

전남대학교 저에너지 입자물리실험실 소개

전남대학교 물리학과
양병수

2024년 12월 20일
입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회
대전 기초과학연구원 과학문화센터

연구 이력

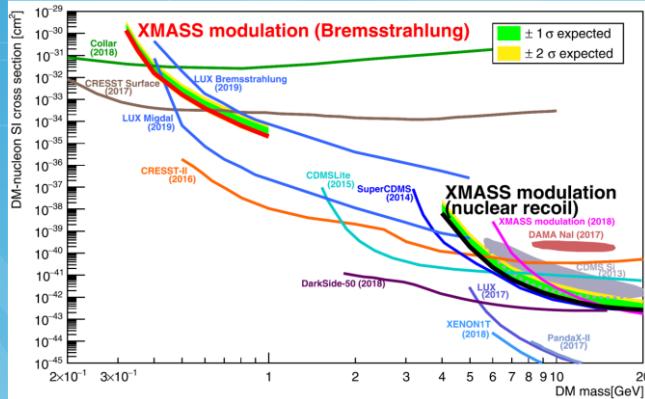
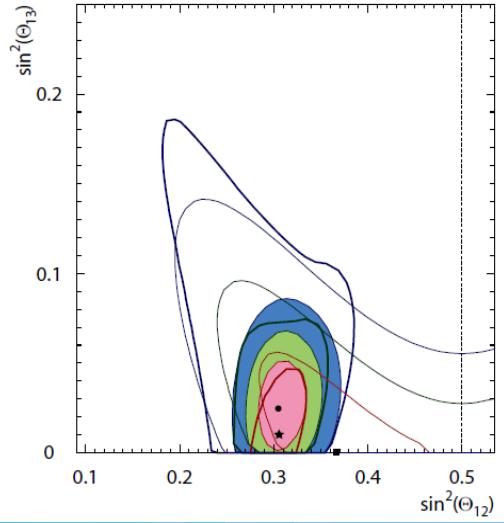
소속

- ▣ 2004~2010: 서울대학교 대학원
- ▣ 2010-2011: 서울대학교 연수연구원
- ▣ 2011-2013: 도쿄대학교 우주선연구소
project researcher
- ▣ 2013-2018: 도쿄대학교 우주선연구소
project research associate
- ▣ 2018-2021: 기초과학연구원 액시온 및 극한
상호작용 연구단 선임연구원
- ▣ 2021-2024: 서울대학교 프런티어물리사업단
BK 조교수
- ▣ 2024-현재: 전남대학교 물리학과. 조교수.

참여연구: 기간

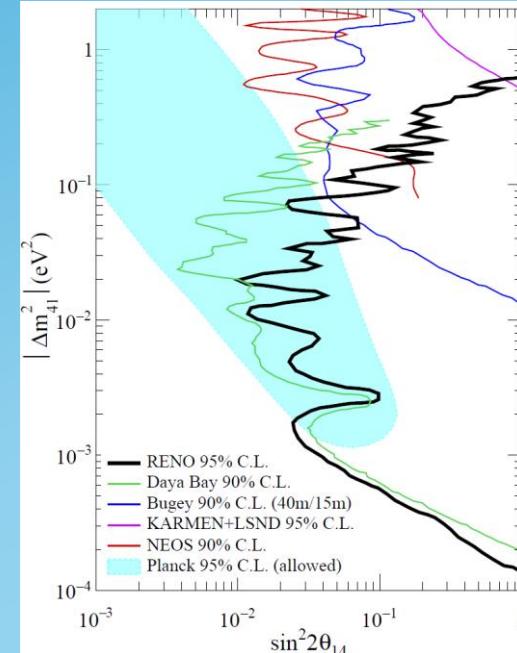
- ▣ Super-Kamiokande: 2005~2011,
2021~현재
- ▣ RENO: 2010~2011,
2018~현재
- ▣ XMASS: 2011~2023. 실험 종료
- ▣ CAPP18T: 2018~2023. 실험 종료
- ▣ RENE: 2022~현재.
- ▣ CENNS: 2022~현재.
- ▣ Hyper-Kamiokande: 2024~현재.
- ▣ KNO: 2021~현재. 실험 기획.

과거 중요 연구 결과

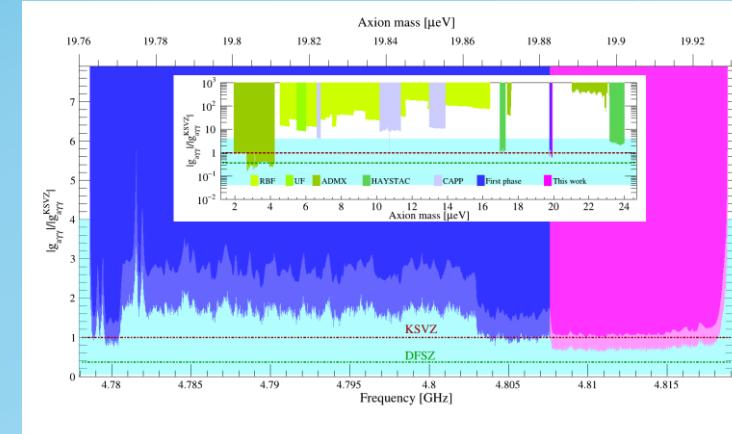


XMASS
Sub-GeV 암흑물질 탐색
PLB795 (2019) 308-313.

Super-Kamiokande
태양 중성미자 및 진동 파라메터 측정
3 종 중성미자: θ_{12} - θ_{13}
PRD83,052010, (2011)



RENO
불활성 중성미자 탐색
PRL 125 191801 (2020)



CAPP18T
액시온 암흑물질 탐색
PRL 131, 081801 (2023)

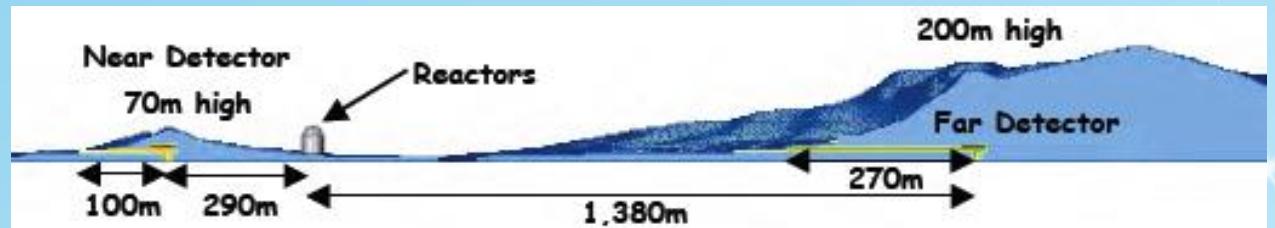
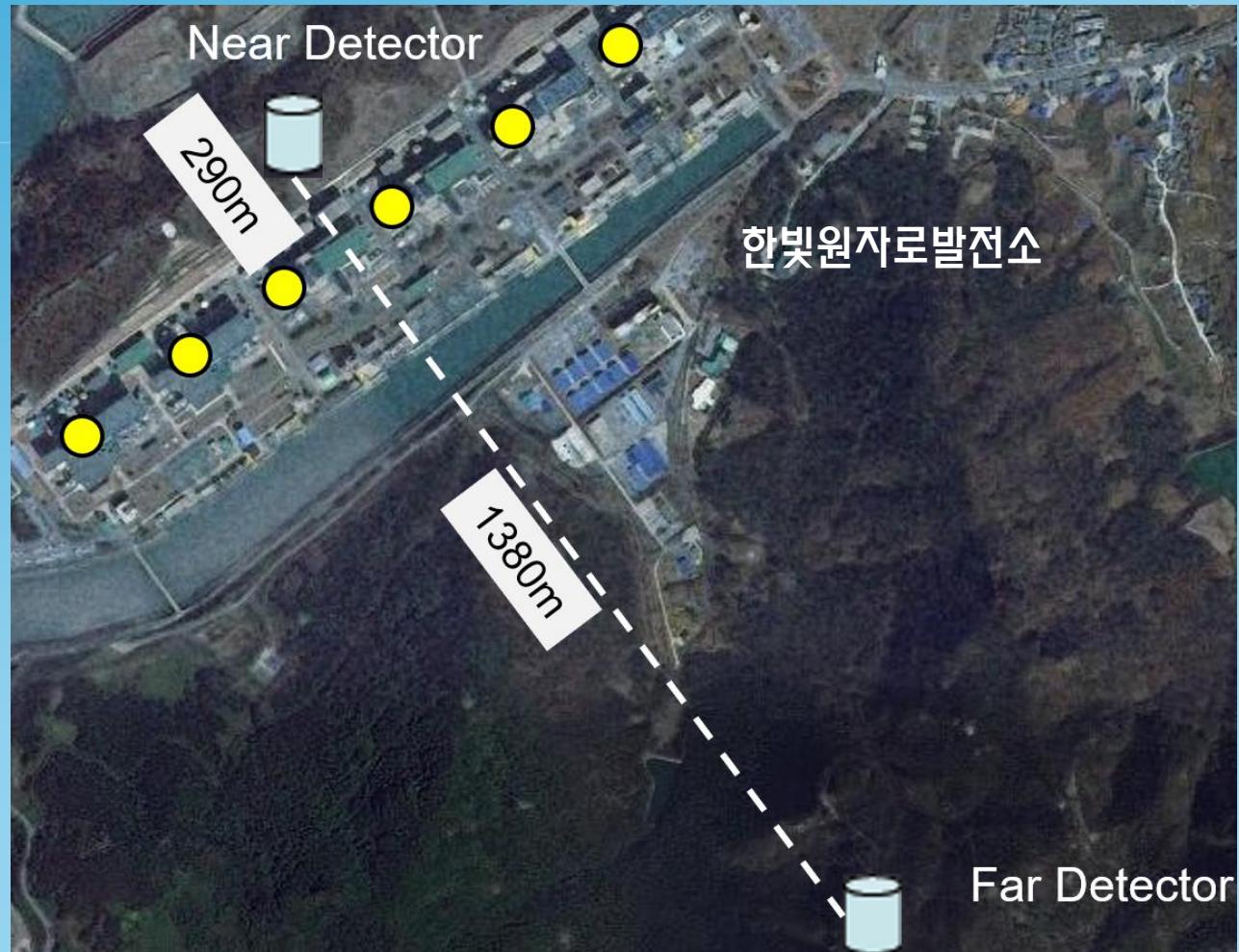
저에너지 입자 물리 실험실

- ▣ 현재는 입자 물리 실험 중 상대적으로 낮은 에너지를 갖는 중성미자 실험에 주력.
- ▣ 현재 참여 실험
 - 원전 중성미자 실험: RENO, RENE
 - 대형 물 체렌코프 실험: Super-Kamiokande, Hyper-Kamiokande, KNO
 - 걸 맞은 탄성 핵-중성미자 산란 실험: Coherent
- ▣ 구성원
 - 교수: 양병수
 - 박사 후 연구원: 정다은 (G-LAMP, 2024년 11월부터)

RENO

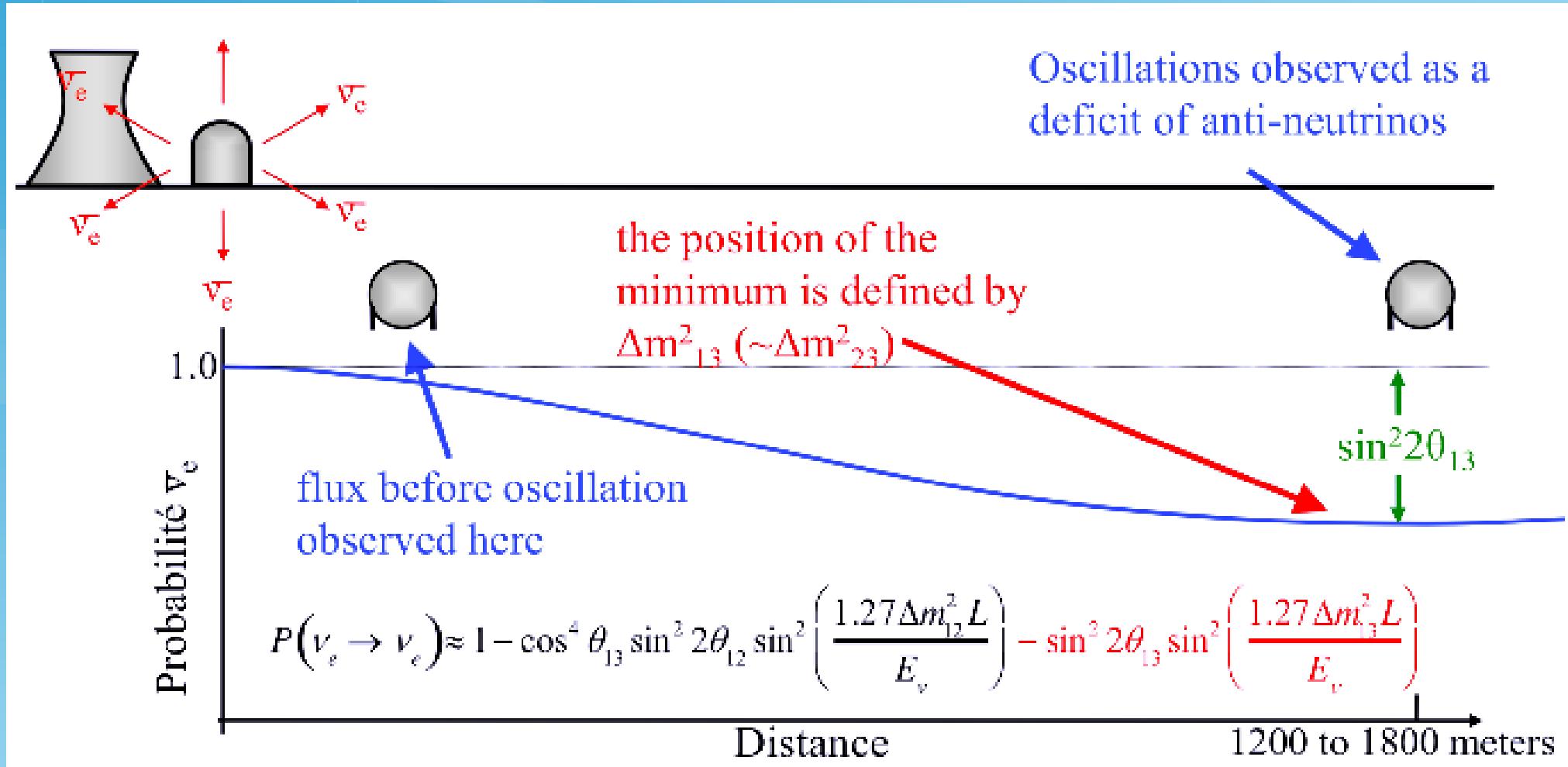
(Reactor Experiment for Neutrino Oscillation)

- 중성미자 진동 파라메터인 θ_{13} 측정 목표.
- 2011.08 – 2023.03 데이터 수집.
- 현재 7개 기관에서 약 30명 참여.



RENO 실험의 방법

근거리 검출기와 원거리 검출기에서 검출한 중성미자 개수의 차이에서 θ_{13} 측정



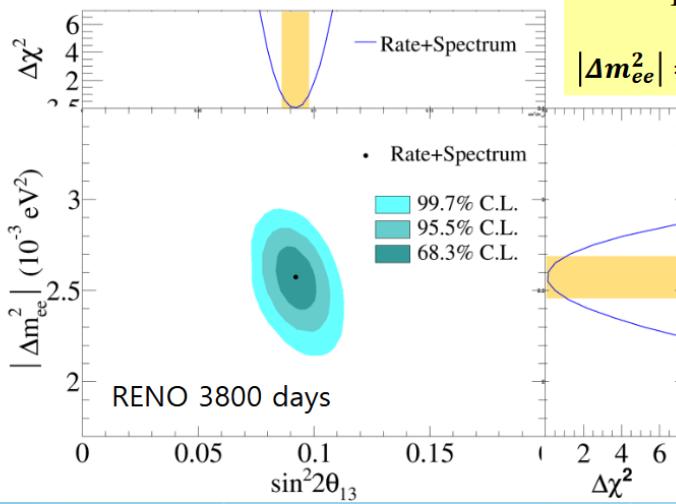
RENO 연구단 현황

- ▣ 실험 대표: 유종희 (서울대)
- ▣ 후속 실험인 RENE 실험 준비 위해 2023년 3월 데이터 수집 중단.
- ▣ 총 3800일 데이터 분석 후 결과 투고 예정.
- ▣ RENE 실험 시작에 맞춰서 근거리 검출기 재가동 준비.

RENO 최신 결과

- RENO 3800일 nGd 데이터를 사용한 진동 파라메터 측정 결과. 곧 논문 투고 예정.
- 그 외 다른 주제들도 연구 중.

Based on the measured far-to-near ratio of prompt spectra from the 3800[d] sample,



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0920^{+0.0044}_{-0.0042} (\text{stat.})^{+0.0041}_{-0.0041} (\text{syst.}) \quad (6.4\% \text{ precision})$$

$$|\Delta m_{ee}^2| = 2.57^{+0.10}_{-0.11} (\text{stat.})^{+0.05}_{-0.05} [\times 10^{-3} \text{ eV}^2] \quad (4.5\% \text{ precision})$$

source of the systematic uncertainty

	$\Delta m_{ee}^2 [10^{-3} \text{ eV}^2]$	$\sin^2 2\theta_{13} []$
reactor	-	± 0.0013
detection efficiency	-	± 0.0032
energy scale	± 0.05	± 0.0016
backgrounds	± 0.02	± 0.0020

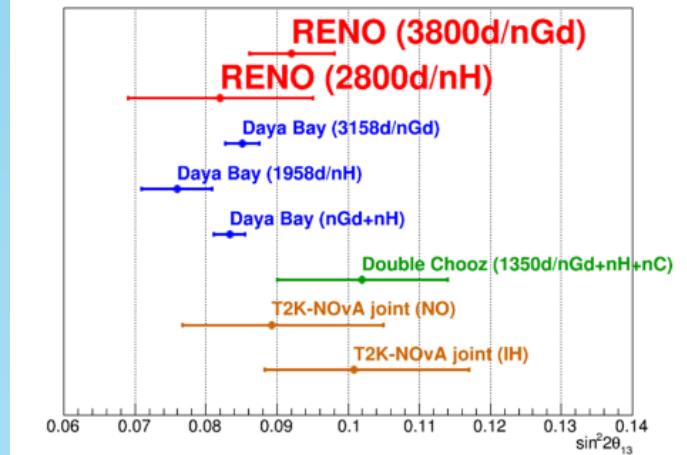
(reference) 2018 PRL

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0896 \pm 0.0048 (\text{stat.}) \pm 0.0047 (\text{syst.})$$

$$|\Delta m_{ee}^2| = 2.68 \pm 0.12 (\text{stat.}) \pm 0.07 [\times 10^{-3} \text{ eV}^2]$$

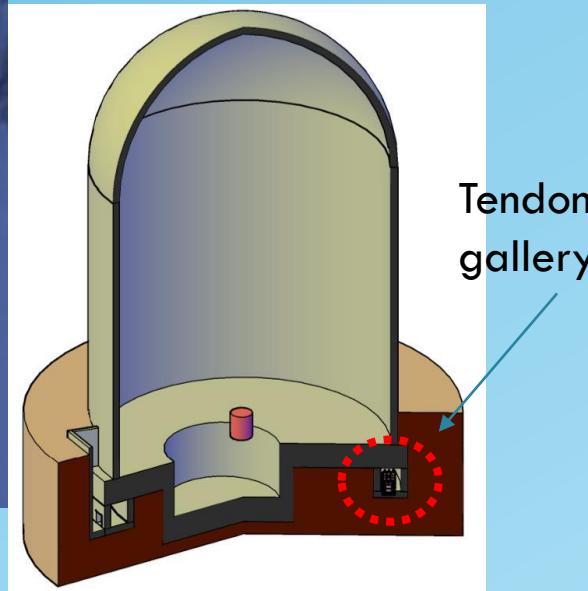
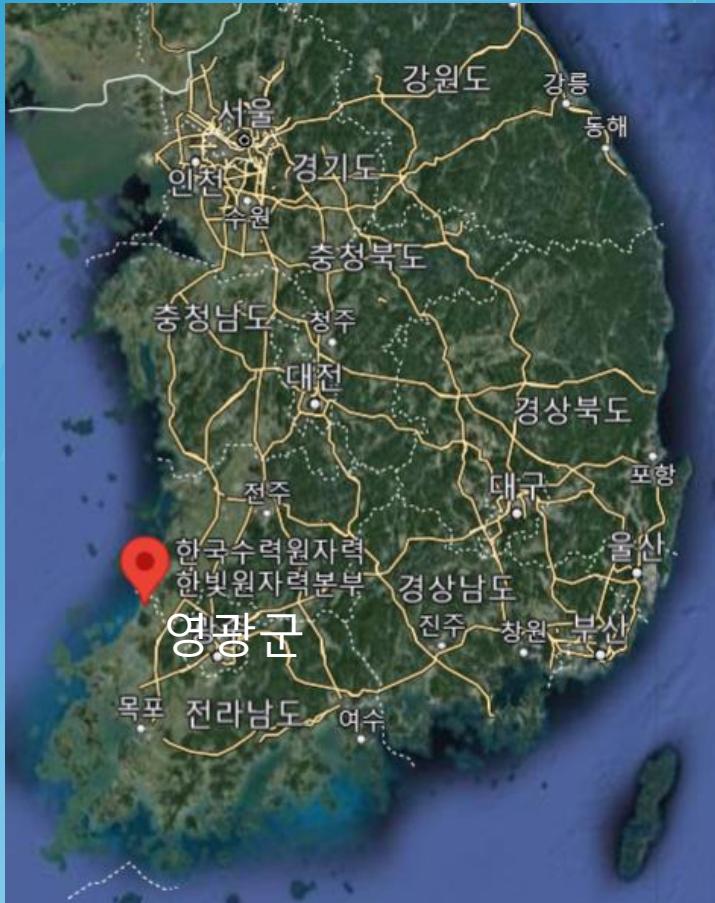
$\sin^2 2\theta_{13}$

Global Comparison for $\sin^2 2\theta_{13}$



RENE

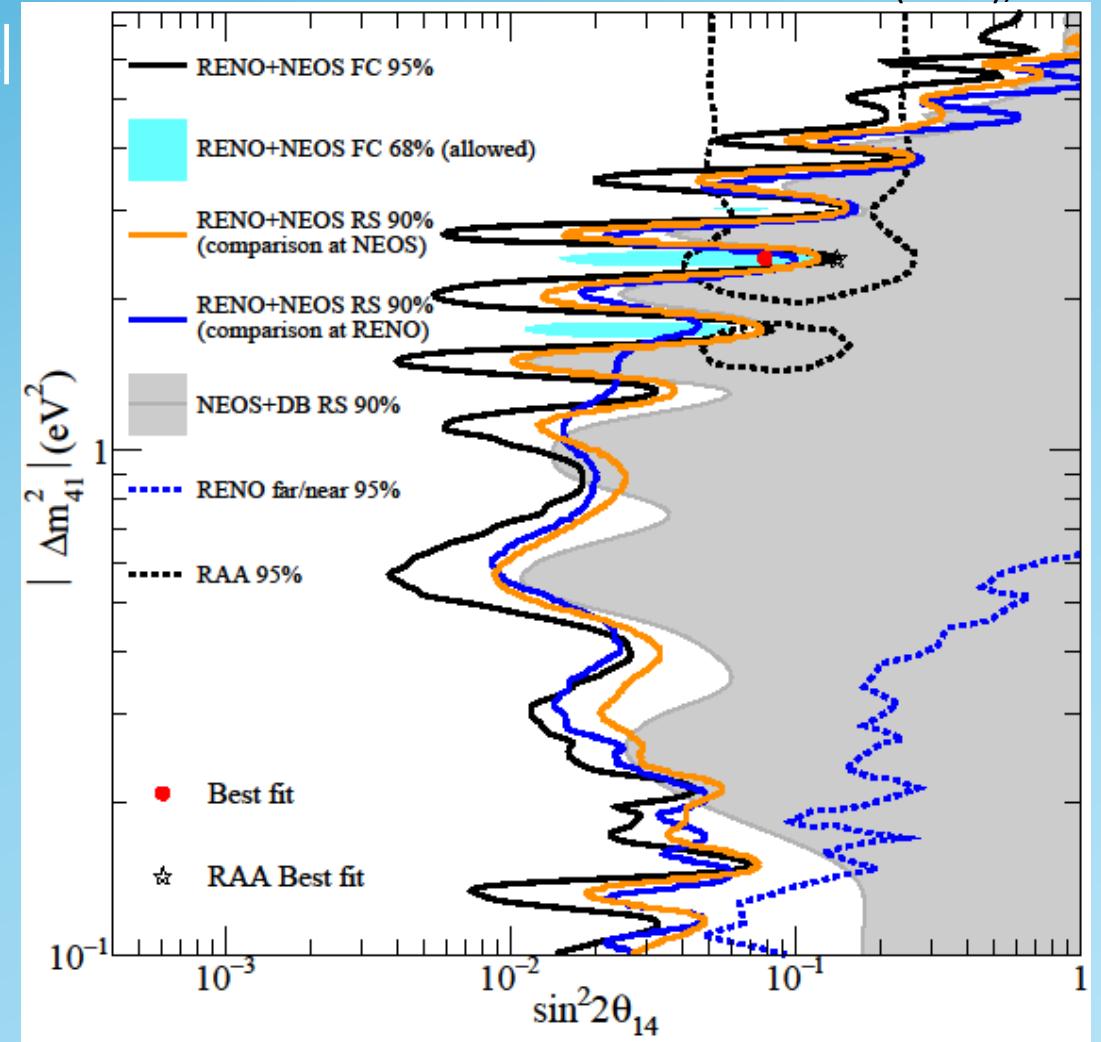
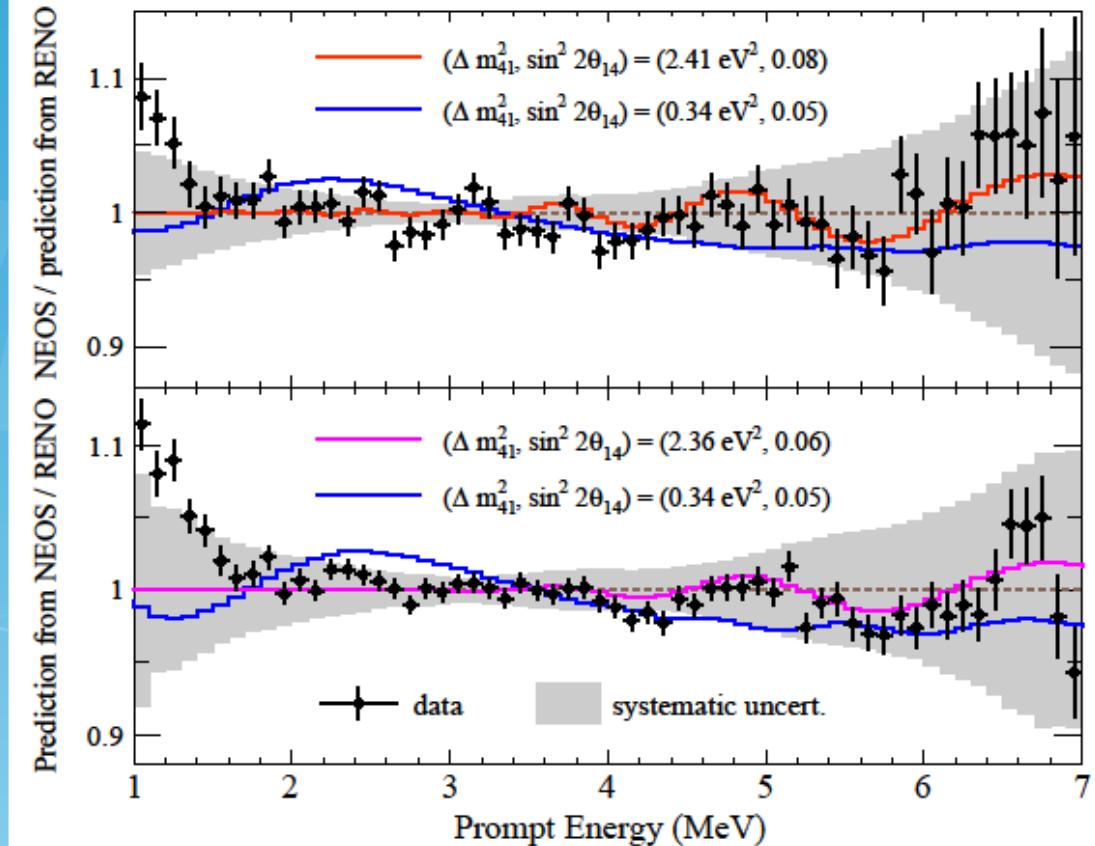
(Reactor Experiment for Neutrino and Exotics)



- ▣ 한빛 원자력 발전소 단지 내 원자로 텐던 갤러리에 위치할 예정.
- ▣ 원자로와 거리 약 ~23m.
- ▣ RENO-NEOS 공동연구의 결과에서 얻어진 불활성중성미자 진동의 흔적을 검증. (PRD 105 (2022) 111101)

RENE 실험의 동기

RENO-NEOS 공동연구에서 4번째 중성미자의 가능성을 발견



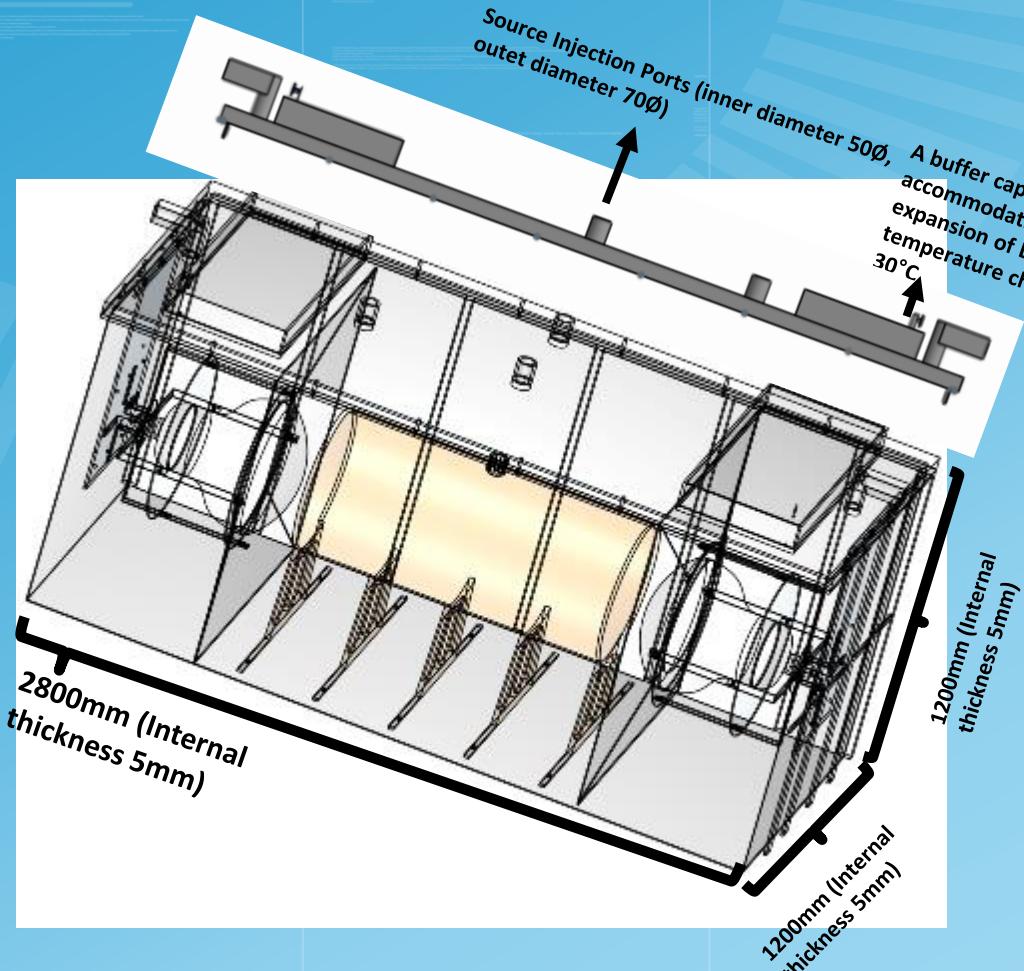
- 검증을 위해 계통 오차 줄여야 함.

RENE 연구단

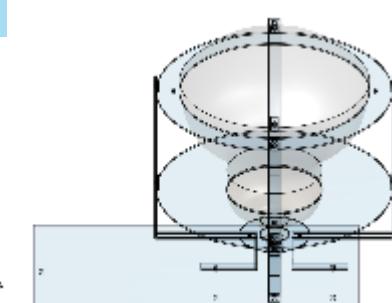
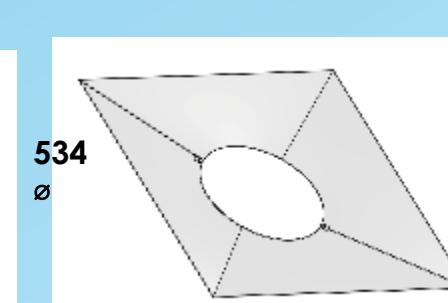
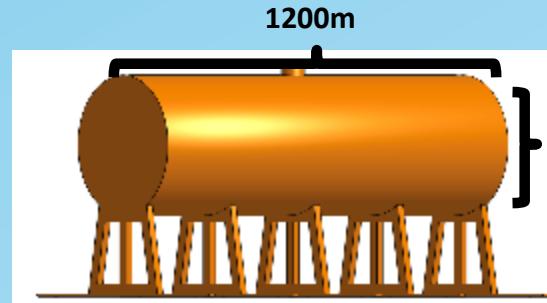


- 2022년 가을 발족.
- 전남대 중성미자 정밀연구센터 (SRC) 주축으로 12개 연구소, 약 30여명.

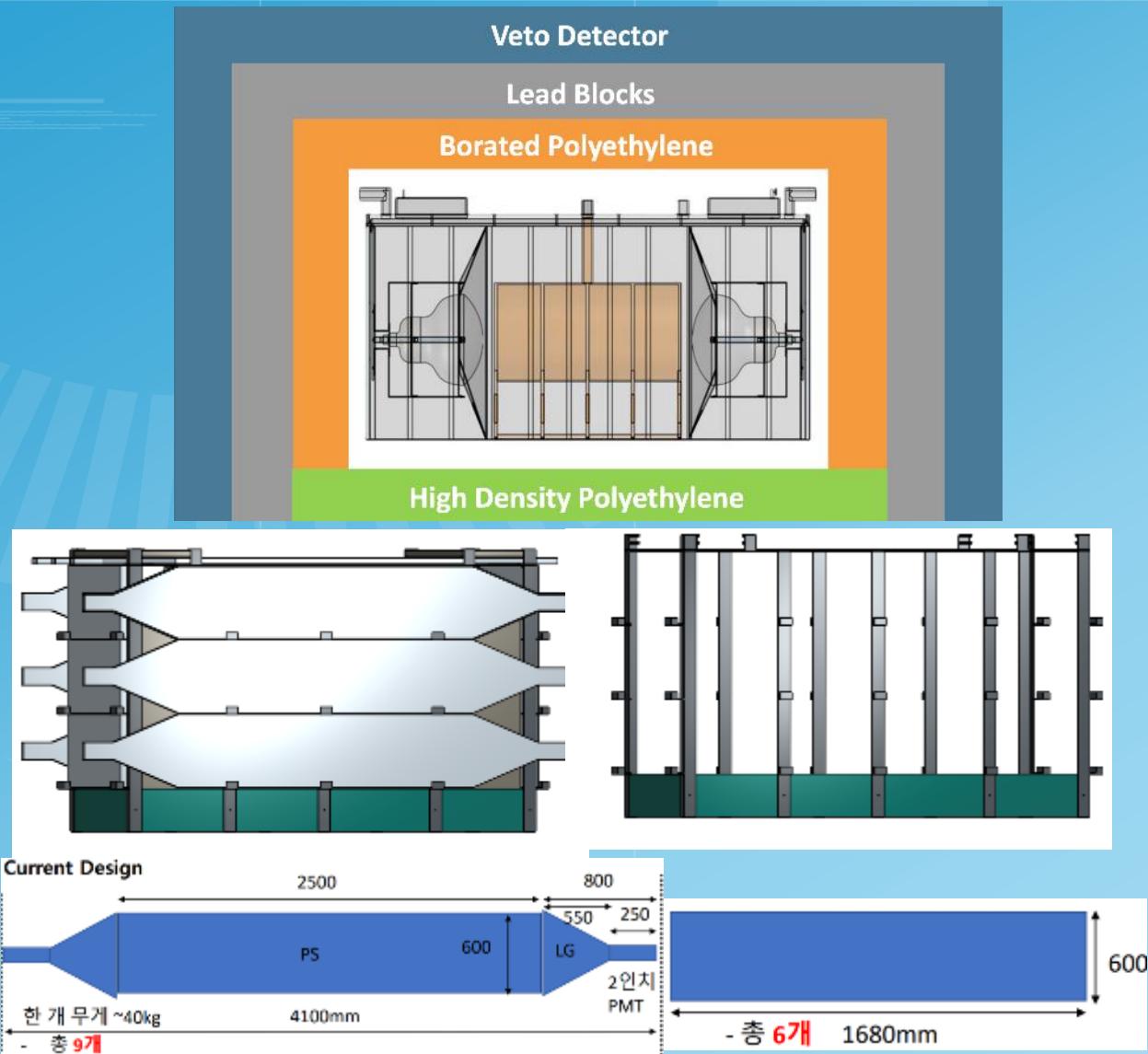
검출기 내부 구조



- ▣ 가돌리늄 0.5% 첨가한 액체 섬광물지 (GdLS) 채운 원통형 타겟.
- ▣ 액체 섬광 물질 (LS) 채운 상자형 스테인레스 감마 캐처.
- ▣ 빛 검출 효율 높이기 위한 텤플론 반사판.
- ▣ 두 20인치 광전자 증배관(PMT)



검출기 바깥 구조



1. 외부 방사능 차폐

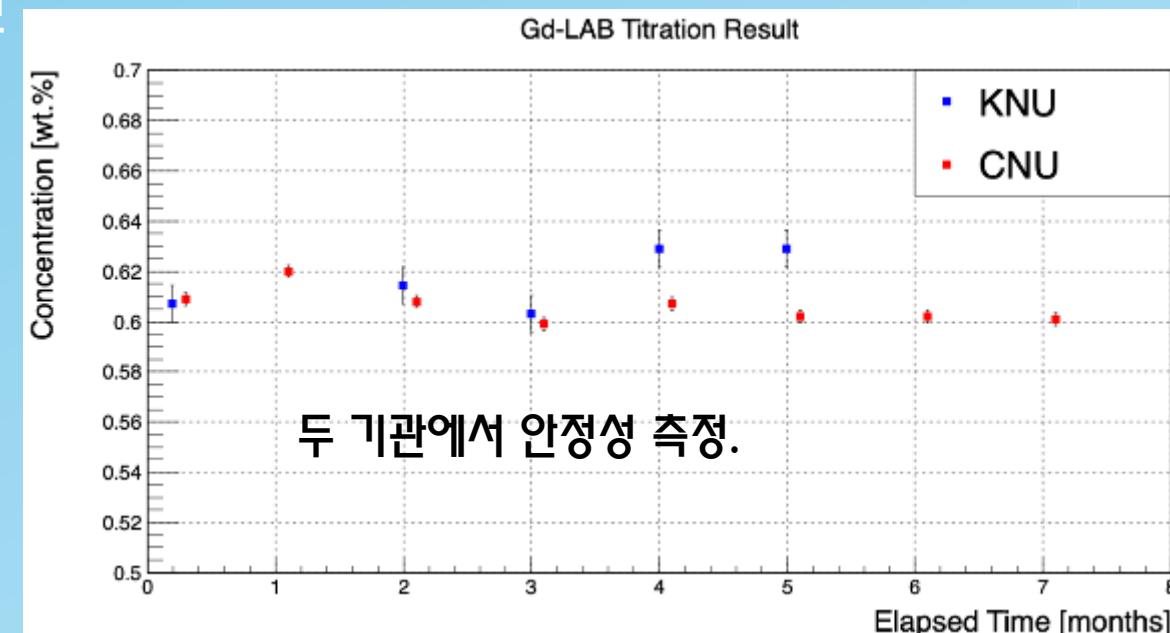
- 10 cm 두께 보론 첨가 혹은 메밀도 폴리에틸렌
- 10 cm 두께 납벽돌 ~3,300 장
- 중성자 및 외부 감마선 차단

2. 비토 검출기

- 플라스틱 섬광검출기 15장. 네오스 실험에서 공여.
- 32개 2인치 PMT.
- 우주선 사건 제거.

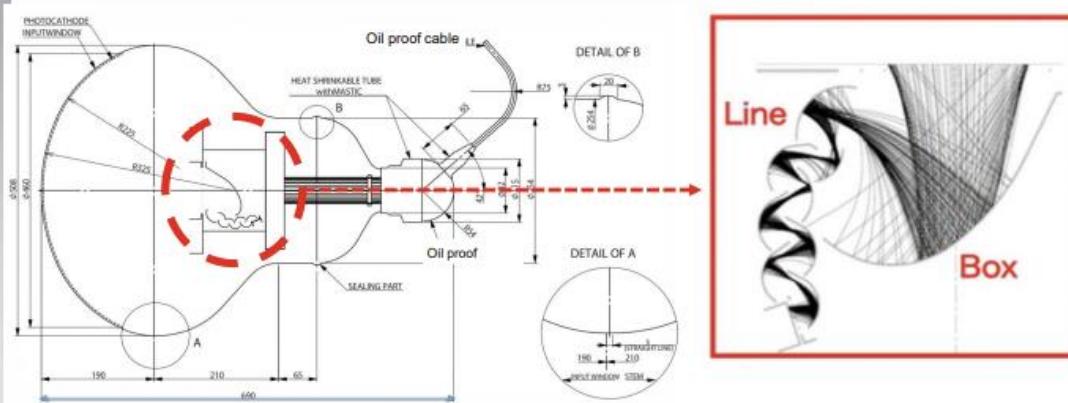
액체 섬광 물질

- 1년 전에 약 210L 0.6% Gd-LS 제조.
- 7개월 동안 0.6%의 높은 농도에서도 안정적.
- 감마 캐처를 채우고 Gd-LS 희석을 위한 추가 LS 곧 제조.



RENE용 PMT

20" PMT R12860 specifications



- ◆ Specifications (Typ.)
 - Spectral response: 300nm to 650nm / λ_{peak} : 420nm / Peak to Valley: 1.5~2.8
 - Gain: 1×10^7 ② 1.6pC / Applied voltage: 2000V (Temp.: 25 °C)

- ◆ Dynode structure
 - Box (Efficient collection) & Line (uniform drift path) dynode

- ◆ Features
 - Fast time response & High stability
 - Quantum efficiency: 30%

TTS ~2ns

ref. Hamamatsu handbook

▣ 기름 등에 사용 가능
한 것 외에는 HK
PMT와 동일한 성능.

데이터 수집 (DAQ)

DAQ 장치



Notice NKFADC500

- 4 + 4 channels
- ADC resolution = 12 bit
- $2.5 \text{ V}_{\text{pp}}$ dynamic range
- Sampling rate = 500 MS/ch/s
- 4+4 GB DRAM



Notice M64ADC (ADC)

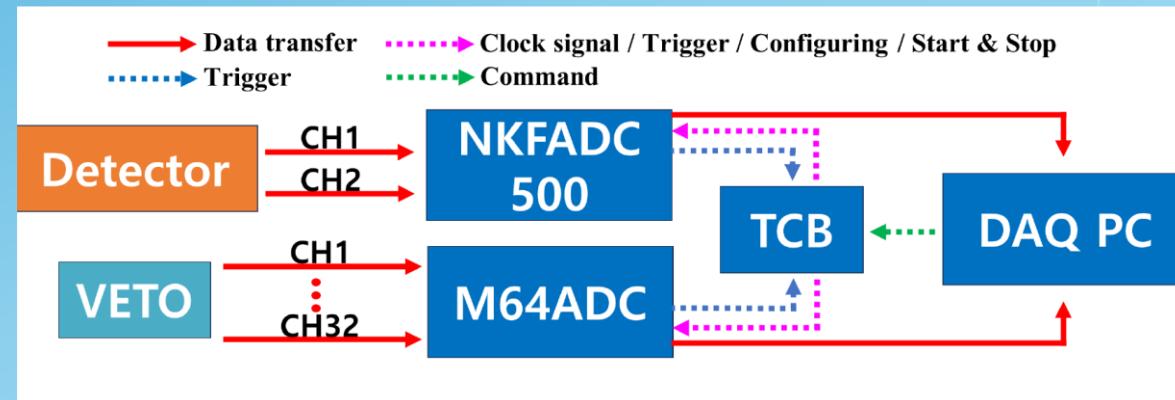
- 32 channels
- ADC resolution = 12 bit
- 2 V_{pp} dynamic range
- Sampling rate = 62.5 MS/ch/s
- 4 GB DRAM



Notice TCB (Trigger Control Board)

- Make trigger and clock signals
- 40 ADCs available
- RJ-45 port

DAQ 계략도



- 20인치 PMT 2개 용으로 NKFADC500. 파형 판별 (PSD, pulse shape discrimination) 적용 예정.
- 비토 검출기 용으로 M64ADC
- 트리거 등 동기화 위해 TCB 사용.

감마 캐처 구축

뚜껑



감마캐처



2024-12-20



- ▣ 스테인레스 감마 캐처 제작. 2024. 04. 15
- ▣ 여름에 RENO 원거리 터널로 이동.

입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회, 양병수

17

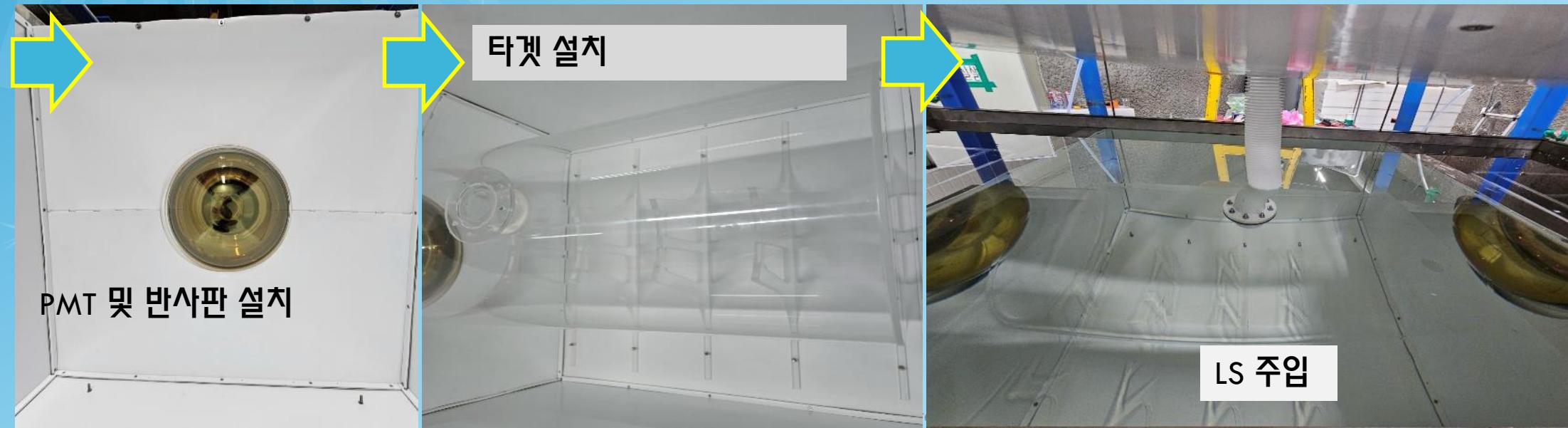
비토 검출기 조립

올해 여름 많은 학생 및 연구원의 참여로
비토 검출기 조립



검출기 구축

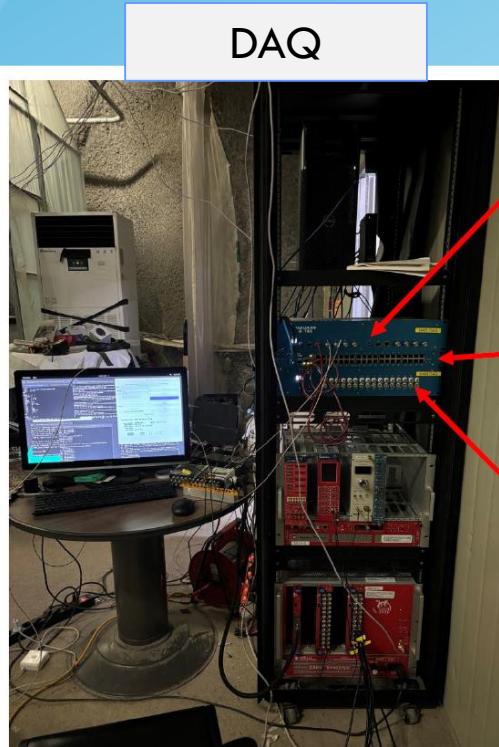
PMT



검출기 구축



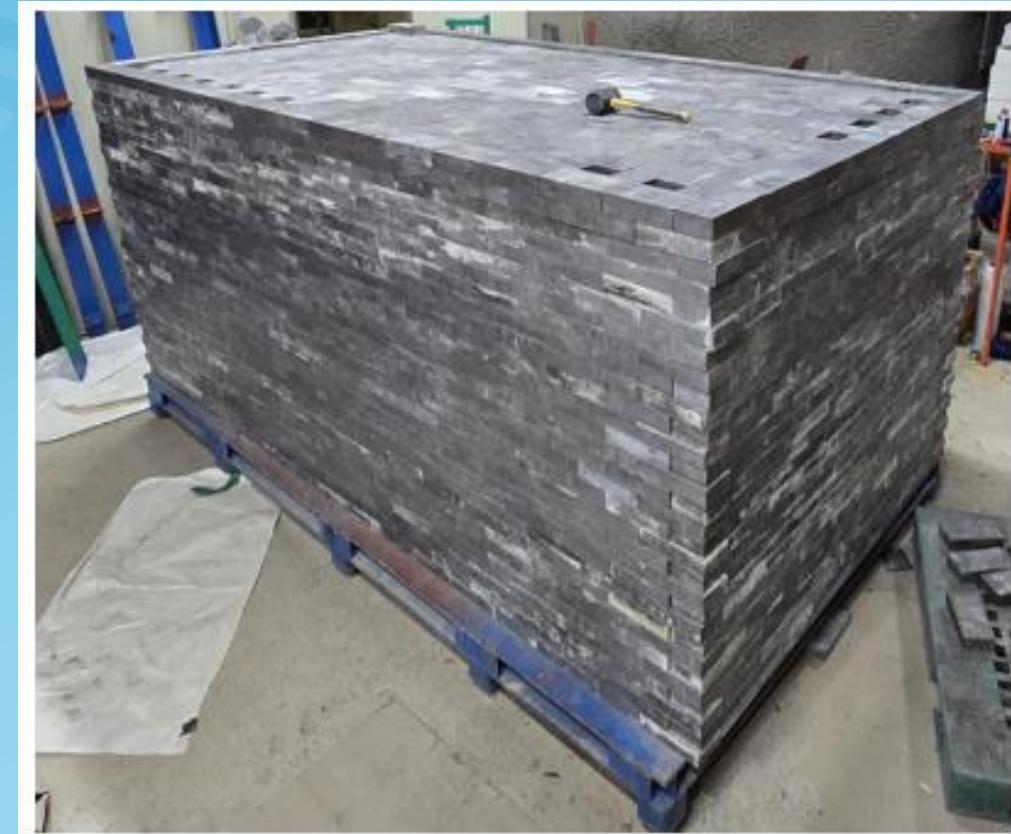
검출기 구축



- 올해 10월 외부에 비토 검출기 설치.
 - RENO 원거리에서 검출기 시운전.
 - 납과 폴리에틸렌 차폐체 미설치로 외부 배경 사건 및 방사능 선원 사용 검출기 및 DAQ 성능 확인.

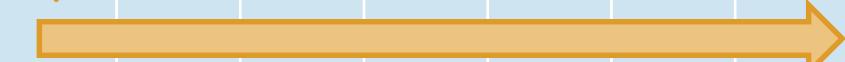
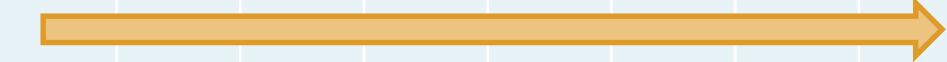
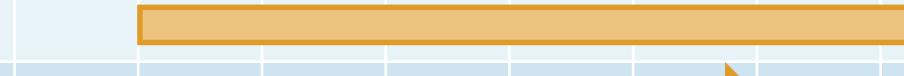
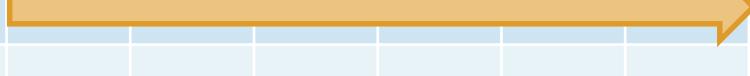
검출기 구축

▣ 남과 폴리에틸렌 차폐체 설치 후 검출기 성능 검사 중.



RENO 원거리 터널

RENE 일정

연	2022				2023				2024				2025			
월	1-3	4-6	6-9	10-12	1-3	4-6	6-9	10-12	1-3	4-6	6-9	10-12	1-3	4-6	6-9	10-12
연구단 발족																
설계																
시뮬레이션																
Gd-LS 및 LS																
DAQ 구축																
PMT																
구축																
시운전 (RENO 원거리 터널)																
RENE 데이터 수집 (텐돈 갤러리)																

RENE

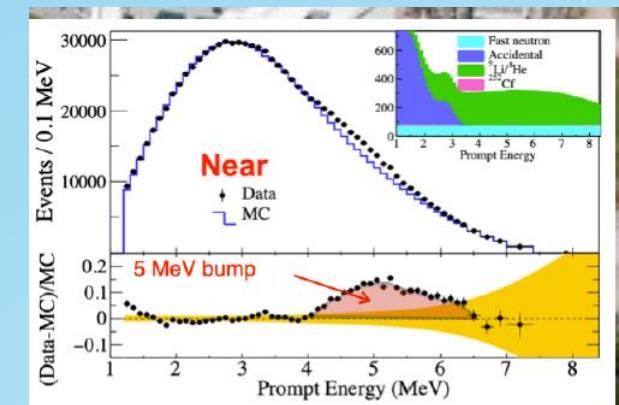
RENE 미래 계획

1. RENE 검출기 성능 향상

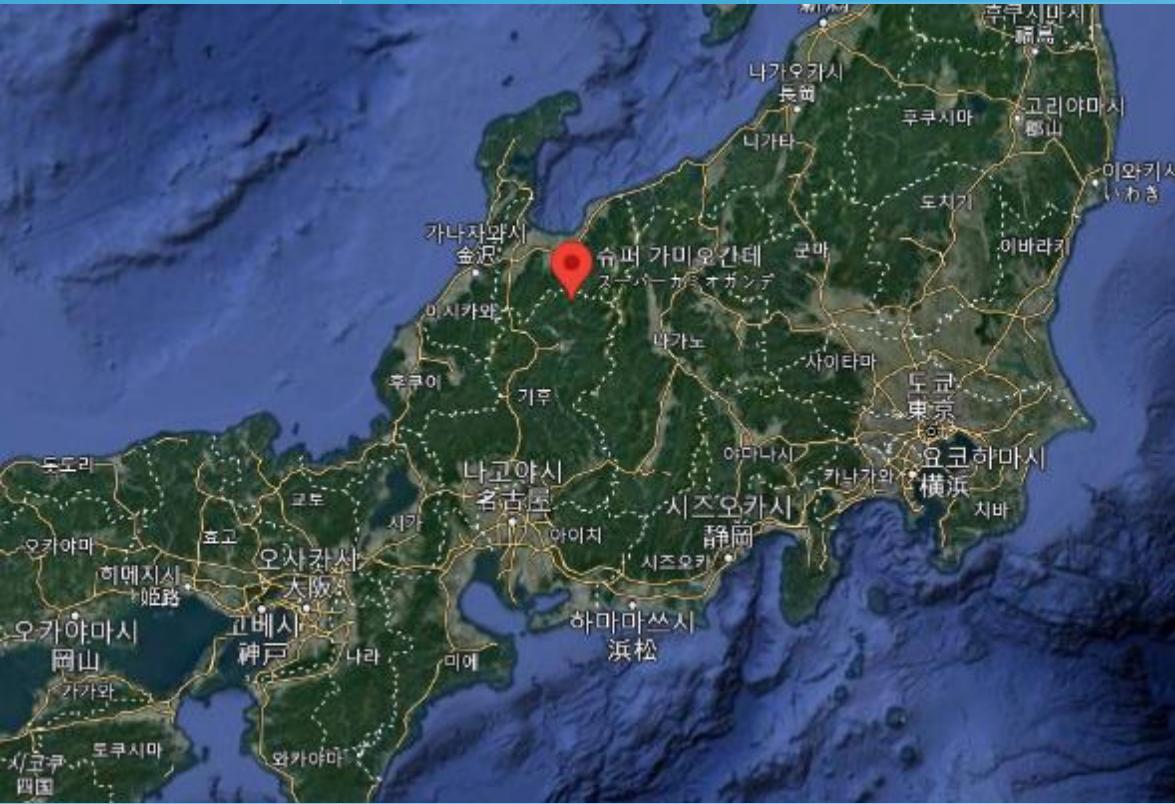
- 감마캐처에 8 혹은 10인치 다수 설치.

2. 미국 오크리지 연구소 연구용 원자로에 검출기 설치

- 원전 중성미자 플럭스와 스펙트럼 정밀 측정.
- ^{235}U 과 ^{239}Pu 의 스펙트럼 분리.



Super-Kamiokande



일본 기후현
카미오카초 소재

산 정상에서 1000 m
아래 위치

높이/지름 (m) : 약 40/40
초순수 용량: 50 kton
PMT: 약 11100 개

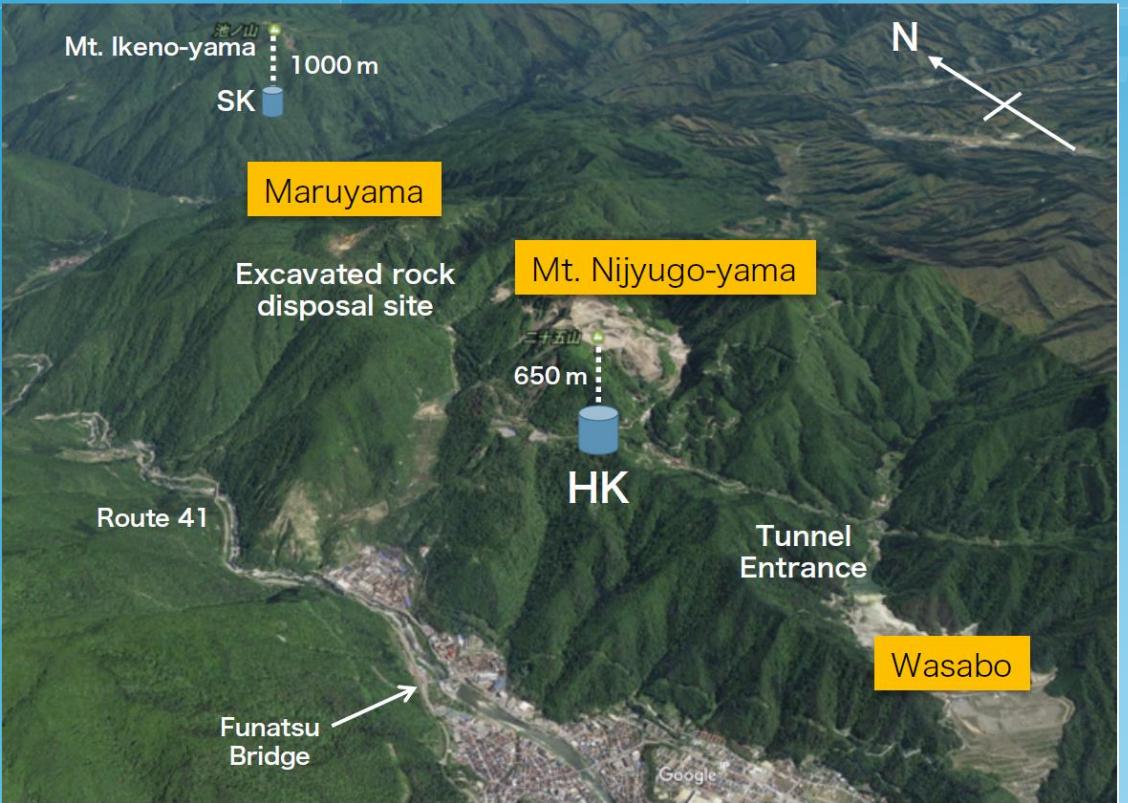


▣ 11개국, 50여개 연구소, 약 200명의 연구원 참여

(Super-Kamiokande 공식 홈페이지에서)

The Super-Kamiokande is operated by an international collaboration of about 200 people and about 50 institutes from Japan, the United States, Korea, China, Poland, Spain, Canada, United Kingdom, Italy, France and Vietnam.

Hyper-Kamkiokande



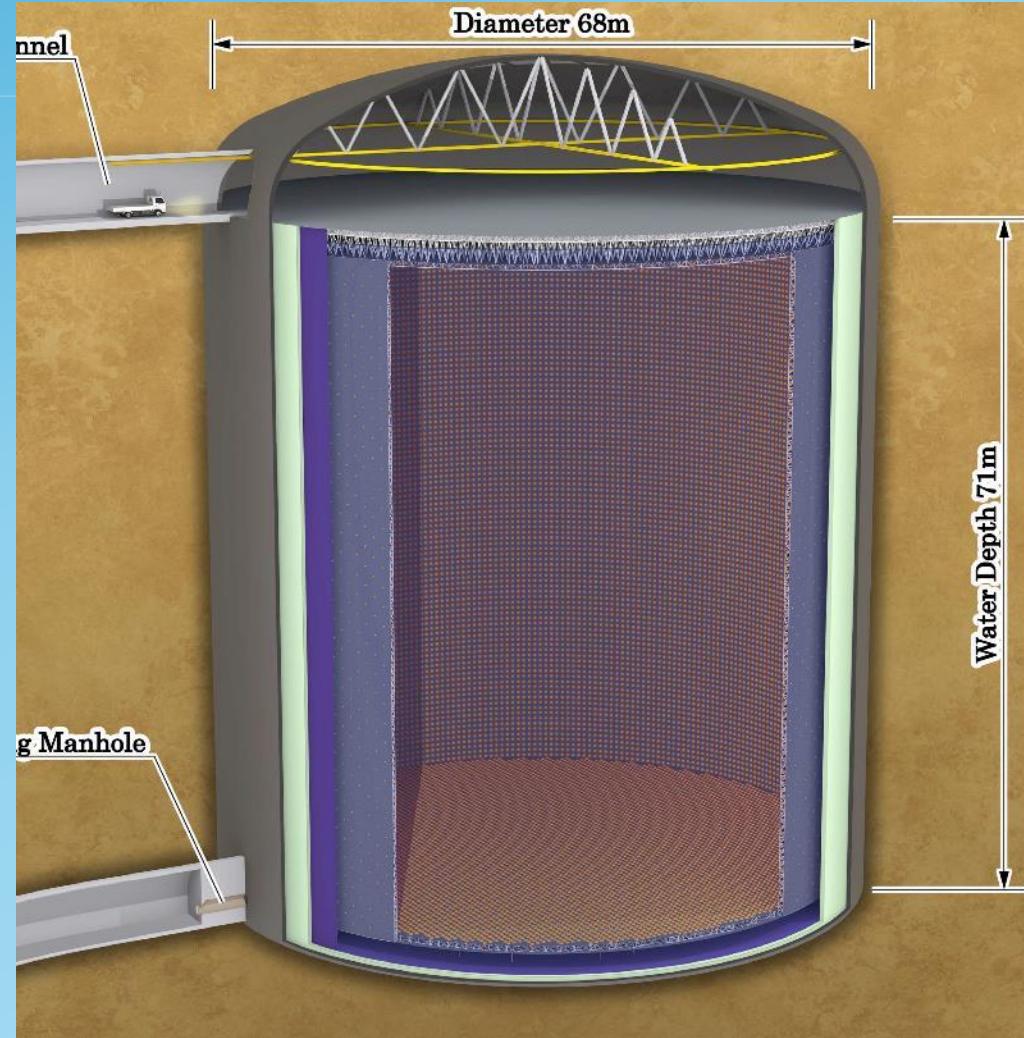
▣ 22개국, 104 개 연구소
약 600여명 연구원
(75%: 비 일본인)



일본 기후현
카미오카초 소재

산 정상에서
650 m 아래
건설 중

높이/지름 (m) :
약 70/70
초순수 용량:
260 kton
PMT:
약 20000 개



Kamiokande 실험들의 연구 주제

핵자 붕괴

중성미자물리

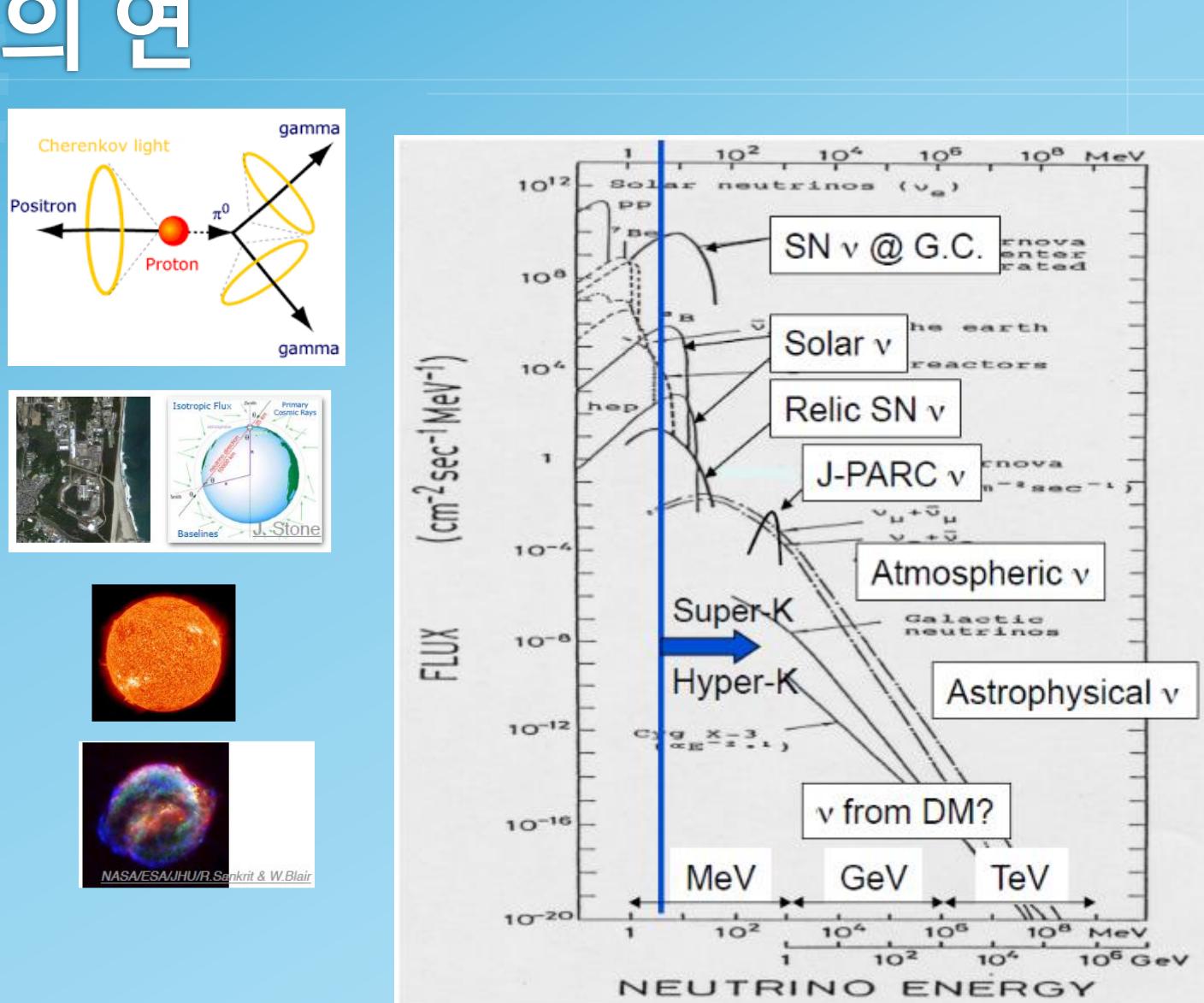
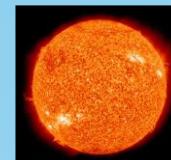
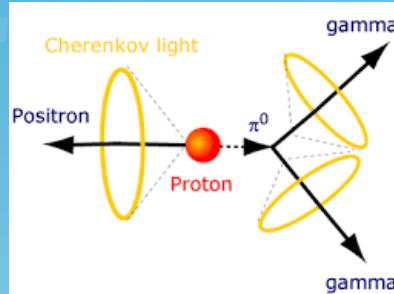
- 가속기, 대기 중성미자
- 태양 중성미자

중성미자 천문학

- 초신성, 태양, 천체 등.

암흑물질

불활성 중성미자



SK/HK 한국 그룹

▣ 경북대

- 문장성
- 박정식
- 이직
- 조현석

▣ 광주과학기술원

- 장지승

▣ 기초과학연구원/지하실험연구 단

- 최고운

▣ 동신대

- 박명렬
- 최준호

▣ 서울대

- 유종희: SK/HK 한국그룹 대표.
- 정승현

▣ 성균관대

- 권은향
- 서지옹
- 윤인태
- 이민우

정렬: 가나다 순 SK/HK 모두 참여
밀줄·굵은 글씨: 책임 SK만 참여
자금 HK만 참여

▣ 울산과학기술원

- 곽경진
- 류동수

▣ 전남대

- 문동호
- 박령균
- 양병수: SK 캘리브레이션 그룹 공동
의장
- 오준교
- 주경광: Steering Resource Board

Super-Kamiokande의 역사

사고

전체 재건

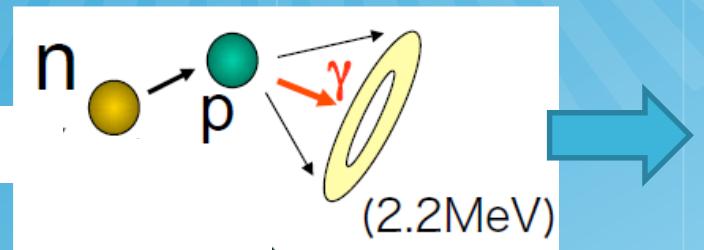
검출기 개수



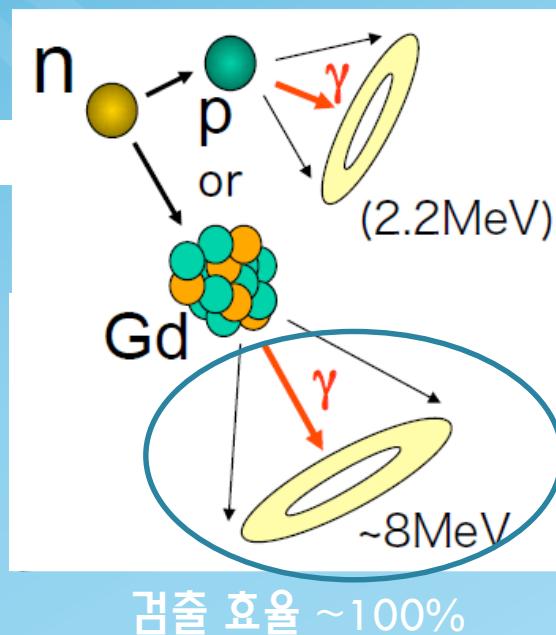
SK-Gd

- Gd을 첨가하여 중성자 검출 효율 높임
→ 중성자 발생하는 반응 검출 효율 높임.

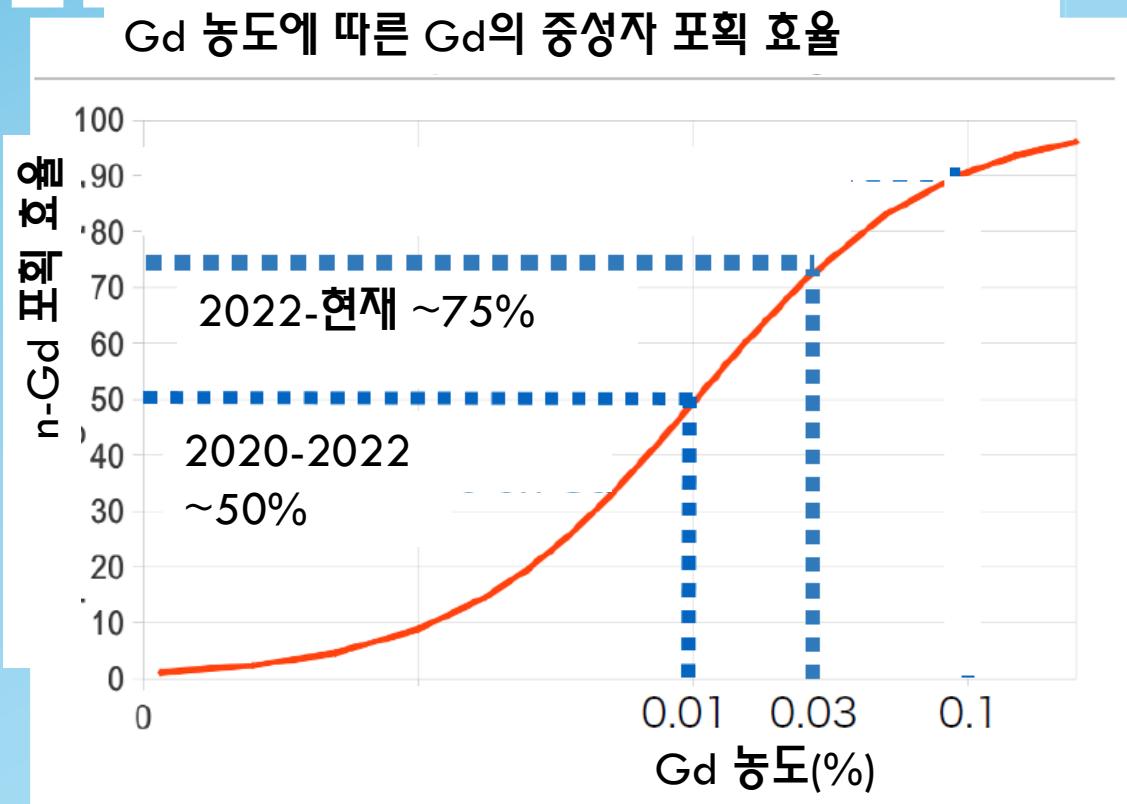
가돌리늄 첨가 전



가돌리늄 첨가 후



SK에서는 검출이 잘 되지 않는
너무 낮은 에너지
효율 20~30%



Gd 투입에 의한 기대 효과

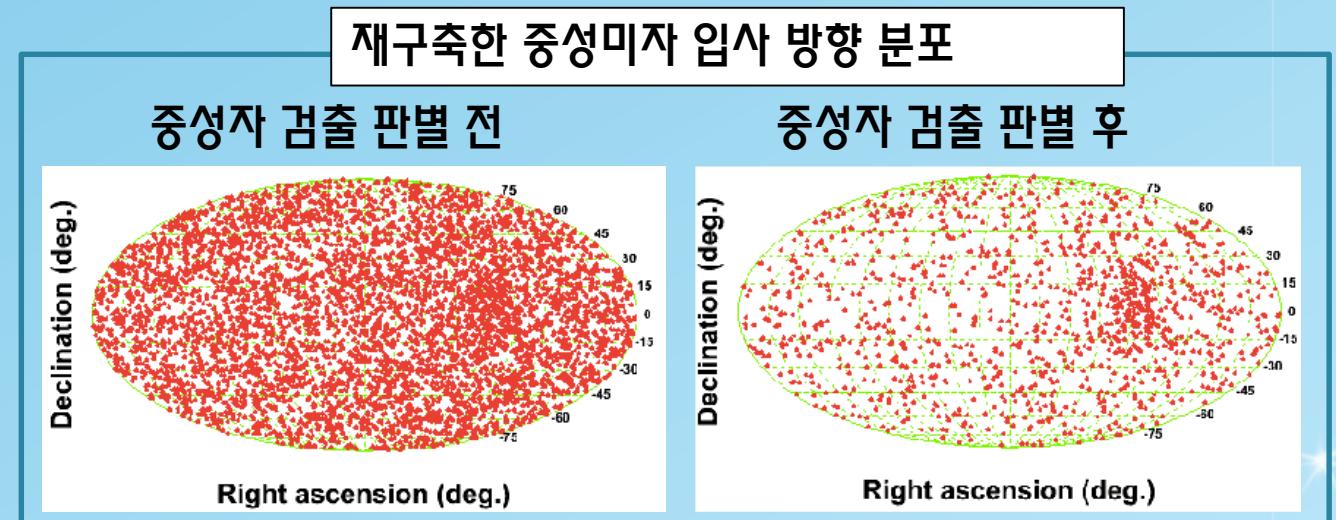
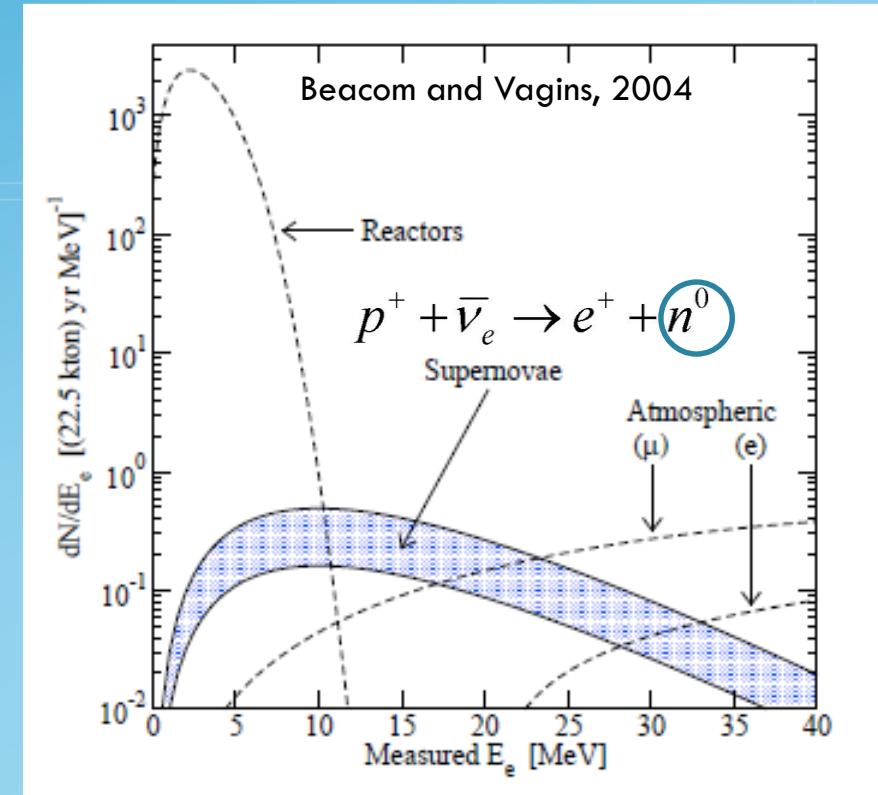
▣ 초신성 중성미자: 많은 역 베타 붕괴(IBM) 반응 예상 됨.

1. 초신성배경중성미자 (Diffuse supernova neutrino background (DSNB), 혹은 (Supernova relic neutrino (SRN))
탐색

- 배경사건 제거로 인한 감도 향상
- 탐색 범위 확장

2. 초신성 중성미자 실시간 탐색

- 방향 정확도 향상
- 초신성 폭발 초기 발생 중성미자 탐색 능력 향상



Gd 투입에 의한 기대 효과

▣ 대기 중성미자

- 중성미자/반중성미자 구별 향상

▣ 양성자 붕괴

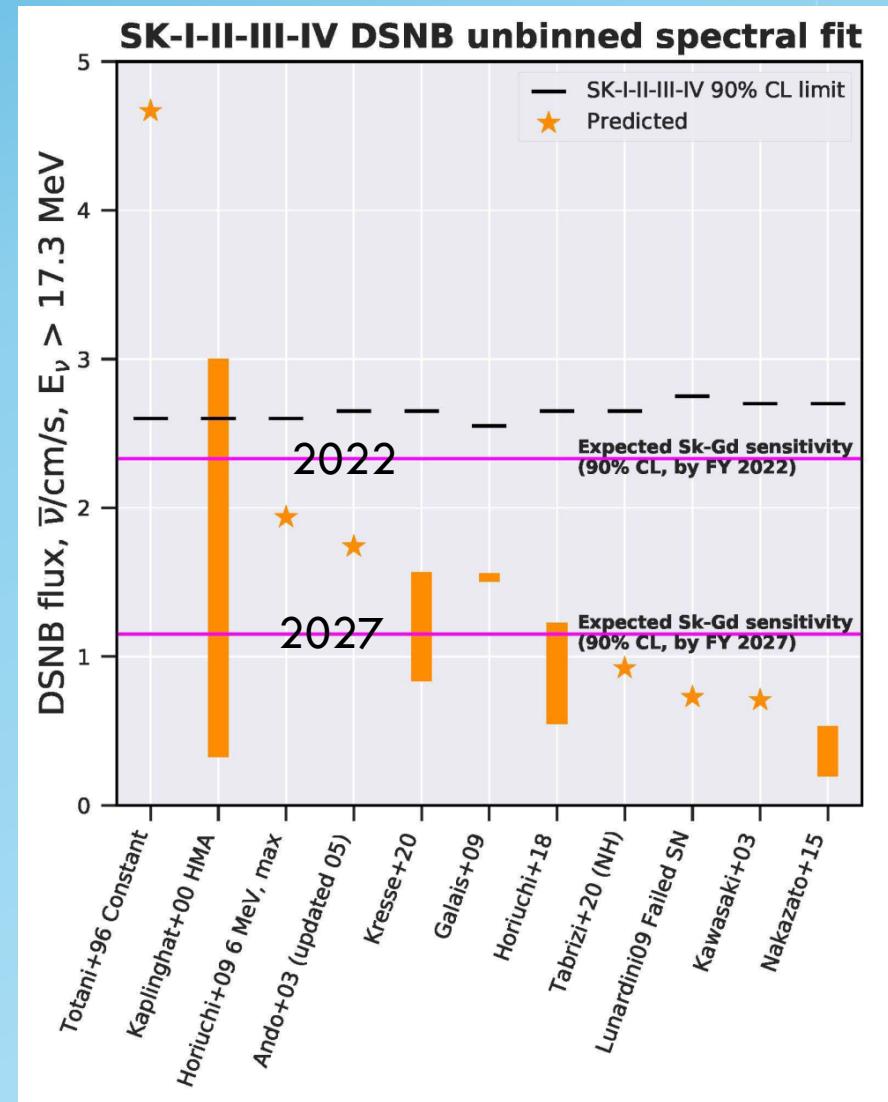
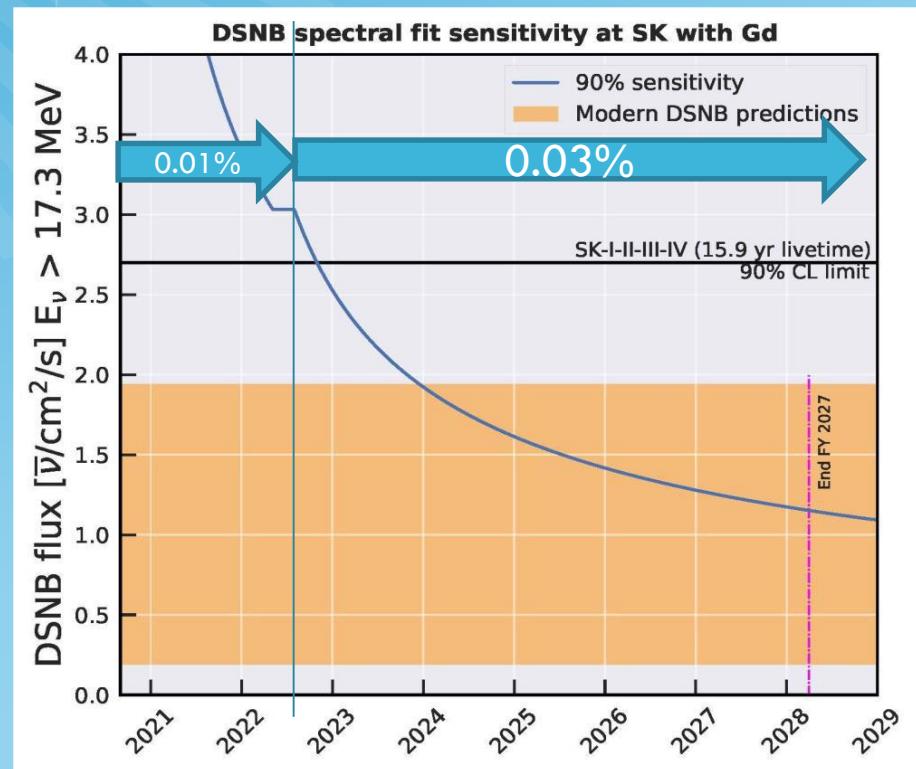
- 대기중성미자 배경사건 제거 향상

▣ 태양 중성미자

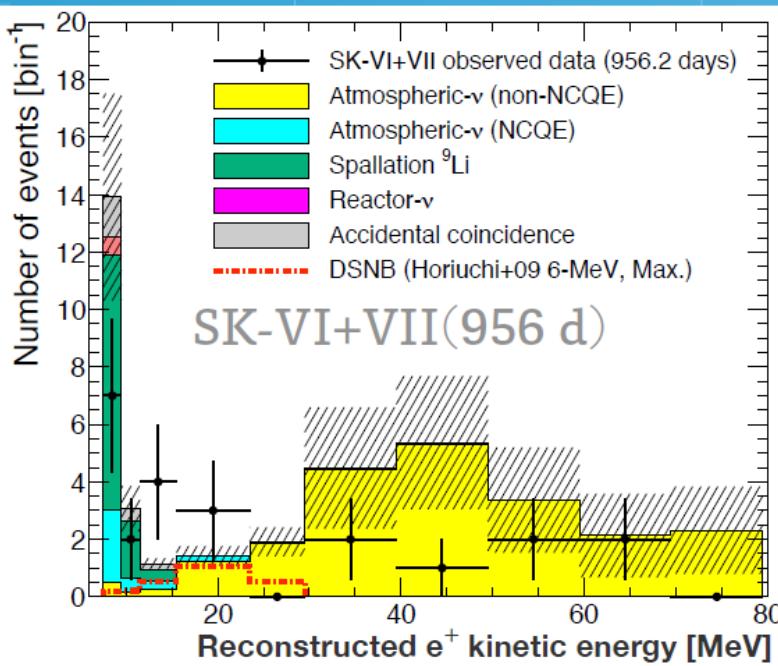
- 우주선에 의한 원자핵 파쇄 (spallation) 배경사건 제거 향상

Gd 농도 0.03%에서 초신성 배경 중성미자 예상 감도

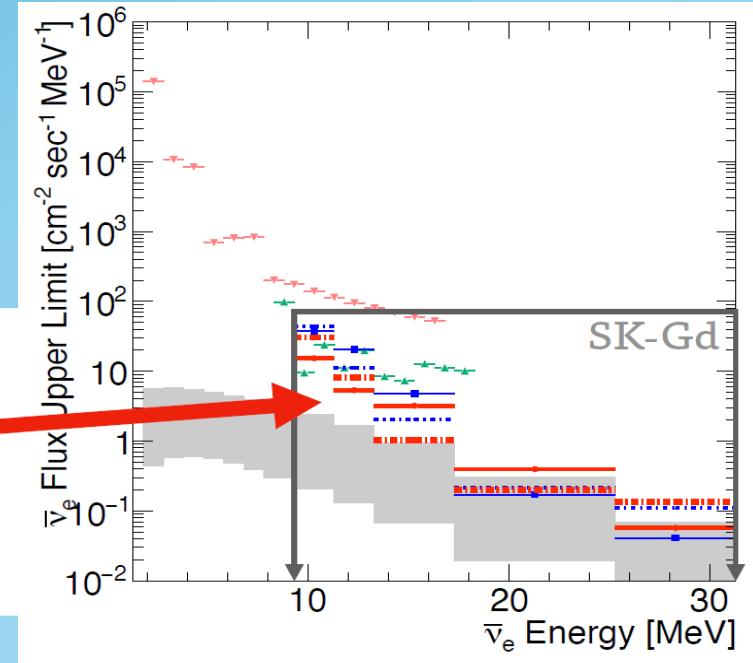
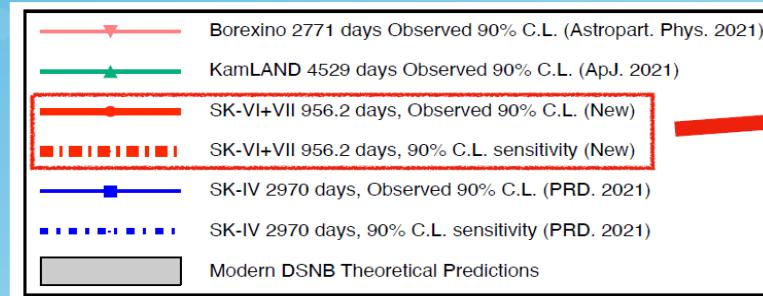
- 2023년도 말에 초신성 배경 중성미자에 대한 감도가 최근 이론 예상치 영역에 돌입.
- 수 년간 데이터로 대부분의 예상치 검증 가능.



SK-Gd 초신성배경중성미자 탐색 최신 결과



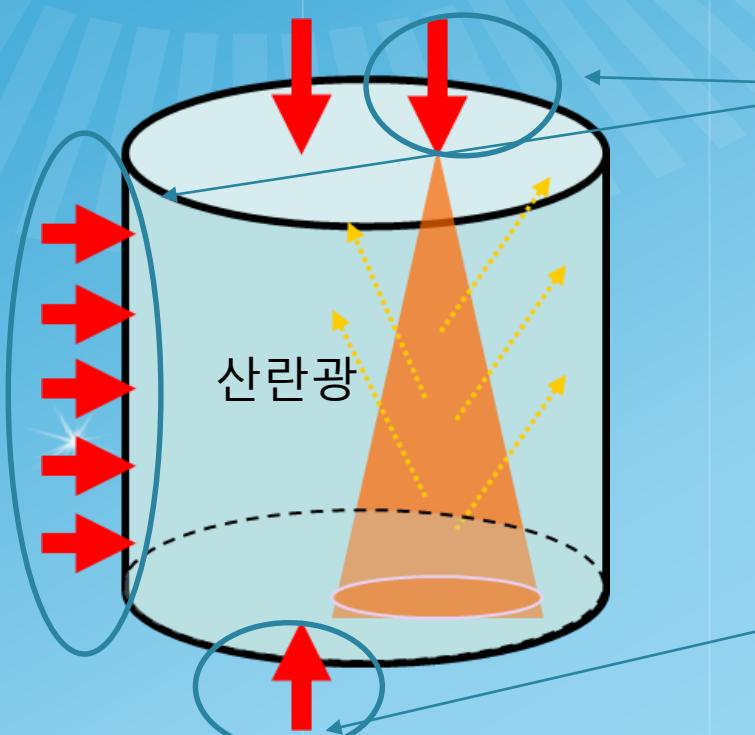
956일 데이터 사용
SK-VI 552일 데이터. 0.01 wt% Gd
SK-VII 404일 데이터. 0.03 wt% Gd



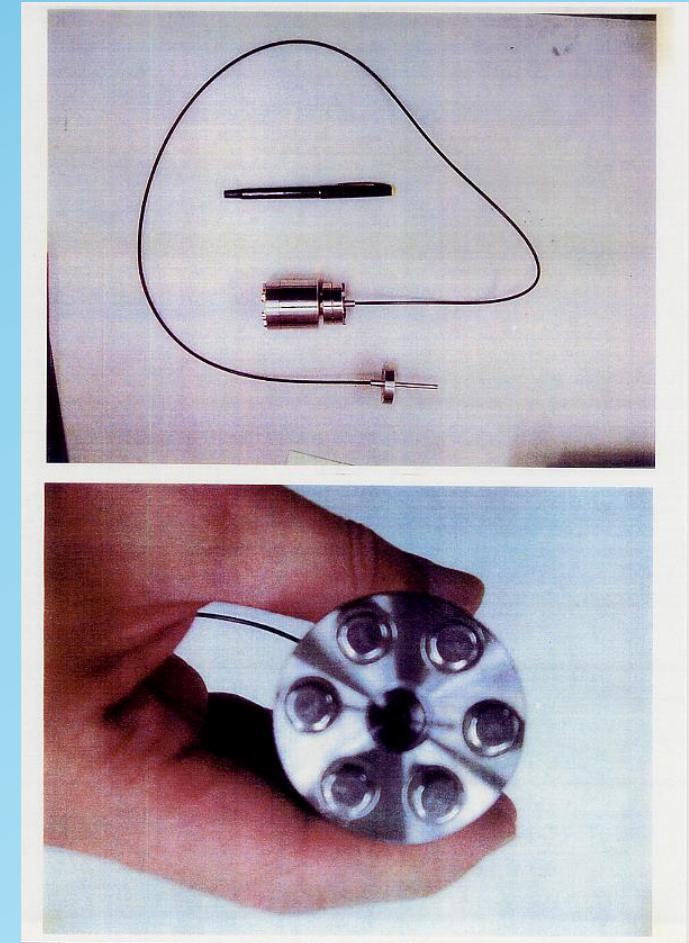
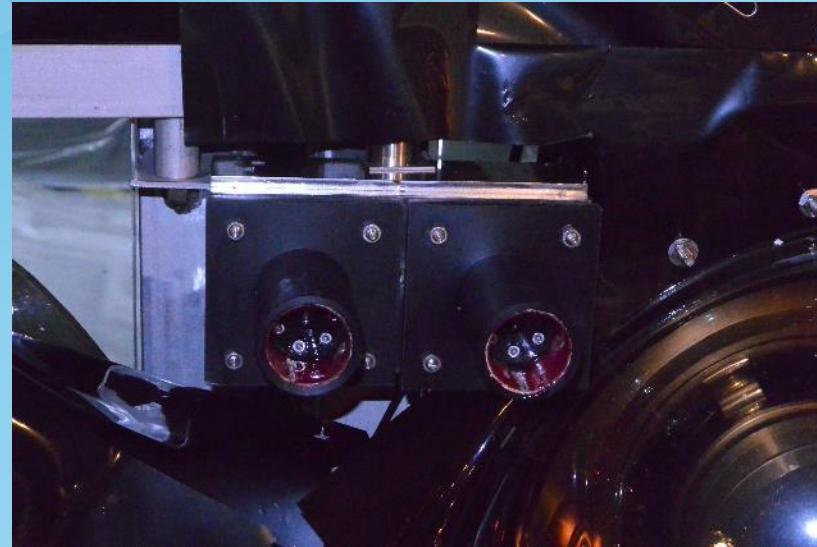
- 유의미하게 초과한 신호는 아직 없음.
- 9.3 ~ 31.3 MeV 영역 대부분에서 가장 강력한 한계를 설정.

한국 그룹의 기여: 캘리브레이션

- SK-I 부터 20여년간 검출기 안쪽 벽에 설치된 빛 인젝터를 사용하여 빛의 SK 물에서의 산란률과 흡수율 측정과 그 변화 감시
- 산란률과 흡수율: 검출기 시뮬레이션, 에너지 캘리브레이션, 이밴트 재구성, 계통 오차 등에 중요한 변수

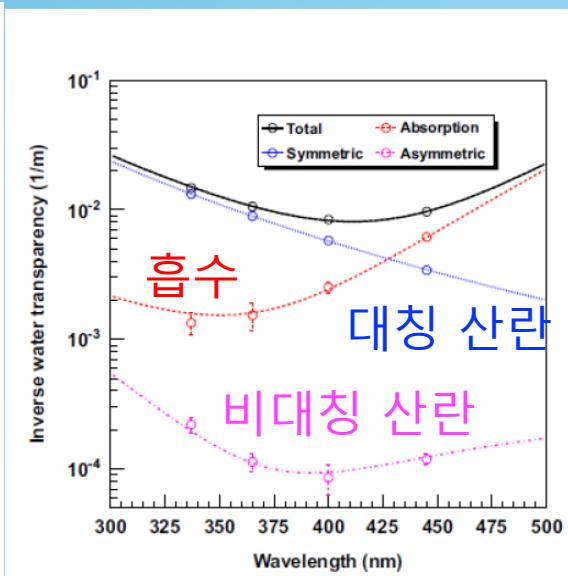
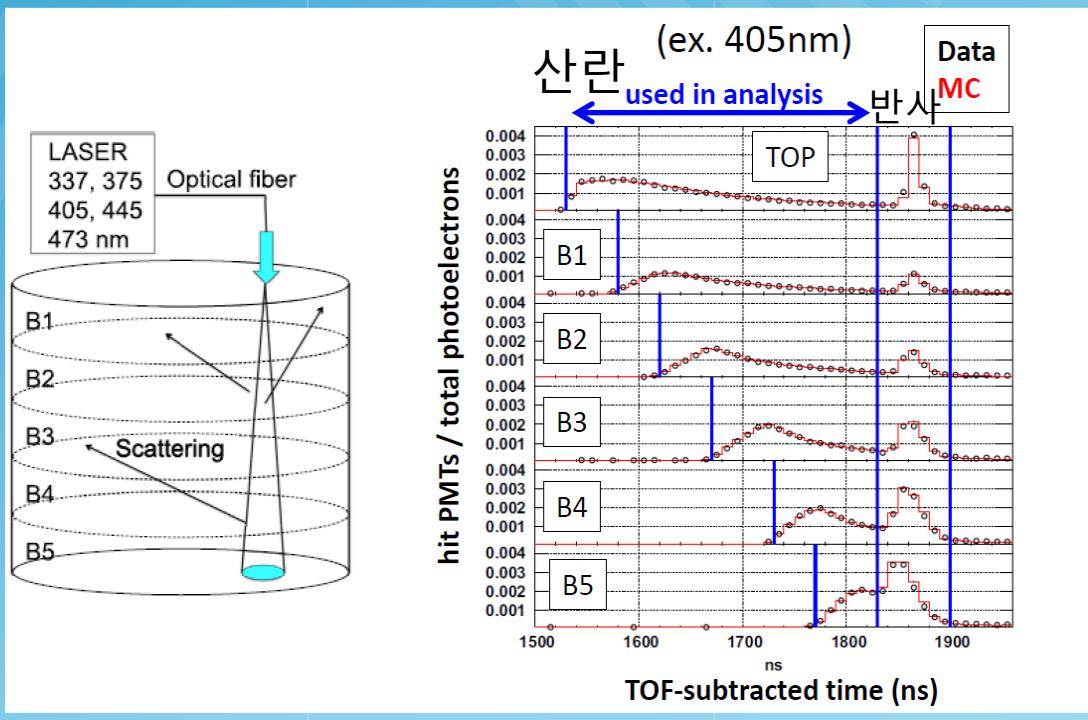


한국 그룹 인젝터와 지지대

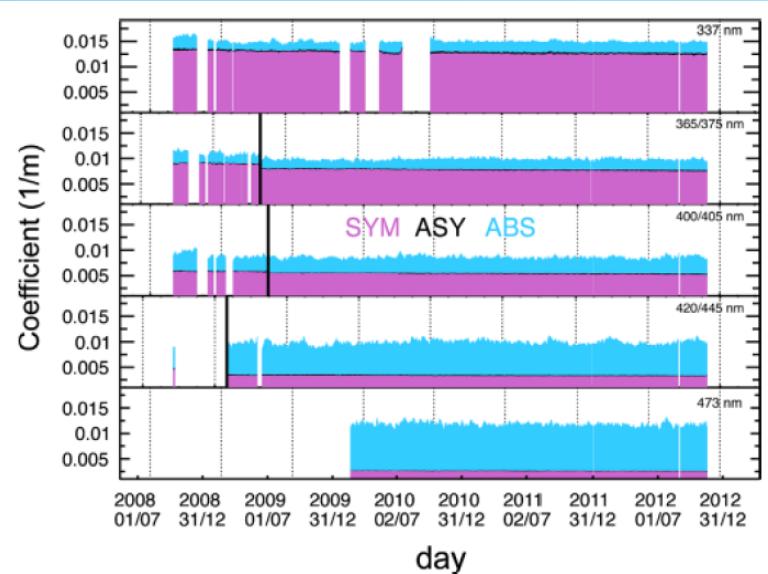


한국 그룹의 기여: 캘리브레이션

- 검출기 위 면에 설치된 인젝터로 입사한 빛이 산란되어 PMT에 도달한 시간을 사용하여 다섯 파장에 대한 산란률과 흡수율을 측정.
- 이를 사용하여 SK 시뮬레이션에 파장에 따른 산란률과 흡수율의 모형을 결정.
- 산란률과 흡수율의 시간에 따른 변화를 감시



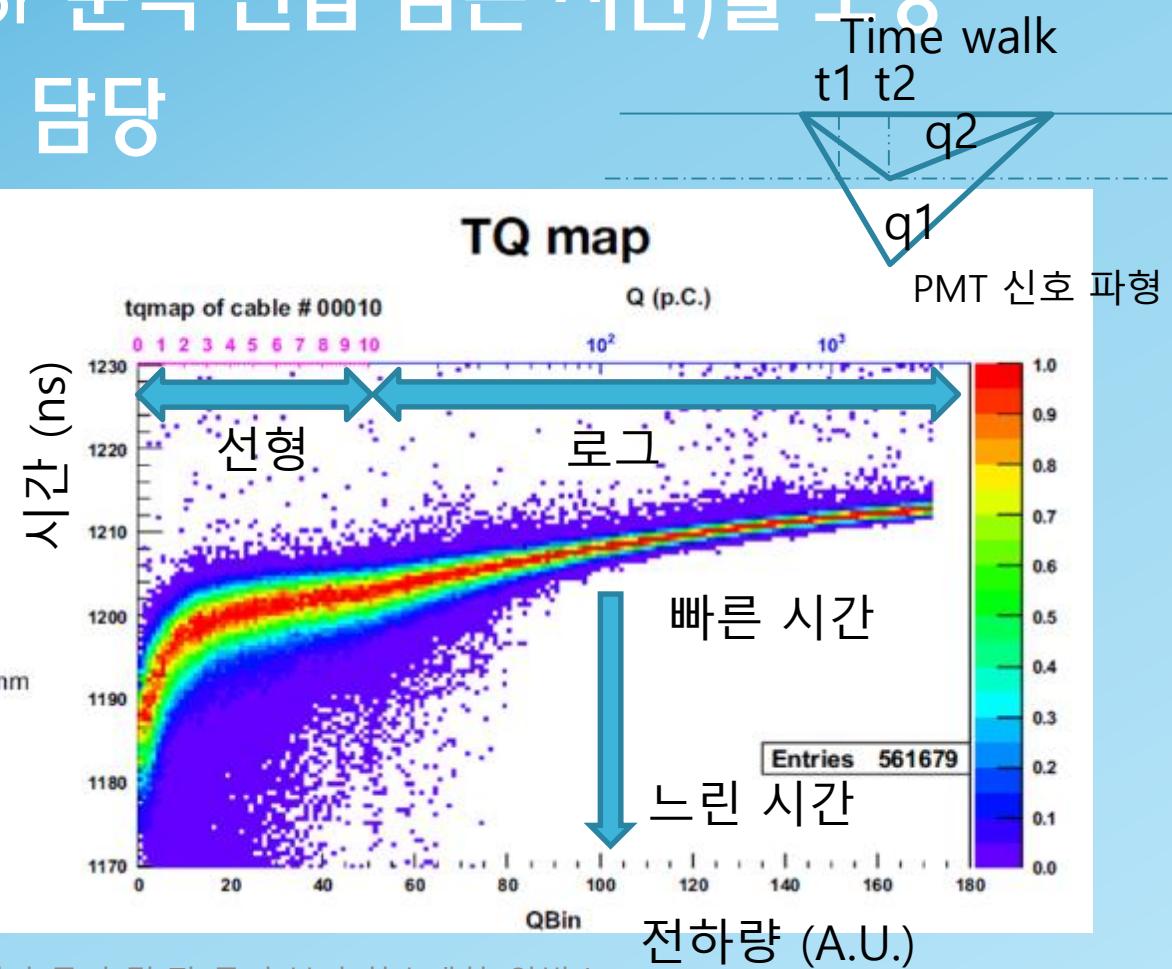
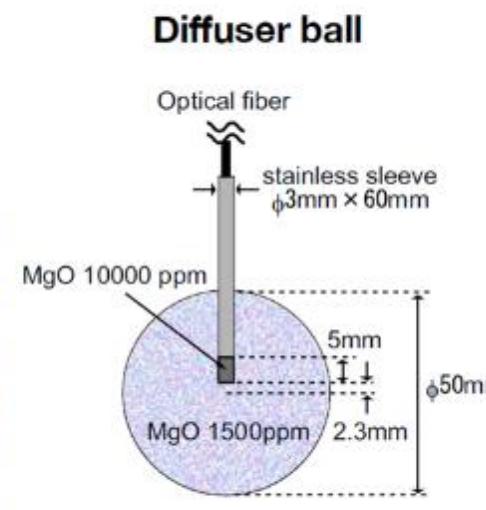
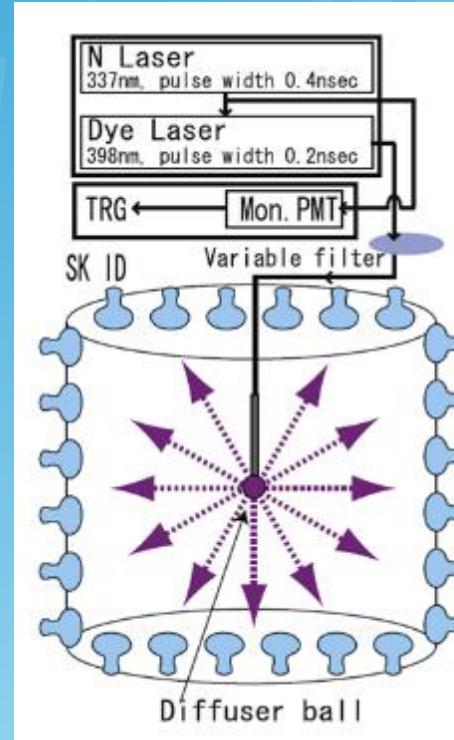
Data points (April 2009) fitted with empirical functions used in SKDETSIM



RMS/mean (Aug. 2008 – Nov. 2012):
~3% for symmetric scattering
20-40% for absorption

한국 그룹의 기여: 캘리브레이션

- ▣ 검출기 중심에서 퍼지는 레이저 빛을 사용하여, 전하량에 따른 PMT의 빛 검출시간 (PMT 신호의 discriminator 문턱 전압 넘는 시간)을 보정
- ▣ 2021년 12월부터 한국 그룹에서 담당

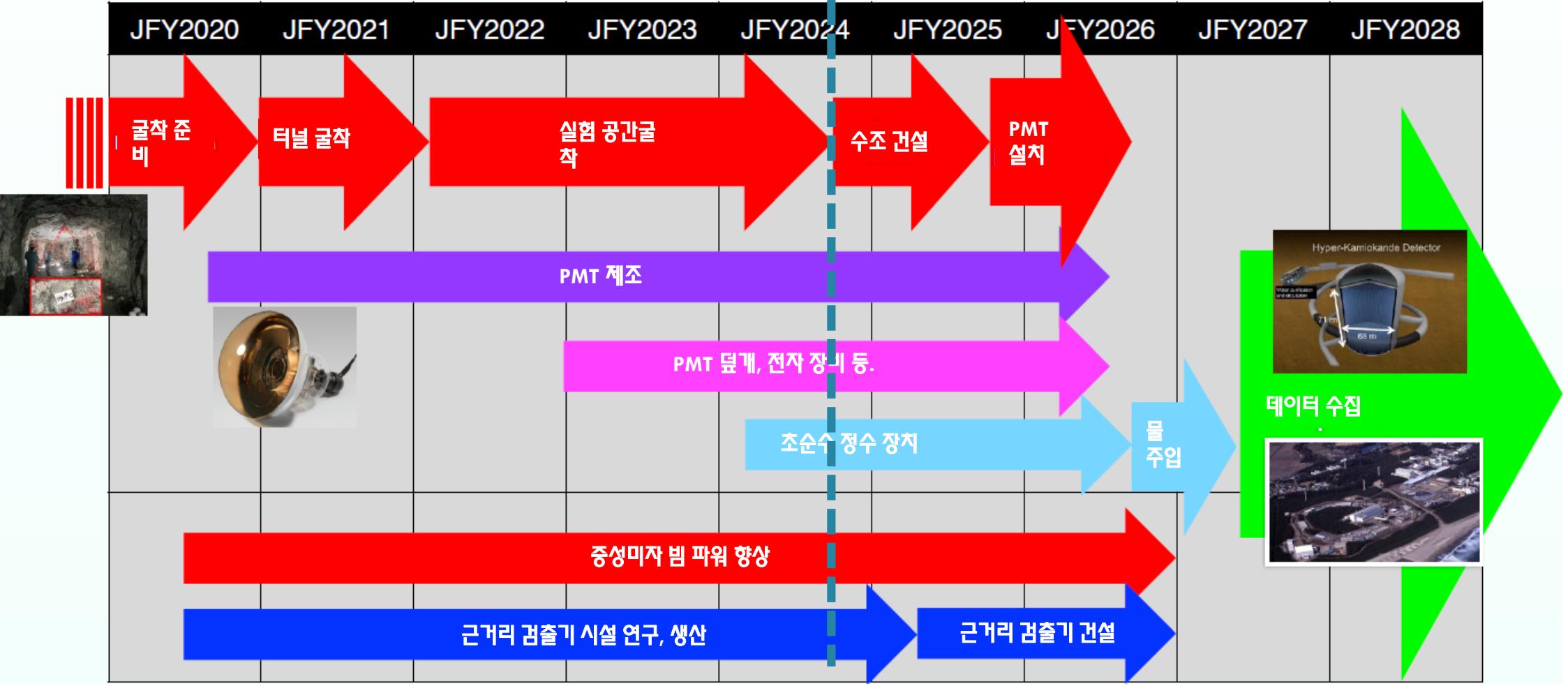


HK 건설 일정

원거리 검출기 일정

가속기,
근거리
검출기
일정

현재



HK 검출기 터널 굴착 현황

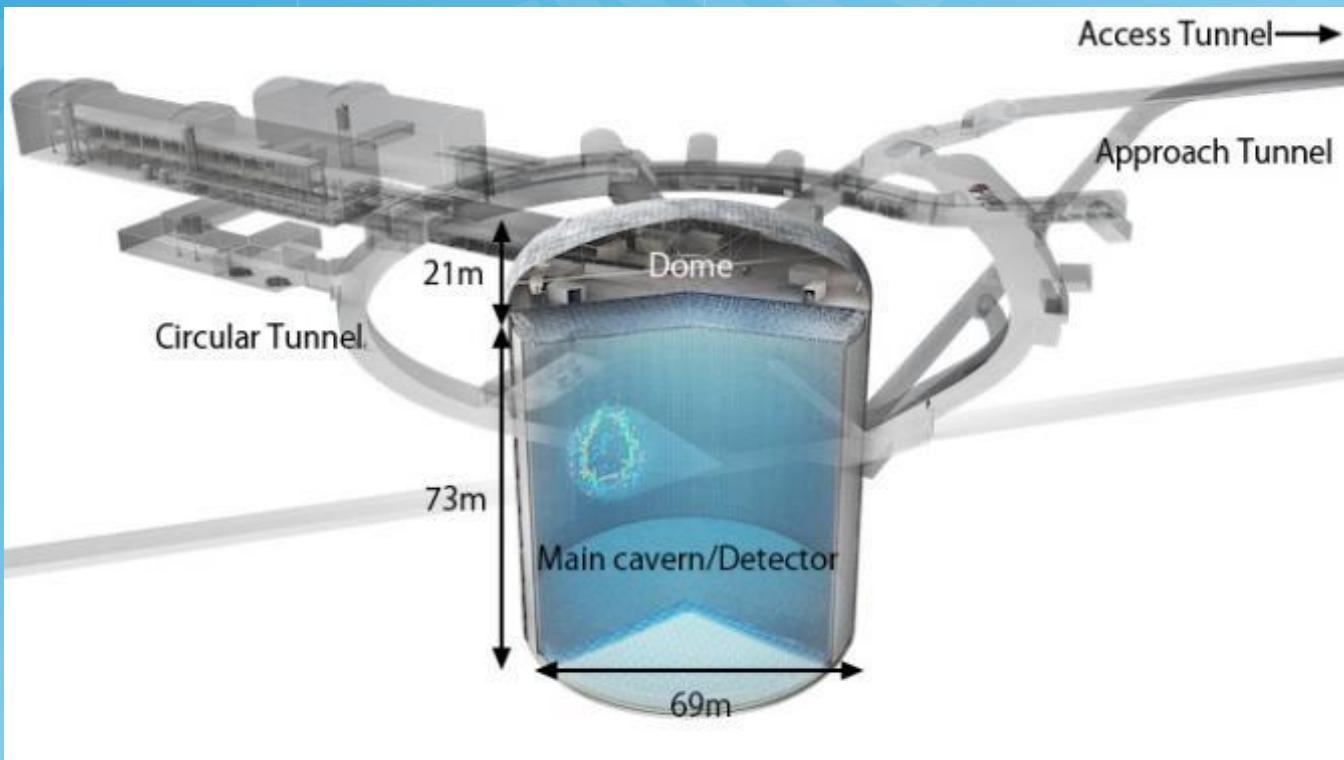
- ▣ 2021년 5월 굴착 시작
- ▣ 접근 터널 굴착 완료
2022년 7월
- ▣ 초순수 정수 시설용 공간
굴착 완료
- ▣ 검출기 위 돔 공간 굴착 완료
- ▣ 검출기 원통 영역 굴착 중



HK 터널 굴착



원형 터널 관통
2022/11/04



접근 터널 첫번째 교차로
2022/05/10

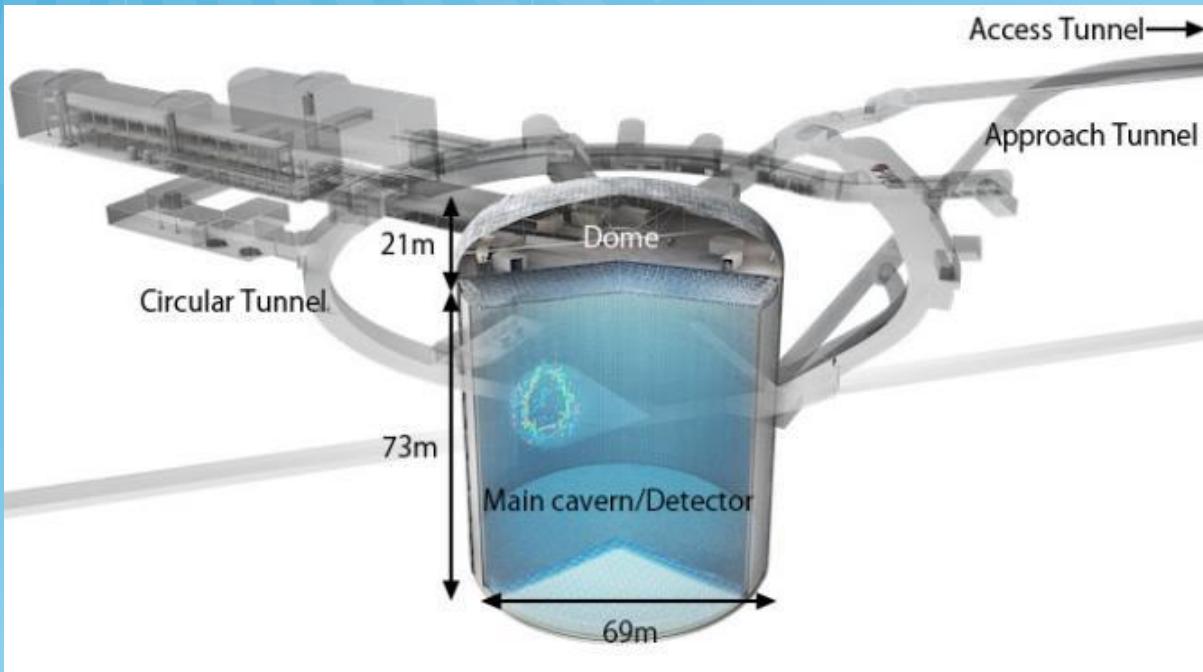


입구 굴착 2021/05/06



HK 돔 굴착

돔 구역
2022/11/17



2024-12-20

돔 구역 까지 터널 굴착
2022/06/23



돔 구역 까지 터널 굴착
2022/07/01



입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회, 양병수

41

HK동굴착

▣ 동굴착 완료

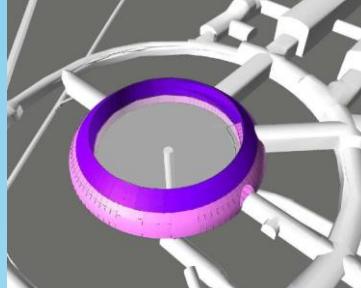
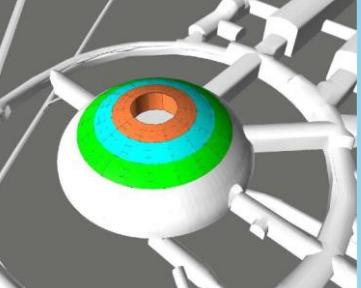
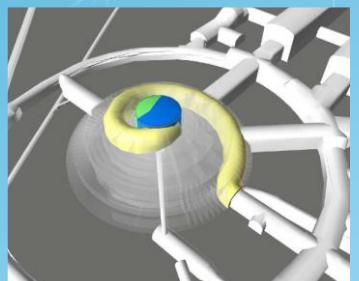
2023년 10월 3

일

지름 69 m

높이 21 m

동 구역 굴착 과정: 안쪽 고리에서 바깥 고리로



2024-12-20



2023/03/14



2023/05/18



2023/10/03

입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회, 양병수

42

HK 초순수 제조 시설 구역 굴착

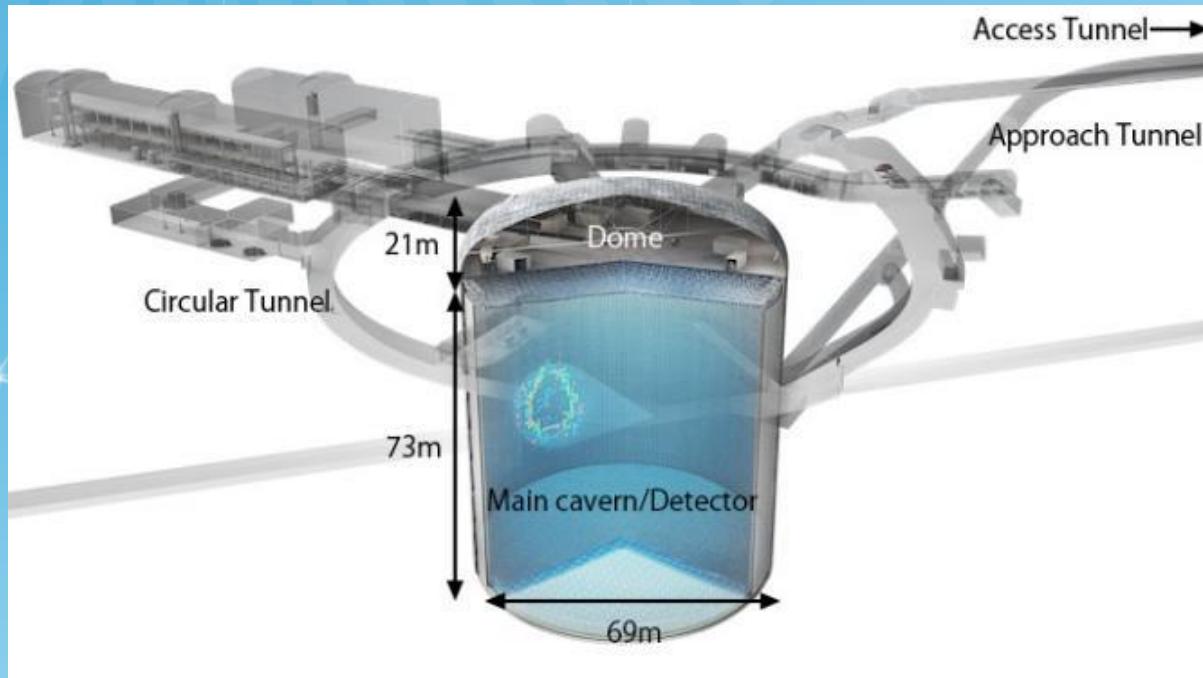
초순수 제조 시설 구역
2024/07/13



초순수 제조 시설 구역 굴착
2023/05/18



초순수 제조 시설 구역
2024/07/13



2024-12-20



입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회, 양병수

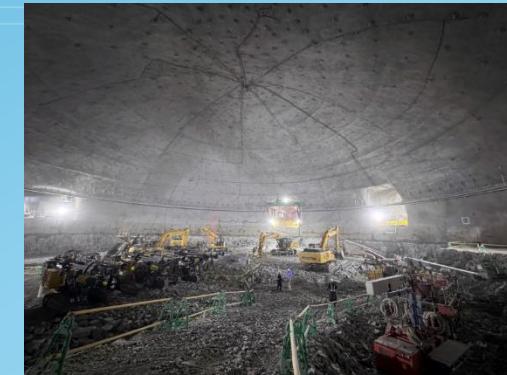
HK 원통 영역 굴착

▣ 원통 영역 굴착 중
올해 말 완료 예정
지름 69 m
높이 73 m

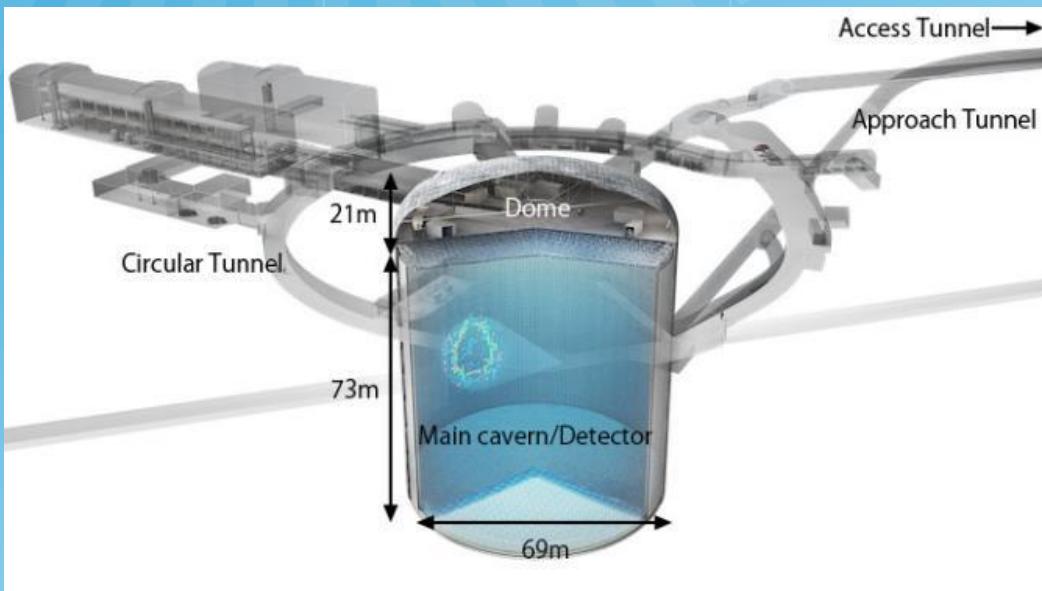
깊이 3m
2023/12/13



깊이 6m
2023/12/13



깊이 12m
2024/02/16



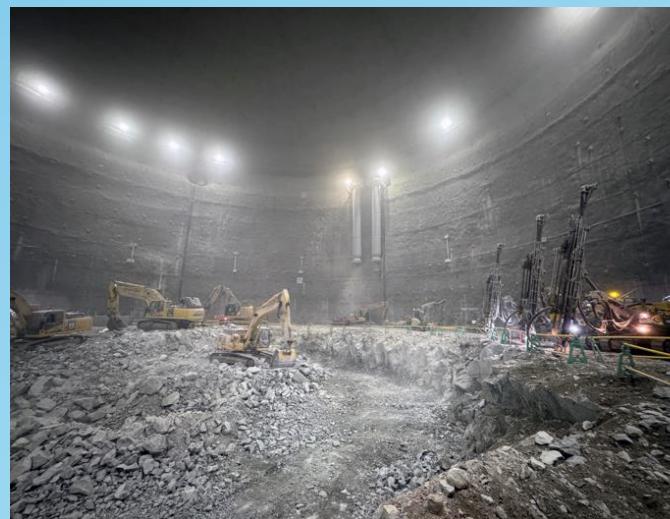
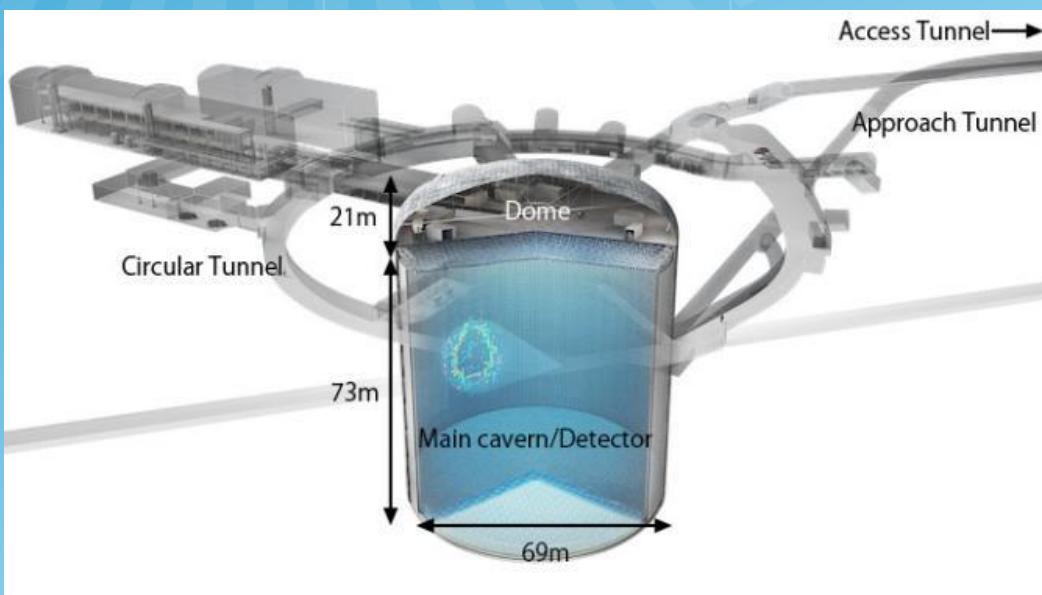
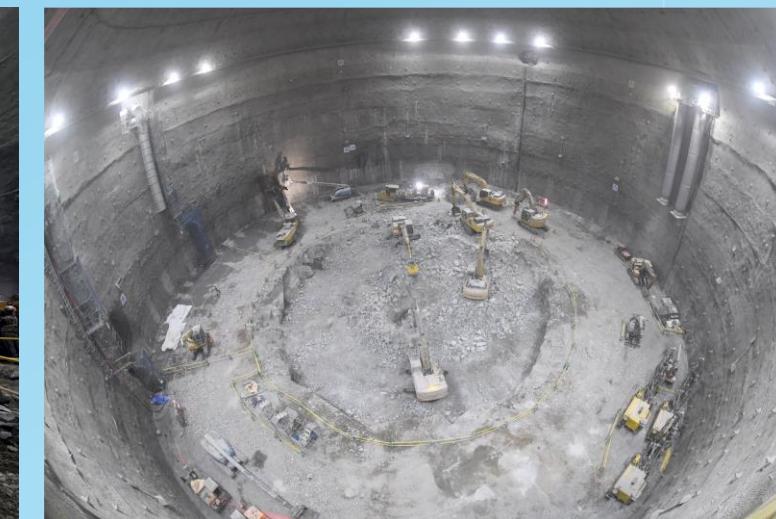
HK 원통 영역 굴착

깊이 20m
2024/05/19



▣ 원통 영역 굴착 중
올해 말 완료 예정
지름 69 m
높이 73 m

깊이 24m
2024/06/11

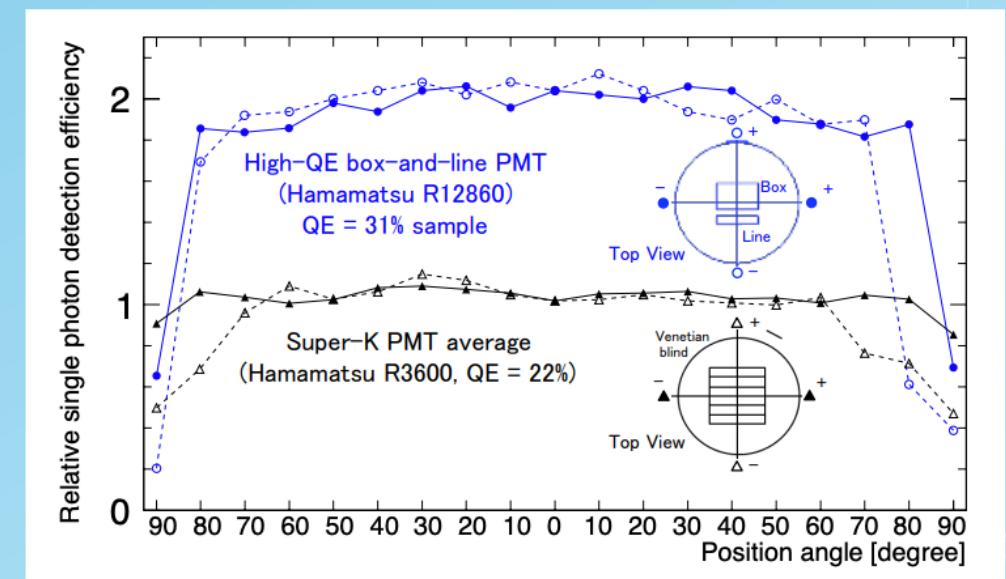


PMT

- ▣ Hamamatsu 사의 50 cm Box&Line PMT "R12860"
- ▣ SK PMT 와 같은 크기. 성능 대폭 향상
 - 빛 검출 효율 두 배 향상
 - 시간/전하 분해능 두 배 향상
- ▣ 20000 PMT로 검출기 표면 20% 덮음.
- ▣ 생산과 검사 진행 중



각도에 따른 광자 검출 효율



PMT 검사

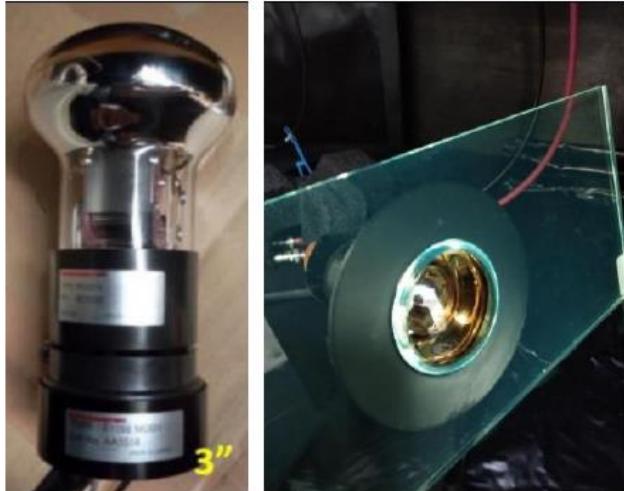
- 제조된 PMT 카미오카에 운송. 1만개 이상
- 근처 폐교를 창고 겸 PMT 검사시설로 사용
- 기존 SK 시설도 사용.



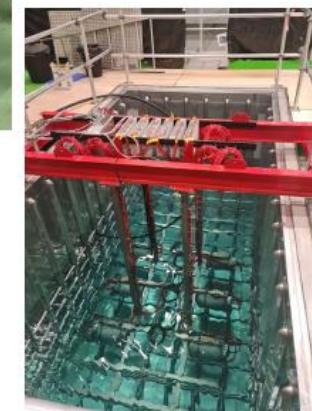
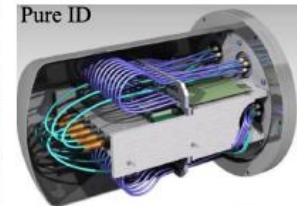
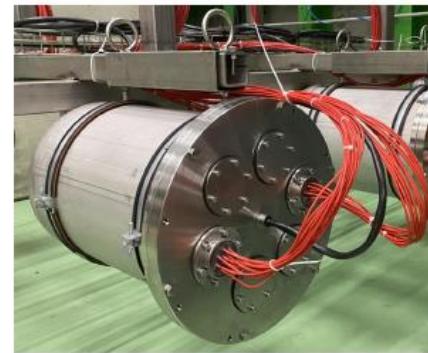
광센서와 수중 전단 보드 현황

(Wavelength shifting)

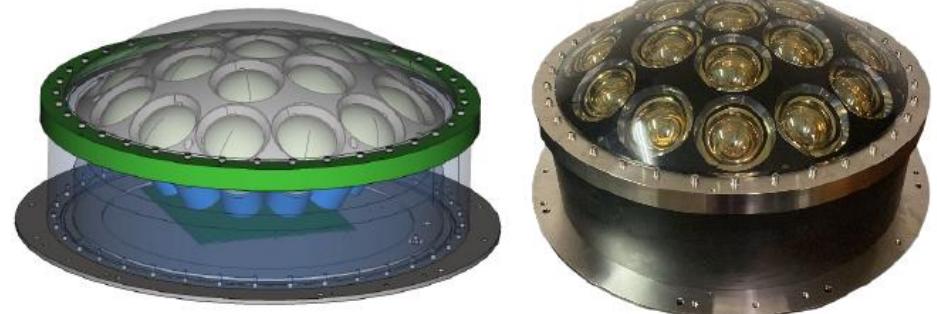
Outer detector: PMT+WLS plate Photosensors/elec. mockup



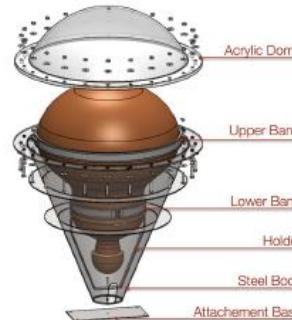
Underwater electronics: Case design and feedthrough



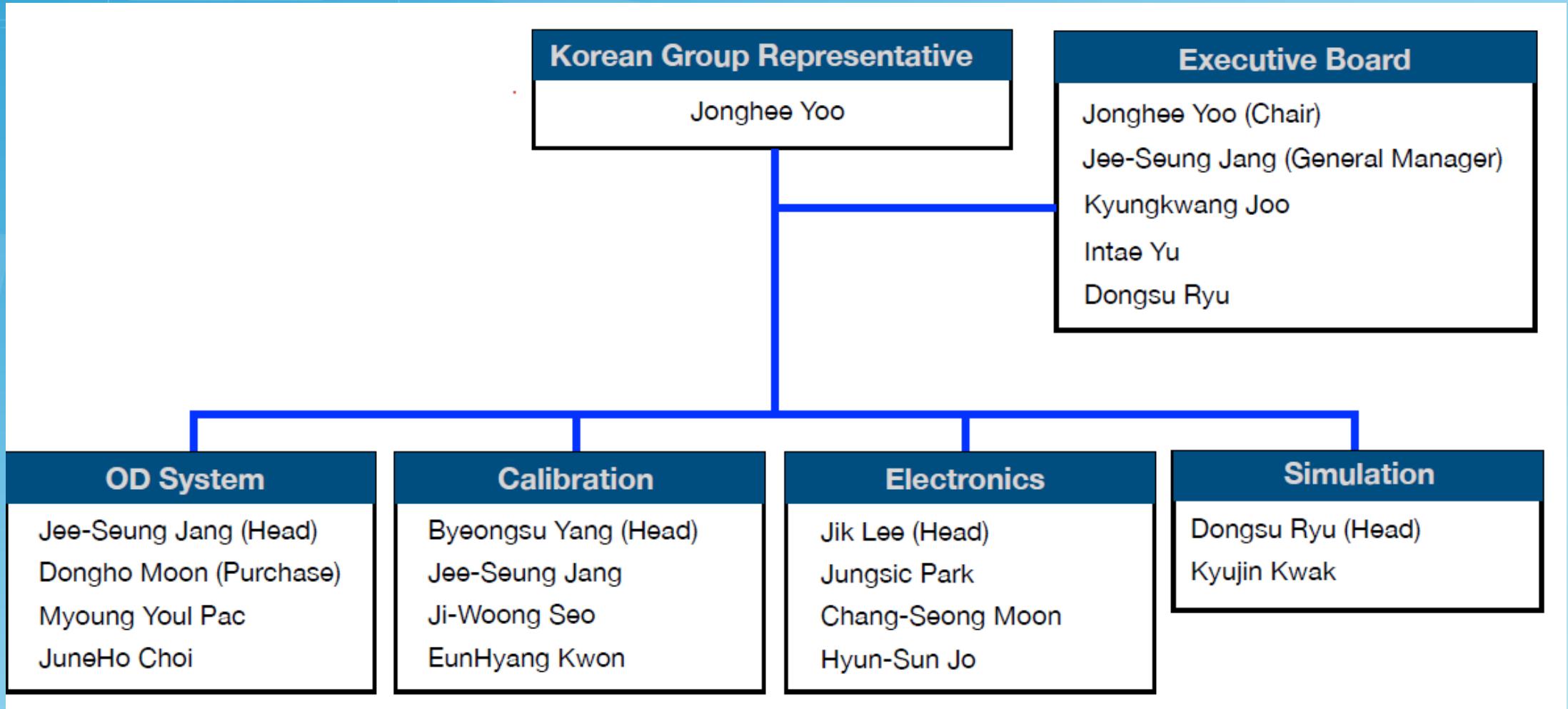
Multi-PMT module:



PMT cover

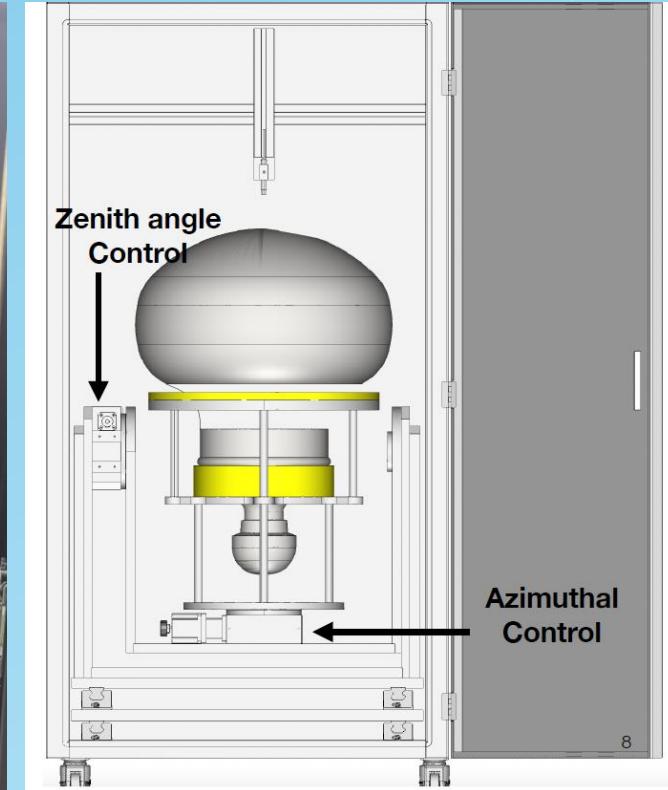


한국 그룹 조직도



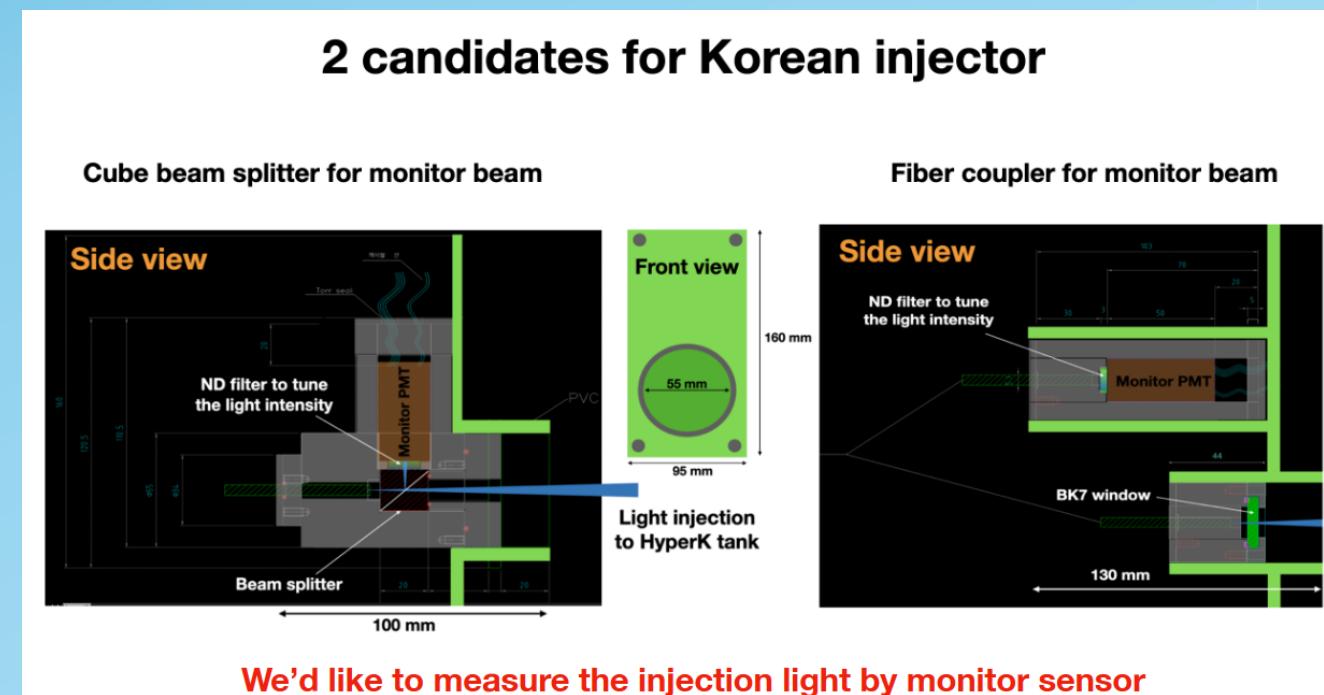
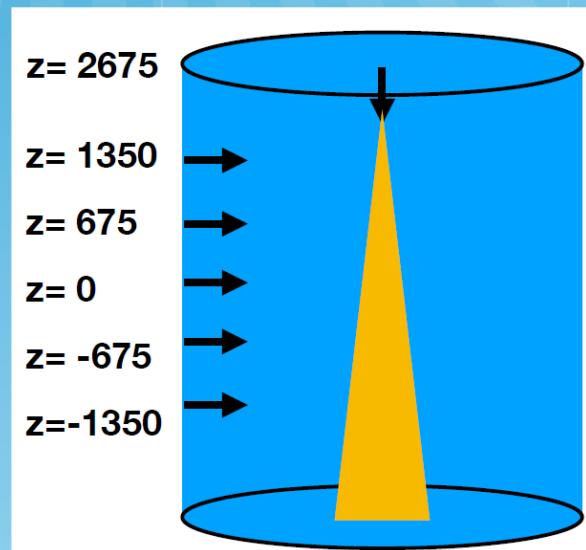
한국 그룹의 기여: PMT pre-calibration

- ▣ 약 2% (약 400개)의 PMT를 검출기에 설치 전 기본 성능 측정
 - QE X CE, Gain, 시간, 전하, 단일 전하 응답 등의 위치 의존성
 - QE의 각도, 편광, 파장 의존성
- ▣ 일본, 한국, 호주 그룹 협력
 - 한국과 호주 그룹이 캘리브레이션 장치 개발.
 - 일본 현지에서 pre-calibration 진행.
수중 시험 진행
- ▣ 이번 여름 광주 과기원에서 개발한 장비로 일본에서 측정.



한국 그룹의 기여: 캘리브레이션

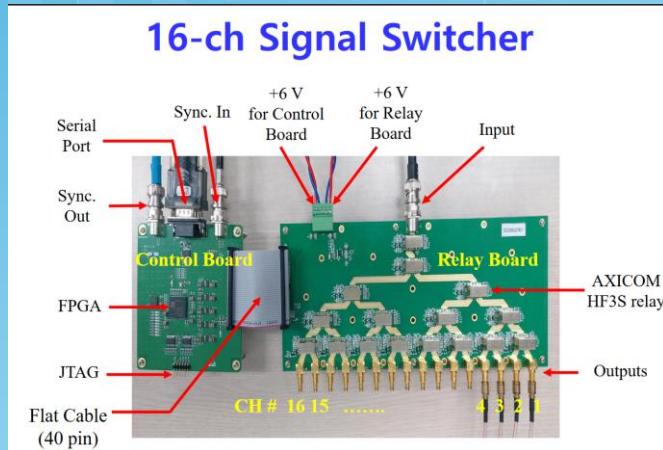
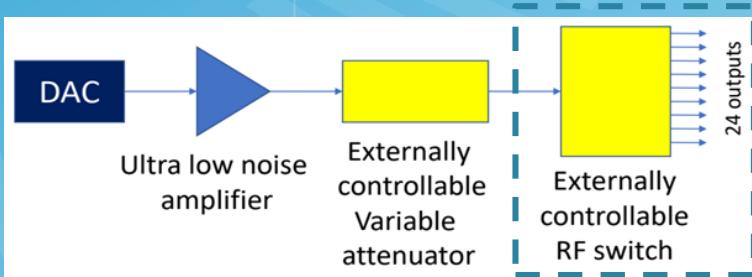
- SK에서와 같이 물에서의 산란률과 흡수율 측정과 그 변화 측정.
- 현재 빛 인젝터 설계 중. 시뮬레이션으로 성능 점검 (울산과기원 성광언 학생/SK 한국 연구원 협력)
- 사용할 모니터 PMT, 광섬유 등의 성능 검사 진행 중.



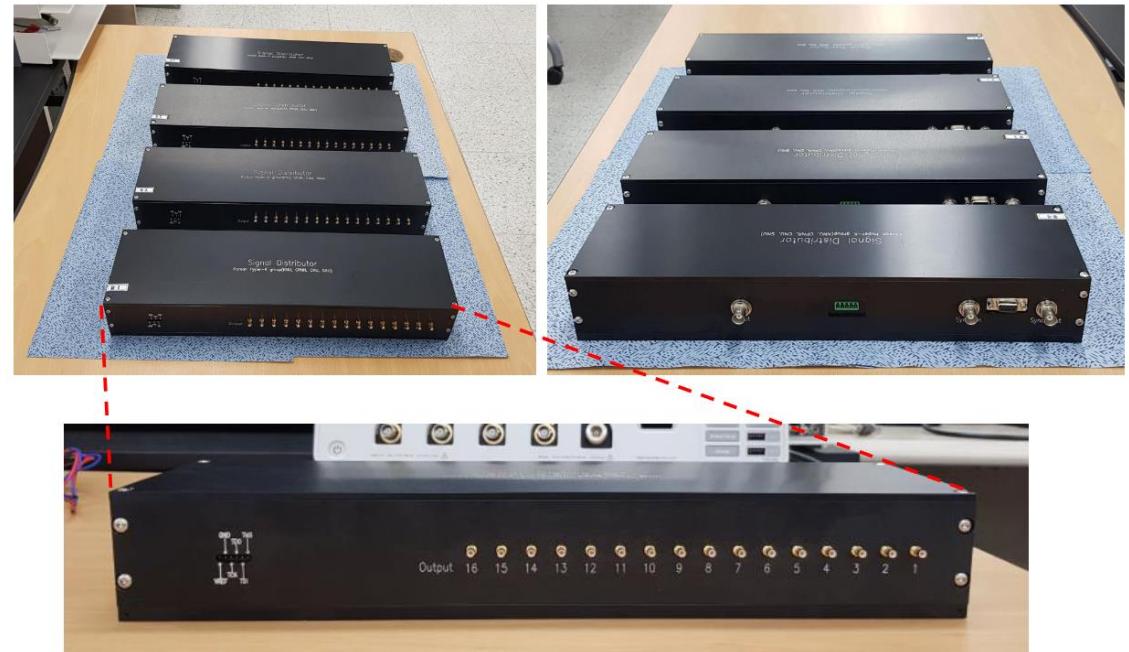
한국 그룹의 기여: 전자 장치

- ▣ 캘리브레이션 용 신호 분배기 경북대 이직 교수님팀에서 개발 완료

PMT 신호와 유
사한
신호 생성

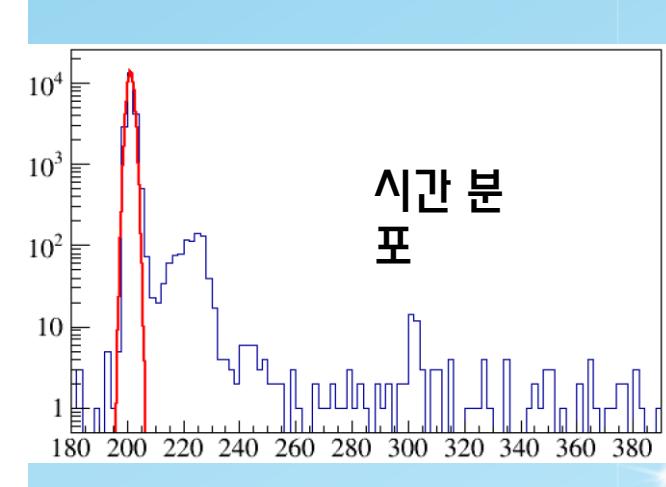
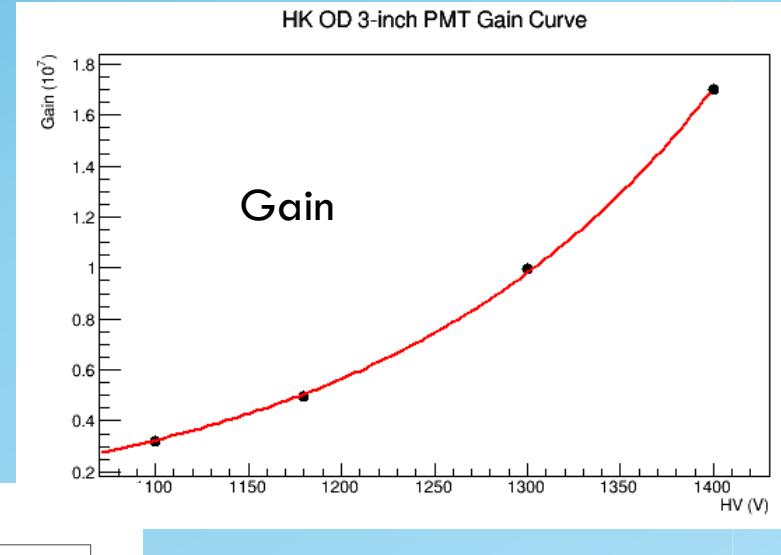
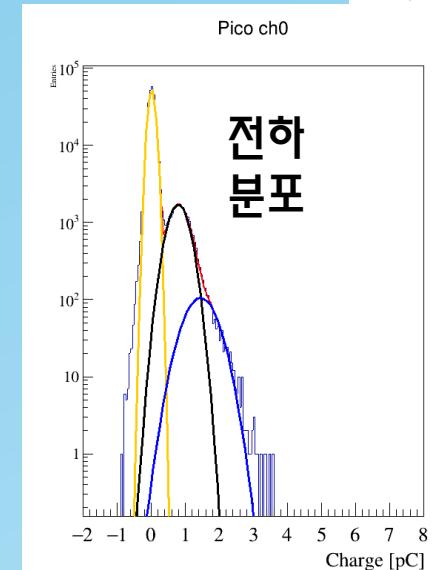
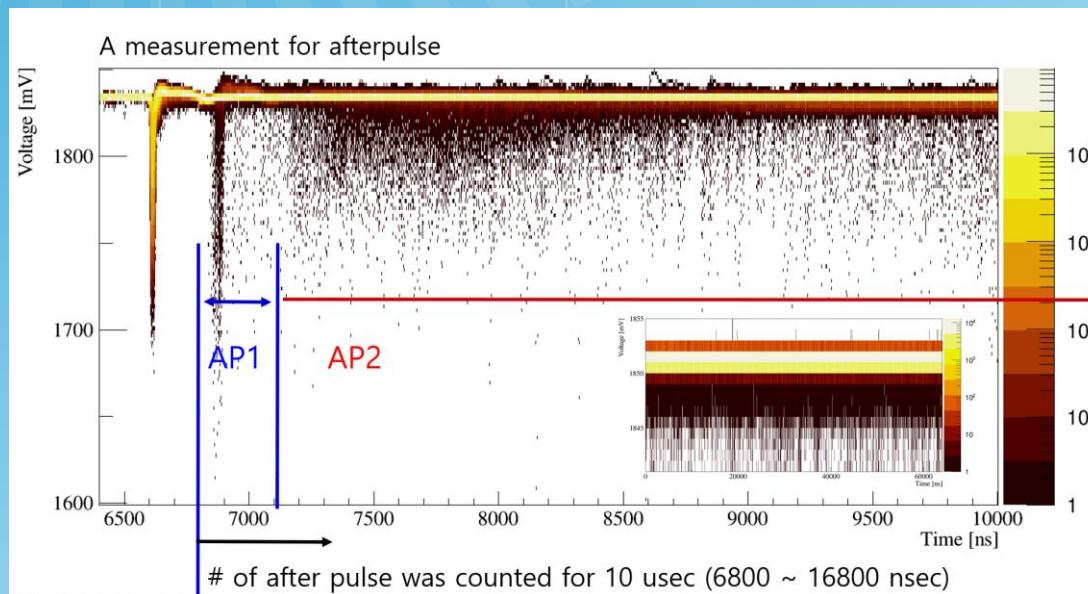


Four Sets of 16-ch Signal Switcher Boxes



한국 그룹의 기여: OD (바깥 검출기)

- OD PMT (3 inch NNVT) 시험 완료
- OD DAQ 참여.
- 3년동안 1백만 USD 집행 예정: 전남대 SRC 집행 방법, 구매 장비 협의 중



요약

- ▣ 2024년 3월 전남대 저에너지 입자 실험실 신설.
- ▣ 현재는 입자 실험중 비교적 낮은 에너지의 중성미자 실험에 주력
- ▣ 현재는 총 2명.
- ▣ RENO, RENE, SK/HK 에 참여 중.

보충자료

Super-Kamiokande에서 연구 활동 (2005~2011)

(SK-II 끝에서 SK-IV 초)

▣ 태양 중성미자와 진동 파라메타 측정

- SK-I~III 데이터 사용
- SK-I & II, 새로운 ${}^8\text{B}$ v 스펙트럼 모델로 재 분석
- SK-III 통계량 ~ SK-I의 통계량의 $1/3 \rightarrow$ 계통오차 개선에 주력
- 앞선 SK-II의 논문 이후 갱신된 다른 실험데이터 추가
- 3 종료 중성미자간 진동 연구
→ Phys. Rev. D 83, 052010 (2011)

■ 빛의 산란, 흡수, 반사

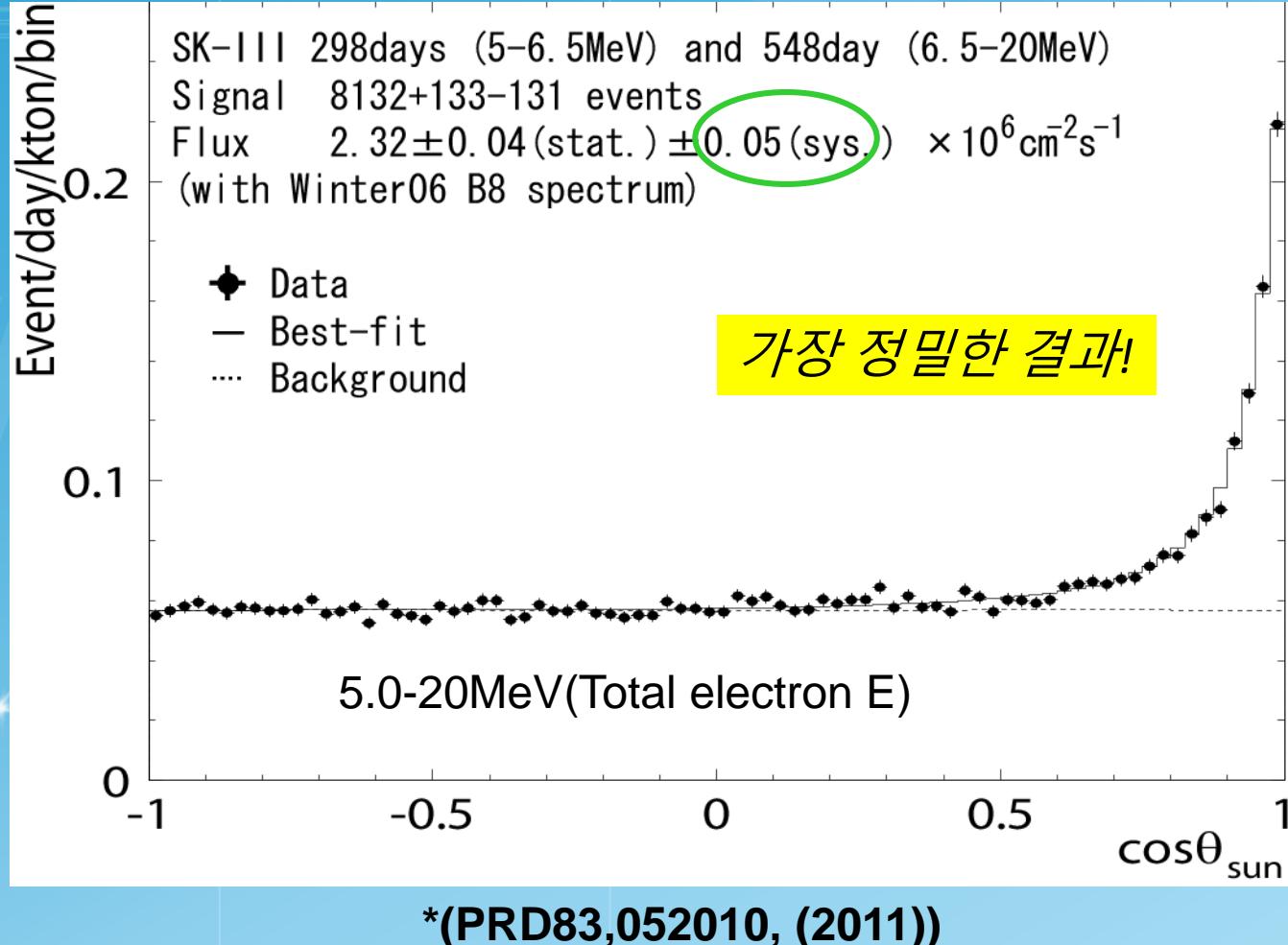
- 데이터 분석과 검출기 모의실험의 개선
- 계통오차 개선에 기여

▣ 다른 개선

- 검출기 보정, 데이터 분석 프로그램, 이벤트 재구축, 검출기 모의실험 → 계통오차 개선에 기여

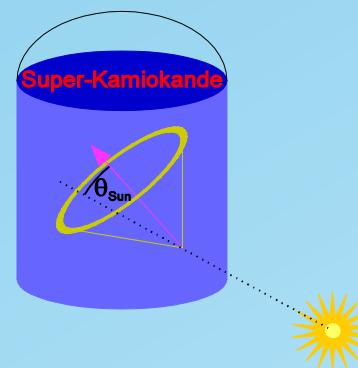
▣ 물에서 빛의 진행에 대한 검출기 보정에 참여

태양 중성미자 측정



SK-I: $2.38 \pm 0.02(\text{sta.}) \pm 0.08(\text{sys.}) \times 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
SK-II: $2.41 \pm 0.05(\text{sta.}) \pm 0.16(\text{sys.}) \times 10^6 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

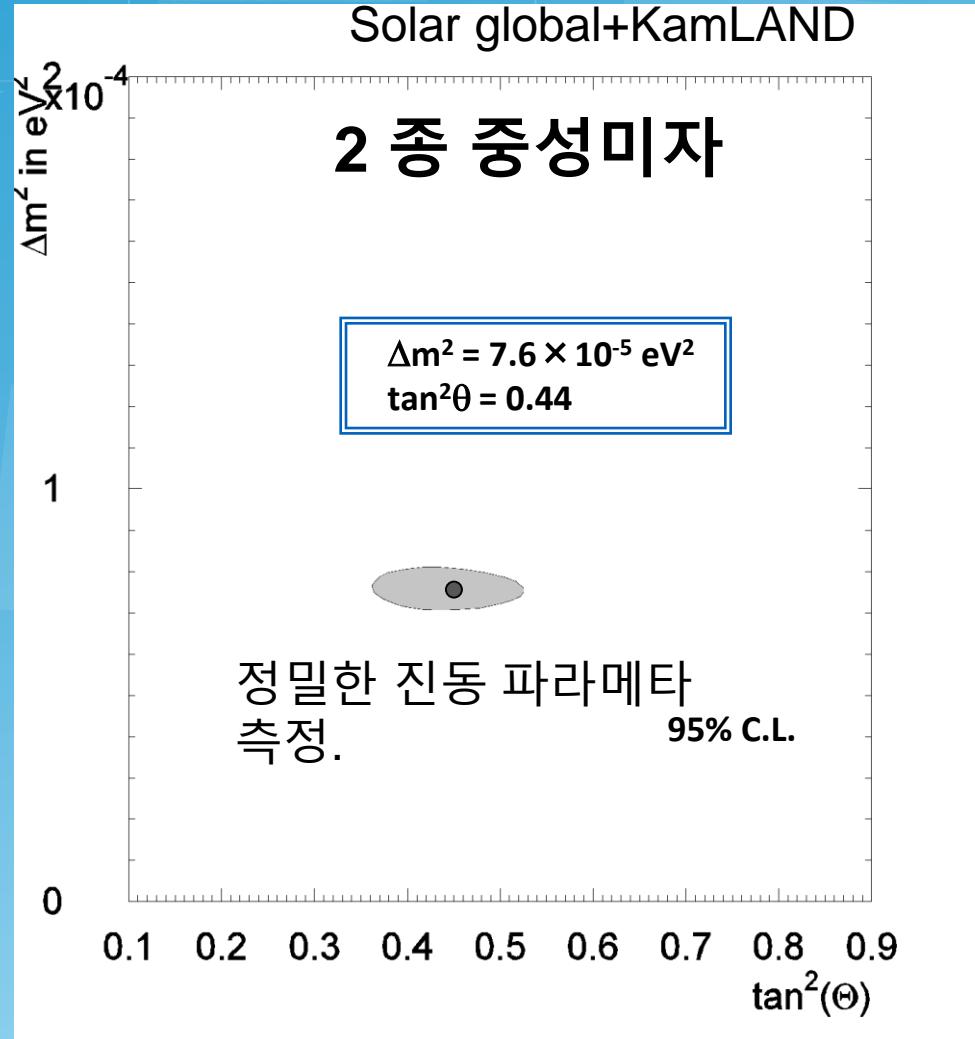
태양방향에 관한 중성
미자의 산란된 전자의
진행방향



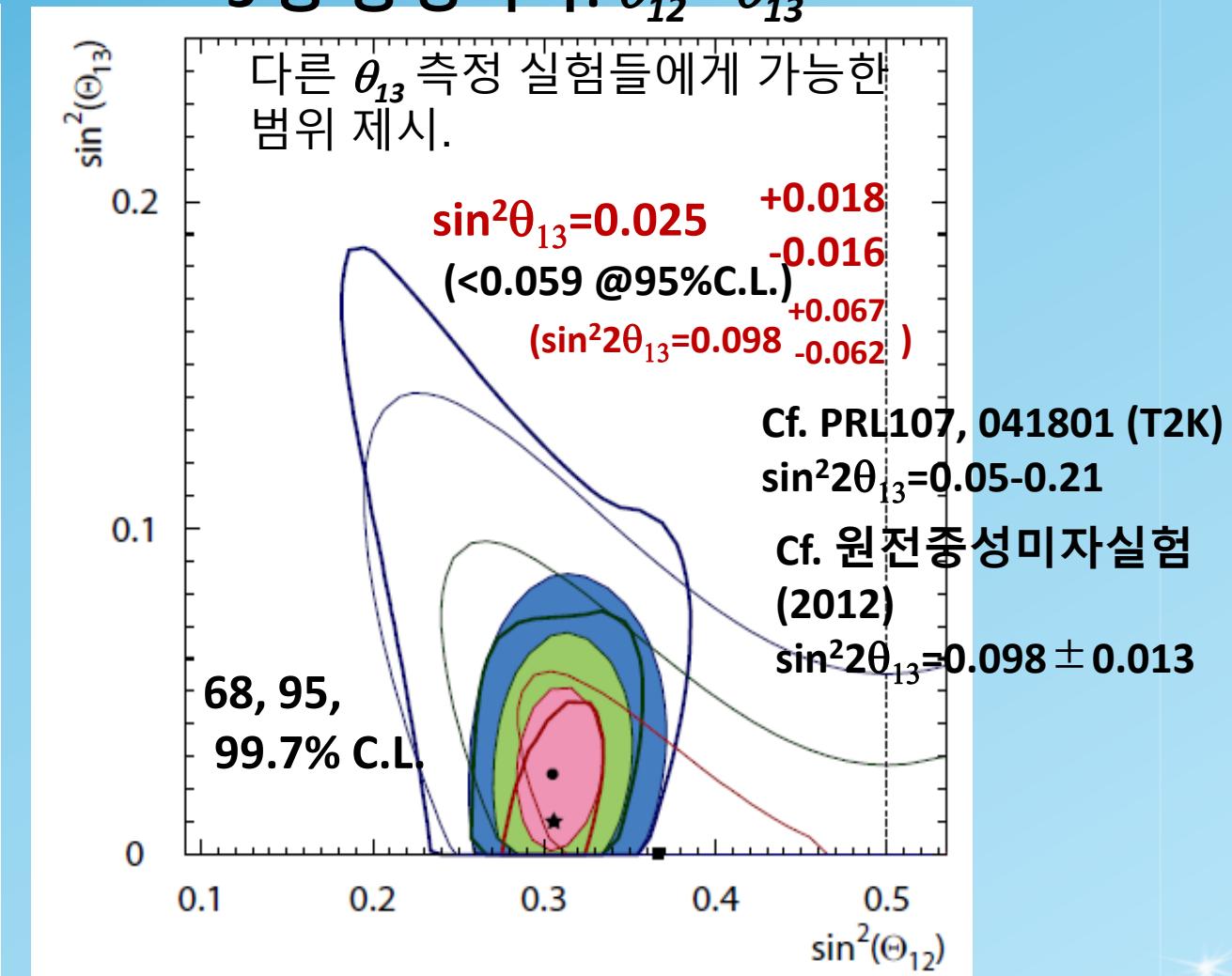
태양 중성미자 진동 실험 통합 분석

★ Solar global
■ KamLAND
● Solar+KamLAND

*(PRD83,052010, (2011))

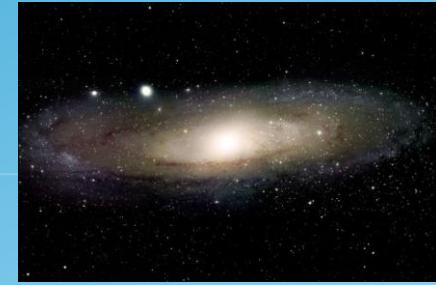


3 종 중성미자: θ_{12} - θ_{13}



XMASS-I

- 단상 (섬광에 의한 광자만 검출) 액체 제논
검출기
- 5년 이상 안정적으로 데이터 수집
 - 2013/11~2019/2
 - ~14pe/keV 의 큰 광수율과 ~1keVee의 낮은 문턱 에너지
 - 다량의 (~1ton) 제논을 사용한 다양한 희귀 이벤트 탐색
 - 암흑물질, 액시온, 이중전자포획, 중력파 등



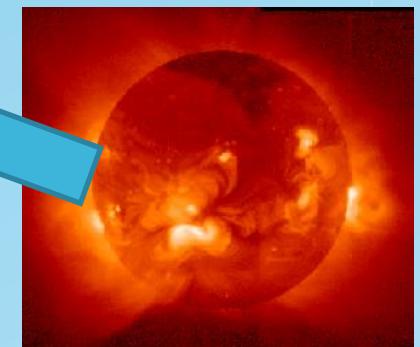
중성미자 없는
이중 베타 붕괴

& 사중

암흑 물질



태양 중성미자

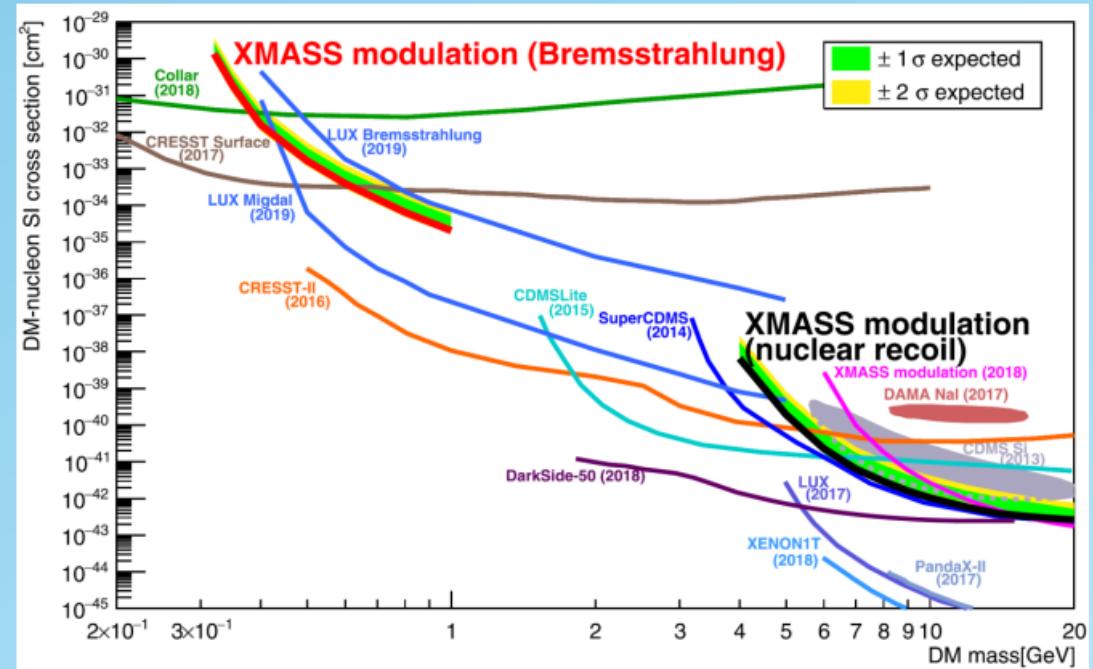
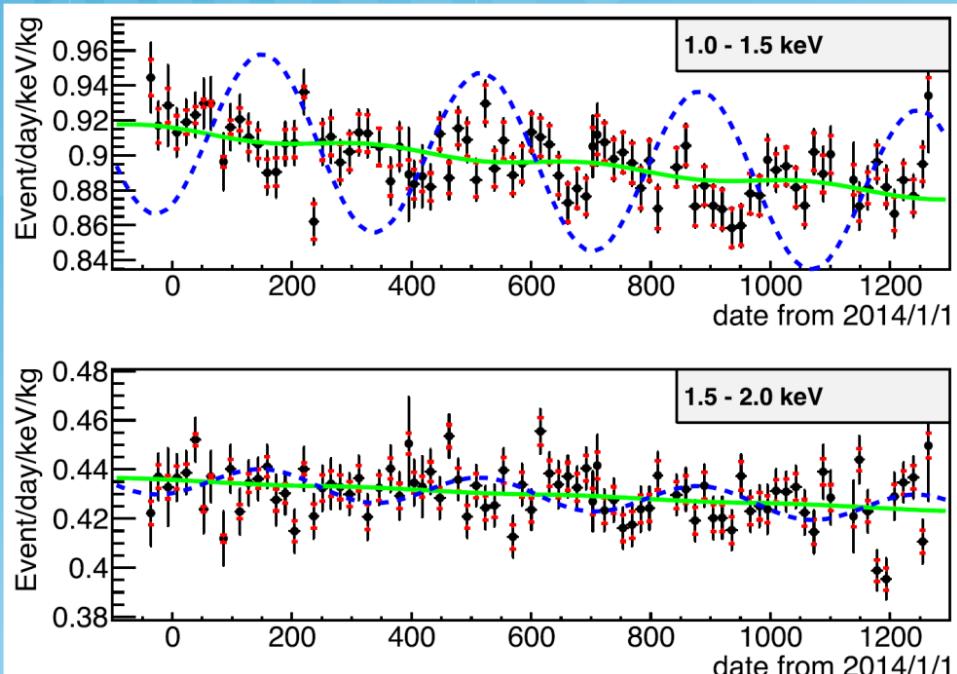


XMASS에서의 연구활동 (2011~2023)

- ▣ 도쿄대 (주관기관) 소속으로 약 7년, 다른 연구소 소속 6년
- ▣ 암흑물질과 핵자의 반발에서 방출되는 제동복사를 통한 Sub-GeV 암흑물질 탐색
 - 연구 제안과 학생 지도.
 - Phys. Lett. B795 (2019) 308-313. 논문 작성 위원회 활동 (교신저자 역할)
 - XMASS검출기를 사용한 ^{136}Xe 의 중성미자 없는 사중 베타 붕괴 탐색
 - Physics Letters B 833 (2022) 137355 논문작성 위원회 (교신저자 역할) 활동
 - 검출기보정
 - 감마선원을 사용한 1 keV당 측정되는 PE 수율 측정.
 - 특히 낮은 에너지에 대한 결과가 sub-GeV 암흑물질 탐색을 가능하게 하였다..
 - 검출기 모의실험 파라미터 조정과 검출기 상태 감시
 - 감마선원 데이터를 사용한 광학 파라미터 결정
 - 주기적으로 받은 감마선원 데이터로 광학 파라미터의 시간 변화 감시. 연간 변화 데이터 분석법에 사용됨.
 - 검출기 모의실험 개발
 - 개수할 XMASS 검출기에 대해 컴퓨터 모의 실험으로 평가. 설계 결정에 기여. \rightarrow 5 keV 부근 WIMP 탐색 영역의 배경사건을 1/10로 줄이는 것에 기여
 - 검출기 모의실험의 가속화를 위한 필요없는 고에너지 사건의 모의실험을 중단 혹은 건너 뛸 수 있는 방법 (HE VETO) 개발. 다양한 낮은 에너지 연구를 그 외 다수.
 - Slow monitor
 - 검출기 환경 상태 감시 데이터 수집 장비와 프로그램 관리.

Sub-GeV 암흑물질 탐색

- 암흑물질과 핵자의 반발에서 방출되는 제동복사를 통한 Sub-GeV 암흑물질 탐색.
 - 표준적인 암흑물질 분포를 가정하여 신호의 연간 변화를 찾는 방식으로 0.32에서 1 GeV/c²의 Sub-GeV DM 탐색
 - 유의미한 신호 무. 90% 신뢰도로 암흑물질-핵자 간 SI 충돌단면적 상한 설정.
 - 암흑물질과 핵자의 반발에서 방출되는 제동복사를 찾는 것으로 세계 최초.
 - Phys. Lett. B795 (2019) 308–313.



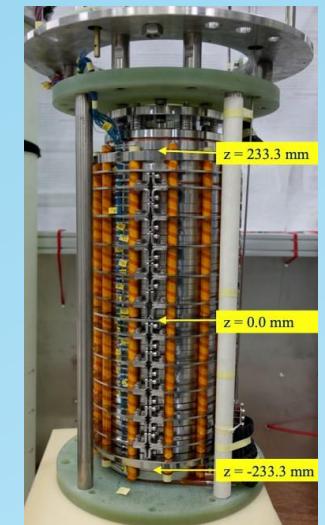
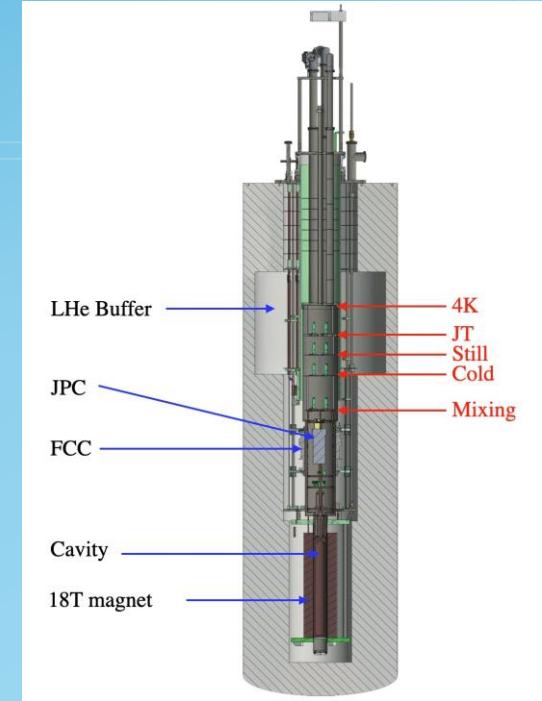
CAPP18T

▣ 액시온

- 강력에서 CP 대칭성 깨짐이 일어나지 않는 것에 대한 답.
- 암흑물질 후보.

▣ CAPP18T 액시온 (Axion) 탐색

- 18T 고온 초전도체 자석 사용. 당시, 상업적으로 판매된 가장 강력한 고온 초전도체 자석. 탐색 속도 자기장 세기의 4제곱에 비례.
- 낮은 잡음의 증폭기 사용. 100 mK의 낮은 온도에서 진행. 탐색 속도 잡음의 크기의 제곱에 반비례.
- 4.8 GHz ($\sim 19.8 \mu\text{eV}$) 주변의 1 KSVZ 수준의 액시온 탐색

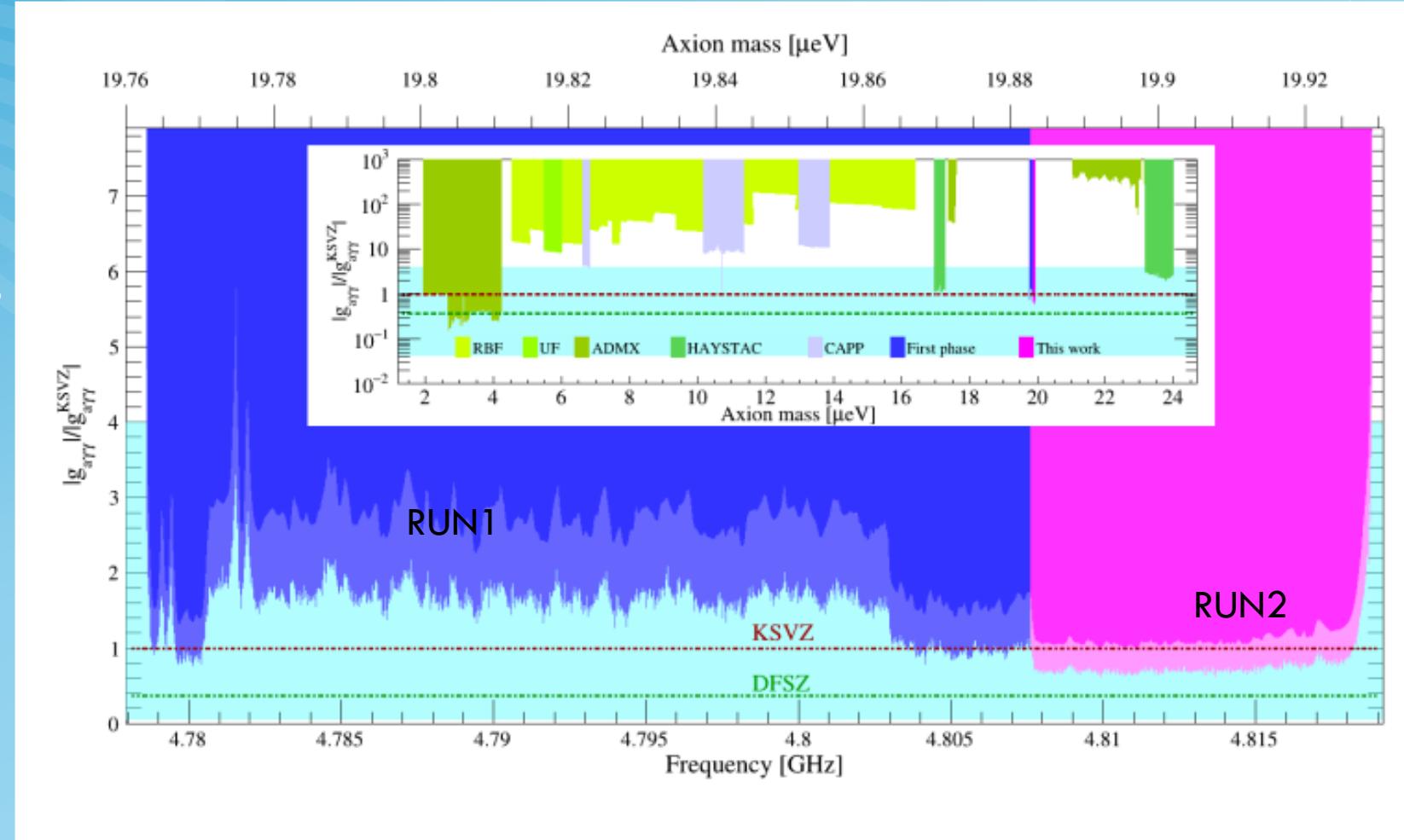


CAPP18T에서의 연구활동 (2018-2023)

- ▣ 기초과학연구원 소속 약 3년, 타연구소 소속 약 2년
- ▣ 적은 인원 관계로 거의 모든 부분에 기여.
 - 검출기 구축, 검출기 데이터 수집 프로그램 개발, 검출기 상태 감시 프로그램 개발, 검출기 보정 데이터분석, 액시온 탐색 데이터 분석 등
 - 특히 컴퓨터관련과 데이터 분석을 포함한 프로그램 구축에 크게 기여
- ▣ 2018-2020 검출기 구축
- ▣ 2020년 12월 1차 데이터 수집
- ▣ 2021년 1-4월 검출기 재구축과 1차 데이터 분석
- ▣ 2021년 5-8월 2차 데이터 수집과 데이터 분석
- ▣ 2021년 9월 - 2023년 9월: 데이터분석과 논문 출판.
- ▣ 논문출판
 - Phys.Rev.Lett. 128 (2022) 24, 241805: 첫번째 탐색결과. 공동저자
 - Phys.Rev.D 106 (2022) 9, 092007: 검출기 및 탐색 방법 설명. 공동 교신저자
 - Phys.Rev.Lett. 131 (2023) 8, 081801: 두 번째 탐색결과. 제 1저자
 - Rev.Sci.Instrum. 94 (2023) 8, 083309: 자석 치 사건과 수리 보고. 교신저자

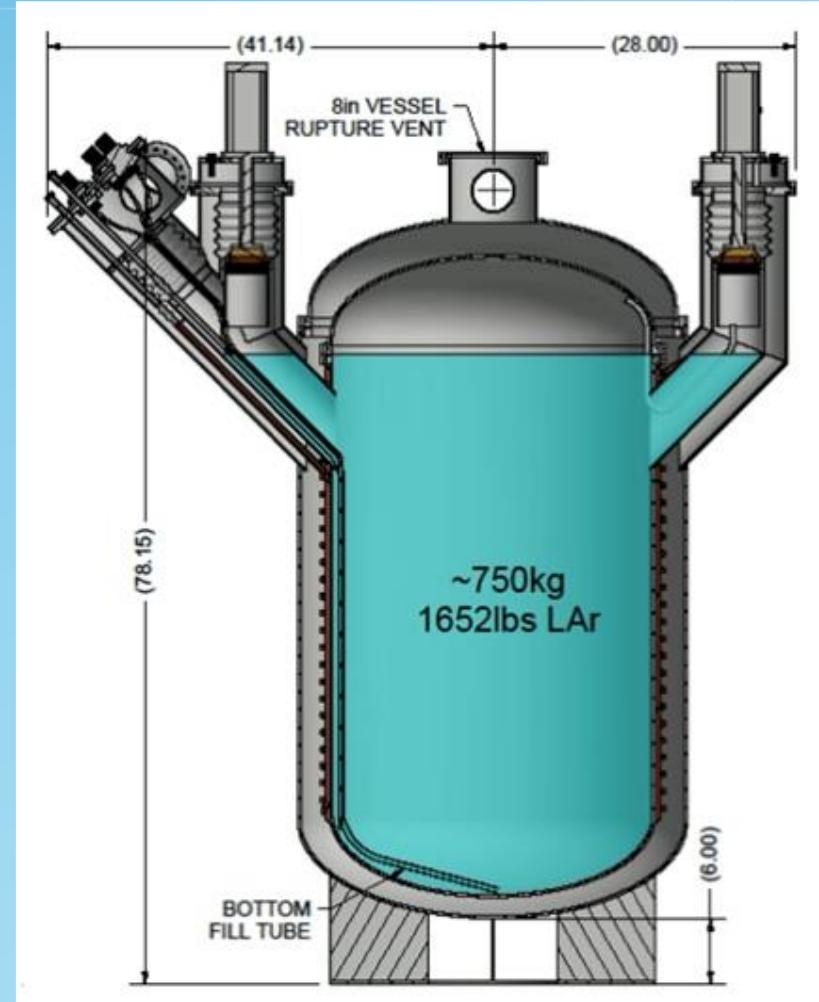
액시온 탐색 결과

- Run1: 2020, 12월 약 한 달.
- Run2: 2021년 5월-8월 약 2달 반.
- 당시에 세계에서 1 KSVZ 수준의 감도에 도달한 몇 안되는 실험 중 하나.



CENNS 실험

- 미국 오크리지 연구소에 1 톤급 액체 아르곤 검출기를 설치하여 중성미자-핵 결맞음 탄성산란 (Coherent Elastic Neutrino Nucleus Scattering: CEvNS)을 측정.
- 운영예정.구축을 유종희교수(서울대)가 제안.
- 2022년, 서울대에서 구축 시작. 2024년
- 검출기 구축에 참여 중.



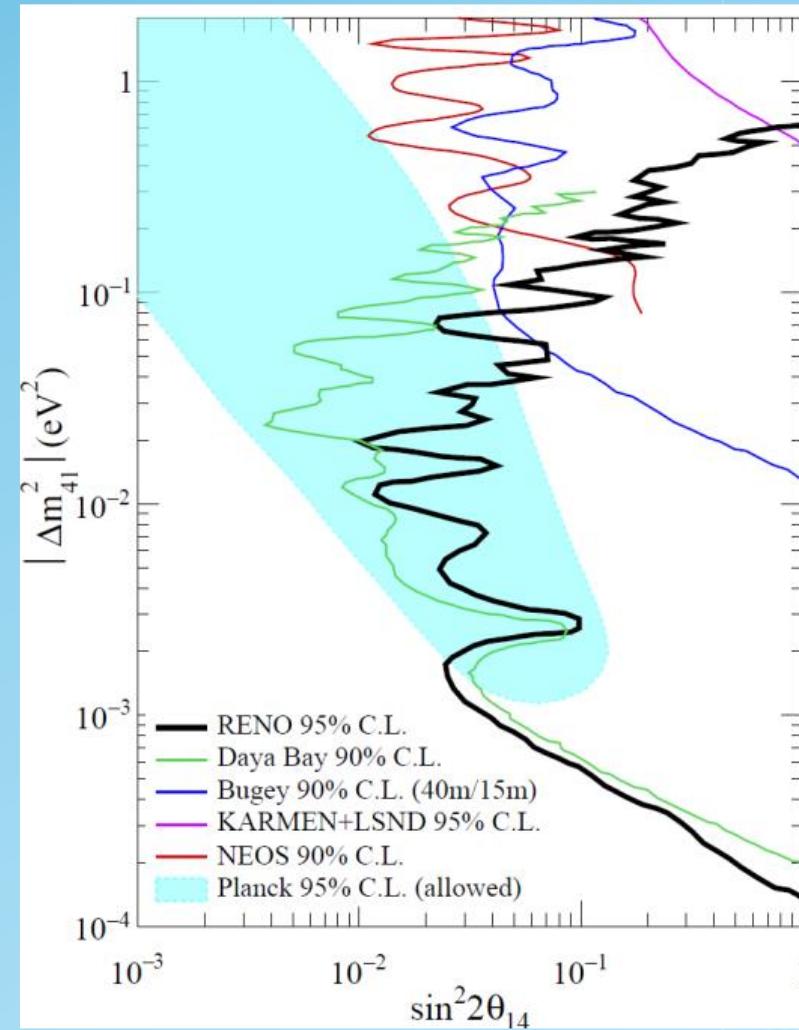
RENO에서 연구활동 (2010~2011)

물리 데이터 받기 전

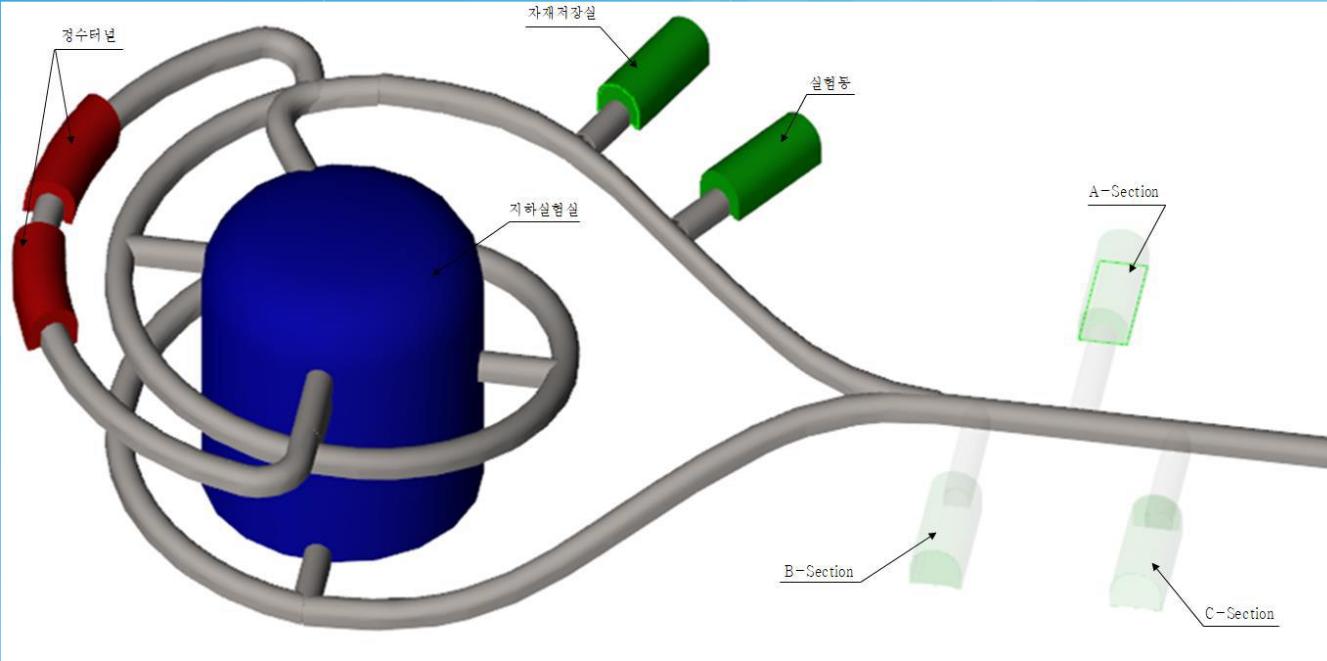
- 프로토타입 검출기 데이터 분석
 - 검출기 성능의 이해
- 검출기 구축
 - 조수순 정수장치
 - 레이저를 이용한 검출기 보정 장치
- 데이터 수집 장치 (DAQ) 설치와 구동 프로그램 개발
 - SK에서 사용하는 전자보드인 Qbee에 대한 사용경험을 바탕으로 DAQ를 책임짐.
 - SK DAQ 프로그램을 바탕으로 RENO DAQ 프로그램 개발
 - 수집된 데이터 처리용 프로그램 등 개발.
- 액체 섬광물질 채우기 전 검출기 구동 시험 책임짐.
 - 모든 장치와 프로그램 구동 점검
 - 검출기 보정

RENO 연구 활동 : 2018-현재

- ▣ 기초과학연구원 소속 약 3년, 타연구소 소속 약 2년
- ▣ 가벼운 비활성 중성미자 탐색
 - 암흑물질의 후보
 - 다른 연구원과 공동으로 Sub-eV 영역 탐색.
 10^{-3} eV^2 이하에서 가장 강력한 한계 설정
 - Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 19, 191801 교신저자 담당
- ▣ 2022년 가을부터 데이터분석 회의 주제하며 연구지도

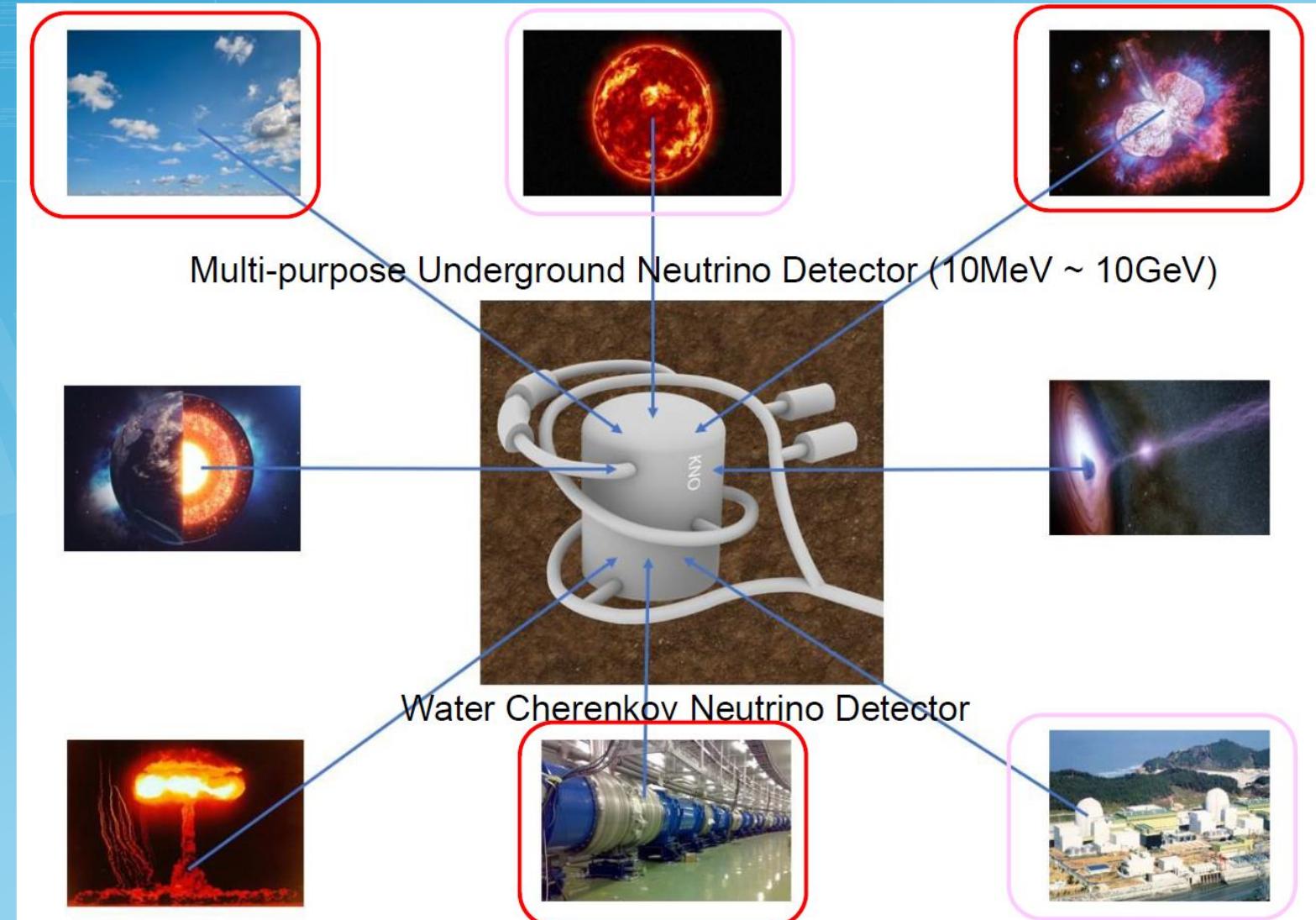


KNO (Korea Neutrino Observatory)



- ▣ 한국에 차세대 0.5 Mt급 대형 물체렌코포 검출기 구축 목표.
- ▣ HK, DUNE과 경쟁
- ▣ 현재, 부지 결정과 연구비 확보를 위해 노력 중.

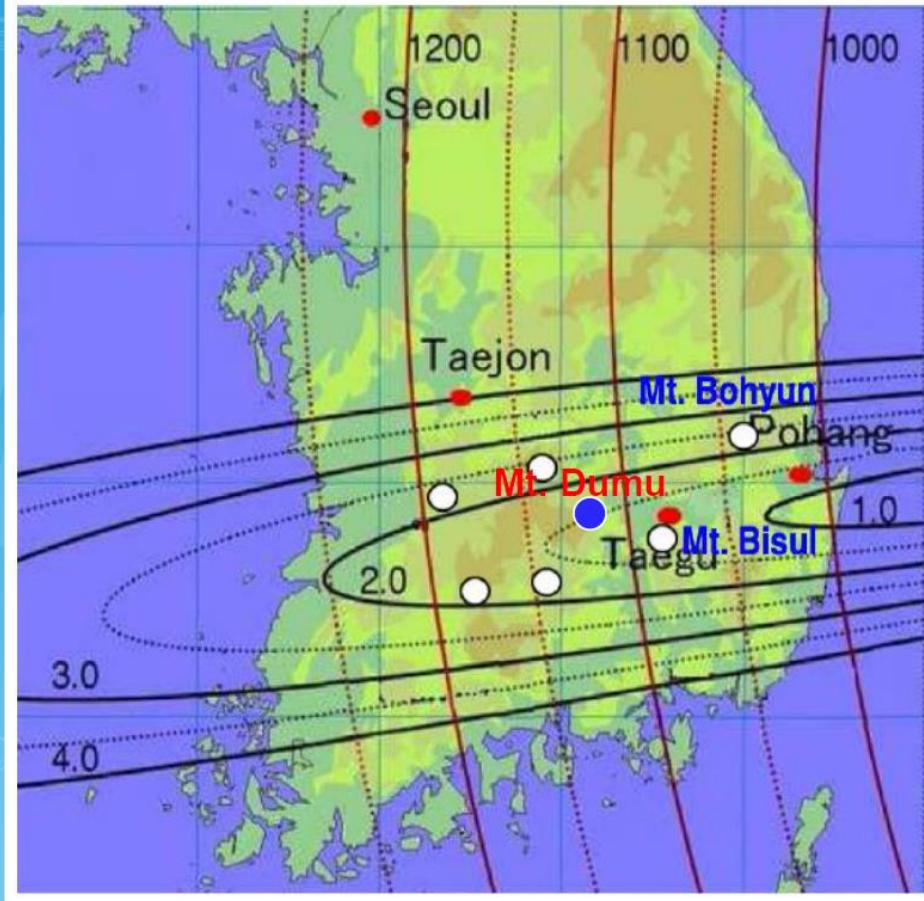
KNO의 물리적 목표



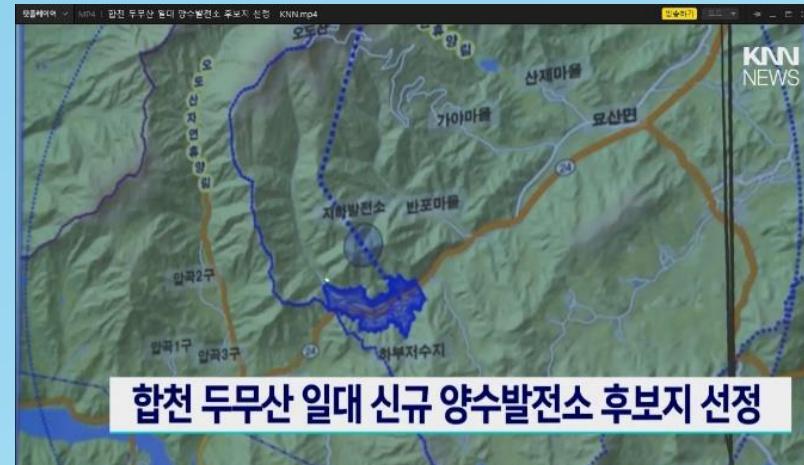
KNO 추진단 활동

- ▣ 2018.10: 각청 “KNO 추진단” 결성
- ▣ 2020.5-11: 과기정통부 정책과제 “중성미자 분야 발전방안” 수행
- ▣ 2021.2: 국회 과방위 의원들을 방문해 KNO사업에 대한 협조 부탁
- ▣ 2022.11: 경북대, UNIST, 천문연구원 등 5개 기관과 KNO 추진을 위한 업무 협약서 (MOU) 체결
- ▣ 2023.2: 과기정통부에서 KNO 기획과제 예산 배정
- ▣ 2023.4~12: KNO 협의회를 위한 기획과제 수행
- ▣ 2023.9.13: KNO 국회 포럼 개최
- ▣ 2023.12.21: KNO 국제 포럼 개최
- ▣ 2024.2: 기획과제보고서 과기정통부에 제출

KNO 새 후보지

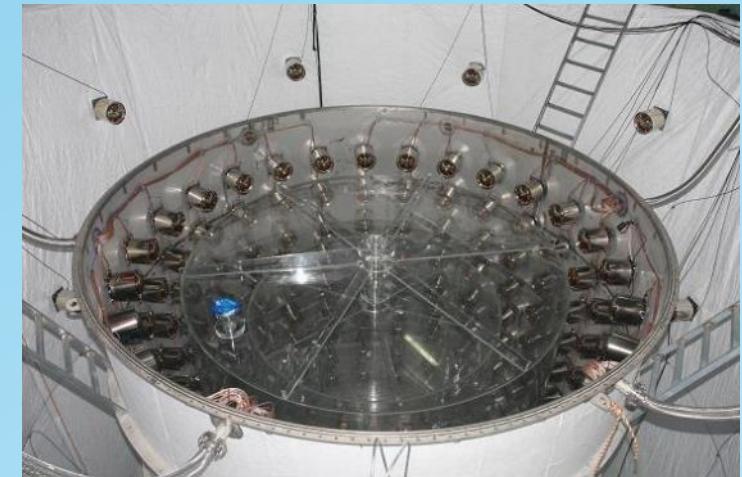
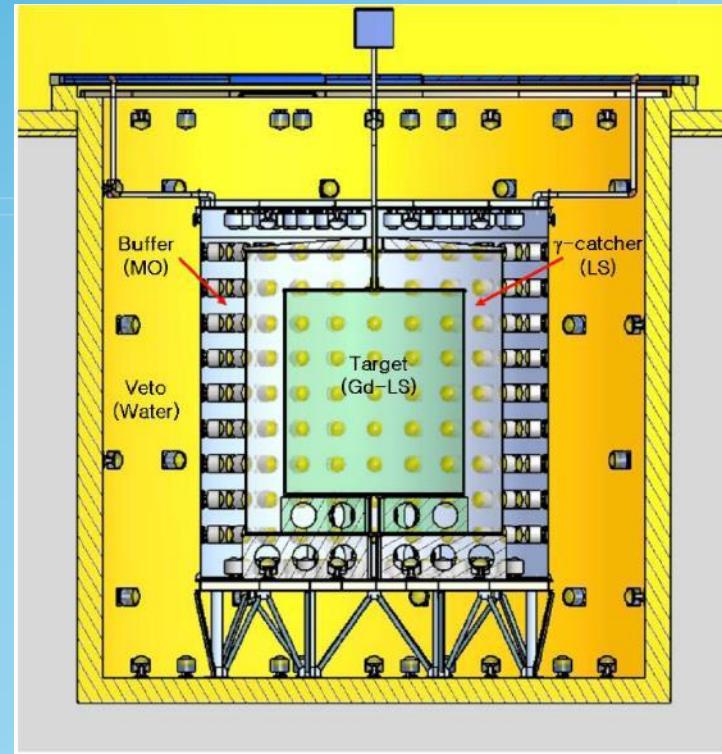
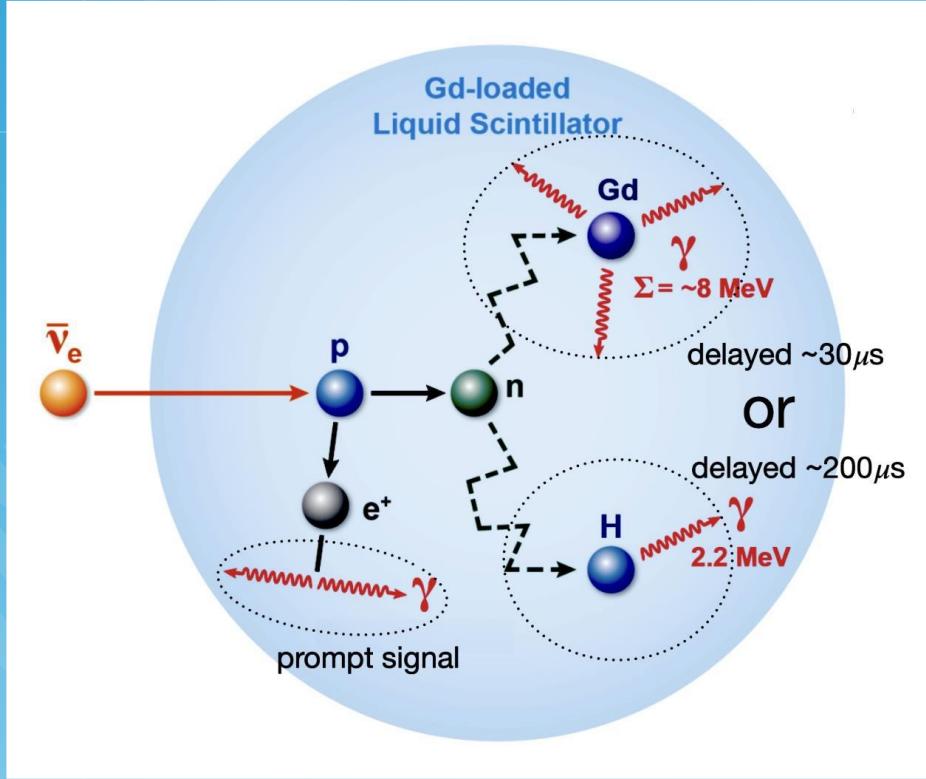


- ▣ 합천 두무산
- ▣ 기존 후보인 보현산과 비슬산에 뒤지지 않는 입지.
- ▣ 양수 발전소 구축 예정.



합천 두무산 일대 신규 양수발전소 후보지 선정

RENO 검출기

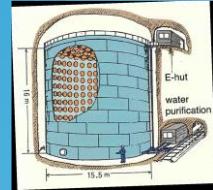


- 354 ID +67 OD 10" PMTs
- Target : 16.5 ton Gd-LS, $R = 1.4 \text{ m}$, $H = 3.2 \text{ m}$
- Gamma Catcher : 30 ton LS, $R = 2.0 \text{ m}$, $H = 4.4 \text{ m}$
- Buffer : 65 ton mineral oil, $R = 2.7 \text{ m}$, $H = 5.8 \text{ m}$
- Veto : 350 ton water, $R = 4.2 \text{ m}$, $H = 8.8 \text{ m}$

Kamiokande 실험의 세대

Water Cherenkov 검출기

Kamiokande (1983-1995)



초순수 용량: 3 kton
PMT: 약 948 개



KOSHIBA
Masatoshi
2002 노벨상

중성미자 천문학 창설

- 조신성 (SN1987A) 중성미자
- B8 태양 중성미자 관측

Super-Kamiokande (1996-)



41m

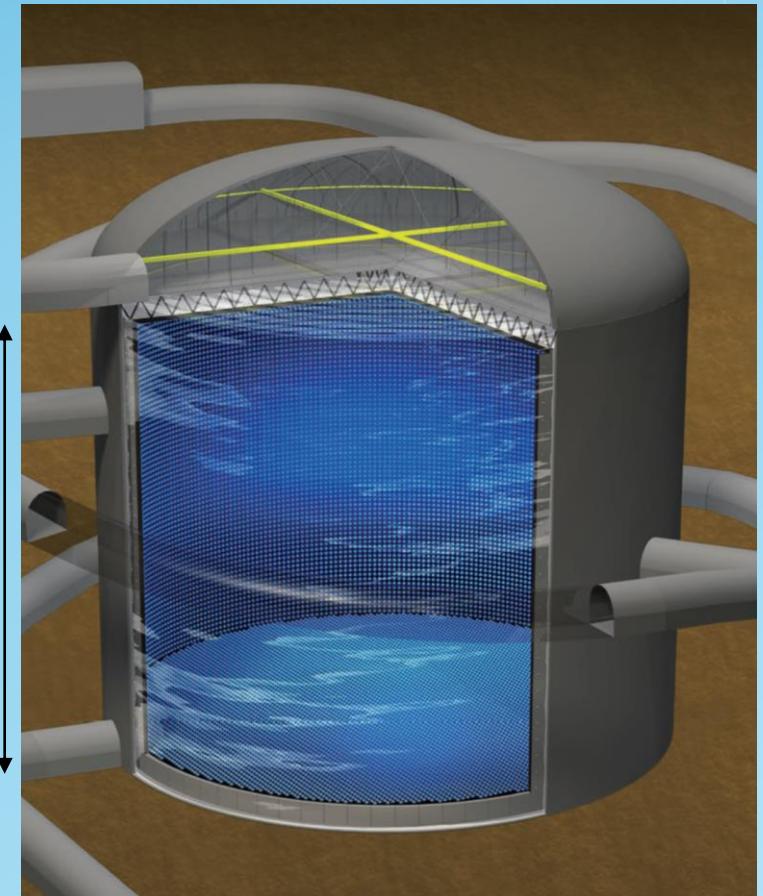
초순수 용량: 50 kton
PMT: 약 11146 개



KAJITA
Takaaki
2015 노벨상

증성미자 진동 발견
• 대기 증성미자

Hyper-Kamiokande (2027-)



71m

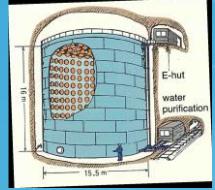
초순수 용량: 260 kton
PMT: 약 20000 개

입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회, 양병수

Kamiokande 실험의 세대

Water Cherenkov 검출기

Kamiokande (1983-1995)



초순수 용량: 3 kton
PMT: 약 948 개

한국 그룹 : 없음
한국인 유학생 참여
한국인 연구원?

Super-Kamiokande (1996-)



초순수 용량: 50 kton
PMT: 약 11146 개

한국 그룹 : 없음

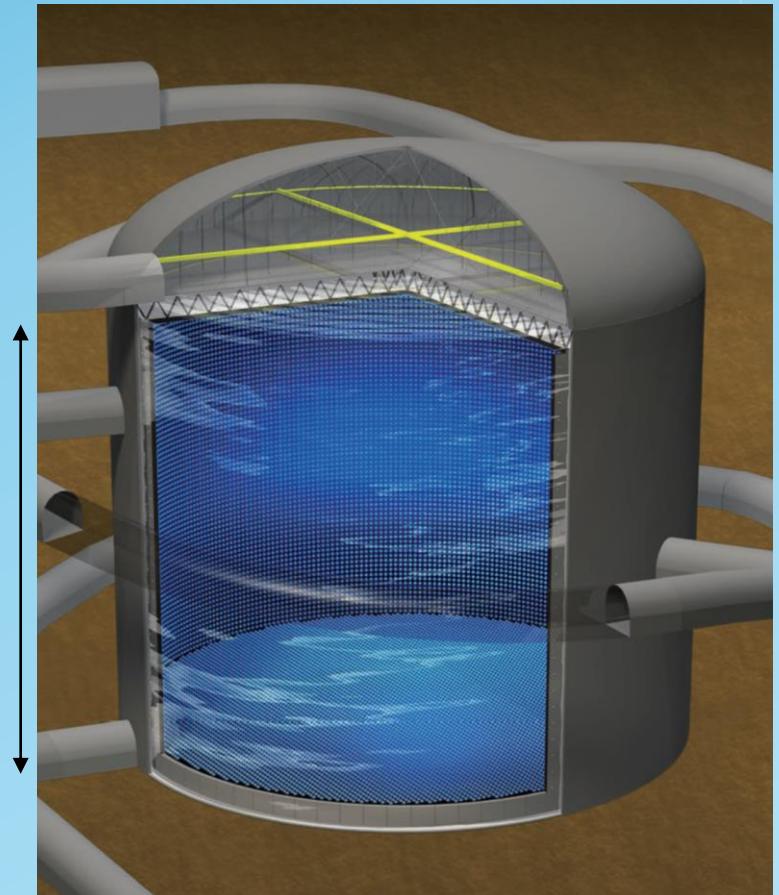
한국인 유학생 참여

한국인 연구원?

현재 한국 그룹
5개 연구소
10여명

현재 한국 그룹
7개 연구소
10여명 (공식)

Hyper-Kamiokande (2027-)



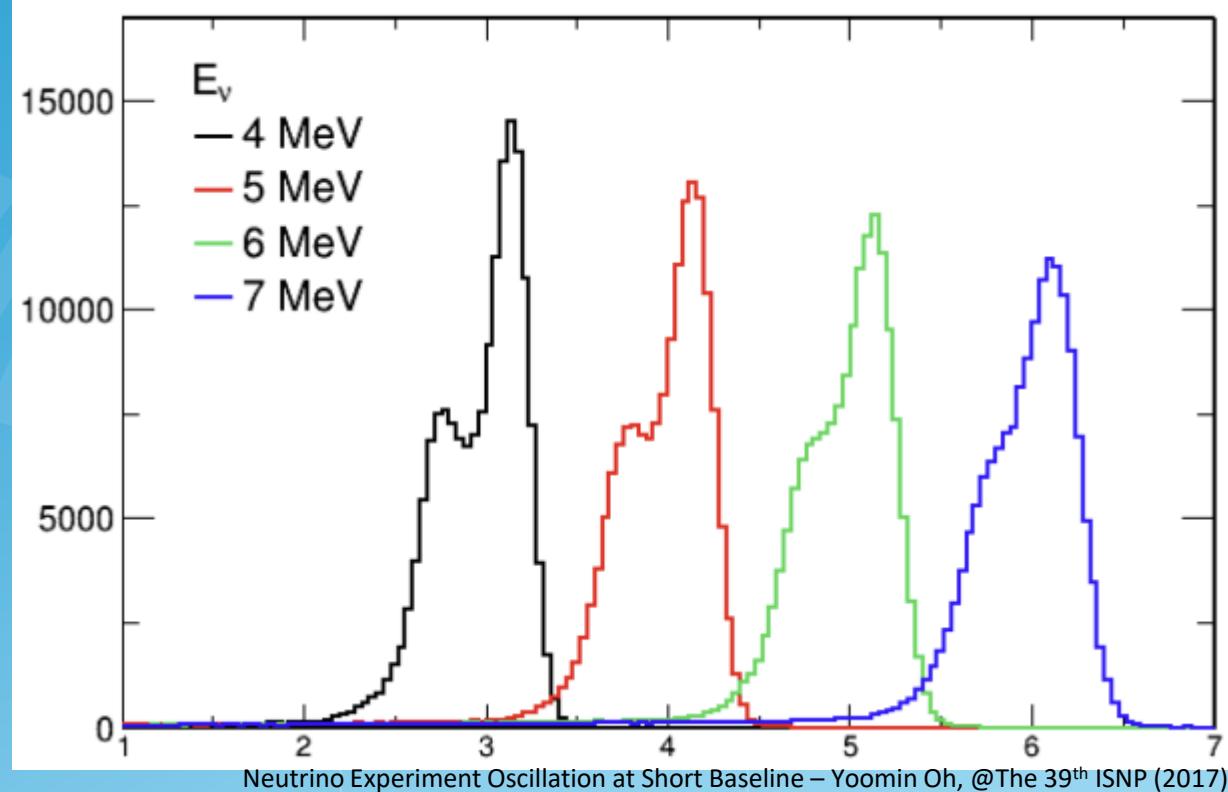
초순수 용량: 260 kton
PMT: 약 20000 개

입자 물리 및 장 물리 분과 학술대회, 양병수

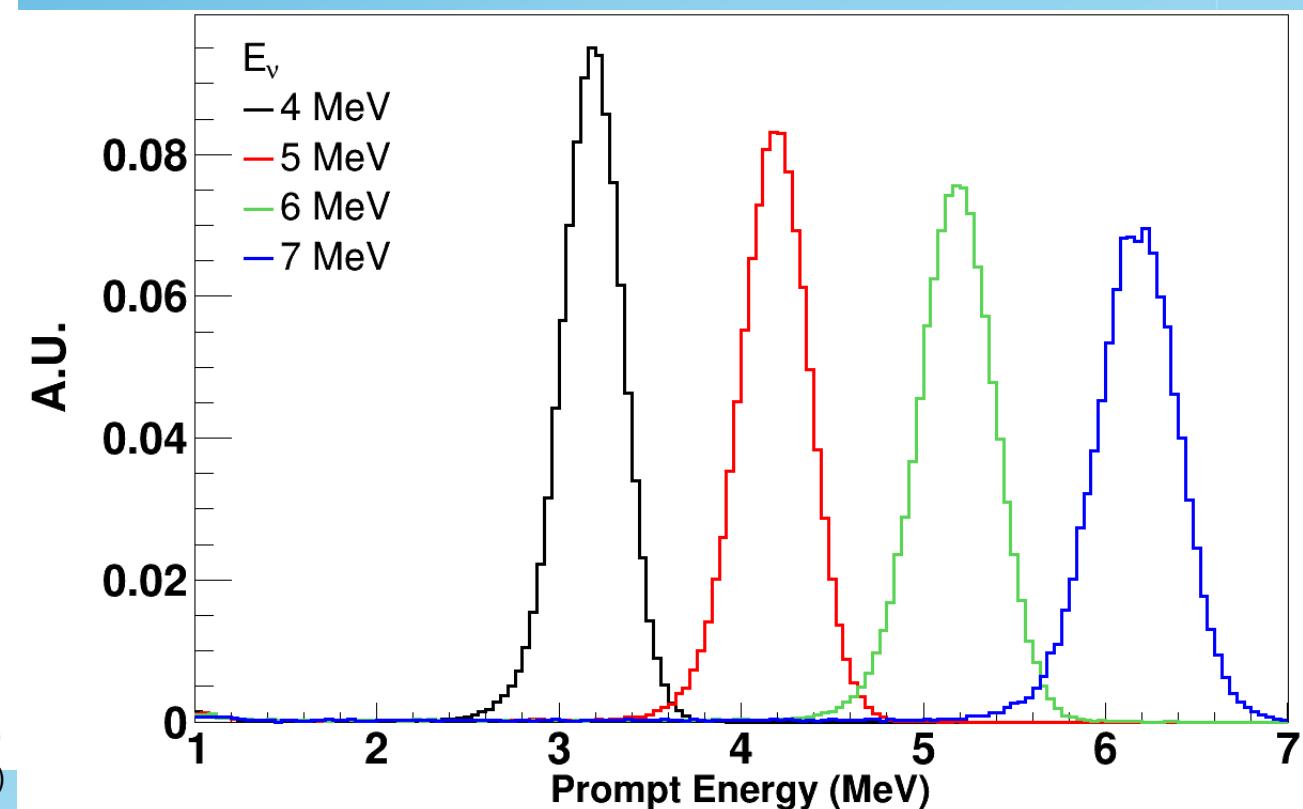
Motivation of RENE

- ✓ NEOS and RENO **detector responses** to monochromatic ν energies.

- NEOS

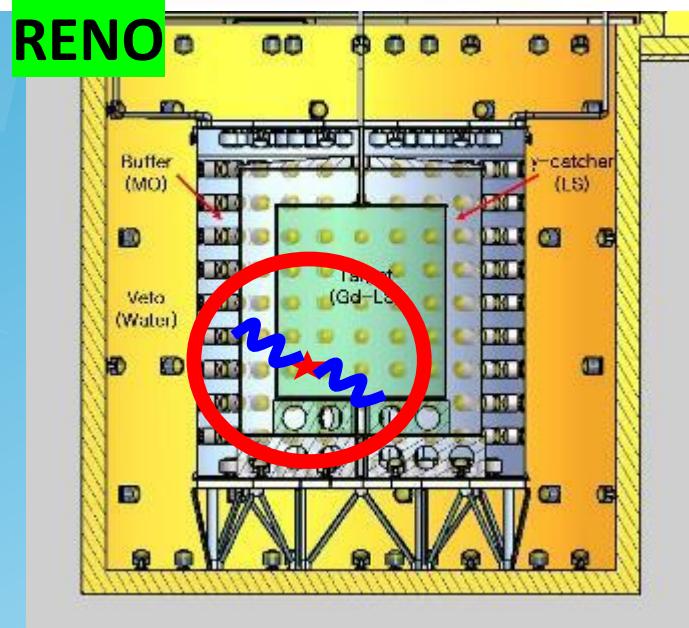
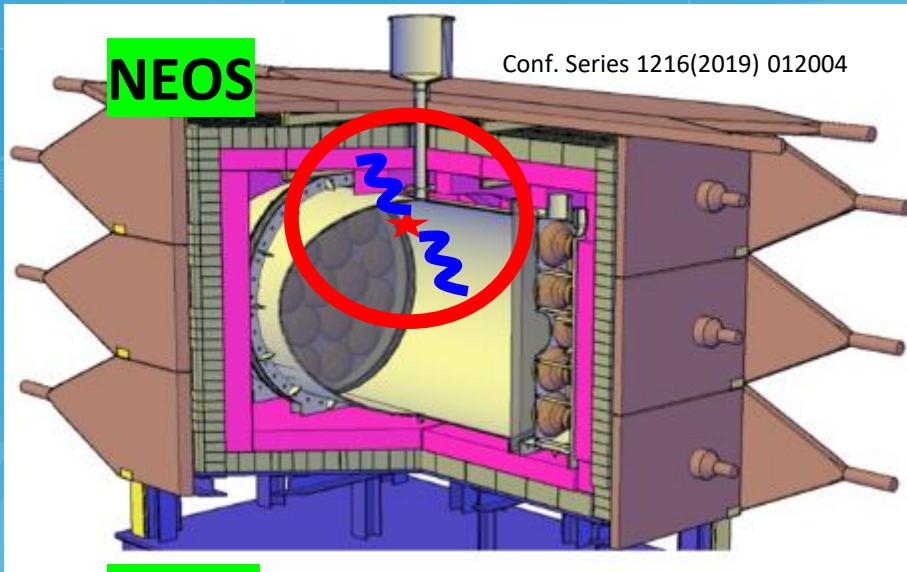


- RENO



The 2nd peaks might make a fake oscillation pattern.

Motivation of RENE



- The NEOS detector doesn't have gamma catcher different from the RENO detectors.
- **Escaping gammas** make the 2nd peak.
- To improve the energy resolution, RENE detector has a gamma catcher.

