

월면 중력과 관측소가

중간질량 블랙홀의 병합을 직접 탐지 해 낼 수 있을까?

*DONGA Project — 한국형 데시헤르츠 전방향 중력과 가속도 측정 네트워크,
LANGO 개념 기반 (Paik et al. 2026)*

제안자: 오정근
국가수리과학연구소 (NIMS)
johnoh@nims.re.kr



§ 과제명 & 모티프

동아 — DONG-A

Deci-hertz **O**mnidirectional **N**etwork of **G**ravitational-wave **A**ccelerometry

달까지 닿는 하늘의 동아줄

한국 전래동화 「햇님달님」(햇님달님, “해와 달”)에서, 어머니를 잡아먹은 호랑이에게 쫓기던 오누이는 나무에 올라가 하늘에 기도합니다. 그 때 동아줄이 하늘에서 내려옵니다. 오누이가 동아줄을 잡고 하늘로 올라가, 오라비는 해가, 누이는 달이 됩니다.

달이 된 누이는 한국에서 토끼와 함께 ‘달’하면 떠오르는 상징이 되었습니다.

동아줄은 DONGA 프로젝트의 핵심 메타포입니다. 한국형 달 프로젝트로서의 상징을 나타냅니다. 달 표면의 가속도계 네트워크가 누이라면, 누이가 포착한 신호는 동아줄을 따라 오라비가 있는 지구로 전달됩니다.



— 동아줄이 지구로 전해주는 신호의 기술적 정의.

● 한국 천문학 발전을 위한 중장기 비전: 2026-2035, 한국천문학장기발전연구회, 한국천문학회, 2026

분류	국제협력 여부	명칭	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	'36~	'40~
기존 시설	국제협력	8m급 광학망원경	가동										추후 활용결정	
		루빈/LSST	가동										자료활용연구	
		알마(ALMA)	가동 및 업그레이드										추후 활용결정	
		1.6m 태양망원경(GST)	가동 및 업그레이드										추후 활용결정	
		스피어엑스(SPHEREx)	가동	연장미션 및 자료 활용					자료활용 연구					
	한국주도	외계행성탐색시스템(KMTNet)	가동 및 기존시설 업그레이드										추후활용결정	
		한국우주전파관측망(KVN)	가동 및 기기 업그레이드										추후활용결정	
건설 중인 시설	국제협력	거대마젤란망원경(GMT)	건설										가동	
		평방킬로미터배열(SKA)	건설	확장 건설 및 가동										
		차세대중력파검출기	건설										가동	
미래 시설	국제협력	차세대 대형전파망원경배열(ngVLA)	희망 활용 시기 : 2030 - 2040년대											
		아테나(ATEHNA)												
	한국주도	전천 원격관측시스템												
		한국 우주망원경												
		다천체 분광탐사망원경												
		초천도 텐서중력센서												
		한국 중성미자천문대												
		다중신호 관측네트워크												
		L4 태양 미션												
태양계 및 태양 미션														
지속적으로 유지할 시설 또는 분야	한국주도	자료저장 / 계산시설	구축 및 활용/지속적 확장											
		관측기기 개발	지속적 개발 및 활용											
		창의적 관측 프로젝트	지속적 개발 및 활용											

<미래의 난제 해결을 위한 한국 천문학계의 연구시설들>

목차

01

연구 배경 & 동기

02

기존 연구와의 차별성

03

연구 질문 & 목표

04

연구 단계 & 핵심 기술

05

데이터 처리 & 기대 성과

06

단기 / 중기 / 장기 로드맵

07

국가 과학기술 정책과의 부합성

08

기술성숙도/ Risk Management

09

추진체계 & 인력

10

단계별 예산 산출

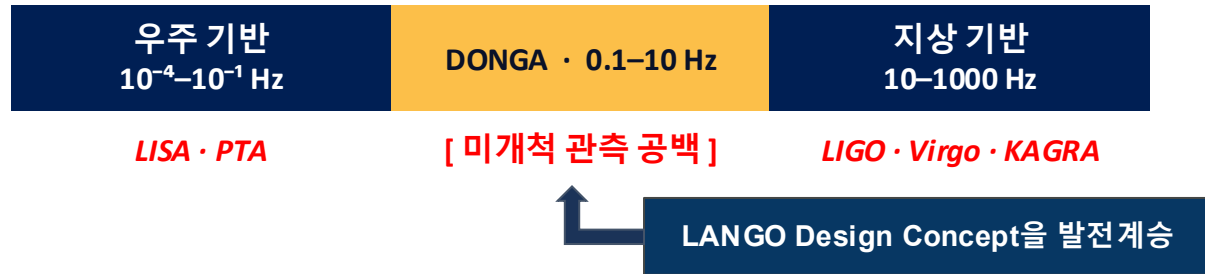
11

구축수준, 차별성 및 활용성

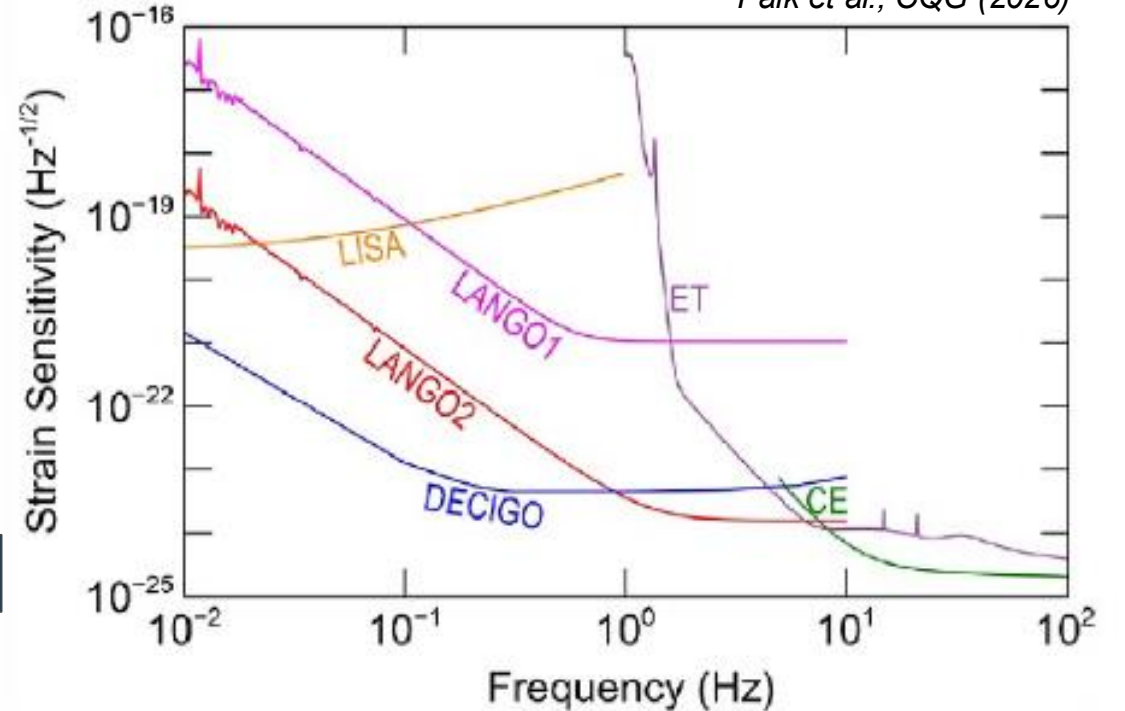


중력과 관측의 “누락된 Band”

LIGO의 2016년 직접 검출로부터 10년이 지난 지금도, 지상검출기와 우주검출기 사이에는 0.1-10 Hz의 중간주파수 관측 공백이 남아 있습니다.



Paik et al., CQG (2026)



이 주파수 대역이 중요한 이유



새로운 천체물리 광원

중간질량 블랙홀 병합, 백색왜성 쌍성, 장주기 쌍성, 연속파 중성자별 — 현 검출기로 도달 불가능한 영역



다중신호 조기 경보

병합 수일 혹은 수개월 전부터 inspiral 신호 포착 — 전자기·중성미자 관측소와 사전 연계 경보



연속 중력과 스펙트럼

지상·중간·우주 대역을 잇는 다중대역 중력과 천문학 완성; 강중력장 일반상대성이론 검증 가능

간섭계가 아닌, 달 전체를 검출기로 활용

기존 검출기 — 레이저 간섭계

측정 방식

- 단일 L-모양의 레이저 BASELINE으로 부터의 strain 측정

환경

- 지구 — 지진·대기·해양 잡음의 영향 / 뉴턴잡음·지진동의 저주파 대역 한계 (Seismic wall)

구조

- 단일축 응답 — 천구 방향 & 편광 결정 능력 제한: 3대 이상의 네트워크 간섭계 필요

대표 시설

- LIGO · Virgo · KAGRA · LISA

DONGA — 초전도 가속도계 네트워크

측정 방식

- 중력기울기 전방향 텐서 — 초전도 가속도계 4기

환경

- 달 — 지진 잡음이 지구 대비 약 10^6 배 낮음, 해양·바람·판구조 없음

구조

- 사면체 네트워크 — 전방향텐서 응답으로 천구 방향 & 편광을 동시에 결정

기술 계보

- LANGO 개념 기반 (Paik et al. 2026); 달(직경 ~3 m 구체의 약 10^6 배)이 20년 이상 운영 가능한 단일 천텐서 중력과 안테나가 됨

→ 경쟁이 아닌 상호 보완 — 간섭계로 측정할 수 없는 물리량을 포착하며 LIGO/ET ↔ LISA 주파수 공백을 연결



월면 중력과 관측소가

중간질량 블랙홀의 존재를 입증할 수 있는가?

목표 달성을 위한 3개의 기술적 하위 질문들

① 센서 실현가능성

2단계 가속도계 네트워크가 감도: $\leq 10^{-11}$ (DONGA1) 및 $\leq 10^{-13}$ (DONGA2) $m s^{-2} Hz^{-1/2}$ 수평 감도(1 mHz-10 Hz)를 달 표면에서 달성할 수 있는가?

- 1단계: 5.0 kg Ti6Al4V 시험질량 + Be-Cu 진자 + 250 K 레굴리스 매립 + JFET 판독
- 2단계: 10 kg Brass 시험질량 + Nb 초전도 Negative 스프링 + 4.2 K + 2단 SQUID 판독

② 신호 분리

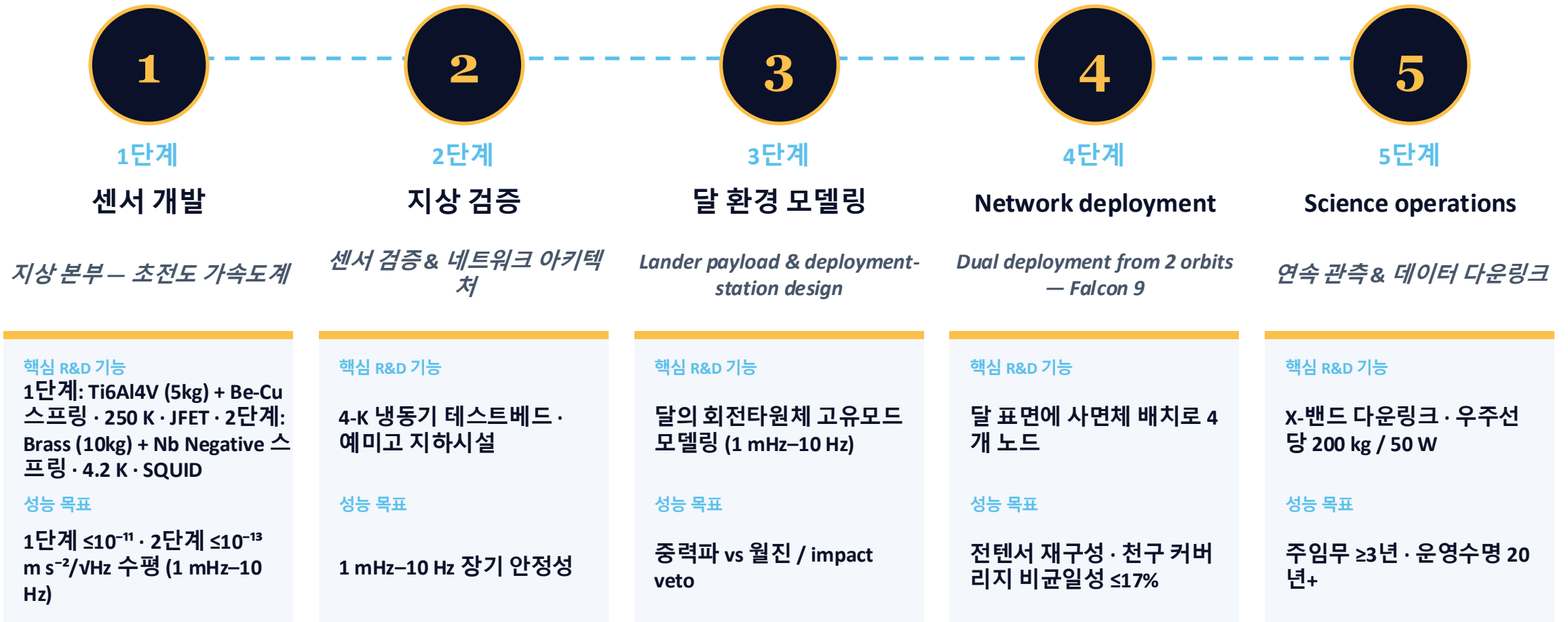
달의 회전타원체 고유모드, 심부 월진, 운석 충돌로부터 중력파 strain을 깨끗하게 분리할 수 있는가?

8개의 수평 가속도 출력으로 응답을 over-determine하여 non-GW event를 veto 할 수 있는가?

③ 네트워크 재구성

사면체 배치의 4기 가속도계로 거의 균일한 천구 커버리지($\leq 17\%$ 비균일성)를 확보하고 파원의 방향과 편광을 재구성할 수 있는가?

센서 R&D부터 달 운영까지 — 5단계 기술 파이프라인



센서 R&D - LANGO 1/ LANGO 2

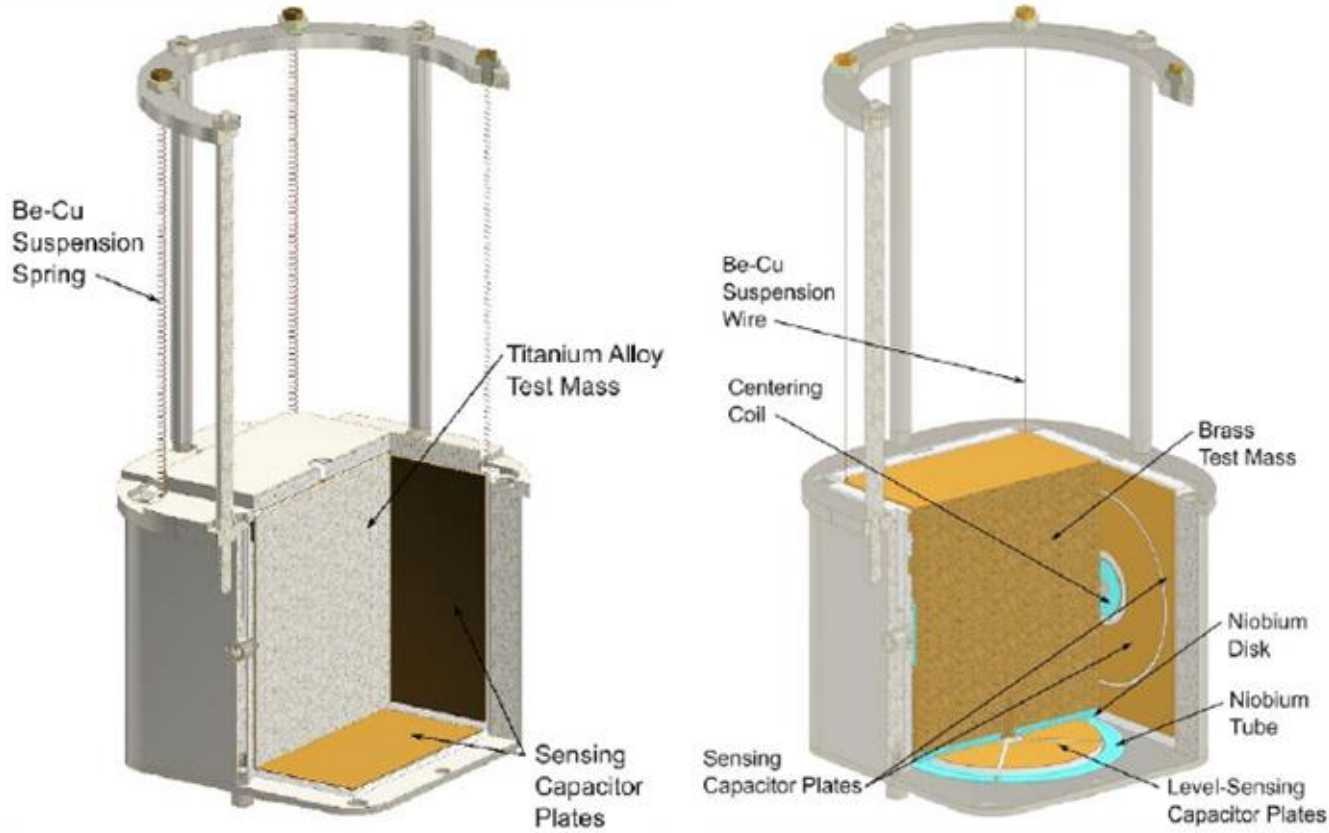
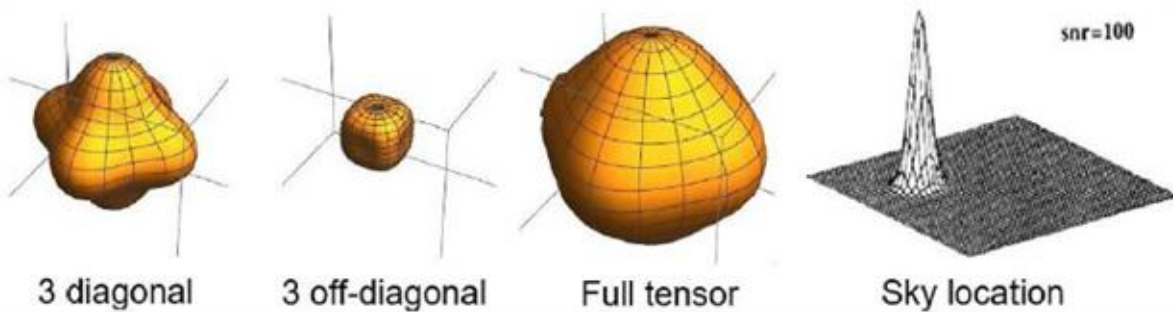
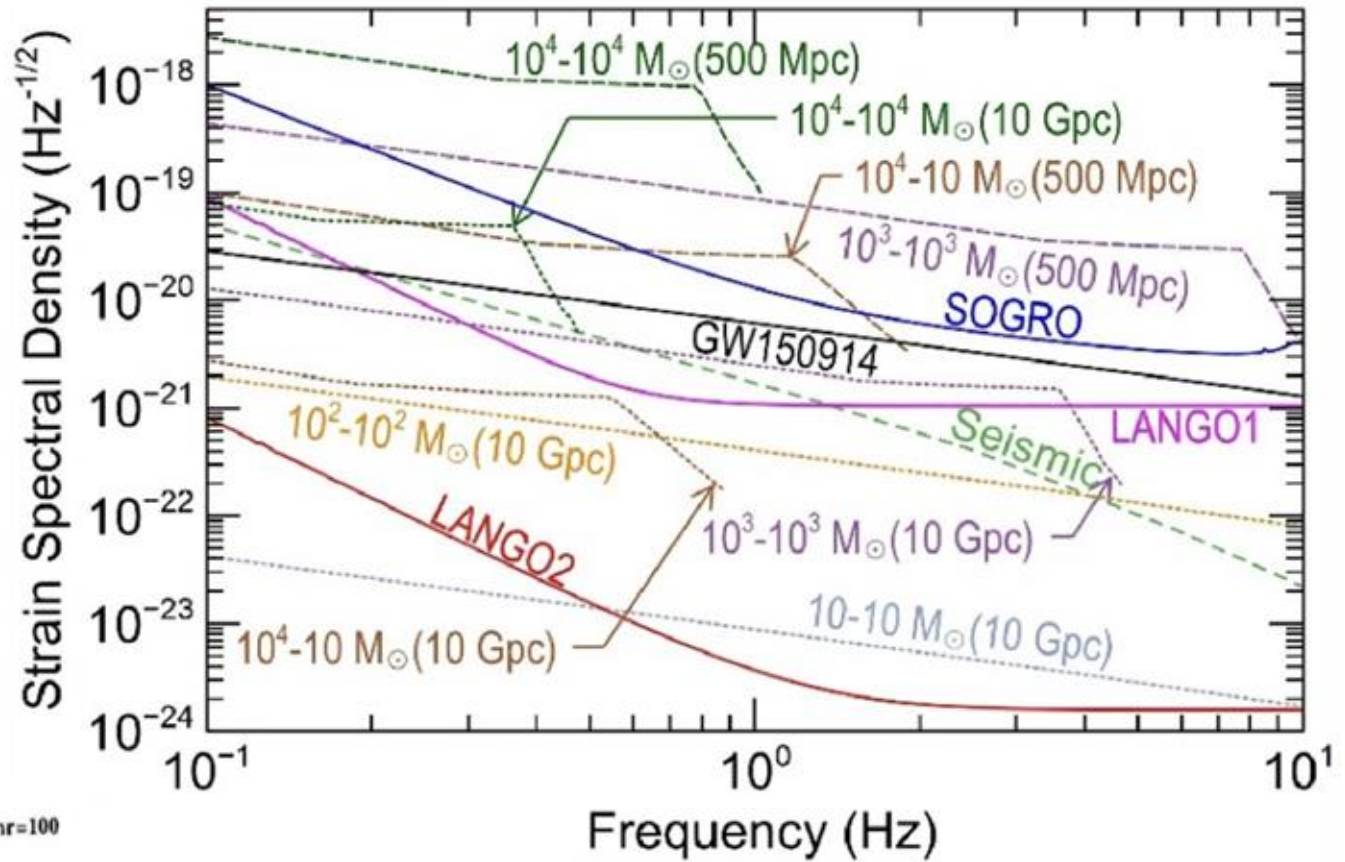
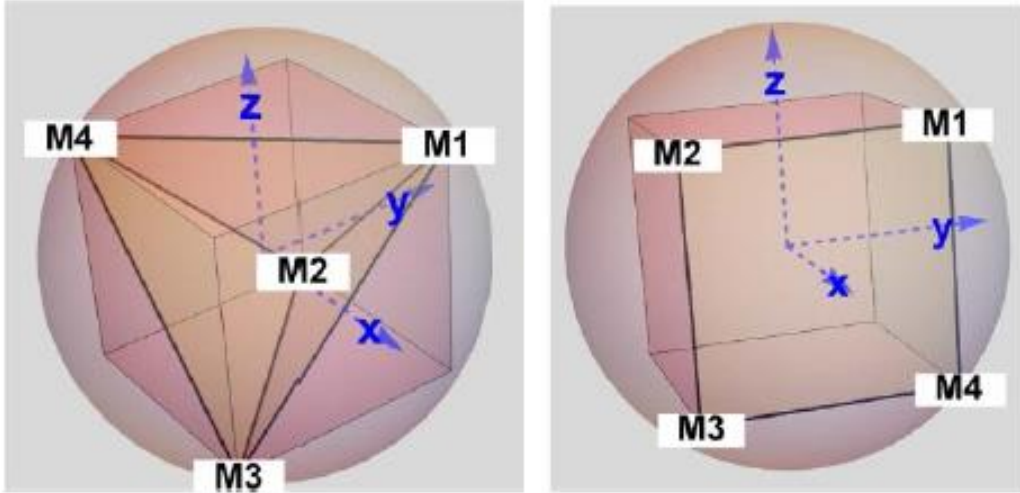


Table 1. Values of accelerometer parameters. Some are fixed by design and others are derived.

Accelerometer parameter	LANGO 1	LANGO 2
Mass of TM, m	5.0 kg	10 kg
TM resonance frequency, f_0	0.01 Hz	0.01 Hz
TM spring loss angle, ϕ (f)	10^{-6}	10^{-8}
TM temperature, T	250 K	4.2 K
LC-bridge driving frequency, f_p	94 kHz	2.7 MHz
Sensing capacitance, C	100 pF	100 pF
Driving electric field, E_p	10^5 V m^{-1}	10^5 V m^{-1}
Quality factor of LC-bridge, Q_p	20	10^3
Bridge inductor, L	25 mH	—
Transformer primary, L_{t1}	—	20 μH
Transformer secondary, L_{t2}	—	5.0 μH
Transformer coupling, k^2	—	0.80
Transducer energy coupling, β	$(0.32 \text{ Hz}/f)^2$	$(1.6 \text{ Hz}/f)^2$
Amplifier noise temperature, T_N	5.2 K	0.017 K

센서 R&D - Features



센서 → 시스템 통합 → 데이터 분석

Project 3 Core Pillars



PILLAR 1

초전도 센서 기술

- 1단계 (DONGA 1) — 5.0 kg Ti6Al4V 시험질량, Be-Cu 펜듈럼 서스펜션, 평형 길이 0.25 m, 250 K 레콜리스 매립 (안정 열환경)
- 정전기 주파수 저감(EFR)으로 펜듈럼 0.40 Hz를 수평 0.01 Hz · 수직 0.03 Hz로 저감
- 2단계 (DONGA 2) — 10 kg 황동 시험질량, Nb 초전도 음 스프링, 2단 Magnicon SQUID ($280\hbar$) + LC-브리지 트랜스듀서
- 4.2 K 냉동기 운영 (2단계), 저진동 마운트 (1 Hz에서 $<3 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-2}/\text{VHz}$) + 보조 가속도계 어레이를 통한 결맞음 지진잡음 제거

목표 $\leq 10^{-11}$ (1단계)
→ $\leq 10^{-13}$ (2단계) $\text{m s}^{-2}/\text{VHz}$ 수평



PILLAR 2

시스템 통합 & 달 환경 적응

- Lunar Night Survival — 14일 밤기간 대응: MLI + 히터 + 탑재 RHU
- 200 kg / 50 W 버스, 5.3 m² 태양전지판, X-밴드 고이득 안테나 (0.5 m)
- 2개 달 궤도에서 Dual Deployment — Falcon 9 페어링, 단일추진제
- RAD750 명령·데이터 처리(C&DH) · 탑재 2주 데이터 버퍼 · 1일 3회 다운링크 창

사면체 네트워크 — 전 지구적 분산 4 노드



PILLAR 3

관측 & 데이터 분석

- 달의 회전타원체 & 단극자 고유모드 정방향 모델링
- 8개 수평 가속도 출력에 대한 역문제 — overdetermined system
- 월진·운석 충돌·전자기 교란으로부터 중력파 신호 분리
- Lunar Geophysics Network (LGN)과의 공동 분석을 통한 사건 거부 / 교차 검증

전방향텐서 재구성 · 천구 방향 결정 & 편광

페타바이트 시대의 중력과 데이터 인프라

수 TB

Annual data volume · multi-station, multi-axis acceleration

PB급

Long-term operation reaches petabyte volumes

≥ 3 년

Continuous observing for long-baseline integration

Core data-processing techniques

- 1 **Frequency / time-frequency analysis**
Signal feature extraction in spectral domain
- 2 **Matched filtering**
Template-bank detection against theoretical waveforms
- 3 **Bayesian parameter estimation**
Posterior-based source-parameter inference
- 4 **Multi-detector correlation**
Cross-station coincidence to amplify weak signals
- 5 **Tensor reconstruction**
Noise veto via full-tensor consistency

DONGA가 열게 될 4대 과학적 지평



01

중간질량 블랙홀의 직접 검출

광도거리 ≥ 10 Gpc까지 IMBH 쌍성 병합 검출 – 초대질량 블랙홀의 seed 형성 경로에 대한 최초 직접 탐사



02

다중대역 중력과 천문학

GW150914급 항성질량 쌍성을 SNR > 100으로 관측 – LIGO/ET, LISA, 전자기·중성미자 관측소와 수일 전 사전 경보 연계



03

일반상대성이론 정밀 검증

다중대역 시너지를 통해 강중력장 일반상대론 검증 정밀도 10000배 달성
달의 단극자 응답을 통한 스칼라 중력과 모드(Brans-Dicke 등) 직접 탐색



04

달 내부 Geophysics

Apollo 지진계 대비 10^5 - 10^6 배 향상된 감도 측정 – 전 지구적 월진 카탈로그 및 LGN 미션과의 시너지로 정밀화된 달 내부 모델

기술성숙도(TRL)에 맞춘 단계별 추진 전략

단기 · 즉시 착수

0-3년

센서 기술

- Meissner 서스펜션 + 2stage dc SQUID 통합
- 저진동 극저온 지상 테스트베드 (4 K, 예미고)
- $\leq 10^{-11} \text{ m s}^{-2}/\text{VHz}$ (1단계 / DONGA-1 급) 지상 프로토타입
- DONGA / LANGO 개념의 실험적 검증 (TRL 4 → 6)

중기 · Pre-deployment

3-6년

시스템 통합

- 달 랜더 페이로드 & deployment station 설계 (4 K 유지)
- 1000-2000 km 네트워크 동기화 & 스테이션 간 시각 정렬
- 지구-달 X-밴드 다운링크 및 지상 데이터센터 파이프라인
- 회전타원체 고유모드 인식 신호분리 알고리즘

장기 · Full Science Operation

6년+

달 표면 네트워크

- 2개 달 궤도에서 dual-deployment Tetrahedral 4노드 가속도계 네트워크
- 방향 & 편광의 전텐서 재구성
- 주임무 3년, 운영수명 20년 이상
- IMBH 쌍성 및 GW150914급 사건 직접 검출

대한민국 국가계획과의 부합성

DONGA는 현행 4개 국가 과학기술 전략계획에 직접 부합

지금 해야 하는 이유: 달 중간대역 중력파 지형이 전 세계적으로 정의되는 중
- 2030년 이후 진입은 추종이지 선도가 아님.

MSIT

과학기술기본계획 (2023-2027)

전략과제 “기초과학 선도” — 대형 기초물리학 인프라를 국가 우선 자산으로 육성.

MSIT · KASA

우주경제 로드맵

2030년대 달 페이로드 프로그램 및 ISRO/NASA/ESA 파트너십 파이프라인 — DONGA는 대표 달과학 페이로드 등급을 제공.
2045년 달 기지 건설과 달 기지에서 수행할 기초과학 프로젝트.

MOFA · KASA

아르테미스 약정 (2021년 13번째 서명)

국제협력 프레임워크 내 달 표면과학 분야에서 한국의 주도 기회 — 한국 최초의 중력파 관측소건설 달 미션 제안.

시급성

중간주파수 중력파 — 시기적 시급

ESA LGWA, NASA LILA 추진 중; 2026-2030년이 한국이 달 중간대역 중력파 공동체에 진입하고 협력할 최적의 시기.

기술성속도, 위험요인 및 완화방안

기술성속도

펜듈럼 + EFR 서스펜션 (DONGA-1) <i>UMD 달 지진계 실증 – de Paula et al. 2023</i>	TRL 4–5
초전도 Negative Spring + SQUID 판독 (DONGA-2) <i>SOGRO 프로그램 프로토타이핑 – NSF 지원</i>	TRL 3–4
달 표면 4K 냉동기 <i>월야 열제어, MLI + RHU + 매립 구조</i>	TRL 4
달 랜더 · X-밴드 다운링크 · 200 kg 버스 <i>상용 달 랜더 운영 경험 계승</i>	TRL 6–7
사면체 전방향텐서 재구성 알고리즘 <i>LANGO Design Concept : Closed-form derivation</i>	TRL 4

주요 위험과 완화방안

- 달 지진잡음 배경 미측정**
 1단계 (DONGA-1)에서 배경 측정; 2단계는 5 km 환형 보조 어레이를 통한 결맞음 제거 구현 (Harms 2022)
- 냉동기 진동 주입**
 1 Hz에서 진동 방출 $<3 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-2}/\text{VHz}$; 수동 마운트 + 절연 단계 지상 검증
- 원격 채널의 상호 교정**
 운석 충돌로 발생하는 달의 사극자 모드를 자연 교정 신호로 활용
- 착륙 분산 / Dual Deployment**
 동일한 달 transfer stage로 2개 궤도에서 4 노드 전달; 노드 위치는 $\pm 100 \text{ km}$ 허용

추진체계 및 전문인력 확보

국내 국제/ 정밀중력측정·달과학 컨소시엄 기반

주관기관

NIMS · SNU · Hana Corp

초전도 중력경사계 (mSOGRO, DONGA, LANGO: SGG)
공동개발을 위한 연구협력 (2025.4.1)

공동주관 국내 협력기관

ADD · KASI · KIGAM · KRISS

저온 및 중력계측 장치 개발, 천체물리 & 지구물리 전문성
초전도자기부양기반 중력경사계 기술개발 이전계약 (NIMS-ADD, 2025.11.26)

국제 협력기관

U. Maryland (HJPaik) · U. Beijing (Bian Xing) · GWR Instruments · U. Calgary

LANGO 계측 계보, 달 미션 비행 시스템, 가속도계 잡음 분석 (현재 iGrav#001 협력 진행 중)
SGG single axis: U. of Beijing

전문인력 양성 계획 (0-5년차)

12-18

핵심 연구인력

국내 협력기관에 걸친 센서·극저온·데이터 분석 & 비행 시스템 트랙

8-12

대학원생

국내 대학과 연계하여 물리·전기전자·항공우주 인력양성

4-6

박사후연구원 (국내외)

UMD, U. Beijing, U. Calgary 등 프로그램 공동 지원 - 계측 & 중력파 데이터 분석 훈련

≥ 6

산업 파트너

(주) 하나 및 국내 저온장비 업체, 지상국 네트워크, 랜더 공급사

구축수준, 차별성 및 활용성

달 중간대역 중력파 천문학에 대한 세계 최초 국가 기여 — 다학제 사용자 공동체 포함

세계 최초

한국 주도 달 중력파 네트워크

DONGA는 한국이 주도하는 최초의 국제협력 중간대역 달 중력파 관측소 — ESA LGWA, NASA LILA 검토와 중복이 아닌 상호보완.

기존 인프라로 대체 불가능한 이유

- 지상 간섭계 (LIGO/ET): ≥ 10 Hz만 — 0.1–10 Hz 도달 불가
- 우주 간섭계 (LISA/DECIGO): $\leq 10^{-1}$ Hz — 중간대역 공백 잔존
- ESA LGWA, NASA LILA 검토: 상이한 센서 아키텍처와 구성 — 다중 미션 네트워크 분야를 강화
- 달 플랫폼 중간대역 영역을 대체할 국내·해외 인프라의 협력체계 구축

사용자 및 활용 분야

중력파 천문학

LIGO/Virgo/KAGRA, ET, CE, LISA — 다중대역 공동 분석

달 지구물리학

LGN 미션, 행성과학 십년계획 공동체

기초 물리학

일반상대성이론 검증, 대안중력이론 (스칼라 중력파), 표준모형 확장

중간주파수대역의 중력파 탐사를 통한 우주의 기원을 밝히는 'Big Question'에 대한 답을 제시

국내 공동체

KASI, NIMS, KIGAM, KRISS, KARI + 우주청의 협력을 통한 우주개발 미션 협업체 구성

Artemis 시대 — 한국은 2021년 5월 13번째 서명국으로 가입, 달 기반 기초과학을 선도할 수 있는 기회



글로벌 협력 네트워크

ESA LGWA·NASA LILA와 차별·상호보완
— 다관측 프레임워크, LANGO 계보 기
반 (Paik et al. 2026)



최초 직접 검출 가능성

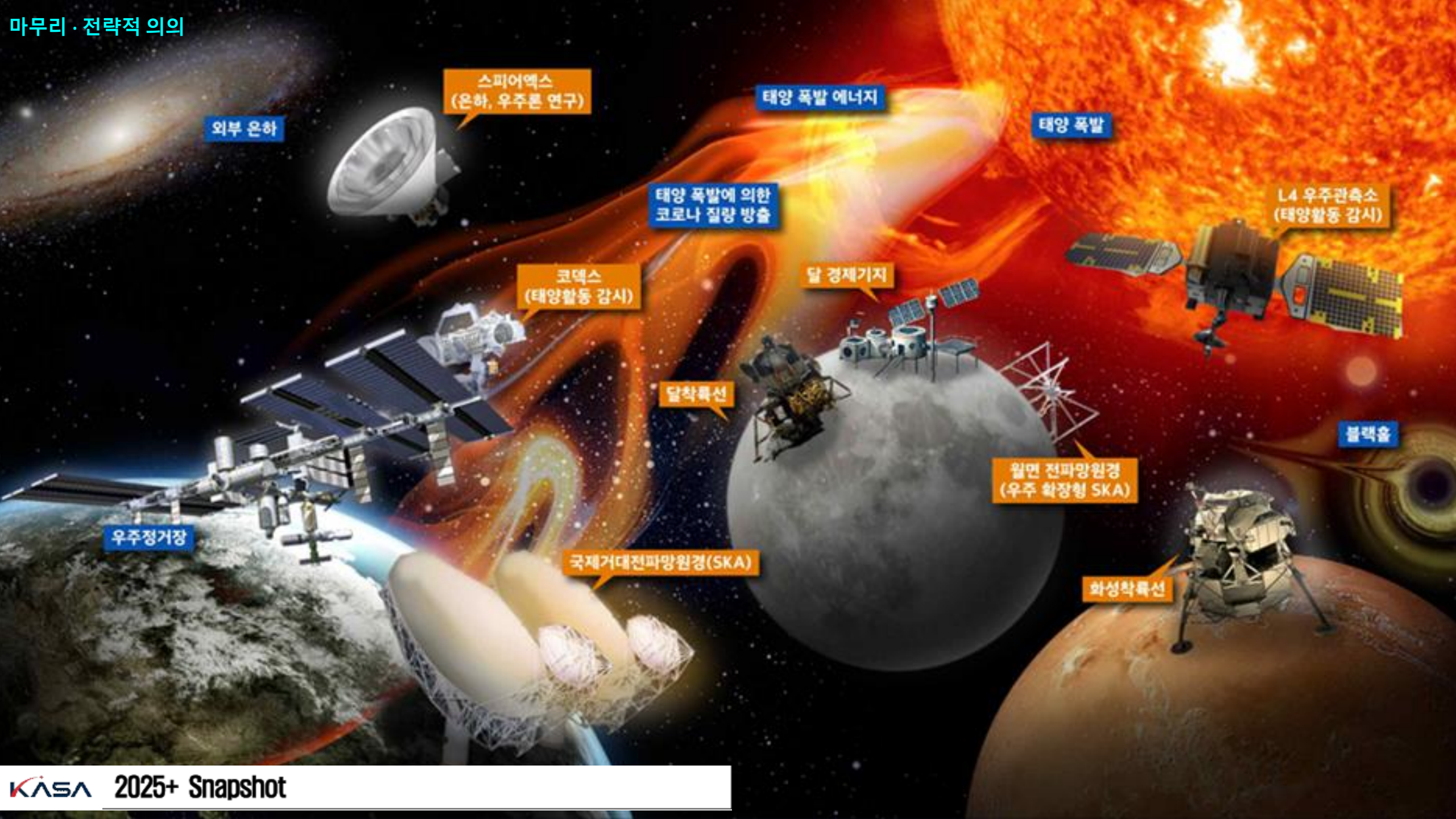
중간대역 중력과 최초 검출 — SNR 및
광원 위치결정 향상



차세대 인프라 플랫폼

초전도 센서 · 달 표면 운영 · 정밀 시각
— 국가 연구자산 역량

감사합니다



외부 온하

스피어엑스
(온하, 우주론 연구)

태양 폭발 에너지

태양 폭발

태양 폭발에 의한
코로나 질량 방출

L4 우주관측소
(태양활동 감시)

코덱스
(태양활동 감시)

달 경제기지

달착륙선

블랙홀

월면 전파망원경
(우주 확장형 SKA)

우주정거장

국제거대전파망원경(SKA)

화성착륙선

Listening to the Universe from the Moon

targeting the mid-frequency gravitational-wave band (0.01-10 Hz) — the spectral window between LISA and LIGO, rich with intermediate-mass black hole

// PROJECT NAME ORIGIN

동아 — Dong-A
THE CELESTIAL ROPE · KOREAN FOLKLORE

In the Korean folk tale *Haenim Dalnim* (해님달님, "The Sun and the Moon"), a brother and sister are chased by a tiger. They pray to heaven, and a *dong-a-jul* — a celestial rope — descends from the sky, lifting them to safety. The brother becomes the Sun; his sister becomes the Moon.

DONGA draws its name from this rope reaching heavenward — a symbol of Korea's aspiration to extend its scientific reach to the lunar surface and, through it, to the gravitational universe.

DONGA Collaboration

<https://www.donga-gw.org/>

NIMS

- John J. OH
- Edwin J. SON
- Hwansun KIM
- JeongCho KIM

SNU

- Jonghee YOO
- Hyung Mok LEE

Hana Corp.

- Seongil CHOI
- Yongho CHUNG

University of Maryland

- Ho Jung PAIK
- Ronald S. NORTON

KRISS

- In-mook CHOI
- Gracia KIM

Chung Ang University

- Gungwon KANG
- Yeong-Bok BAE

University of Beijing

- Xing Bian

ADD

- Kyungho CHUNG

Inje University

- Hyung Won LEE

Cryo H&I

- Dong Rak KIM

References

- **Lunar accelerometer network gravitational observatory (LANGO)**, Ho Jung Paik, Zachary Metzler, M Coleman Miller, Christopher J Collins, Clive R Neal, Slava G Turyshev, *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 43, No. 9 (2026) 095023
- **A Superconducting Tensor Detector for Mid-Frequency Gravitational Waves: Its Multichannel Nature and Main Astrophysical Targets**, Yeong-Bok Bae, Chan Park, Edwin J. Son, Sang-Hyeon Ahn, Minjoong Jeong, Gungwon Kang, Chunglee Kim, Dong Lak Kim, Jaewan Kim, Whansun Kim, Hyung Mok Lee, Yong-Ho Lee, Ronald S. Norton, John J. Oh, Sang Hoon Oh, Ho Jung Paik, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol. 2024, Issue 5, 053E01
- **Tetrahedral Omnidirectional Full-Tensor Gravitational Wave Detector**, Zachary Metzler, Christopher J. Collins, Ho Jung Paik, Peter S. Shawhan, *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 39 (2022) No. 22, 225012
- **Sensitive Superconducting Gravity Gradiometer Constructed with Levitated Test Masses**, C. E. Griggs, M. V. Moody, R. S. Norton, H. J. Paik, K. Venkateswara, *Physical Review Applied*, Vol. 8 (2017) No. 6, 064024
- 한국 천문학 발전을 위한 중장기 비전: 2026-2035, 한국천문 학장기발전연구회, 한국천문 학회, 2026

