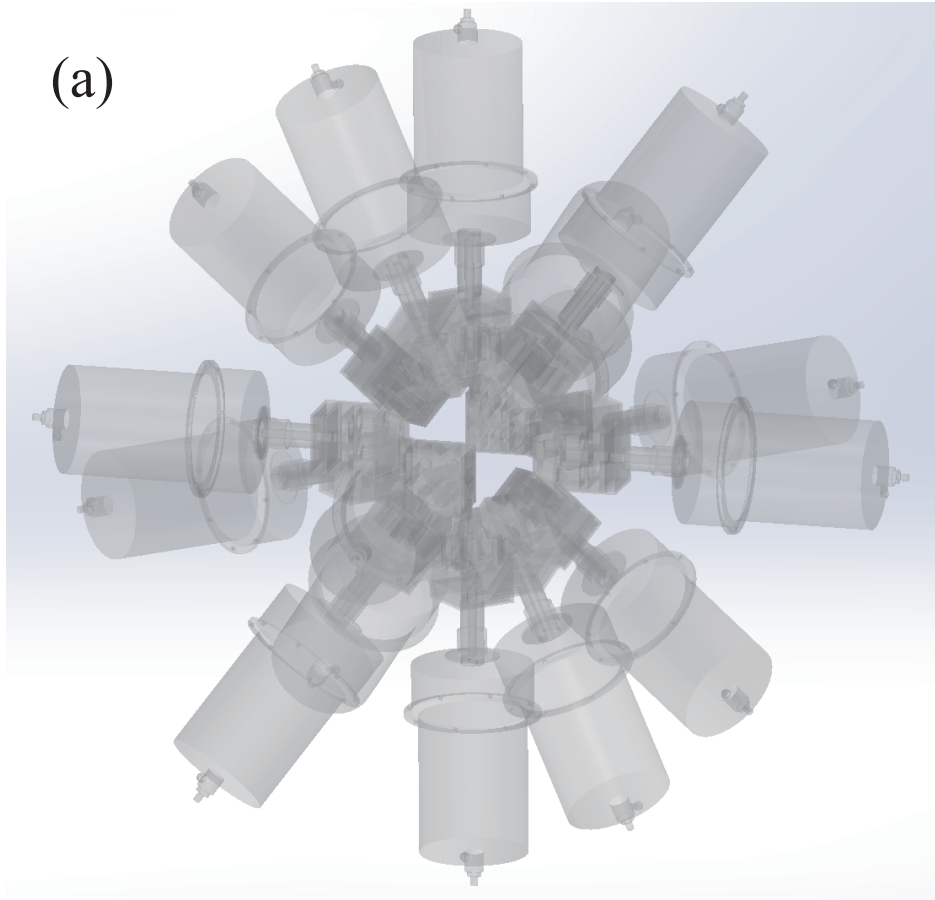


- KOBRA stage 1의 빔라인 설계를 이용하여 시스템 연계성 확인
- stage 1의 PPAC 검출기 챔버에 함께 설치
- $^{14}\text{O}(d, ^3\text{He})^{13}\text{N}$, $p(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}^*(2p)$ 그리고 $p(^{18}\text{Ne}, t)^{16}\text{Ne}$ 등 현재 계획하고 있는 day-1 실험의
수행 가능성을 확보하기 위해 검출기 배열 등을 미세 조정 중
- 검출기 배열이 가장 까다로운 **핵자 전달반응** 측정 실험에 맞추어 검출기 배치 고려

KoBRA Lol

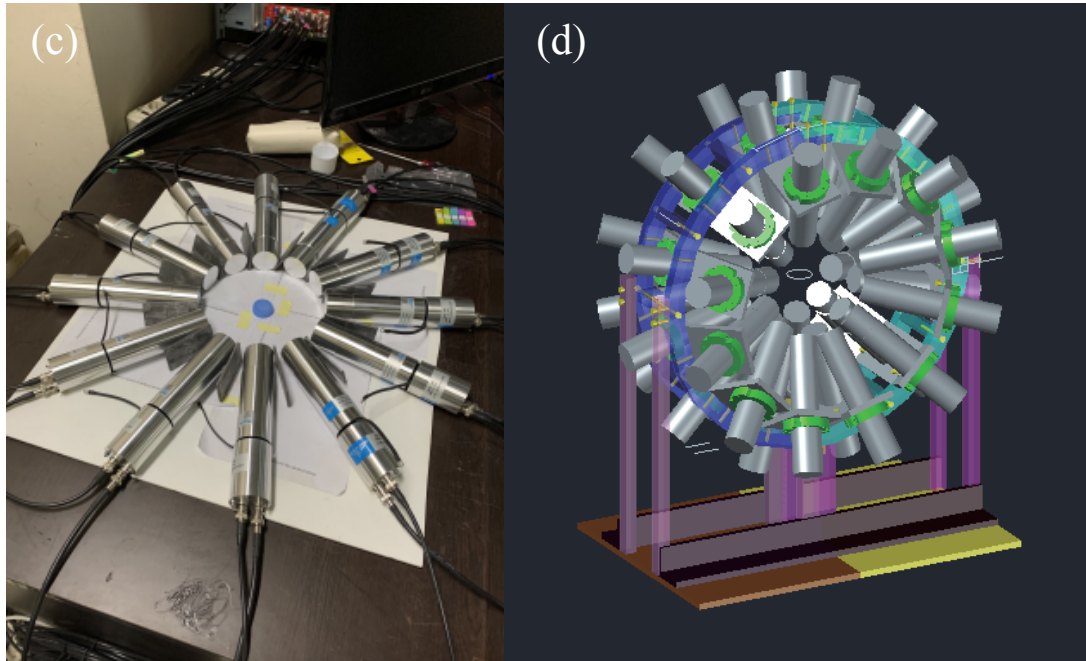
1. Decay spectroscopy and fast-timing measurements by using KHALA at RAON
2. High-resolution in-beam γ -ray experiments at RAON
3. Internal conversion electron spectroscopy
4. Spectroscopy of proton, neutron and alpha emitters
5. Study on neutron-deficient nuclei using proton-induced fusion evaporation
6. 3n fusion-evaporation reactions to study mirror energy differences in $T_z = -3/2$ nuclei
7. RI experiments probing isospin symmetry
8. The study of lifetime of isotopes near doubly magic N=Z nuclei ^{40}Ca
9. Decay Spectroscopy and Total Absorption Spectroscopy

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



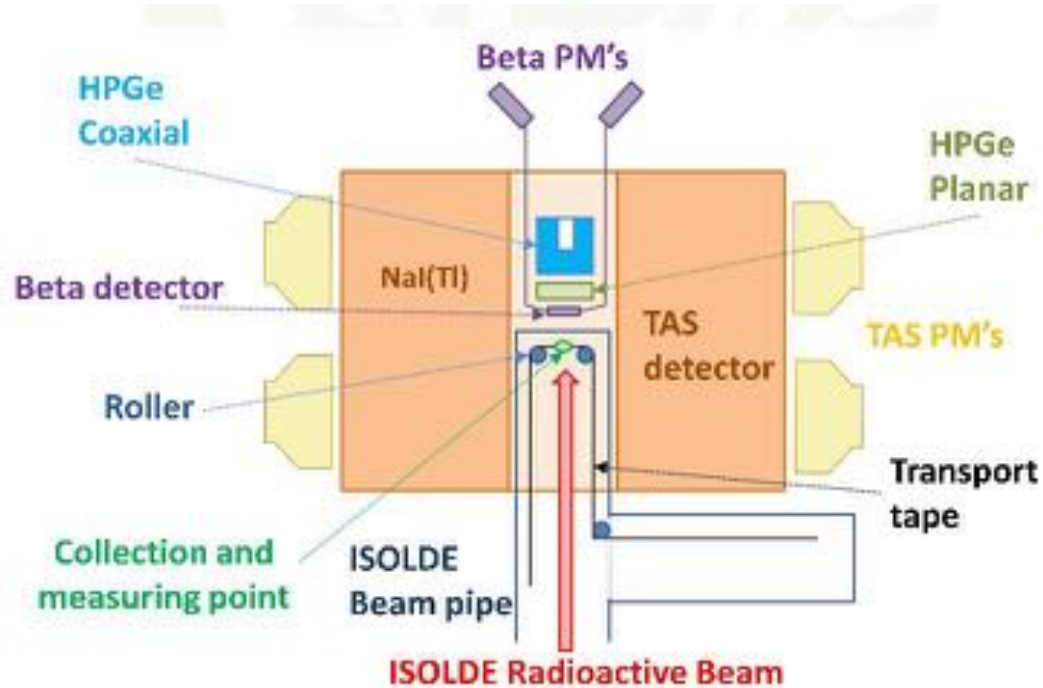
- 감마선 정밀측정 실험
- 핵자들 간의 상호작용, 핵의 구조 연구
- CENS의 고해상도 감마선 검출기 활용

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



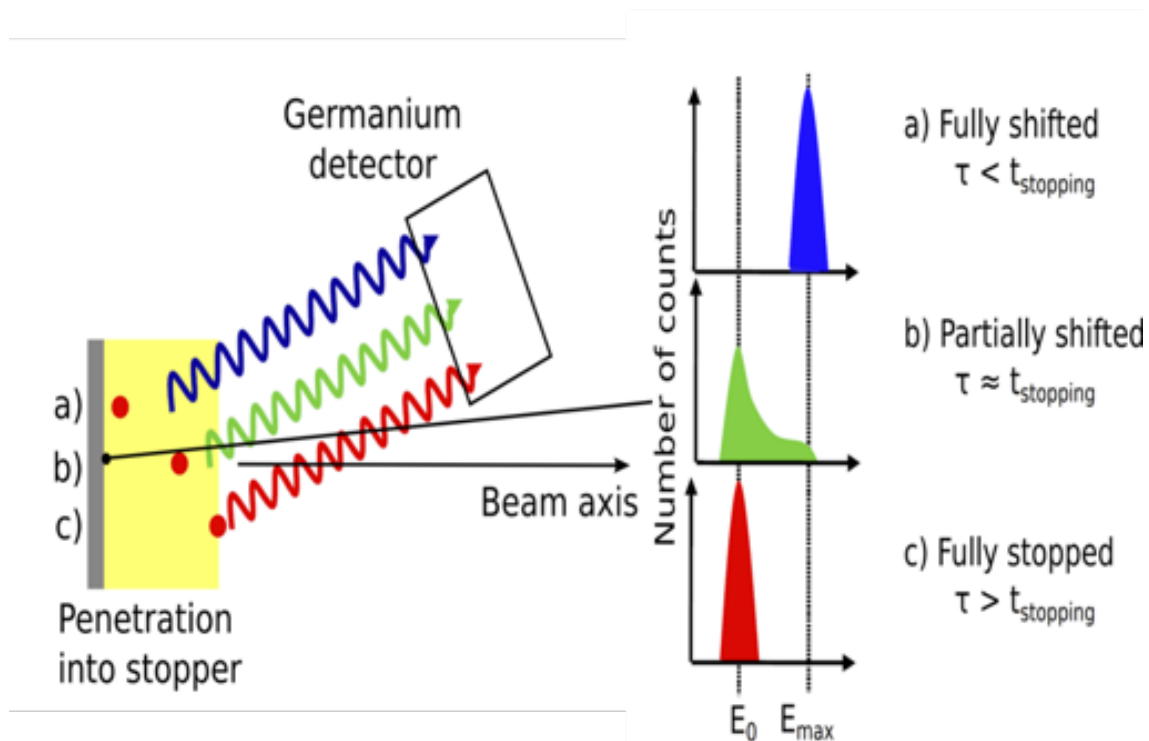
- 핵의 들뜬 상태의 수명 측정
- 내부 구조, 모양 등 연구

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

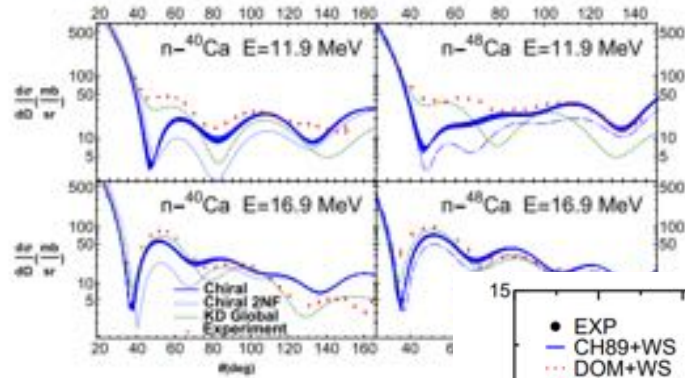
2021년 물리학회 Focused Session

Optical Model Potentials for Exotic Nuclei

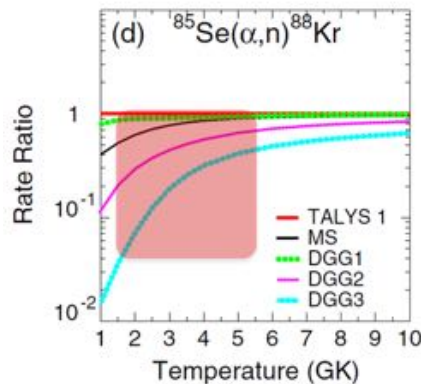
- Can we trust the Global Optical Model Potentials?

- Phenomenological GOMP
- Microscopic GOMP

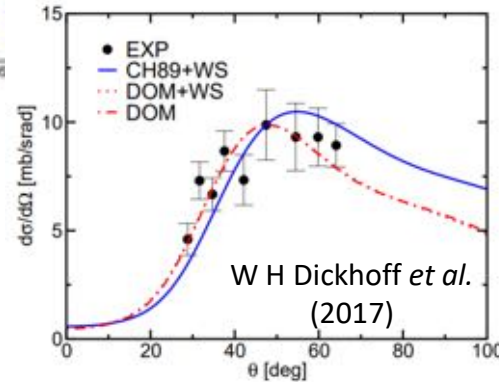
Optical model potential from chiral effective field theory



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



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

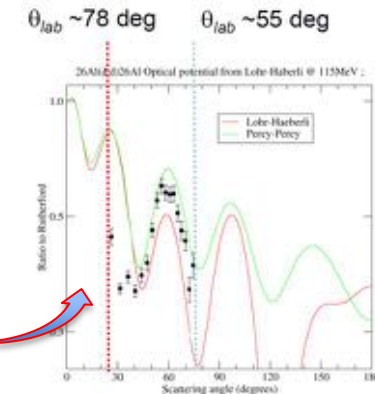
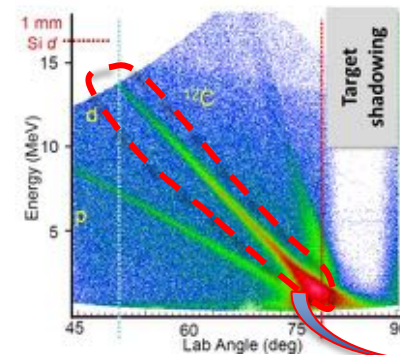
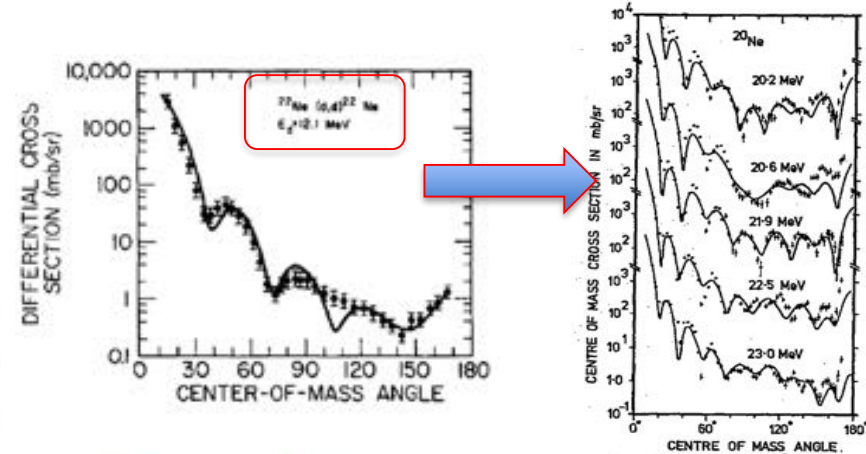


Angular distributions for $^{132}\text{Sn}(d, p)^{133}\text{Sn}$ ($E_d = 9.46$ MeV)

W H Dickhoff *et al.* (2017)

See D. Kim's Talk

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



Nuclear Structures related to rp-process

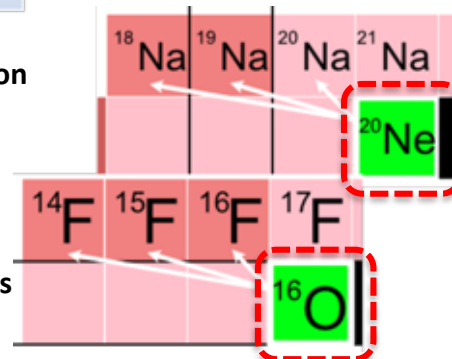
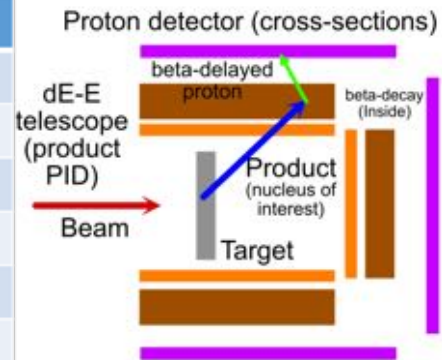
- Recoil isotope tagging after fusion evaporation reactions can provide spectroscopic properties of nuclei.

See J. Hwang's Talk

- ✓ Heavy-ion Fusion-evaporation
- ✓ Light particle induced fusion evaporation.

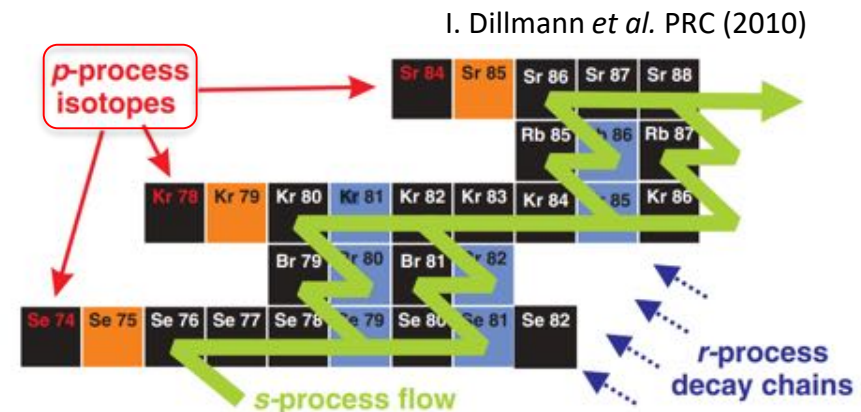
tar(pro,3n)	Beam	Target
³³ Ar	¹² C	²⁴ Mg
³⁷ Ca	¹² C	²⁸ Si
⁴¹ Ti	¹⁶ O	²⁸ Si
⁴⁵ Cr	¹⁶ O	³² S
⁴⁹ Fe	¹² C	⁴⁰ Ca
⁵³ Ni	¹⁶ O	⁴⁰ Ca
⁵⁷ Zn	²⁰ Ne	⁴⁰ Ca

Examples of recoils from
SI beam + SI target fusion evaporation



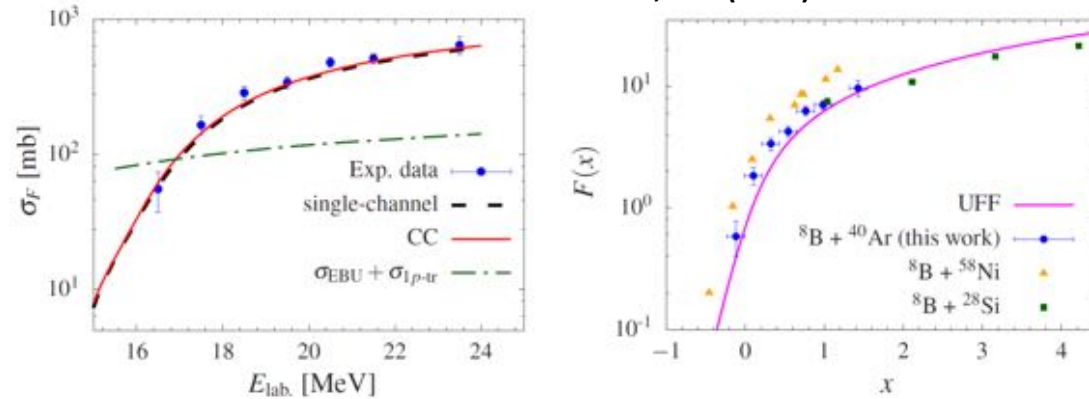
Examples of proton-induced reactions
to produce neutron-deficient nuclei

- ✓ ^{37,38}Ar(p,γ)^{38,39}K: key reactions affecting astrophysical condition of globular clusters
- ✓ ⁶⁴Ge, ⁶⁸Se, ⁷²Kr: rp-process waiting point
- ✓ ⁷⁴Se, ⁷⁸Kr, ⁸⁴Sr: p-process isotopes



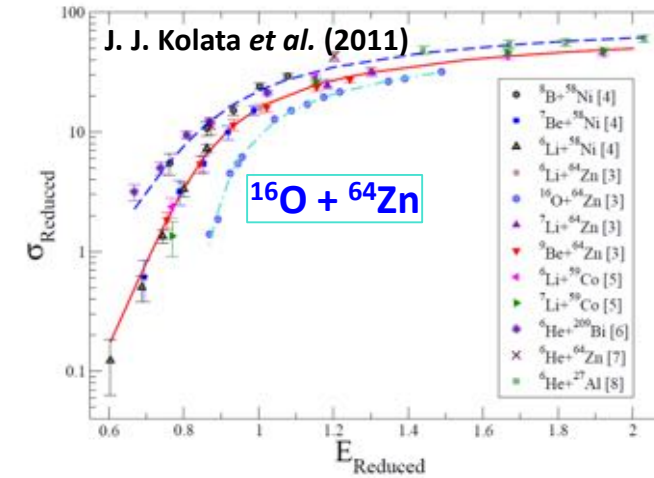
Fusion Reaction Mechanism related to Stellar Evolution

J.C. Zamora *et al.*, PLB (2020)



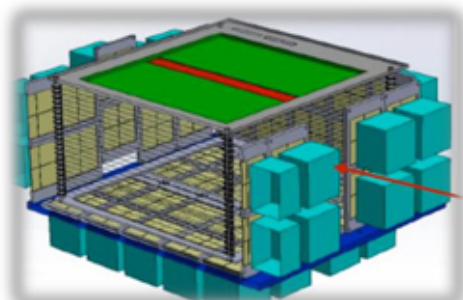
Total fusion excitation function for ${}^8\text{B} + {}^{40}\text{Ar}$.

J. J. Kolata *et al.* (2011)

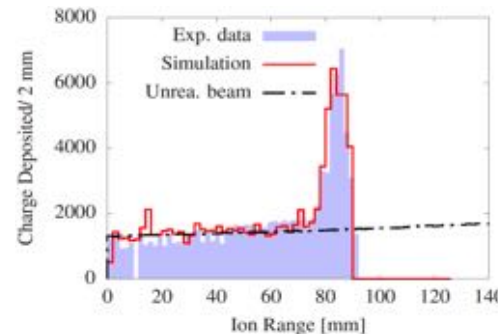


Reduced total reaction cross sections

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



Texas Active Target (TexAT) design

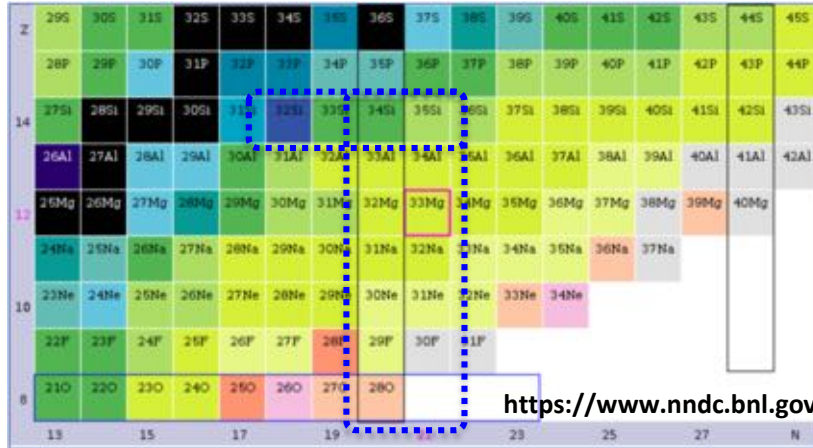


Ionization beam profile for a typical fusion event

- ✓ ${}^{20}\text{Ne} + {}^{20}\text{Ne}$, ${}^{20}\text{Ne} + {}^{16}\text{O}$ fusion cross sections to revisit the result of D. Shapira PRC (1983)
- ✓ Fusion cross sections with halo nucleus (${}^6\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$)

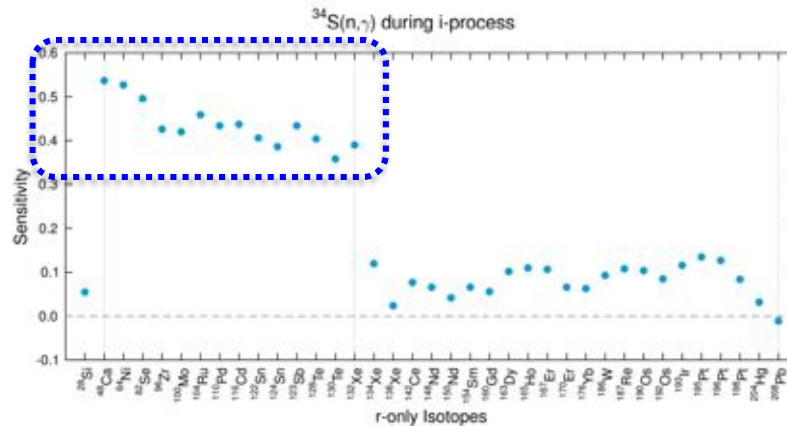
Nuclear structures related to *i*-process

- $^{32}\text{Si}(d,p)$ and $^{34}\text{S}(d,p)$ neutron transfer reactions for E_{ex} , spin/parity and SF
- (d,p) neutron transfer reactions around $N=20$

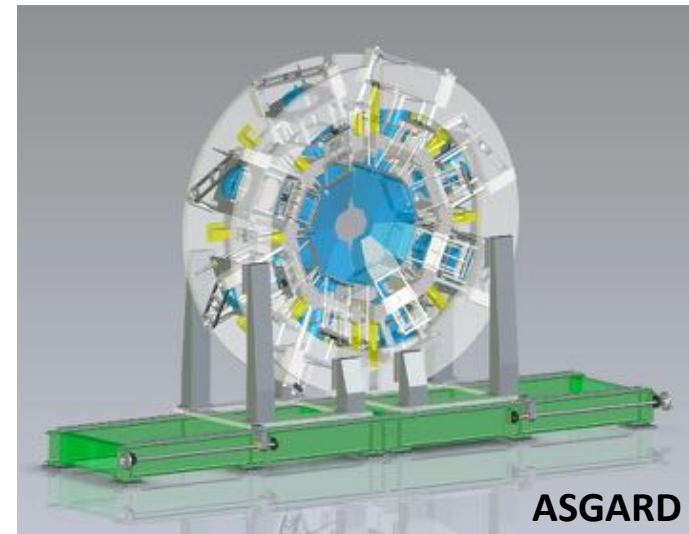


- ✓ ^{34}Si : Doubly Magic Nucleus
- ✓ ^{32}Mg : Island of Inversion
- ✓ ^{28}O : Doubly Magic Nucleus
- ✓ Many unknown spectroscopic properties

See B. Moon's Talk



A. Koloczek, PhD Thesis 2014



검출기 연구 개발

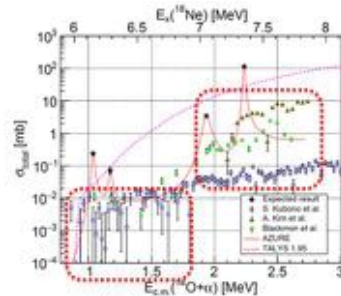
2021년 물리학회 Focused Session

Active Targets for Nuclear Astrophysics Studies at RAON

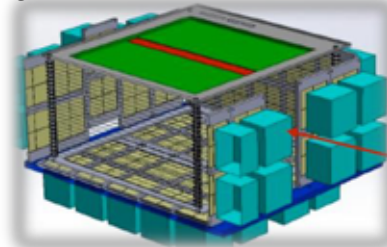
✓ TexAT Active Target TPC detector Upgrade

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

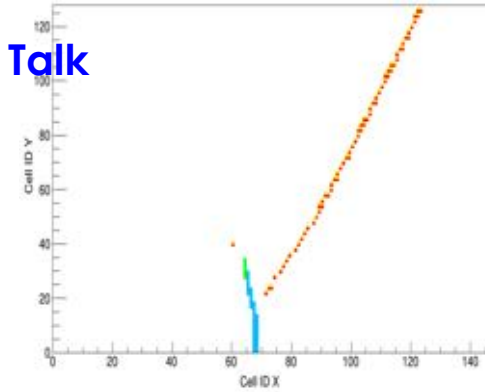
See C. Park's Talk



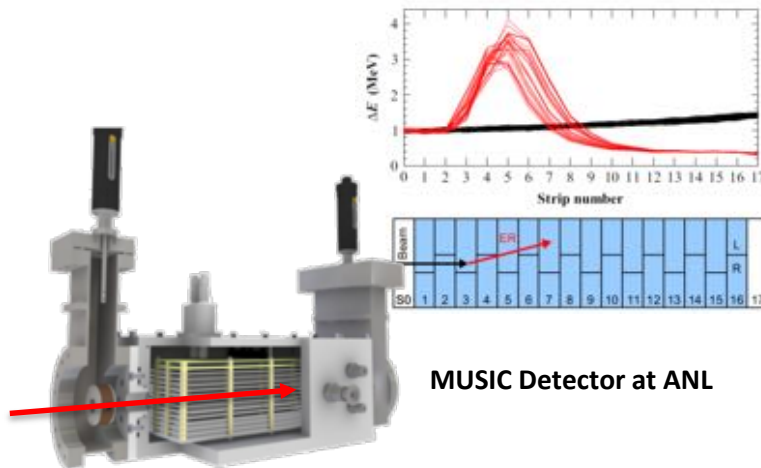
Previous measured data and calculated total cross sections of $^{14}\text{O}(\alpha, p)$ reaction



Texas Active Target (TexAT) design



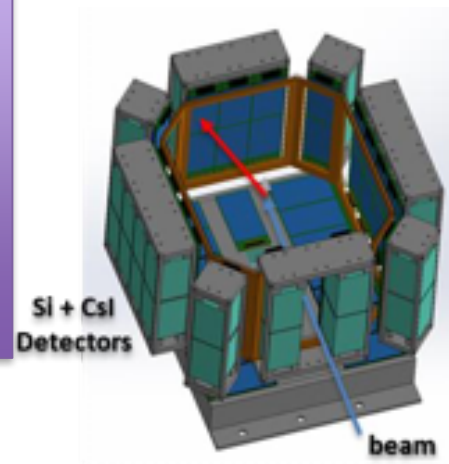
✓ Multi-Sampling Ionization Chamber (MUSIC) detector



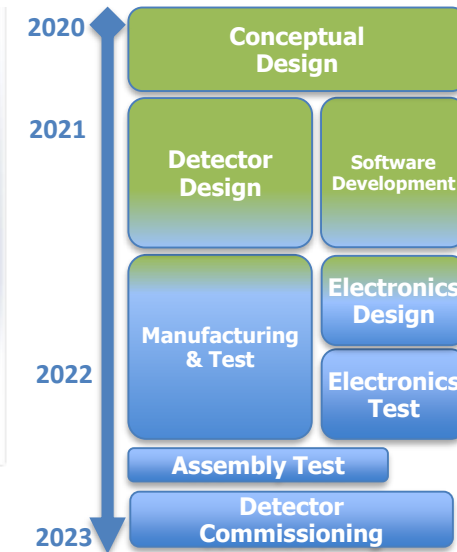
MUSIC Detector at ANL

(p, p)
 (d, d)
 (α, α)
 (α, p)
 (α, n)
fusion

✓ CENS Active Target TPC (aka AToM-X)



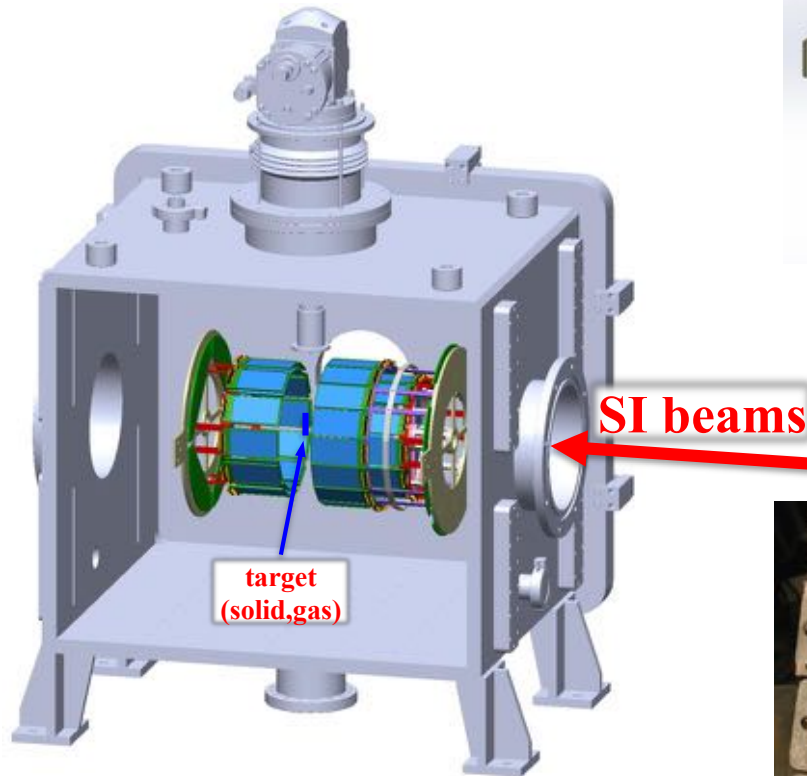
Conceptual Design of AToM-X



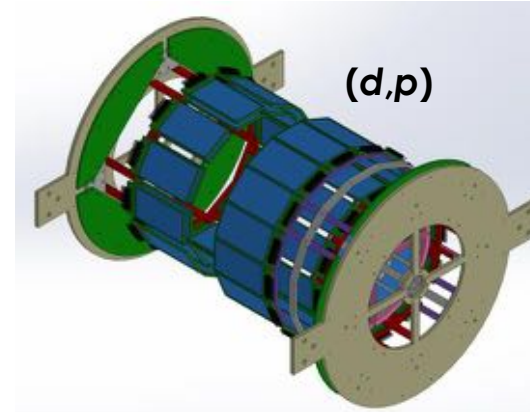
Targets and Detectors for Nuclear Astrophysics Studies at RAON

See S. Bae and B. Moon's Talk

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

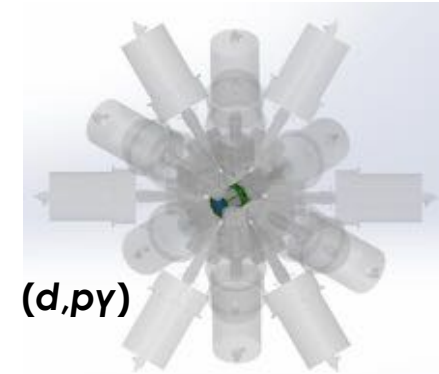


Conceptual Design of STARK chamber

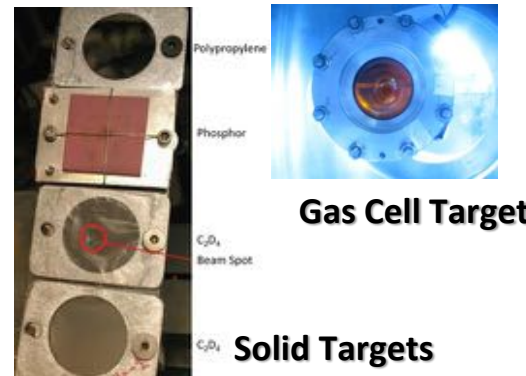


Conceptual Design of STARK

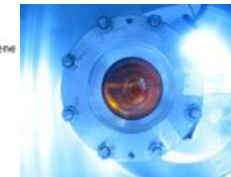
Year 2022!!



Conceptual Design of STARK Jr. and ASGARD



Solid Targets



Gas Cell Target



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

요약 및 정리

- RAON+KoBRA를 활용하는 연구 주제는 지속적으로 발굴 중
 - Loi 4건 + 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
 - 연구 인력 양성
- 희귀동위원소 빔을 활용한 연구 준비