

다중신호 천체물리학을 통한 우주 팽창 및 극한 천체 규명: 거대 다중망원경 시스템, ng7DT

임명신(1), 이형목(1), 김정리(2), 강궁원(3), 이형원(4), 김진호(5),
이성호(5), 김영민(5), 김지훈(1), 장서원(1), 탁동근(6), 샤피엘루 알만(5)

1. 서울대, 2. 이화여대, 3. 중앙대, 4. 인제대, 5. 천문연, 6. 경희대

(2026-06-12, 제주대학교 아라캠퍼스)

극한 중력 현상 연구: 아인슈타인은 옳았나?

Hubble Tension – New Physics?

두 측정, 하나의 우주
하지만 다른 결론
허블상수 갈등

우주 초기 (CMB) 우주 근처 (거리 사다리)

진짜 허블상수는?
km/s/Mpc

67.4 km/s/Mpc 73.0 km/s/Mpc

2026-06-12

Is Dark Energy Evolving?

1 Two visions of the same Universe

How the Universe expands with time

- ACDM ($w = -1$, constant)
- Evolving dark energy ($w = w(z)$)

Big Bang Today

Cosmic time

Early times ($z \geq 10$)	Matter era ($0.1 \leq z \leq 3$)	Recent Universe ($z \leq 1$)
Dark energy effect	Similar	Differences emerge

Current data cannot yet distinguish between a cosmological constant and a time-evolving dark energy.

2026 봄 고에너지물리학회

Extreme Gravity as Lab for Gravity Theories

왜 극한 중력 천체로 중력이론을 검증해야 할까요?

지구에서는 볼 수 없는 '극한 환경'이 중력의 진짜 모습을 드러냅니다.

지구 (약한 중력) 태양 (중간 중력) 중성자별 (극한 중력) 블랙홀 (가장 극한 중력)

중력의 세기

일반상대성이론은 모든 것을 설명할까요?

- 극한 환경에서는 아직 검증되지 않았습니다. 매우 강한 중력, 빠른 속도, 고밀도 영역은 지구 실험으로 확인할 수 없습니다.
- 새로운 물리가 숨어 있을 수 있습니다. 일반상대성이론을 넘어서는 새로운 이론이나 현상을 발견할 실마리가 됩니다.
- 우주의 기원과 진화를 이해할 열쇠입니다. 블랙홀, 중성자별은 우주에서 가장 강력한 천체 현상을 만들어냅니다.

극한 중력 천체로 어떻게 검증할까요?

- 전파 관측: 블랙홀 그림자, 제트, 전파 신호
- 중력파 관측: 블랙홀/중성자별 병합의 파동
- 펄서 타이밍: 중성자별의 매우 정확한 시계
- X선/감마선 관측: 고온, 고에너지 현상 분석
- 별의 운동 추적: 블랙홀 주변 별의 속도와 궤도

관측 결과를 이론과 비교
일반상대성이론 또는 새로운 중력이론과 비교하여 일치하는지 확인합니다.

왜 이것이 중요할까요?

- 중력의 본질 이해: 시간, 공간, 중력의 근본 원리를 더 깊이 이해
- 새로운 물리 발견: 양자중력 등 통합이론으로 나아가는 단서
- 우주 현상 설명: 블랙홀 제트, 감마선 폭발 등 극한 현상의 비밀 해결
- 우주의 기원과 운명: 우주의 탄생, 진화, 미래를 이해하는 데 필수

극한 중력 천체는 우주가 준 최고의 실험실!
더 멀리, 더 강한 중력 환경을 탐험할수록 우리는 중력의 진짜 모습을 더 정확히 알 수 있습니다.

Tensions in Cosmology

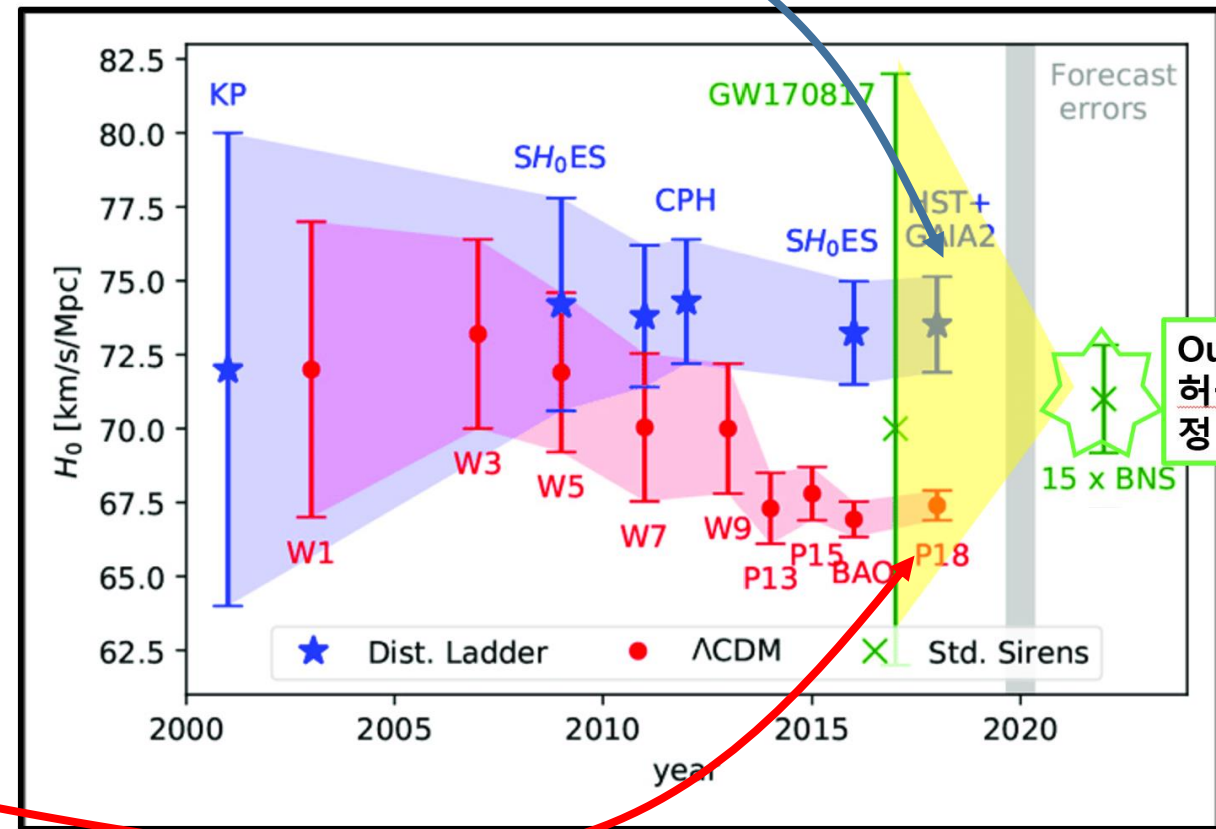
허블 상수 갈등: 측정 방법에 따라 2가지 상이한 값
 독립적인 방법으로 허블 상수 결정 필요

• 초신성:

$$H_0 \approx 74 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mpc}$$

• 우주배경복사:

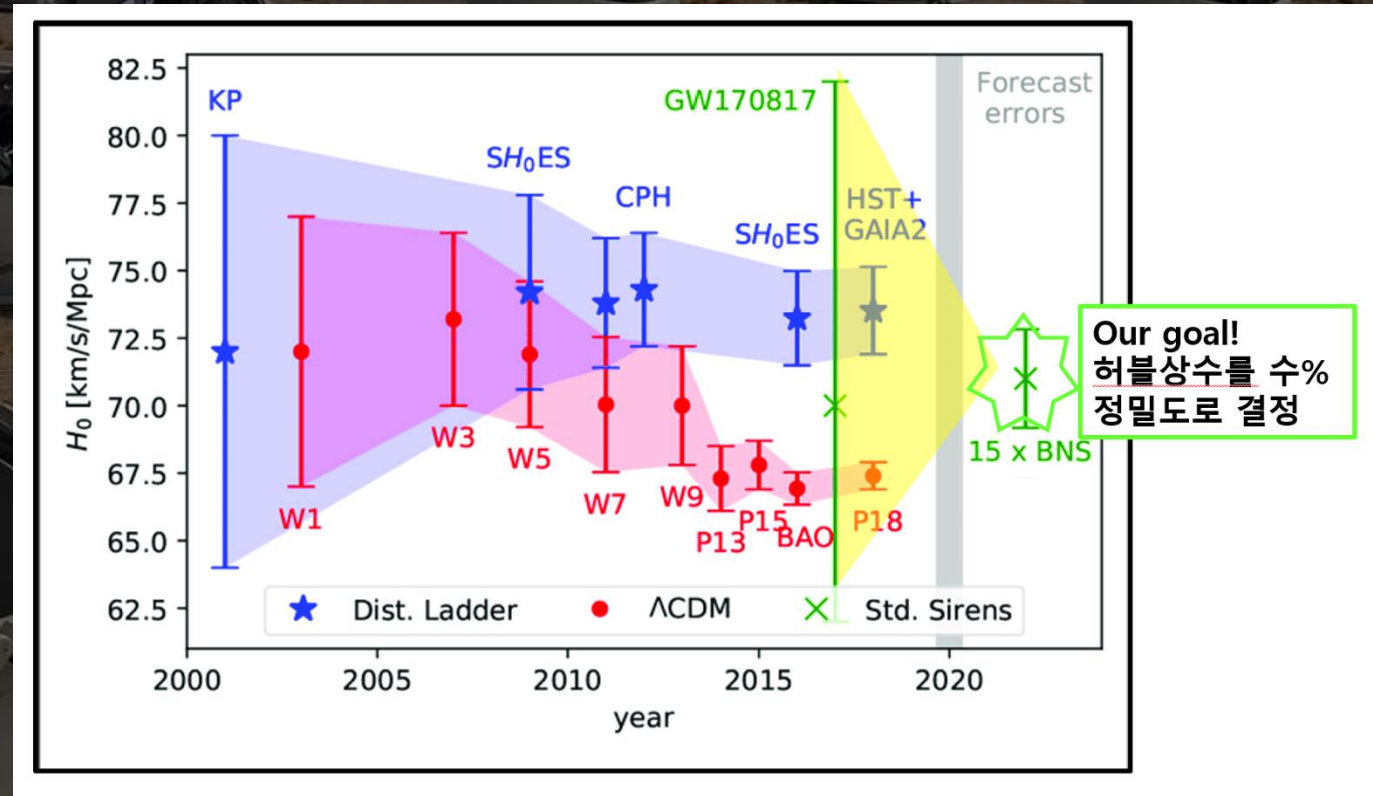
$$H_0 \approx 67 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mpc}$$



Our goal!
 허블상수를 수%
 정밀도로 결정

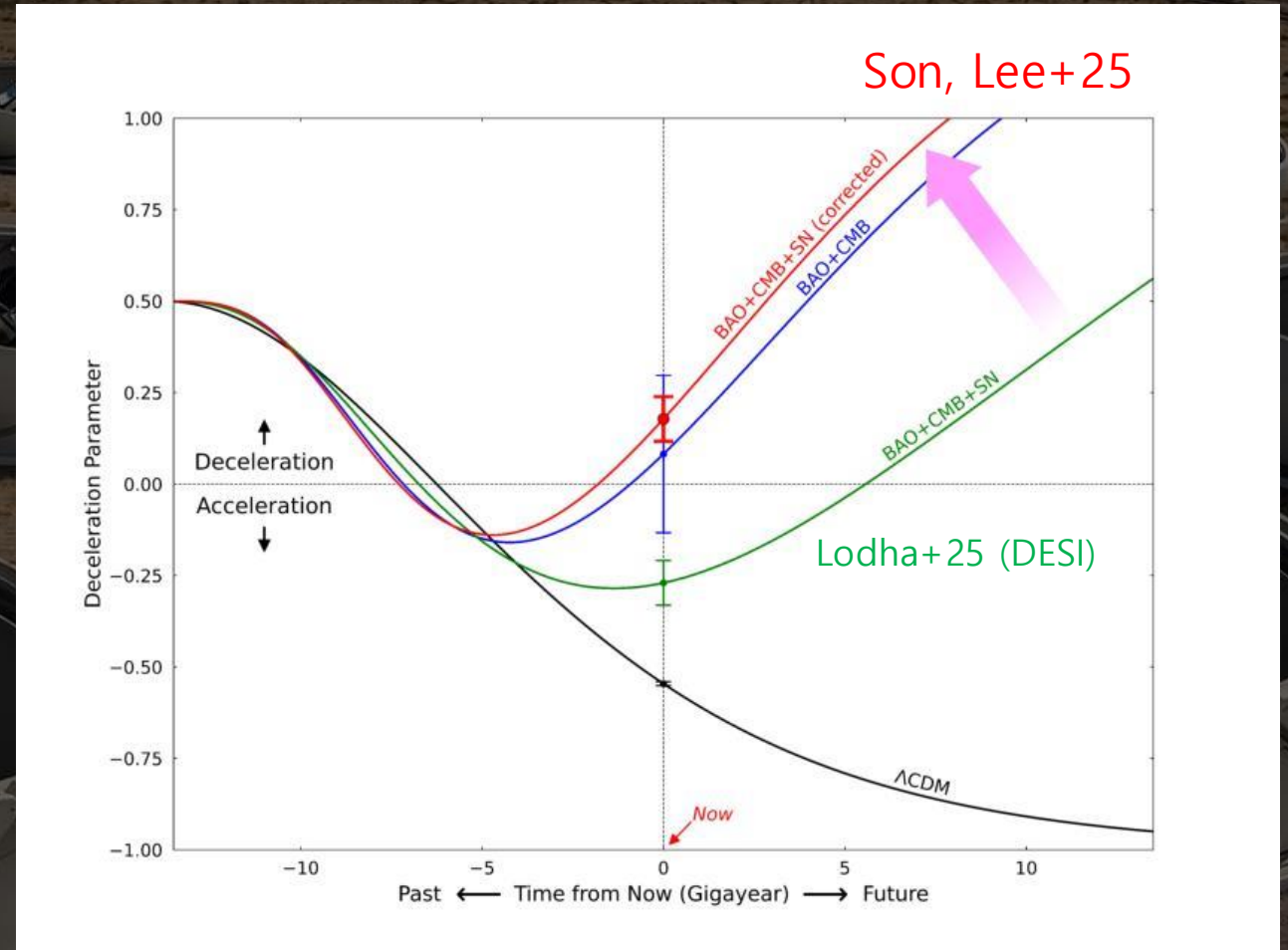
새로운 방법으로 허블상수값 측정: 중력파와 전자기파 관측 다중신호 천문학

- 중력파: 거리 결정
- 전자기파: 후퇴속도 결정
- 중력파 전자기파 대응천체(킬로노바)의 위치 신속 결정 필요



Tensions in Cosmology: Dark Energy Tension

- Is Dark Energy evolving?
- Is the Universe decelerating?

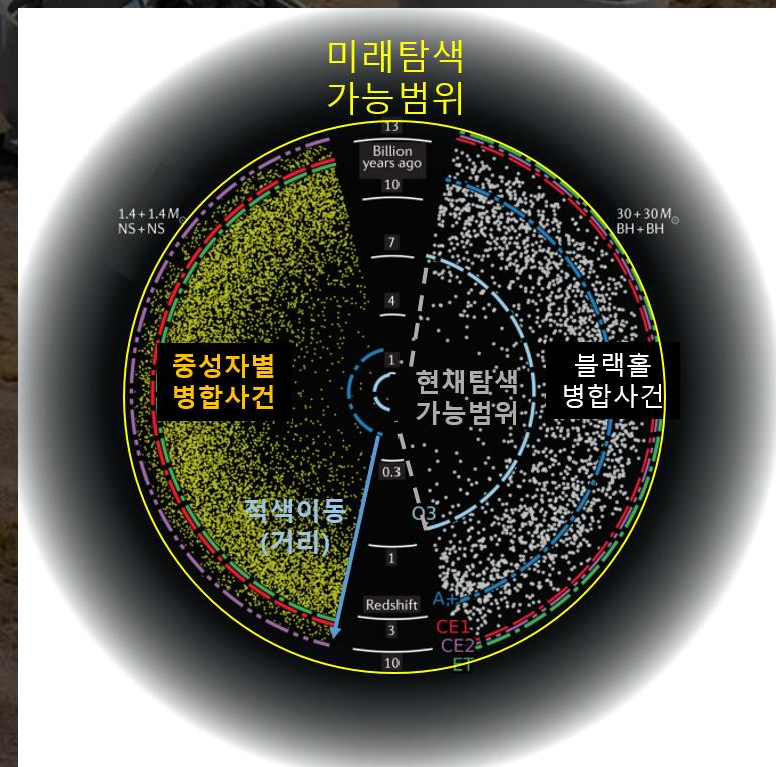


다중신호 천체물리학 (Multimessenger Astrophysics)

- 우주론적 계수 값 측정에 기존 방법과 독립적인 결과 제시 가능

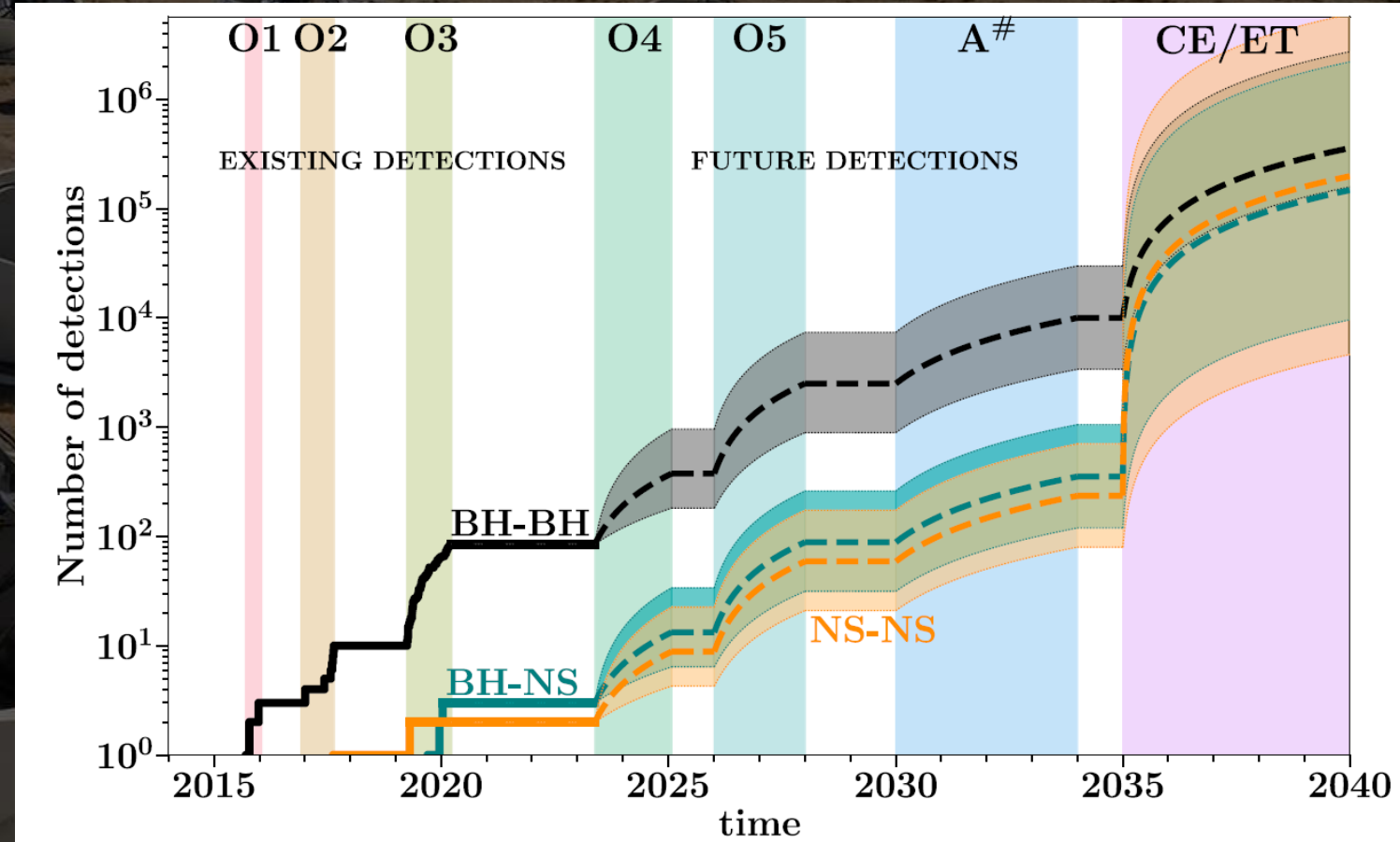
- 극한 중력 현상 연구 가능

→ 2030년대에 급격한 발전 예상



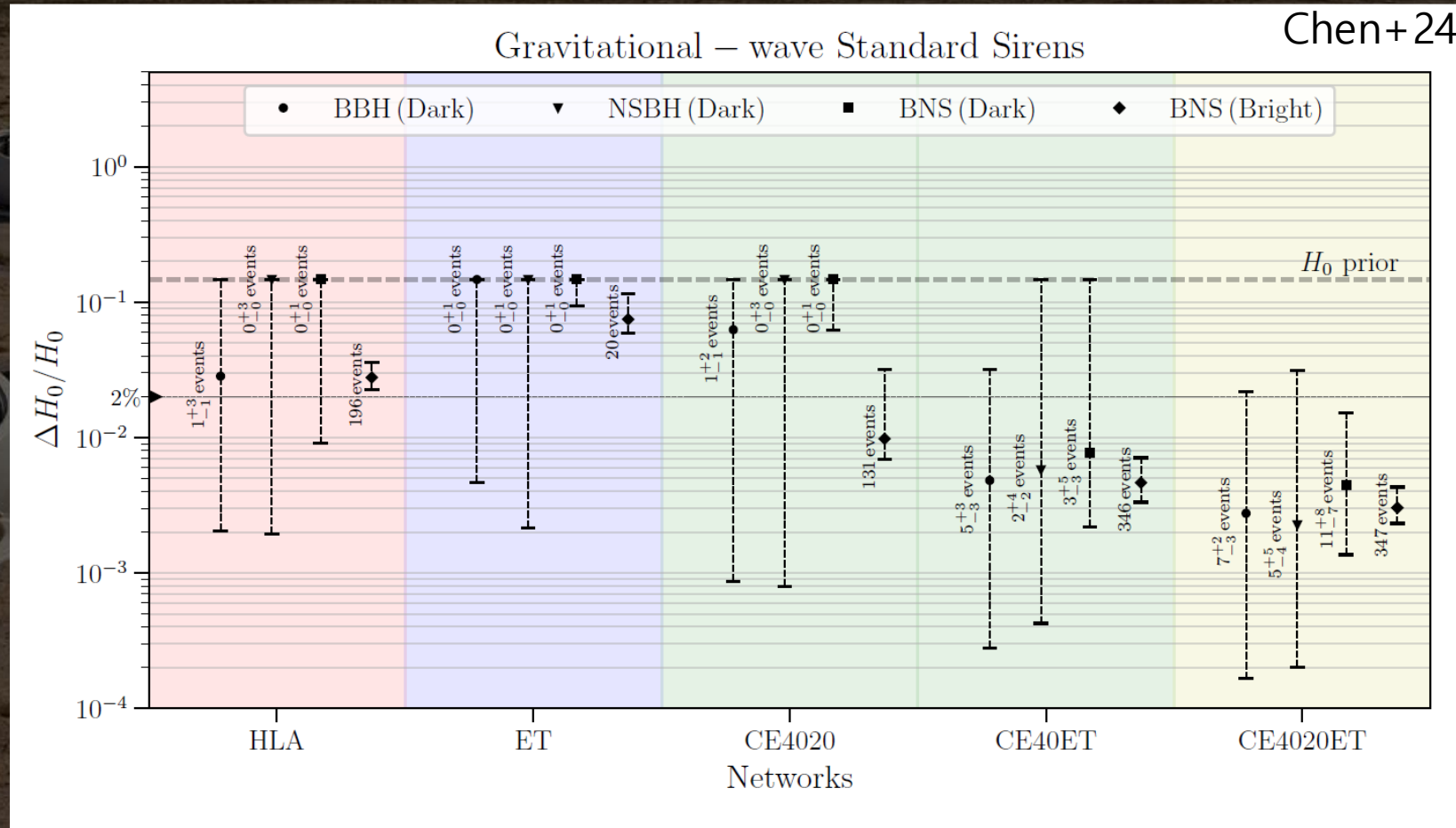
2030s will see rapid increase in GW events

- In 2030s, of order of 10^{3-5} events (10^{2-3} BNS merger events) per year
- >2035, of order of 10^5 events ($>10^3$ BNS merger events) per year



Broekgaarden et al. 2024

Future Prediction (2030s)



- < 1% accuracy for H_0

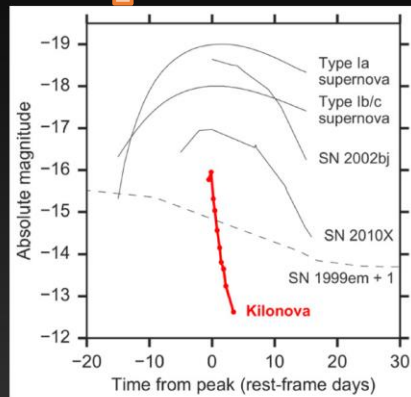
그러나, 전자기파 대응천체 발견은 매우 어려움

- Search area is too wide (~100 deg² or more)
- Kilonovae (Kne): Faint, fast-decaying transient (> 20 mac)

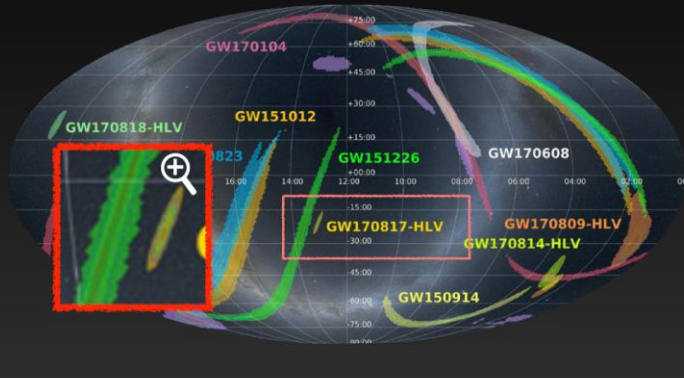
넓은 지역을 깊게 탐색하여 킬로노바의 조기 발견 (~1 day) 필요

Dim & fast decaying KN

Proton constrained GW localization area



Arcavi+17

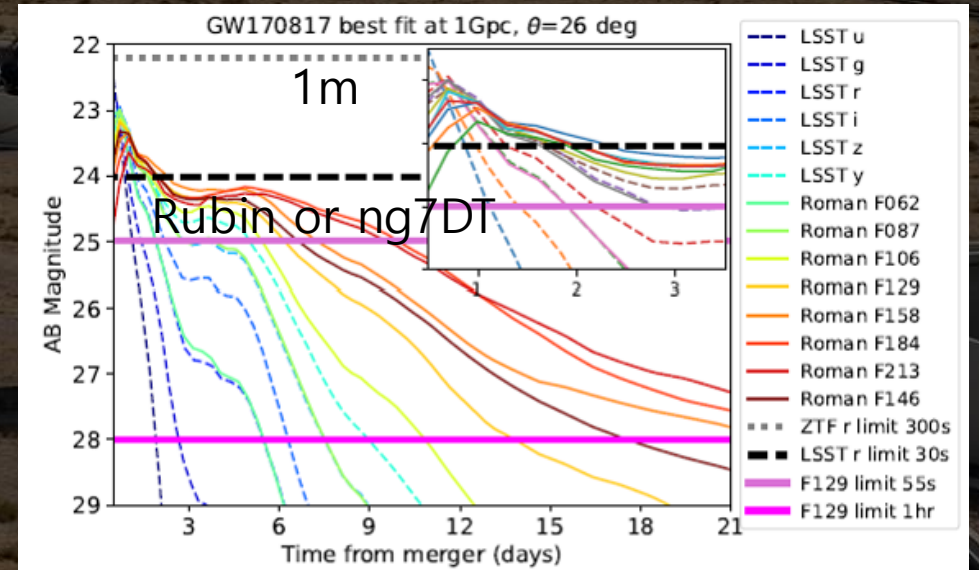


Abbott+20

G.S.H. Paek

MMA in 2030s needs large, wide-field rapid response telescopes worldwide

- GW Events from LVK, ngGW
 - But most events are at ~ 1 Gpc
- Optical counterpart from ???
 - Rubin (Chilean sky only)
 - ST such as Roman → only good for follow-up (narrow field of view)



World will need large wide-field optical telescopes at various locations!

Next Generation 7-Dimensional Telescope: ng7DT

Upgrade of 7DT

25 x 1-1.5m telescopes
One at North, another at
South

Collective light gathering
power ~ a 5 to 7.5-m class
telescope (similar to V. Rubin
Observatory)

Each telescope look at
different wavelength (spectral
mapping capability) or same
wavelength (multiple
operation modes)



ng7DT, Three Observing Modes

1. Deep Observing Mode

Single filter + the same position
= 5.0 m wide-field tel.
Combined two sites
= 7.1 m wide-field tel.



Rubin
(1조2천억 원)



2. Wide-field Mode

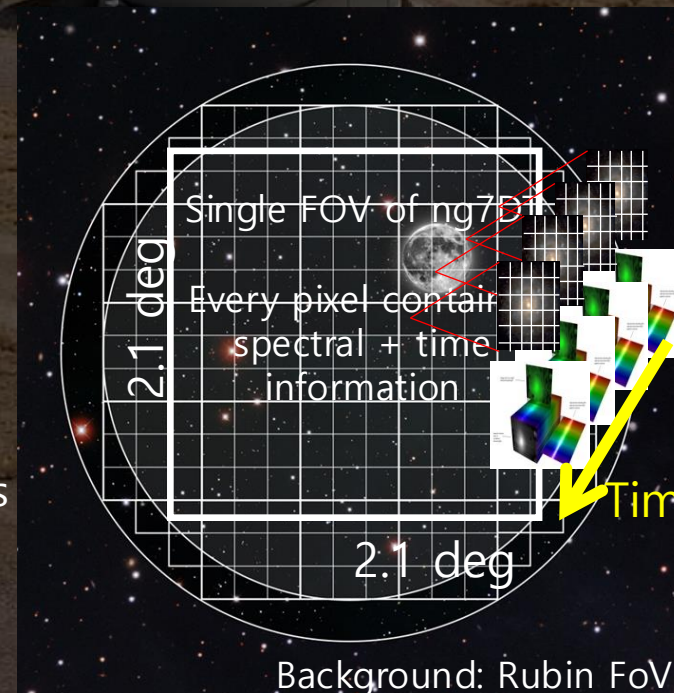
Single filter, different positions = 100 - 200 deg²



GW150914 can be covered with several observations

3. Spectroscopic Mode

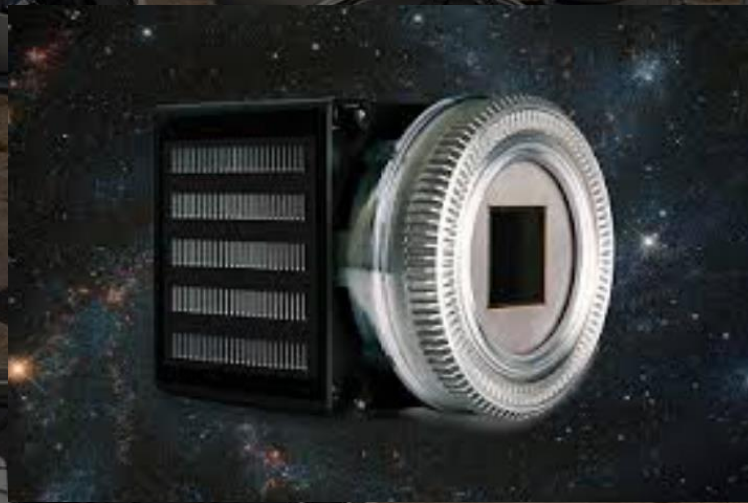
Wide-field IFU-type observations



Telescope & Camera [기존 상용제품으로 구현 가능 → 기술성숙도 매우 높음]



Pf-1000 telescope (1m, f/2.25)
~10억 원



Teledyne COSMOS-66 Camera
6000만 화소 CMOS 카메라
(8120 x 8120)
~ 5억 원

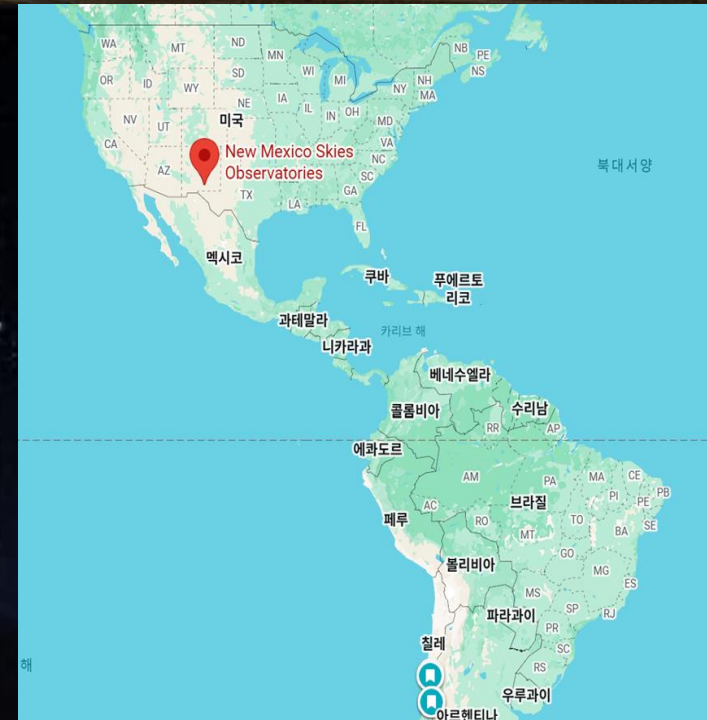
ng7DT FoV
 $2.07 \times 2.07 \text{ deg}^2$
(pix = 0.9")

X2

ng7DT-North Site Candidate: New Mexico Skies/Starfront, Canary Island

Private telescope hosting sites with many telescopes
Excellent astroclimate (dark sky)
Good infrastructure
Experience working with similar companies

Other candidates: Canary Islands, China, Israel,
Morocco, etc, and US national observatory sites



ng7DT-South Site Candidate: South African Astronomical Observatory, Chile Sites



- Excellent astroclimate
- Geographical advantage – no large wide-field facilities
- Ample space to build multi-telescopes
- Existing collaboration heritage: KMTNet & GECKO
- SKA to be operational at South Africa

- Other candidates: Australia & Chile

7DT Heritage

- 16대의 0.5m 광시야 망원경으로 이루어진 7-Dimensional Telescope 이미 운영 중(칠레)

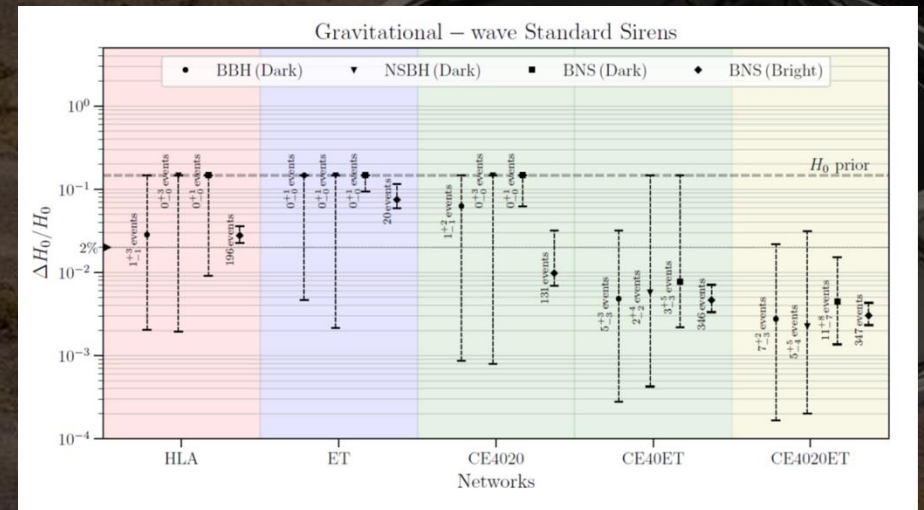


Expected Outcome

- $< 1\%$ Measurement of H_0
- Dark Energy Constraint (감속 or 가속)
- Unprecedented View of Neutron Stars/Black Holes

New Physics
Or
No New Physics?

중력파 검출기	시기	BNS 사건 연간 검출 빈도	관측시설	관측시설 스펙(망원경 대수 x 크기)	H_0 측정 정밀도 예상	예상되는 과학성과
LVK O5	2028~	~10	7DT/ng7D T 부분 구축	20 x 0.5m + 10 x 1 m	3-5%	- 다중신호 허블상수 정밀 측정 초기 결과 - 중력파원 모은하 목록 생성
A+	2030년대 조중반~	~30	ng7DT-N, ng7DT-S 일부	25 x 1m + 10 x 1m	~2-3%	- 허블상수 갈등 해결 초기 성과 - 암흑에너지 진화 과정 규명 초기 성과(다중신호) - 중성자별 equation of state 측정 시도 - 킬로노바 특성 규명
ngGW (ET, CE)	2030년대 후반~	>100	ng7DT-N, ng7DT-S	25 x 1m + 25 x 1m	< 1%	- 허블상수 갈등 완전 해결 - 다중신호를 이용한 암흑에너지 진화 과정 규명 - 중성자별 equation of state 규명



중력과 및 중력 이론 연구
고밀집성 연구

관측 및 이론 우주론 연구



Gravitational Waves

Accelerated Expansion

Neutron Star Merger Event

우주론 난제해결
극한 천체 중력이론 검증

관측 다중신호천체물리 연구

1. 과학기술적 타당성 1

평가항목	세부내용	ng7DT
과학적 우수성/필요성	<ul style="list-style-type: none"> - 과학적 큰 질문 - 근본적인 질문? - 새로운 물리? 	<ul style="list-style-type: none"> - 우주의 구성물질과 운명은? 고중력천체의 물리적 특성? - 중력이론의 궁극적인 검증 - 암흑에너지, 중력검증 등을 통한 새로운 물리 필요성 타진
연구내용 타당성	<ul style="list-style-type: none"> - 연구주제 및 목적 - 연구방법? - 기간 및 도전성? - 로드맵? - 혁신성? - 시기 적절? 	<ul style="list-style-type: none"> - 다중신호를 이용한 우주팽창과 고중력천체 연구 - 중력과 가시광선 대응천체를 이용한 연구(다중망원경) - 10년, 50대의 광시야 망원경 활용 → 매우 도전적 - 10년 로드맵 구성, 남반구 북반구에 ng7DT 구축 - 다중망원경 시스템으로 기존 관측한계 극복(1/10예산, spectral mapping 가능) - 중력과 관측 시기와 긴밀하게 연동
국가연구인프라 세부설명	<p>인프라 핵심사양? 필요기술? 확보? 국내외인프라 차별? 착수가능시점?</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 50대의 1m급 망원경으로 이루어진 광시야 다중망원경 - 광시야 망원경, 대용량 CMOS 카메라, 자동관측시스템, 대용량 관측자료 신속 분석(AI 등 활용) 시스템 → 모두 현재 기술로 구현 가능(상용 제품 사용, 기 개발 시스템 응용) - 세계 최고 시설 - 당장 착수 가능

1. 과학기술적 타당성 2

평가항목	세부내용	ng7DT
기술성숙도 및 위험/실현가능성	<ul style="list-style-type: none"> - 현재 기술 수준 - 위험성? - 실현 가능성? - 선행 개념 연구 필요? - 단기수요? - 장기수요? 	<ul style="list-style-type: none"> - 현재 기술로 충분히 가능(국산화를 하려면 약간의 개발 기간 필요) - 기술 성숙도가 높아 위험도 낮음 - 기술 성숙도가 높아 실현 가능성 매우 높음 - 국산화 추진시 proto-type 개발 필요하나, 해외 기성제품으로 구축시작 가능 - 매우 높은 단기 수요 예측 - 장기 관측을 통한 연구결과 극대화 가능(월면 관측 시설 프로토타입)
파급효과	<ul style="list-style-type: none"> - 과학적 파급력? - 인력 양성 효과? - 국제협력 효과? 	<ul style="list-style-type: none"> - 중력파 다중신호 천체물리 선도 가능 - 중력파 천체 연구와 시간영역 관측 인력, 빅데이터 AI 기술인력 다수 양성 예상 - 기존 Rubin 천문대처럼 국제협력 중심지가 될 것으로 예상
활용성	<ul style="list-style-type: none"> - 연구 결과 활용 분야, 범위? (다학제 포함) - 예상 사용자 규모? 	<ul style="list-style-type: none"> - 중력파, 다중신호 천체물리 뿐만 아니라, 관측천문학 전반, 위성 및 우주위험물체 감시, 빅데이터 AI 분석 등의 분야에 파급효과 예상 - 국내의 경우 수백명의 사용자 그룹 형성 예상, 국제적으로 1000명 이상의 사용자 그룹 예상
구축수준	세계 최초/세계 최고/국내최초/국내최초?	- 세계최초 대형 다중망원경 시설이며, 세계최고 성능을 갖출 것임

2. 정책 및 전략적 타당성: 국가정책

- 국가정책 - 우주청 '우주과학탐사 로드맵': "... 대형 지상망원경 프로젝트 주도/참여(Rubin, GMT, 중력파망원경 등)... 관측기기 기반기술과 데이터 처리 기술 개발 및 고도화"

3. 달 기지 망원경 개발

◆ [기본방향] 지상 대형망원경의 전략적 활용을 통해 관측기기 핵심기술을 개발 및 고도화하고 달 기지 망원경 구축

① 단계 지상 인프라 연계 기반기술 확보 및 설계 기획

- 대형 지상망원경 프로젝트 주도·참여(Rubin, GMT, 중력파망원경 등)를 통해 관측기기 기반 기술*과 데이터 처리 기술** 개발 및 고도화

Bottom-up processes identify TDMMA as top/very high priority

Time Domain and Multi-Messenger Astrophysics

The Astro2020 Decadal Survey recommended an investment in Time Domain and Multi-Messenger Astrophysics (TDMM) as the top-priority sustaining activity in space for the coming decade.

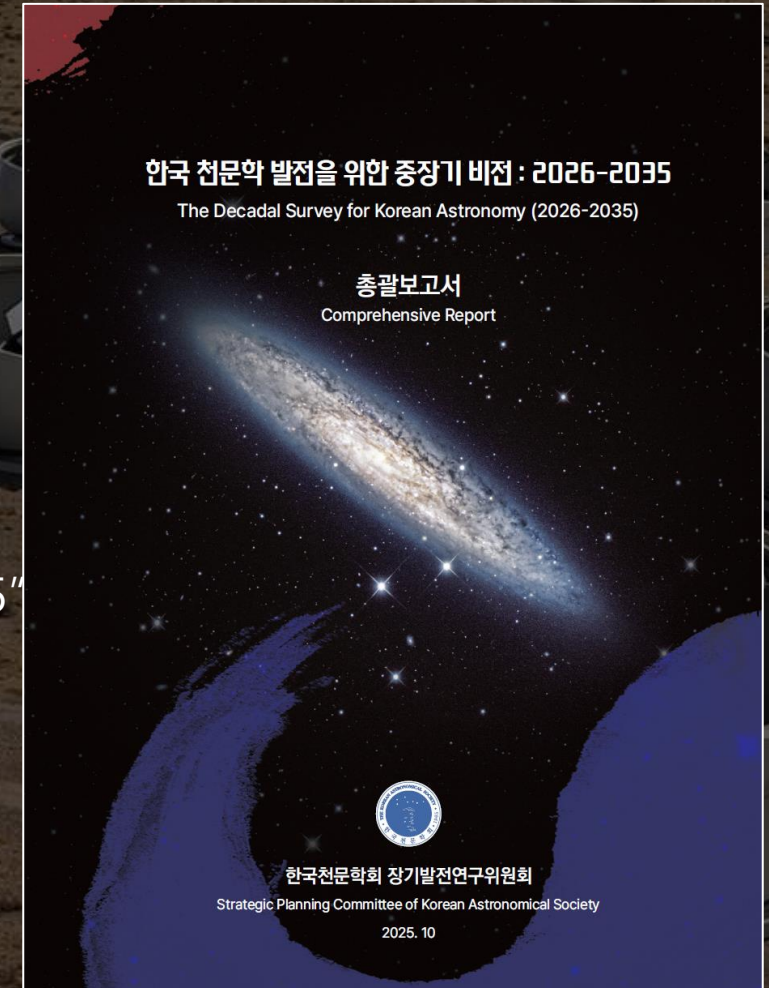
미국 Decadal Survey

한국 "천문학 장기발전계획 2026-2035"

7-3. P2(중요도 상, Very High Priority)

선정 기준 : 과학적 및 기술적 중요도에서 P1만큼 중요하나, 파급력이나 활용도 측면에서 P1 대비 조금 더 제한적이거나 장기적인 관점에서 추진해야 할 시설.

1. **전천 탐사 관측시스템** : 국내기관이 운영하는 관측시설의 현대화를 통해 관측기기 전문 인력 양성과 관련 기술 노하우 축적을 꾀하는 동시에 소형망원경 네트워크를 이용한 변광천체, 지구 근접 천체, 인공위성 감시 등 한반도 현지에 필요한 관측연구를 수행하는 프로젝트이다. 새로 구축할 다중신호 관측시설(예: 7DT) 등을 포함하여 다중신호 천문학 시대에 독자적이고 경쟁력 있는 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.



2. 정책 및 전략적 타당성: 중복성 여부

- 국내 유사인프라:

- 7DT, KMTNet 등이 있으나 ng7DT는 규모 면에서 이들을 압도

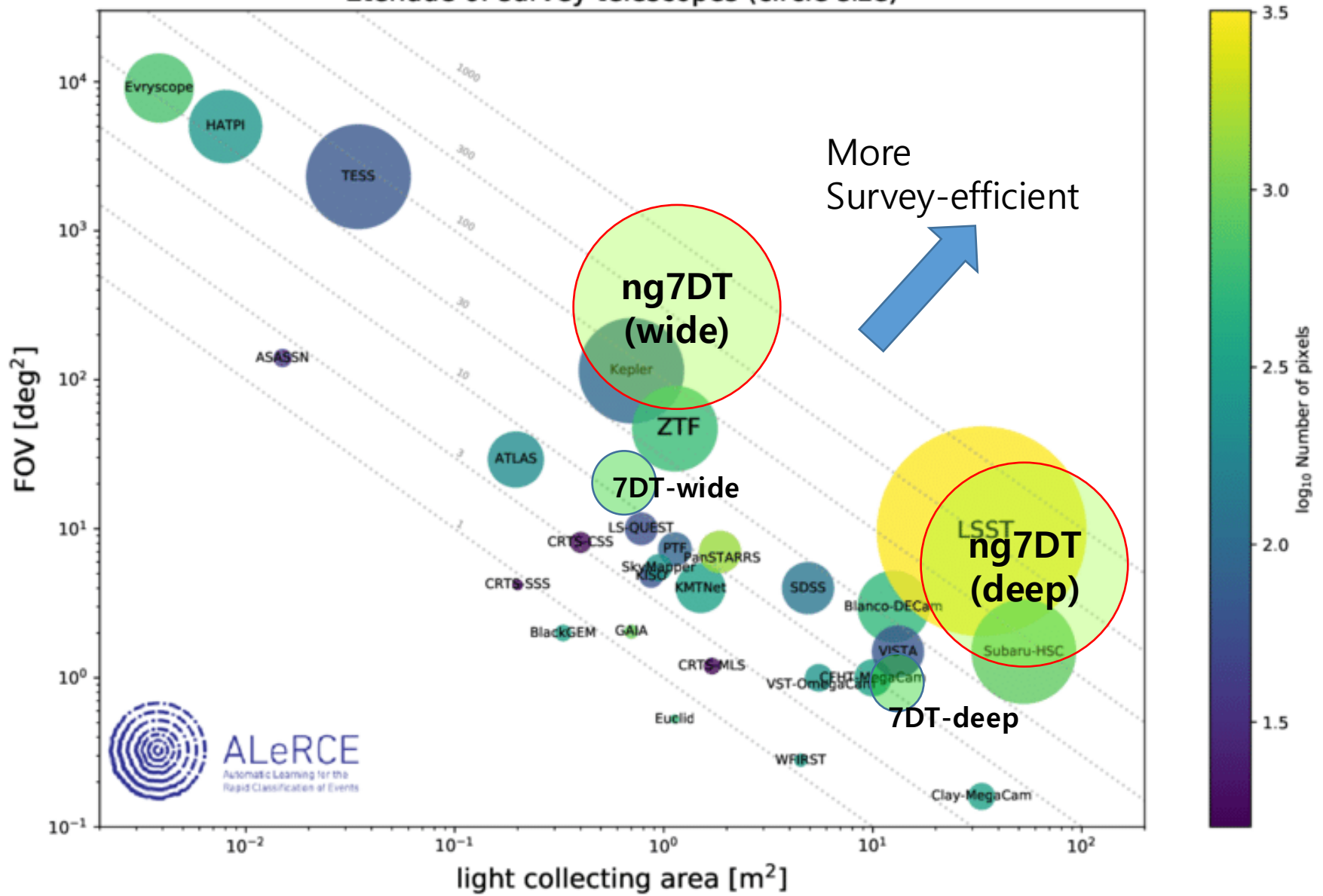
- 해외인프라:

- Rubin 천문대가 있으나 남반구 칠레에 그 위치가 국한. 또한 우리나라 그룹 주도권 아님

- Roman 망원경 등은 시야가 제한적이라 킬로노바의 추적관측에 특화

- ng7DT는 그 외 ZTF 등 기존 광시야 탐사관측용 망원경들을 크기면에서 압도

Etendue of survey telescopes (circle size)



2. 정책 및 전략적 타당성: 추진체계 + 규제 및 위험

- 연구 운영 주체 역량: 기존 7DT 망원경, KMTNet, 등의 망원경 네트워크 운영, 그리고 KGWG 활동 등을 통해 운영 및 연구 인력 양성 및 확보(>30여 명의 전문 인력)
- 해외 사이트와 유기적인 협력 가능
- 기존 7DT 구축 노하우 축적
- 후보 사이트 탐색(환경 및 지역 협의 사항 리스크 최소화)

3. 예산적 타당성

- ng7DT x 2개 = 1320억 원 (> 1m 망원경 50대, 약 20억 원/1대)
- 저장 및 계산 시설 = 50억 원 (연간 약 3PB 자료 생성 예상)
- 연간예산 약 40억원 x 10년 = 410억 원 (망원경 운영 연간 27억 원, 국내 운영인력, 관측 연구와 이론 및 시뮬레이션 연구 등 박사급 인력 15명 내외, 연구조원 ~20명 내외 포함)
- 총: 1780억 원[조정 가능] → Rubin 천문대의 1/10 예산으로 세계 최고 다중신호 천체물리학용 관측시설 구축 가능, 타 천체물리학/천문학 연구에 큰 파급효과 예상

3. 예산적 타당성: 타임라인

중력파 검출기	시기	BNS 사건 연간 검출 빈도	관측시설	관측시설 스펙(망원경 대수 x 크기)	H0 측정 정밀도 예상	예상되는 과학성과
LVK O5	2028~	~10	7DT/ng7DT T 부분 구축	20 x 0.5m + 10 x 1 m	3-5%	<ul style="list-style-type: none"> - 다중신호 허블상수 정밀 측정 초기 결과 - 중력파원 모은하 목록 생성
A+	2030년 대 초중 반~	~30	ng7DT-N, ng7DT-S 일부	25 x 1m + 10 x 1m	~2-3%	<ul style="list-style-type: none"> - 허블상수 갈등 해결 초기 성과 - 암흑에너지 진화 과정 규명 초기 성과 (다중신호) - 중성자별 equation of state 측정 시도 - 킬로노바 특성 규명
ngGW (ET, CE)	2030년 대 후반 ~	>100	ng7DT-N, ng7DT-S	25 x 1m + 25 x 1m	< 1%	<ul style="list-style-type: none"> - 허블상수 갈등 완전 해결 - 다중신호를 이용한 암흑에너지 진화 과정 규명 - 중성자별 equation of state 규명

3. 예산적 타당성: 구축 일정 및 예산, 확보 가능성

(액수: 천원 또는 원)

	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	총계 (천원)
예산(억원)	2,900,000	15,800,000	16,500,000	19,100,000	18,300,000	19,300,000	21,100,000	21,900,000	22,500,000	19,600,000	178,000,000
ng7DT-N	제반시설 (20억)	7대 건설 (140억)	7대 건설 (140억)	7대 건설 (140억)	2대 건설 (50억)	2대 건설 (50억)					55,000,000
ng7DT-S				제반시설 (20억)	3대 건설 (90억)	3대 건설 (90억)	5대 건설 (150억)	5대 건설 (150억)	5대 건설 (150억)	4대건설 (120억)	77,000,000
시설 운영 (현지)	300,000	500,000	1,000,000	1,500,000	2,300,000	3,100,000	3,800,000	4,500,000	5,000,000	5,000,000	27,000,000
전산시설 구축	100,000	300,000	300,000	300,000	600,000	600,000	700,000	700,000	700,000	600,000	5,000,000
연구인력/ 연구활동비	500,000	1,000,000	1,200,000	1,300,000	1,400,000	1,500,000	1,600,000	1,700,000	1,800,000	2,000,000	14,000,000

Future of MMA Astrophysics is coming : We are ready to dive into future MMA

