

Gravitational-wave Detectors and a New Low-frequency Detector SOGRO

Ho Jung PAIK

Department of Physics, University of Maryland,
College Park, MD 20742, USA
The Korean Gravitational Wave Group

Hyung Mok LEE

Department of Physics and Astronomy,
Seoul National University, Seoul 08826, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Kyuman CHO*

Department of Physics, Sogang University, Seoul 04107, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

Jaewan KIM

Department of Physics, Myongji University, Yongin 17058, Korea
The Korean Gravitational Wave Group

(Received 11 March 2016 : revised 14 March 2016 : accepted 14 March 2016)

Gravitational-wave detectors are able to measure extremely small changes in the distances between two freely-falling test masses. This article describes the principle and the structure of laser interferometer gravitational-wave detectors, including their sensitivities and the various types of noises that could hinder measurements. We also describe a new type of terrestrial gravitational-wave detector for low frequencies (0.01 ~ 10 Hz) based on recently-proposed superconducting instrumentation. Some preliminary results and ideas to mitigate Newtonian and seismic noises at low frequencies in order to achieve sufficient sensitivity to observe astrophysical sources with this detector are briefly reviewed. Finally, we describe the on-going effort by Korean scientists to support the Japanese gravitational-wave detector which is currently under construction, the Kamioka Gravitational-wave detector (KAGRA).

PACS numbers: 95.85.Sz, 04.80.Nn, 42.60.Da, 07.60.Ly, 85.25.Dq, 04.80.Cc

Keywords: Gravitational-wave, Astrophysics and astronomy, Laser interferometer, Superconducting omnidirectional gravitational-wave detector

중력파 검출기와 새로운 저주파 검출기 소그로 (SOGRO)

백호정

Department of Physics, University of Maryland,
College Park, MD, USA 20742
한국중력파연구협력단

이형목



서울대학교 물리천문학부, 서울 08826, 대한민국
한국중력파연구협력단

조규만*

서강대학교 물리학과, 서울 04107, 대한민국
한국중력파연구협력단

김재완

명지대학교 물리학과, 용인 17058, 대한민국
한국중력파연구협력단

(2016년 3월 11일 받음, 2016년 3월 14일 수정본 받음, 2016년 3월 14일 게재 확정)

최근 중력파 직접 검출에 성공한 레이저 간섭계 중력파 검출기는 매우 정밀하게 두 개의 자유낙하하는 질량 사이의 거리를 측정할 수 있는 장비이다. 이 논문에서는 레이저 간섭계 중력파 검출기의 원리와 구조를 간단히 설명한다. 이어서 최근 국내 연구진이 제안하고 있는 초전도 기기에 바탕을 둔 3차원 저주파 (0.01 ~ 10 Hz) 용 지상검출기에 대해 소개한다. 이러한 저주파 영역에서는 중요한 잡음원인 지진 및 뉴턴 잡음을 충분히 저감시켜야 천체물리학적으로 의미 있는 감도를 유지할 수 있다. 이를 위한 최근의 연구 결과와 새로운 기법을 소개한다. 마지막으로 일본에서 건설하고 있는 검출기인 카그라 (Kamioka Gravitational-wave detector, KAGRA)에 대한 국내 연구진의 실험적 지원 내용을 소개한다.

PACS numbers: 95.85.Sz, 04.80.Nn, 42.60.Da, 07.60.Ly, 85.25.Dq, 04.80.Cc
Keywords: 중력파, 천체물리 및 천문학, 레이저 간섭계, 초전도 전방향 중력파 검출기

I. 서론

지상 중력파 검출기는 대부분 팔의 길이가 수 km인 마이켈슨형의 레이저 간섭계로 이루어져 있으며, 관측 가능한 주파수는 10 Hz에서 수 kHz이고 감도는 수 $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$ 의 성능을 보이고 있다 [1-3]. 이 논문에서는 이번에 중력파를 직접 검출하는데 성공한 레이저 간섭계의 구조와 감도를 결정하는 요인들을 설명한다. 이러한 검출기는 주로 $f \sim 1 \text{ kHz}$ 에서 강한 신호를 발생시키는 밀집쌍성계의 병합 현상에서 발생하는 중력파를 검출하기에 최적화 되어 있다. 그러나 몇몇 천체물리학 과정은 고도화된 검출기가 검출할 수 없는 10 Hz 이하의 중력파를 생성한다. 그러나 지진과 뉴턴 잡음은 그러한 신호를 검출할 수 있는 중력파 검출기를 지상에 건설하는데 있어 중대한 장애이다.

우주에서 중력파를 관측하려는 리사 (Laser Interferometer Space Antenna, LISA)는 지상 검출기의 대역보다 훨씬 낮은 진동수인 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ Hz}$ 에서 가장 민감하여 질량이 큰 블랙홀을 관측하는데 최적화되어 있다 [4]. 지상 검출기 주파수 대역과 LISA의 주파수 대역 사이에 있는 0.01 ~ 10 Hz영역을 관측하기에 적합한 검출기는 일본에서 데시고 (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory, DECIGO)가 추진되고 있으나 [5] 한변의 길

이가 1000 km인 정삼각형의 꼭지점에 각각 한개씩 레이저 간섭계용 인공위성을 배치하는 것으로 현실적으로 단시간 내에 추진하기는 어려운 프로젝트이다. 지상에서 이 대역의 관측을 어렵게 만드는 요인인 지진 잡음과 뉴턴 잡음을 효율적으로 제거할 수 있다면 지상에 검출기를 설치하는 것을 고려할 수 있을 것이다.

삼차원 구조를 가지는 정밀한 중력경사 측정기를 이용해 곡률 텐서 (curvature tensor)의 모든 성분을 측정하면 중력파와 근처의 물질 밀도 변화로부터 나타나는 뉴턴 중력의 변화에 의한 성분과 구별할 수 있을 뿐 아니라 중력파원의 방향과 극성을 정할 수 있다 [6]. 최근 한국연구진은 이러한 사실을 바탕으로 새로운 개념의 중력파 검출기인 소그로 (Superconducting Omni-Directional Gravitational Radiation Observatory, SOGRO)를 제안한 바 있다 [7]. 이 검출기의 기본 아이디어는 레이저 간섭계와 달리 삼차원 구조를 이용해 곡률텐서의 모든 성분을 측정하고 중력파의 횡파적 성질을 이용해 지진 잡음과 뉴턴 잡음을 제거할 수 있다는 점이다.

소그로는 저온 검출기이므로 초전도체의 여러가지 우수한 특성들과 감도가 양자한계 (quantum limit)에 가까운 스쿼드 (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)를 이용할 수 있다. 또한 저온에서는 시험질량의 열잡음이 줄어든다. 레이저 간섭계와 같이 팔의 길이를 늘린다면 감도를 더 증가시킬 수 있지만 공동 지지대를 필요로

*E-mail: kcho@sogang.ac.kr

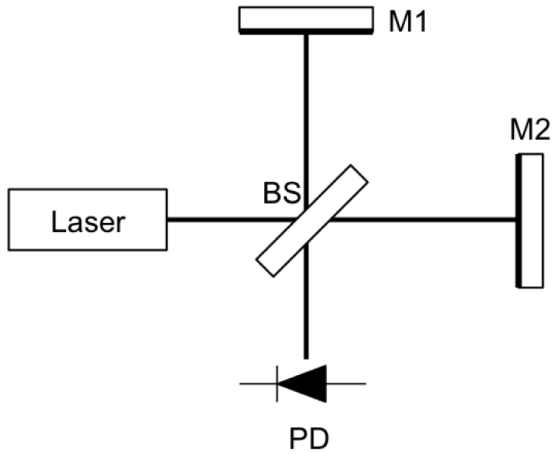


Fig. 1. Schematic illustration of Michelson interferometer

하기 때문에 질량이 수백 톤에 해당하는 대형 지지대를 4.2 K 이하의 저온으로 냉각시켜야 하는 도전에 직면하고 있다. 그래서 소그로의 팔의 길이는 수십 m 이상으로 증가시키기가 어렵다.

이 논문에서는 소그로의 원리와 감도, 단계별 개발 전략 그리고 관측 대상 천체 등에 대해서도 간략히 소개한다. 마지막으로 일본의 검출기인 카그라 (KAGRA) 프로젝트에서 한국중력파연구협력단의 역할에 대해서 설명한다. 소그로의 구조와 감도에 대한 자세한 설명은 문헌을 참고하기 바란다 [7,8].

II. 라이고 중력파 검출기의 원리

2016년 2월11일에 있는 라이고 (LIGO)의 발표 [9]로 간섭계를 이용한 극 초정밀 측정에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 앞서서도 논의된 바 있듯이 라이고가 이번에 측정 한 변형률 (strain)은 약 10^{-21} 내외로 좀 더 구체적으로 얘기하자면 이는 4 km 막대에 인가된 4×10^{-18} m의 길이 변화이다. 원자핵의 크기가 10^{-15} m 임을 감안한다면 이 변형이 얼마나 작은 것인가를 실감할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 라이고가 어떻게 이처럼 작은 변형률을 측정할 수 있었는지 그 원리에 대하여 살펴보기로 하겠다. 전체적인 이해를 돕기 위해서 너무 세부적인 사항은 생략하기로 하겠다.

1. Michelson 간섭계

라이고 등 중력파 측정을 위해 고안된 간섭계 중력파 안테나의 기본 골격은 Michelson 간섭계이다. 이미 Michelson

과 Morley의 실험을 통하여 특수 상대론에 중요한 기여를 한 이 간섭계가 중력파를 직접 측정하는 데에도 큰 역할을 했다는 점에서 그 중요성을 다시 한 번 강조하지 않을 수 없다. 이와 같이 Michelson 간섭계가 특수상대론과 일반상대론에 핵심적인 역할을 할 수 있었던 가장 큰 이유는 이 간섭계가 서로 수직인 두 방향으로 가해지는 비등방적인 (anisotropic) 변화를 아주 높은 정밀도로 측정할 수 있기 때문이다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 광원으로부터 방출된 빛은 빔살 가르게 (beam splitter, BS)에 의해 서로 수직인 두 개의 경로1과 2로 나뉘지고 각각의 경로를 따라 진행되는 광선에 수직으로 정렬된 거울 M1과 M2에서 반사되어 같은 경로를 따라 다시 BS로 되돌아 온다. 되돌아온 광선은 BS에 의해 다시 두 갈래로 나뉘어 지는데 경로1에서 투과된 성분과 경로2에서 반사된 성분이 서로 합쳐져서 광검출기 PD에 도달하여 두 광선 사이의 간섭신호로 검출된다. 따라서 경로1과 경로2 사이에 변형이 있을 경우 이를 따라 이동한 빛의 경로 차이, 즉 위상차이가 변하게 되므로 간섭신호의 변화로 나타나게 된다. PD에 입사되는 간섭광의 세기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_D = \frac{1}{4}P_0 (r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \Delta\phi) \quad (1)$$

여기서 P_0 는 광원으로부터 출력된 빛의 세기, r_1, r_2 는 각각 M1과 M2의 반사율, $\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \phi_g$ 이고, $\Delta\phi_0 = 4\pi\Delta L/\lambda$ 는 간섭계구조에 따른 경로1과 경로2의 거리 차이 $\Delta L = L_1 - L_2$ 에 의한 위상차이로 환경적인 요인에 의해 준정적 (quasi-static)으로 변하며, $\phi_g = 4\pi\delta L_g/\lambda$ 는 측정하고자 하는 매우 작은 변형 등에 의해 유도된 위상으로 간섭계를 구성하는 목적은 간섭신호의 세기변화를 측정하여 이로부터 δL_g 를 측정하는 것이다. 적절하게 편광된 진폭이 h 인 중력파가 간섭계 두 팔을 포함하는 면에 수직으로 입사되면 이에 의해 $L_1 \approx L_2 = L$ 인 간섭계 팔 사이에 $\delta L_g = Lh$ 의 경로차가 유도되어 간섭신호가 변하게 된다.

간섭계를 이용하여 얼마나 작은 위상변화를 측정할 수 있는지를 가늠하기 위해서는 우선 광계측과 관련된 잡음에 대하여 논의해야 한다. 중력파 측정을 위한 간섭계에서는 선폭이 매우 좁고 단일 모드로 발진하고 진동수가 안정화된 레이저를 광원으로 사용한다. 이와 같은 레이저로부터 출력되는 빛은 이상적인 결맞는 상태 (coherent state)로 볼 수 있으며 이에 대한 광자검출은 푸아송 (Poisson) 통계에 의해 주어진다. 따라서 광원, 즉 레이저와 간섭계 그리고 PD로 구성된 위상변화 측정과정에서는 식 (1)의 세기로 주어지는 빛의 광-전 변환과정에 대한 광자잡음 (photon noise) 또는 산탄잡음 (shot noise)을 반드시 고려해야 한다. 여기서 자세한 계산은 생략하겠지만 최고의 감도를 갖는

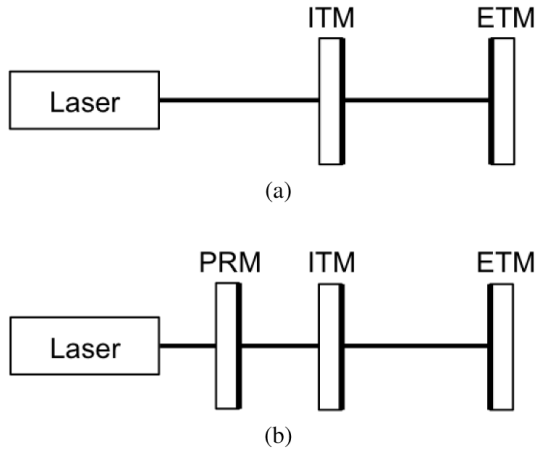


Fig. 2. Schematic illustrations of (a) Fabry-Perot resonator and (b) the resonator with PRM.

조건에서 이 간섭계가 측정할 수 있는 단위 대역폭 (unit bandwidth) 당 최소 중력파 진폭이

$$h(f) = \frac{\lambda}{4\pi L} \sqrt{\frac{2\hbar\omega}{P_0}} \quad (2)$$

로 주어지며 [10,11], 따라서 간섭계 팔의 길이와 광원출력의 제곱근에 반비례함을 알 수 있다. 여기서 λ 는 레이저의 파장, ω 는 레이저의 진동수이다. 예를 들어 간섭계의 팔 길이를 약 4 km로 하고 레이저의 출력과 파장을 각각 125 W와 $1.06 \mu\text{m}$ 라고 하면 광자잡음만을 고려했을 때 측정할 수 있는 최소 변형률은 약 $10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$ 정도로 이번엔 관측된 중력파와 같은 정도의 차수이기는 하지만 실제로 중력파 안테나를 유용하게 활용하기 위해서는 이보다 훨씬 높은 감도 (sensitivity)의 간섭계가 필요하다.

레이저의 파워를 높이면 산탄 잡음은 줄어들지만 거울에 미치는 복사압이 커진다. 거울에 입사되는 광자의 숫자를 N 이라 하면 거울이 받는 제곱 평균의 제곱근 (root mean square, rms) 운동량은

$$\delta p = \delta N \cdot \frac{2\hbar\omega}{c} = \sqrt{N} \frac{2\hbar\omega}{c} = \sqrt{\frac{P_0\tau}{\hbar\omega}} \frac{2\hbar\omega}{c} \quad (3)$$

가 된다. 이를 진동수 f 인 중력파에 대한 단위대역폭당 진폭 오차로 환산하면

$$h_{rad}(f) = \frac{1}{2\pi^2 M f^2 L} \sqrt{\frac{\hbar\omega P_0}{c^2}} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 M 은 거울의 질량이다. 산탄 잡음이 중력파 진동수의 제곱근에 비례하는 반면 복사압 잡음은 진동수의 제곱에 반비례한다는 사실로부터 진동수가 높은 영역에서는 산탄 잡음이, 진동수가 작은 영역에서는 복사 잡음이 중요해진다는 사실을 알 수 있다. 이러한 ‘양자 잡음’은 공진기를 적용한 간섭계에서는 약간 그 형태가 수정되어야 한다.

2. 공진기가 결합된 Michelson 간섭계

식 (2)에서 볼 수 있듯이 중력파 측정에 대한 감도를 높일 수 있는 방법은 간섭계 팔의 길이를 더욱 길게 하거나 레이저의 출력을 높이는 방법을 생각할 수 있다. 예를 들어 간섭계 팔의 길이를 400 km로 증가시킬 경우 감도는 100 배 증가하지만 이와 같은 길이의 진공터널을 지상에 설치한다는 것이 기술적으로 어려울 뿐만 아니라 서로 수직인 간섭계 팔의 방향에 따른 중력의 차이때문에 지구상에서는 최대 팔길이가 4 km로 제한을 받는다. 따라서 효과적으로 간섭계의 팔 길이를 늘리는 방법으로 패브리-페로 (Fabry-Perot) 공진기를 이용하는 방법이 적용되었다. 패브리-페로 공진기는 Fig. 2(a)와 같이 서로 마주보고 있는 두 개의 거울로 구성되는데 어드밴스드 라이고 (Advanced LIGO, aLIGO)의 경우 앞의 거울, 입력 시험 질량 (Input Test Mass, ITM)은 약 1.4% 정도의 투과율을 갖는 반면 뒤쪽 거울, 말단 시험 질량 (End Test Mass, ETM)은 약 5 ppm의 투과율을 갖는 거의 완벽한 거울로 구성된다. 따라서 ETM의 투과를 무시하면 이 공진기의 유효 반사율은 두 거울 사이의 공진조건에 상관 없이 항상 100%가 된다. 이제 거울 사이의 거리를 적절하게 조절하여 입사된 빛에 대한 공명조건, 즉 정지파 (standing wave) 조건이 만족되면 앞쪽 거울에서 투과되어 공진기에 들어오는 광파가 계속 왕복하면서 서로 증강간섭을 일으켜 공진기 안에는 아주 강한 세기의 빛이 저장된다. 즉, 앞쪽 거울을 투과해 입사된 광파가 공진기 내부에서 계속 왕복하게 되는데 왕복 횟수는 $n \approx 2F/\pi$ 이며 여기서 F 는 간섭계의 예리도 (finesse)로 공진기 거울의 반사율에 의해 주어진다. 공진기 내부에 저장된 강한 빛의 1.4%가 다시 ITM에서 투과되어 원래의 경로를 따라 되돌아 가는데 이때 공진기에 입력되지 않고 ITM에서 반사된 빛이 합쳐져 공진기의 유효 반사율은 ETM에서 손실을 무시한다면 거의 100%가 된다. 즉, 광원에서 출력된 모든 빛이 다시 광원으로 되돌아 가는 데 이를 유용하게 재활용하기 위해서 Fig. 2(b)와 같이 출력 재활용 거울 (power recycling mirror, PRM)을 레이저와 공진기 사이에 두어 공진기로부터 빠져 나오는 빛을 다시 재활용한다.

이제 중력파에 의해 공진기 길이가 δL 만큼 변하면 왕복하고 있는 모든 광파들의 이동거리가 동일하게 변하기 때문에 공진기를 빠져나가 되돌아 가는 광파는 효과적으로 $n\delta L = nLh$ 만큼 경로차이를 얻는다. 어드밴스드 라이고에서 공진기의 예리도가 450이므로 약 300회 정도 왕복을 하고 있음을 알 수 있으며 이를 이용하여 간섭계 팔의 길이를 실효적으로 약 1200 km 정도로 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 공진 횟수가 늘어남에 따라 중력파의 파장과

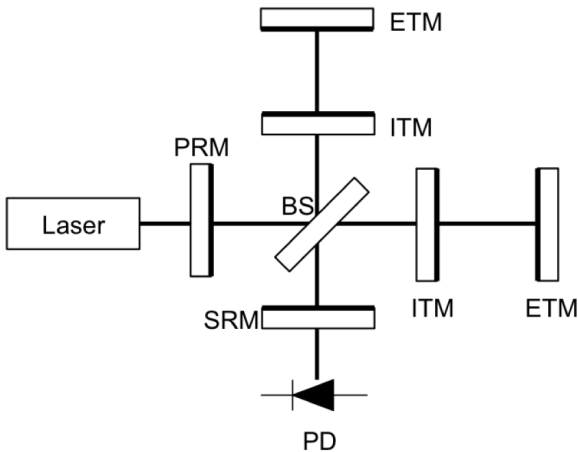


Fig. 3. (Schematic illustration of Michelson interferometer coupled with Fabry-Perot interferometer and PRM/SRM.

레이저가 왕복하는 거리는 점점 가까와지게 된다. 산탄 잡음은 공진기를 적용하면서 크게 작아지지만 왕복 거리가 늘어나는 효과에 의해 증력파 진동수가 커질수록 서서히 커진다. 반면 복사압 잡음 역시 공진기를 적용하면서 반사 횟수가 늘어나므로 상당히 악화된다. 그러나 어드밴스드 라이고의 경우 복사 거울의 질량을 크게 하여 레이저 파워를 높이고도 충분히 낮은 복사 잡음을 유지할 수 있게 되어 있어 낮은 진동수에서도 현가 케이블이나 거울면의 열잡음과 비슷하거나 낮은 수준을 유지하도록 설계되어 있다.

공진기가 결합된 Michelson 간섭계에 대한 개략도가 Fig. 3에 나와 있다. 각각의 간섭계 팔에 공진기를 설치함으로써 간섭계의 실효적인 팔 길이를 크게 증가시킬 수 있게 하였으며, BS와 레이저 사이에 PRM을 두어 레이저로 다시 되돌아 가는 빛을 재활용하게 하였다. 또한 신호 재활용 거울 (signal recycling mirror, SRM)을 이용한 복합 공진기를 구성하여 증력파에 의해 발생한 간섭신호를 공진추출 (resonant extraction) 시키게 되어 있다. 여기서는 증력파 안테나의 기본 구조 및 개념을 이해하기 위해서 가장 기본이 되는 장치만을 소개했으나 실제 증력파 측정을 위한 간섭계의 구조는 훨씬 더 복잡하다. 여기서는 자세하게 기술하지 않았지만 공진기로부터 반사되어 BS에서 합쳐져서 PD로 입사되는 빛이 어두운 무늬 (dark fringe) 조건을 만족할 때 증력파에 의해 발생하는 간섭신호에 대한 감도가 최대가 된다. 이와 같은 조건을 만족시키기 위하여 거울과 BS 위치에 대한 능동조절이 필요하고, 이와 동시에 공진 조건을 만족시키기 위해서 각 공진기의 거울들 사이의 간격 또한 능동조절이 필요하며, PRM과 공진기 거울 그리고 SRM과 공진기 거울에 대한 간격조절이 이루어져야 한다.

III. 소그로: 새로운 지상 저진동수 증력파 검출기

앞절에서 설명한 것처럼 현재 가동되고 있거나 곧 가동될 레이저 간섭계에 바탕을 둔 지상 검출기는 10 Hz 이하의 저주파 영역에서는 지진 잡음이나 진동 잡음 등과 같은 잡음 때문에 감도가 현저히 떨어진다. 이 절에는 0.01 ~ 10 Hz 영역에서 관측이 가능한 삼차원 구조의 새로운 검출기 개념인 소그로에 대해 간단히 설명한다. 낮은 주파수의 증력파를 검출할 수 있기 위해서는 우선 공명진동수가 아주 낮은 거의 자유로운 시험질량을 사용해야 한다. 액체헬륨의 온도에서는 초전도체의 시험질량을 자기장에 부양함으로써 공명진동수를 0.01 Hz로 내릴 수 있다. 또한 시험질량들을 동일한 지지대 위에 부양시킨다면, 뒤에서 더 자세하게 설명하는 바와 같이, 시험질량들이 지지대와 함께 움직이는 동일위상진동 (common mode)을 검출기 출력에서 제거함으로써 지진 잡음을 대폭적으로 줄여줄 수 있다. 자기적으로 부양된 6개의 초전도 시험질량을 조합함으로써 곡률 텐서의 모든 성분을 측정할 수 있는 지상 텐서 증력파 검출기, 소그로를 제작할 수 있다. 증력파는 횡파이므로, 텐서 검출기는 증력파와 근처의 뉴턴 장을 구별할 수 있다. 또한 텐서 검출기는 증력파원의 방향과 극성을 구분할 수 있다 [7].

소그로는 저온 검출기이므로 초전도체의 여러가지 우수한 특성들과 감도가 양자한계 (quantum limit)에 가까운 스퀴드를 이용할 수 있다. 또한 저온에서는 시험질량의 열잡음이 줄어든다. 레이저 간섭계와 같이 팔의 길이를 늘린다면 감도를 더 증가시킬 수 있다. 그러나 소그로는 공동 지지대를 필요로 하기 때문에 질량이 수백 톤에 해당하는 대형 지지대를 4.2 K 이하의 저온으로 냉각시켜야 하는 도전에 직면하고 있다. 그래서 소그로의 팔의 길이는 수십 m 이상으로 증가시키기 어렵다.

이 논문에서는 이미 출판된 소그로 관련 논문을 요약하고 규모를 키운 어드밴스드 소그로 (Advanced SOGRO, aSOGRO)에 대하여 기술한다. 어드밴스드 소그로는 중간질량의 블랙홀 (IMBH) 쌍성계 뿐만 아니라 GW150914와 같은 별 정도의 블랙홀 쌍성계 (BBH)의 낮은 진동수 부분의 신호를 검출하기에 충분하다는 것을 보일 것이다.

1. 구조

Fig. 4는 소그로 시험질량의 구성을 보여준다. 6개의 시험질량은 각각 세 방향의 선형 자유도를 갖고있고 3개의 수직 지지대에 부양되도록 되어 있다. 시험질량은 니오븀

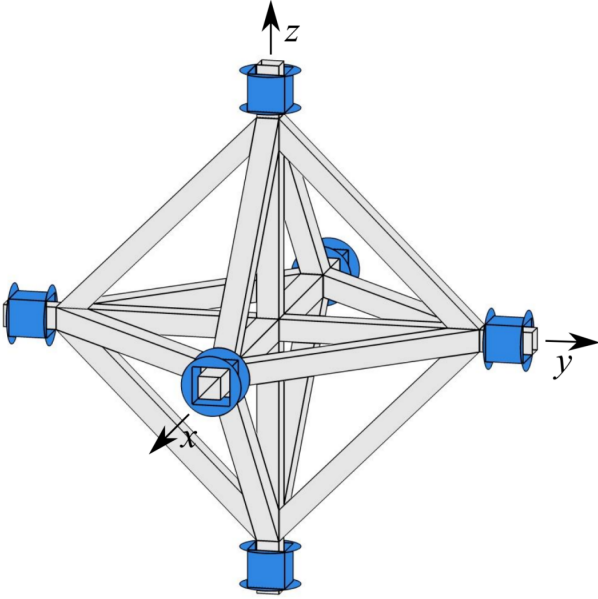


Fig. 4. (Color online) Test mass configuration for SOGRO. Six magnetically levitated test masses are combined to measure all six components of the curvature tensor.

(Nb)으로 된 육면체이다. 부양을 위한 초전도 코일과 감지 축전기 (보이지 않음)는 지지대와 시험질량 사이의 틈과 외부에 위치한다. 지지대를 따라 움직이는 두 시험질량의 위치의 차는 중력파의 대각 성분, $h_{ii}(t)$, 을 구하는데 사용된다. 각 좌표 평면에 있는 4 개의 시험질량의 회전운동의 차로 비대각 성분, $h_{ij}(t), i \neq j$, 을 구한다.

소그로 시험질량의 운동은 지지대에 있는 감지 회로를 기준으로 측정 되므로 소그로는 진동 모드의 진동수가 신호 진동수대역보다 큰 틈을 필요로 한다. 온도에 의한 잡음을 줄이기 위하여 틈 자체도 4.2 K 이하로 유지 되어야 한다. 저온을 유지하기 위한 부담을 줄이기 위하여 틈은 충분히 견고하면서도 가벼워야 한다. 유한요소법 (FEM) 분석에 의하면 그림과 같은 틈을 알루미늄 (Al) 관으로 30 m 크기로 제작할 경우 진동 모드 진동수가 19 Hz 이상이고 총 질량은 약 70 ton 이 된다. 틈의 크기를 100 m로 늘리려면 보다 정교한 구조를 찾아야 한다. 자기 부양을 통하여 시험질량을 매우 높은 Q와 0.01 Hz의 공명 진동수를 갖게 할 수 있다.

민감한 중력파 검출기를 만들기 위해서는 극도로 낮은 잡음 특성을 갖는 높은 에너지 전달자 (transducer)가 필요하다. 소그로에는 최적화된 초전도 브릿지형 축전기 전달자를 사용한다 [12]. Fig. 5는 대각성분을 측정하는 채널의 전달자를 보여준다. 이 그림에서 $C_{ij}(t)$ 는 i 번째 시험질량의 j 면에 위치한 Nb 축전기이다. 브릿지 회로의 출력은 초전도 변환기를 통하여 dc SQUID에 연결 되어 있다. 감지 축전기는 중력파에 의하여 진동수 ω 로 변조되고 브릿지

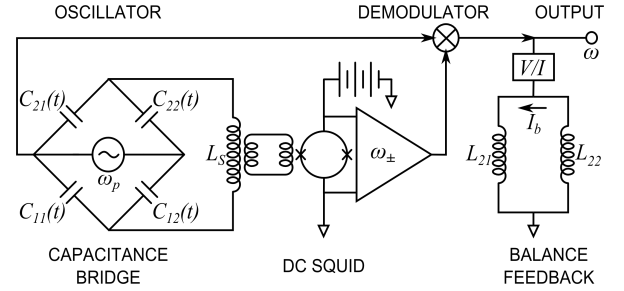


Fig. 5. Superconducting tuned capacitor bridge transducer. The bridge output is detected by a dc SQUID. The demodulated signal is fed back to the test masses to keep the bridge precisely balanced.

회로는 SQUID 입력 코일과 연결된 축전기 브릿지 회로의 고유 진동수 $\omega_p (\gg \omega)$ 로 구동되고 이 진동수는 SQUID의 $1/f$ 잡음이 나타나는 진동수영역보다 크다. 전기적 공명은 에너지 연결 상수 값 (β)을 증가 시킨다. 진동수가 ω_p 인 전달신호는 보정력을 시험질량에 가해줌으로써 브릿지 출력의 진동 잡음을 없앨 수 있다.

2. 감도

능동전달자를 사용한 중력파 검출기의 진동수에 대한 잡음 강도 (noise power spectral density)는 다음과 같이 주어진다 [7].

$$S_h(f) = \frac{16}{ML^2\omega^4} \left\{ \frac{k_B T \omega_D}{Q_D} + \frac{|\omega^2 - \omega_D^2|}{2\omega_p} \left(1 + \frac{1}{\beta^2} \right)^{1/2} k_B T_N \right\}. \quad (5)$$

위 식에서 M 과 L 은 각각 시험질량의 질량과 검출기 팔의 길이, T 는 온도, $\omega_D = 2\pi f_D$ 와 Q_D 는 각각 반위상 모드의 공명 각진동수와 공명회로의 Q값, T_N 은 스쿼드의 잡음 온도이다. 능동전달자인 경우에 $\beta > 1$ 이 되도록 회로를 구성할 수 있다. 여기서 제안한 축전기 브릿지형 전달자의 경우 그 값은 다음 식과 같이 주어진다 [7].

$$\beta = \frac{2CE_p^2 Q_p}{M|\omega^2 - \omega_p^2|} \frac{1}{\sqrt{1 + (2Q_p\omega/\omega_p)^2}} \quad (6)$$

여기서 C 는 감지 축전기의 평행 축전 용량 값, E_p 는 각 진동수 ω_p 에서 인가된 전기장의 세기, Q_p 는 전기회로의 Q값이다.

Table 1에 예상되는 두 종류의 검출기 제원에 대한 신호 진동수가 $f = 1$ Hz에서 계산한 $S_h^{1/2}(f)$ 값을 보였다. 증폭기 잡음수는 $n \equiv \hbar\omega_p/k_B T_N$ 으로 정의된다. 소그로의 온도는 액체헬륨을 순환하거나 저온냉각기 (cryocooler)를

Table 1. Detector parameters and expected sensitivities of SOGRO and aSOGRO.

Parameter	SOGRO	aSOGRO	Method employed (/aSOGRO)
Each test mass M	5 ton	10 ton	Nb square tube
Arm-length L	30 m	100 m	Over "rigid" platform
Antenna temperature T	1.5 K	0.1 K	Superfluid helium/dilution refrigerator
Platform temperature T_p	1.5 K	1.5 K	$Q_p = 5 \times 10^6 / 10^7$
DM frequency f_D	0.01 Hz	0.01 Hz	Magnetic levitation
DM quality factor Q_D	5×10^8	10^9	Surface polished pure Nb
Signal frequency f	0.1 - 10 Hz	0.1 - 10 Hz	
Pump frequency f_p	50 kHz	50 kHz	Tuned capacitor bridge transducer
Amplifier noise number n	20	2	Nearly quantum-limited dc SQUID
Detector noise $S_h^{1/2}(f)$	$2 \times 10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$	$2 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$	Computed at 1 Hz

이용하여 1.5 K로 냉각되고, 어드밴스드 소그로는 He^3/He^4 를 사용한 희석냉각기 (dilution refrigerator)를 이용하여 0.1 K까지 냉각한다. 두 단계의 dc SQUID를 이용하여 백색잡음 값이 1.5 K에서는 $120\hbar$, 0.1 K에서는 $10\hbar$ 에 이를 수 있다는 것은 이미 증명 되었다 [13, 14]. 소그로와 어드밴스드 소그로의 SQUID 잡음의 목표 값은 각각 $20\hbar$ 와 $2\hbar$ 이다. Table 1에 제시된 제원을 사용하면 소그로와 어드밴스드 소그로의 $S_h^{1/2}(f)$ 의 값은 각각 $2 \times 10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$ 와 $2 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$ 에 다다를 수 있다. 소그로는 매우 높은 Q 값을 요구한다. 속박된 자기플럭스와 조각난 전기장 (patch fields)에 의한 기생 힘 (parasitic force)으로 인하여 전달자에 감쇄를 유발할 수 있다. 이러한 기생 힘에 의한 감쇄를 줄이기 위하여 시험질량은 높은 순도의 Nb으로 제작해야 하고 표면을 매우 매끄럽게 처리해야 한다.

Fig. 6에는 소그로와 어드밴스드 소그로의 계산된 잡음 강도를 어드밴스드 레이저 간섭계의 잡음 강도와 비교하여 표시하였다. 소그로는 장래의 지상 레이저 간섭계와 우주 간섭계가 측정할 수 없는 0.1 - 10 Hz의 영역에서 좋은 감도를 보여 준다. 그림에는 비교를 위하여 GW150914의 병합 이전에 예상되는 낮은 진동수에서의 신호강도를 같이 표시하였다 [15]. 어드밴스드 소그로는 GW150914와 같은 수십배의 태양질량 블랙홀로 이루어진 쌍성계의 나선궤도과정에서 발생하는 중력파를 1 - 10 Hz 영역에서 신호대잡음비 (SNR)가 10 정도로 측정할 수 있을 것이다. 이러한 근원에서 오는 신호는 레이저 간섭계의 진동수 영역에서는 1초 이내 밖에 지속되지 않는다. 반면에 소그로는 신호를 여러 날 또는 여러 주 추적할 수 있으며, 병합 며칠 전에 레이저 간섭계들에게 미리 경고해 줄 수 있다. 레일리 (Rayleigh) 파와 아음파에 의한 뉴턴 잡음은 잘 알려져 있다 [16, 17]. 검출기의 감도가 설계값에 도달하기 위해서는 뉴턴 잡음은 소그로에 대해서는 70 dB, 어드밴스드 소그로에 대해서는 90 dB 이상 줄여야 한다.

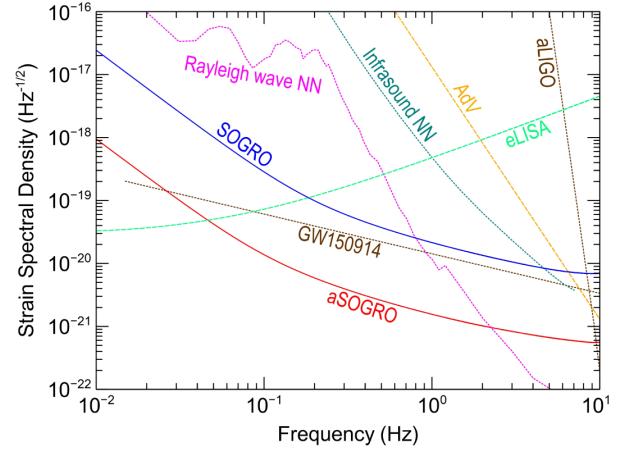


Fig. 6. (Color online) Expected strain sensitivities of SOGRO and aSOGRO. Also plotted is the low-frequency precursor of GW150914. aSOGRO would be sensitive enough to detect BH binaries like GW150915 with a SNR of 10 .

3. 지진 잡음 제거

진동수가 $f > 5 \text{ Hz}$ 인 지진 잡음의 효과를 줄이기 위하여 일반적으로 취하는 방법은 지하에 검출기를 건설하는 것이다 [3, 17]. 소그로도 설계 감도를 달성하기 위해서는 지하 1 km에 건설할 것을 제안한다. 지진 잡음의 강도는 0.1 - 10 Hz 영역에서 $3 \times 10^{-7} \text{ m s}^{-2} \text{ Hz}^{-1/2}$ 정도이다 [18]. 이는 소그로와 어드밴스드 소그로에 요구되는 잡음 강도보다 각각 10^{11} 배, 10^{12} 배 큰 값이다. 이와 같은 낮은 진동수에서의 진동 격리 (vibration isolation)는 매우 힘든 기술이다. 반면에 소그로는 매우 정밀하게 틀의 동일위상진동 (common mode)을 제거할 수 있는 능력이 있다. 초전도 중력구배계 (superconductor gravity gradiometer, SGG)에서 개발된 동일위상진동 제거기술 [19, 20]을 소그로에서 사용할 것이고 이를 이용하여 지진 잡음을 10^{10} 배 줄일 것이다. 가속도계의 감도를 정밀하게 일치시키고 나머지

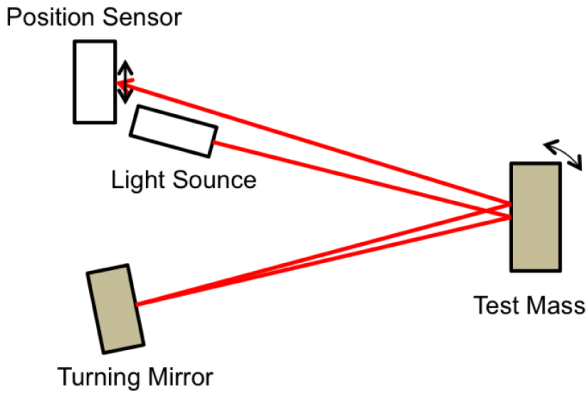


Fig. 7. (Color online) A schematic illustration of the optical lever for initial mirror alignment in KAGRA.

오차에 대하여 보상을 하여 동일위상진동의 감도를 10^{-10} 으로 줄이면 소그로와 어드밴스드 소그로에서 요구되는 진동 격리는 각각 20 dB와 40 dB로 줄어 든다.

틀은 약 50 m 길이의 줄에 매달아서, 수평방향의 진동수가 약 0.07 Hz 이고 회전 진동수가 약 1 mHz 를 갖도록 구성한다. 이러한 구성으로 1 Hz에서 수평 방향의 가속도 감소를 40 dB 이상, 회전 가속도 감소를 120 dB 이상을 얻을 수 있고, 10 Hz에서는 더 크게 감소한다. 앞에서 기술한 동일위상진동 제거와 같이 사용하면 지진 잡음은 수직 방향을 제외하면 검출기의 고유 잡음보다 작게할 수 있다. 수직 방향의 지진 잡음은 어드밴스드 소그로의 경우 능동적 수동적 장치를 통하여 40 dB 이상 줄여야 한다.

4. 뉴턴 잡음 저감

주변 물체들의 움직임에 의한 뉴턴 잡음은 진동수가 $f \leq 1$ Hz 인 영역에서 검출기의 잡음 강도를 줄이는 것을 매우 어렵게 한다. 레일리파와 아음파의 크기는 지하 깊이 z 에 따라 지수적으로 감소한다. 레일리파 ($c = 3.5$ km/s)는 0.1 Hz에서 세기의 감소가 크지 않다. 그러나 아음파 ($c = 330$ m/s)에 대해서는 뉴턴 잡음이 지하 1 km, 0.1 Hz에서 약 1/6 정도 (음파의 표면에 대한 입사각에 따라 다르다) 줄어들고, 1 Hz에서는 10^{-8} 이상 줄어든다. 따라서 0.1 Hz에서는 원하는 잡음 강도를 유지하려면 뉴턴 잡음을 소그로와 어드밴스드 소그로에서 각각 10^{-3} 과 10^{-4} 배 줄여야 한다. 소그로에서는 이를 달성하기 위하여 검출기의 텐서성분 측정 특징과 동일위상 가속도의 동시 정밀 측정을 이용한다 [7].

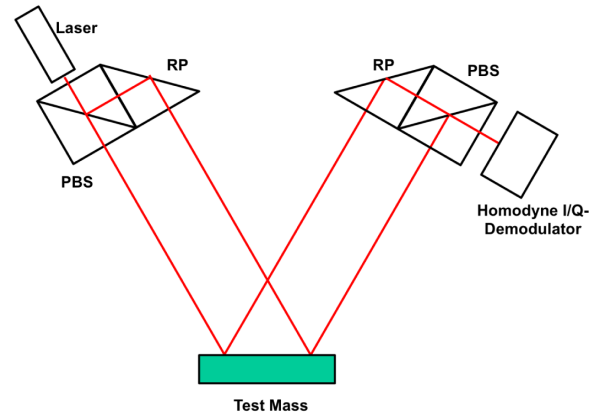


Fig. 8. (Color online) New interferometer scheme for precision tilt measurement

IV. 카그라 실험의 기기관련 한국참여 현황

1. 간섭계 거울 기울기 센서

서강대학교 조규만 교수는 2012년 7월 말부터 카그라의 공동 연구자 (collaborator)로서 협력관계를 맺어 왔으며 주로 간섭계와 관련된 연구를 수행하고 있다. 개인적으로는 현재 적용되고 있는 중력파안테나의 성능을 개선하기 위하여 간섭계의 구조에 대하여 연구를 수행하고 있으며, 2015년 1월초에서 2월 말까지는 동경대학교의 ICRR (Institute for Cosmic Ray Research)에 특임교수로 초청을 받아 카그라 거울의 초기정렬에 필요한 기울기 (tilt) 센서를 개발하는 연구를 수행한 바 있다. 여기에서는 간섭계를 이용한 기울기 센서에 대한 내용을 간략하게 소개하겠다 [21].

앞에서 논의된 바 있듯이 중력파 안테나에는 패브리-페로 공진기를 포함하는 주 간섭계를 비롯하여 입력 및 신호 광에 대한 모드 세척기, PRM, 신호 재활용 거울 SRM 등 정밀 위치조정 및 정렬을 필요로 하는 많은 거울들이 있다. 특히 주 간섭계에서 공진기 입력과 끝 단의 주 거울, 즉 입력 시험 질량 (input test mass, ITM)와 말단 시험 질량 (end test mass, ETM)의 정렬이 매우 중요하며, 이를 위해서 다른 공진기 모드들 사이의 간섭신호를 오차신호로 활용하여 능동적으로 정렬시키는 기술을 사용하고 있으나 이를 적용하기 위해서는 초기정렬이 이루어져야 한다. 카그라 주 간섭계의 ITM과 ETM의 초기 정렬을 위해서 0.1 Hz보다 큰 진동수 영역에서 0.1 μ rad의 분해능을 갖고 10 μ rad/day의 정향 변화 (drift)와 적어도 3 mrad 정도의 측정범위를 갖는 기울기 센서가 요구된다. 이를 위해서 이제까지는 Fig. 7과 같은 광학 지렛대 (optical lever, OL)를 사용하여 왔으나 위의 요구사항을 만족시키기 위해서는

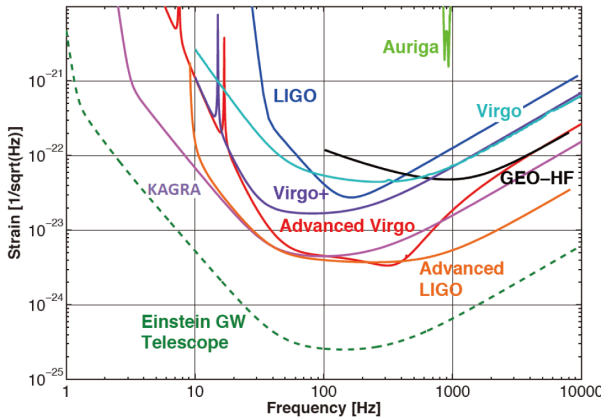


Fig. 9. (Color online) Schematic sensitivity curves for various gravitational wave detectors [23].

기기 주변의 환경적인 변화에 영향을 적게 받게 하기 위해서 기구 설치에 세심한 주의를 기울여야 하며 또한 실험적으로 주어진 보정 식을 이용하여 주변의 온도변화 등에 의한 정향 변화를 보정해주어야 한다 [22]. 따라서 중력파 안테나의 초기 정렬을 수월하게 하고 정렬상태를 장기간 유지하기 위해서는 분해능이 더 높고, 정향 변화가 적으며, 측정범위가 넓은 새로운 기울기 센서가 필요하다. 서강대학교 연구팀은 ICRR 방문연구를 통하여 Fig. 8과 같이 접혀진 Mach-Zehnder 간섭계 형태를 갖는 새로운 기울기 센서를 개발하였다. 새로 개발된 센서는 0.1 Hz에서 0.1 mrad의 분해능을 갖고, 12시간 동안 0.5 μ rad의 정향 변화를 가지며, 3 mrad의 측정범위를 가지면서도 주변의 환경변화 등에 영향을 적게 받는 것이 특징이다. 현재 기울기 센서를 카그라에 설치하기 위한 시작품을 제작하는 연구가 진행되고 있다.

2. 카그라 검출기의 진동 격리

카그라는 어드밴스드 라이고 등과 같이 2세대 중력파 검출기로 분류된다. 카그라의 감도는 진동수가 100 Hz 근처 혹은 그 이상 대역에서 1세대 검출기인 라이고 등 보다 약 10배 정도 개선될 것으로 예상된다. 또한 1세대 검출기에서 진동 잡음에 의해 검출하기 힘들었던 100 Hz 이하의 진동수 대역에서 큰 폭의 개선을 이루어 10 Hz 근처에서 $1/\sqrt{L} \sim 10^{-22}$ 의 strain 감도를 얻을 것으로 예상되며 이는 최근 중력파 검출에 성공한 어드밴스드 라이고 검출기와 비슷한 성능이다 (Fig. 9). 실제로 이번에 발견된 중력파는 대략 40 - 250 Hz 로 어드밴스드 라이고 검출기의 감도가 가장 좋은 35 - 350 Hz 대역에서 발견되었다 [9].

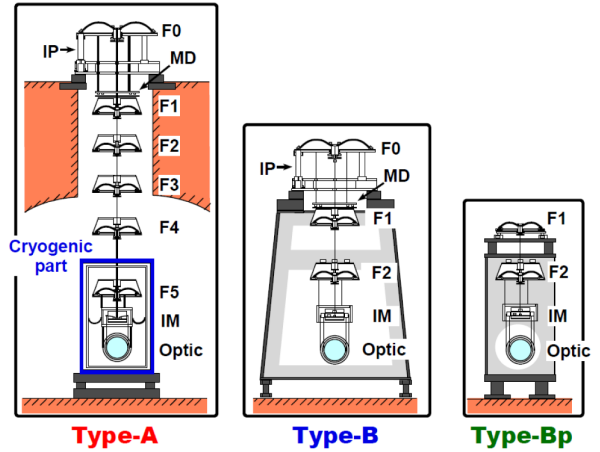


Fig. 10. (Color online) Design of suspensions for the KAGRA detector. The vacuum envelopes are not illustrated for simplicity. F0-F5 denote the geometric anti-spring filters for vertical seismic attenuation. MD represents the magnetic damper, which is placed just above F1 and aims to damp the torsion modes of the attenuation chain. IM represents the intermediate mass, from which the optic is hung with suspension wires [24].

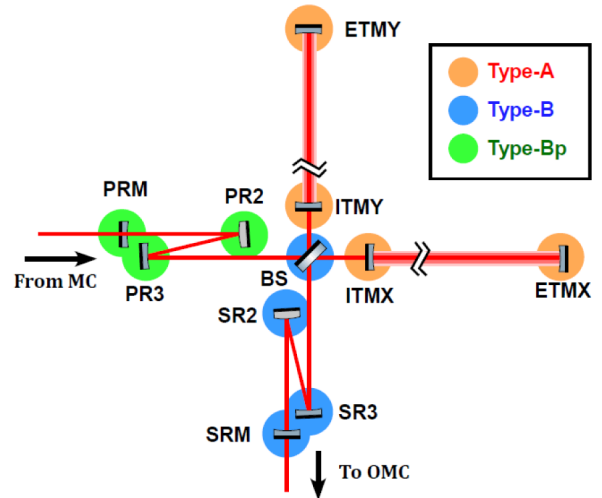


Fig. 11. (Color online) Arrangement of suspensions in the KAGRA main interferometer. ITMX, ITMY, ETMX, and ETMY denote input and end test masses in the X and Y arms. SR and PR denote signal recycling and power recycling. MC and OMC denote the input mode cleaner and the output mode cleaner [24].

이처럼 100 Hz 이하의 낮은 진동수의 신호를 검출하기 위해서는 그 진동수 대역에서 주된 잡음 요인인 땅의 흔들림에 의한 지진 잡음을 억제하는 것이 중요한 과제이다. 이를 위해 카그라는 산 기슭으로부터 산 안쪽으로 길이가 3 km 인 두 개의 터널을 뚫어 지하에 건설하고 있다. 또한 땅의 흔들림이 거울에 전달되지 않도록 특수한 현가 장치를 이용하여 거울을 매다는데 카그라에 사용되는 현가 장치는 라

이고와 비르고 검출기에서 개발되어 사용되는 거꾸로선 진자 (inverted pendulum)와 기하학적 반용수철 (geometric anti-spring, GAS)을 이용한 방식이다. 간섭계를 구성하는 가장 중요한 거울 (시험 질량의 역할을 하는 4개의 거울)은 전단계 진동 격리 장치, 5중의 거꾸로 선 진자, 중간 질량 등 총 7단계로 이루어져 길이가 10 m에 달하는 현가 장치에 매달리게 되며 아래 거울이 있는 부분은 열적 잡음을 최대한 억제하기 위해 액체 헬륨을 이용하여 저온으로 유지된다 (Fig. 10). 그 밖의 여러 거울과 빔가르개 등은 감도에 영향을 미치는 정도에 따라 좀더 단순한 형태의 현가 장치에 매달리게 된다 (Fig. 11). 중요 거울을 매다는 10 m 길이의 A형의 경우 2층 구조로 되어 맨 위의 전단계 진동 격리 장치는 카그라의 주 간섭계가 있는 터널이 아니고 그 위에 뚫은 또 다른 상부 터널에 설치되어 예비 진동 격리를 하도록 하여 더 높은 진동 격리가 가능하도록 한 것이 특징이다. 이처럼 지하에 건설되고 저온 거울을 이용한 검출기는 아직 시도된 바가 없으며 이 두가지 핵심적인 특징으로 인해 10 Hz 이하 1 Hz 까지의 낮은 진동수에서는 어드밴스드 라이고 보다 더 높은 감도를 가져 2세대 검출기 중에서 가장 우수한 성능을 보일 것으로 예상된다.

3. 앞으로의 과제와 협력

수 Hz 혹은 그보다 낮은 진동수 대역에서 많은 흥미로운 중력파 파원이 존재한다. 이러한 영역에서의 감도는 진동 잡음에 의해 한계지워지는데 특히 현가 장치로는 격리할 수 없는 중력 구배 혹은 뉴턴 잡음이 주된 요인이 될 것으로 예상된다. 뉴턴 잡음은 검출기가 고정된 땅의 직접적인 진동이 아니라 주위 물체의 밀도, 위치 변화에 의해 검출기에 작용하는 중력의 변화에 의해 발생한다. 1세대 검출기의 경우 이 잡음은 검출기의 작동 대역에서 그 크기가 무시할 정도였으나 2세대 검출기, 특히 수 Hz 대역에서도 높은 감도를 보이는 카그라의 경우 수 Hz 이하 진동수 대역에서 가장 큰 잡음원으로 작용한다. 이 잡음은 본질적으로 중력 변화이므로 중력파를 측정하고자 하는 검출기에서 격리가 불가능하며 추가적인 검출기를 이용하여 뉴턴 잡음을 측정 한 뒤 신호를 보정하여야 한다. 지하에 건설되는 카그라의 경우 사람에 의한 잡음 요인과 진동 잡음이 1/100 정도로 줄어드는 잇점은 있으나 지진 활동, 봄철에 예상보다 매우 많이 발생하는 지하수 등으로 인한 뉴턴 잡음의 정도는 정확히 밝혀지지 않았다. 앞으로 이러한 뉴턴 잡음의 측정 및 분석, 적절한 중력 검출기의 개발 등이 필요하다. 명지대 학교 김재완 교수는 카그라 진동 격리 시스템 그룹과 2011년부터 협력을 진행하고 있으며 뉴턴 잡음의 측정과 이를

이용한 신호 보정에 원자 간섭계를 이용한 중력 구배 측정과 디지털 필터 등을 이용한 feed-forward 신호 보정 방법을 제안하여 향후 계획으로 논의되고 있다 [25]. 검출기의 건설이 진행되는 동안은 터널 내부 현가 장치의 설치 작업에 참여하고 있으며 향후 검출기의 건설이 완료되고 검출기의 감도가 설계대로 얻어져 뉴턴 잡음에 대한 연구가 시작되면 더욱 활발한 협력이 이루어질 것으로 예상된다.

V. 결론과 전망

마이켈슨 간섭기에 바탕을 둔 레이저 간섭계 중력파 검출기들에 페브리-페로 공진기, 레이저 파워 재생 등 다양한 감도 증가를 위한 성분들이 포함되어 있다. 이들중 선두 주자인 라이고는 지난 2015년 9월 14일 최초의 중력파 직접 검출에 성공하였다. 대부분의 지상 검출기들은 수십에서 수천 Hz 영역에서 주로 민감하다. 이 주파수 범위는 중성자별이나 별의 진화에 의해 생성된 블랙홀로 이루어진 쌍성의 마지막 병합 과정에서 나오는 중력파를 검출하는데 적합하고 앞으로도 이런 종류의 중력파를 많이 관측하게 될 것이다.

세계의 수직인 고정 막대의 끝에 자기장에 의해 부양된 6개 시험질량의 상대적인 운동을 감지할 수 있게 만든 검출기를 건설하면 레이저 간섭계의 주파수보다 낮은 영역인 0.1 - 10 Hz 범위에서 감도가 $10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2}$ 인 중력파 검출기를 만들 수 있다. 이러한 검출기는 삼차원 구조를 가지고 있어 리만 텐서에서 중력파와 관련된 모든 성분을 동시에 측정할 수 있기 때문에 중력파원의 방향과 파의 극성도 결정할 수 있다. 측정된 텐서에는 중력파와는 다른 수학적 성질을 가진 뉴턴 잡음에 의한 성분을 포함하고 있다. 지면의 운동과 대기밀도의 변화 등에 의해 발생하는 뉴턴 잡음은 지진계와 마이크로폰 등으로 얻을 수 있는 데이터와 삼차원 중력파 검출기로부터 측정된 중력파와 무관한 텐서 성분과 결합시킴으로서 수학적인 모형화가 가능하다. 결국 삼차원 검출기는 다른 레이저 간섭계에서는 제거가 불가능한 뉴턴 잡음을 효과적으로 제거할 수 있는 길을 열어주는 것이다. 새로운 검출기를 제작하는데 있어서 가장 큰 기술적인 문제는 대형 (~100 m), 견고 (~10 Hz)한 틀을 4.2 K 이하의 저온으로 유지하는 것과 부양된 초전도 시험질량을 높은 $Q(\sim 10^9)$ 를 갖게 하는 것이다.

소그로는 다른 지상 검출기의 감도가 매우 나쁜 영역인 10 Hz 이하의 저주파 영역에서 천체물리학적으로 의미 있는 관측을 가능하게 할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 주파수 영역에서는 수십억 광년 떨어진 중간 질량블랙홀 쌍성계나 국부 은하군에 있는 백색왜성 쌍성계를 관측할

수 있을 것으로 기대된다. 이론적인 감도에 도달하게 되면 어드밴스드 소그로는 GW150914와 같이 항성 진화를 통해 만들어지는 블랙홀 중에서 비교적 질량이 큰 것으로 이루어진 쌍성계가 병합 몇일 전에 방출하는 중력파를 관측할 수 있게 되어 다른 레이저 간섭계가 관측할 수 있는 주파수를 내기 전에 이미 예견할 수 있을 것이다.

한국의 과학계는 현재 작동하는 지상 중력파 검출기와 앞으로 우주공간에 설치할 검출기가 측정할 수 없는 중간 진동수 0.01 - 10 Hz 영역의 중력파 검출기를 최초로 건설할 수 있는 독특한 기회를 가지고 있다. 이 프로젝트는 저온 물리학과 고도의 전자 기술 외에도 대규모 역학적 구조의 설계와 분석, 대규모 저온 냉각 기술을 요구하므로 많은 실험 물리학자들과 공학자들의 공동연구와 협력을 필요로 한다.

감사의 글

백호정의 연구는 미국 국립과학재단 (NSF grant PHY1105030) 과 미국 우주항공국 (NASA grant NNX14AI43G) 의 지원에 의해 수행되었습니다. 조규만, 김재완, 이형목의 연구는 각각 한국연구재단의 연구비 NRF-2014M1A7A1A01029956, NRF-2009-0075111, NRF-2006-0093852의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

- [1] J. Aasi *et al* (The LIGO Scientific Collaboration), *Class. Quant. Grav.* **65**, 074001 (2015).
- [2] T. Accadia, F. Acernese, F. Antonucci, P. Astone and G. Ballardini *et al*, *Class. Quant. Grav.* **28**, 114002 (2011).
- [3] K. Somiya, *Class. Quant. Grav.* **29**, 124007 (2012).
- [4] P. Amaro-Seoane, S. Aoudia, S. Babak, P. Bintruy and E. Berti *et al*, *Class. Quant. Grav.* **29**, 124016 (2012).
- [5] S. Kawamura, T. Nakamura, M. Ando, N. Seto and K. Tsubono *et al*, *Class. Quant. Grav.* **23**, S125 (2006).
- [6] R. V. Wagoner and H. J. Paik, *Proceedings of the Accademia Nazionale dei Lincei International Symposium on Experimental Gravitation* (Pavia, Italy, 1976), p. 257.
- [7] H. J. Paik, C. E. Griggs, M. Vol Moody, K. Venkateswara and H. M. Lee *et al*, *Class. Quant. Grav.* **33**, 075003 (2016).
- [8] J. Harms and H. J. Paik, *Phys. Rev. D* **92**, 022001 (2015).
- [9] B. P. Abbott *et al*. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [10] J.-V. Vinet, *Physical Models for Gravitational Wave Experiments on Ground and in Space*, http://www.luth.obspm.fr/IHP06/lectures/mestervinet/lecture_vinet.pdf (accessed Mar. 30, 2016).
- [11] P. R. Saulson, *Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors* (World Sci. Pub. Co, pte. Ltd, 1994).
- [12] C. Cinquegrana, E. Majorana, P. Rapagnani and F. Ricci *et al*, *Phys. Rev. D* **48**, 448 (1993).
- [13] P. Falferi, M. Bonaldi, A. Cavalleri, M. Cerdonio and A. Vinante *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 931 (2003).
- [14] P. Falferi, M. Bonaldi, M. Cerdonio, R. Mezzena and G. A. Prodi *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 172506 (2008).
- [15] A. Sesana, arXiv:1602.06951[gr-qc].
- [16] J. R. Bowman, G. E. Baker and M. Bahavar, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L09803 (2005).
- [17] ET Science Team, <https://tds.ego-gw.it/itf/tds/cod.ET-0106C-10> (accessed Mar. 30, 2016).
- [18] M. G. Beker, J. F. J. van den Brand, E. Hennes and D. S. Rabeling, *J. Phys. Conf. Ser.* **363**, 012004 (2012).
- [19] H. A. Chan, M. V. Moody and H. J. Paik, *Phys. Rev. D* **35**, 3572 (1987).
- [20] M. V. Moody, H. J. Paik and E.R. Canavan, *Phys. Sci. Instrum.* **73**, 3957 (2002).
- [21] J. G. Park and K. Cho, *Appl. Opt.* **55**, 2155 (2016).
- [22] K. Agatsuma, Optical leer for KAGRA, <http://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=2396>, JGW-G1402396-v1 351 (accessed Mar. 30, 2016).
- [23] The Gravitational Wave International Committee Roadmap - The future of gravitational wave astronomy, <http://gwic.ligo.org/roadmap> (accessed Mar. 30, 2016).
- [24] T. Sekiguchi, Ph.D. thesis, University of Tokyo, 2016.
- [25] R. Takahashi and J. Kim, *Feed-forward Vibration Isolation and Reduction of Newtonian Noise, 2nd Korea-Japan Workshop on KAGRA* (May 28, 2012).