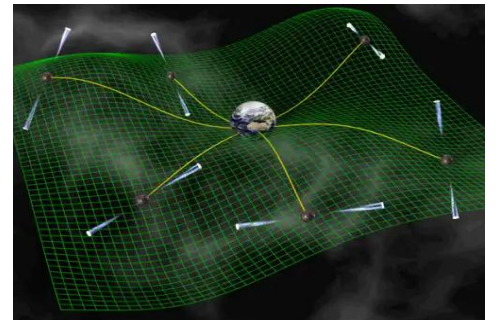
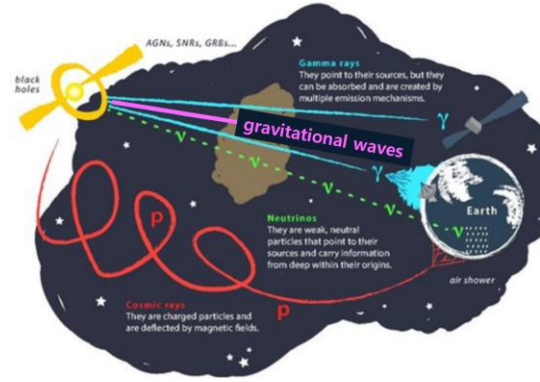
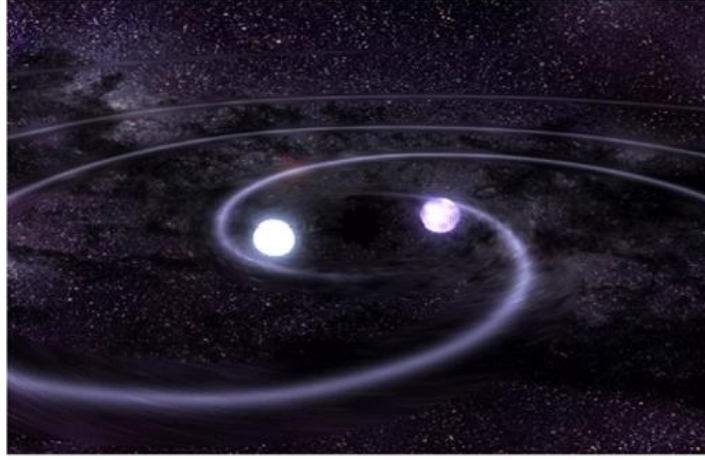
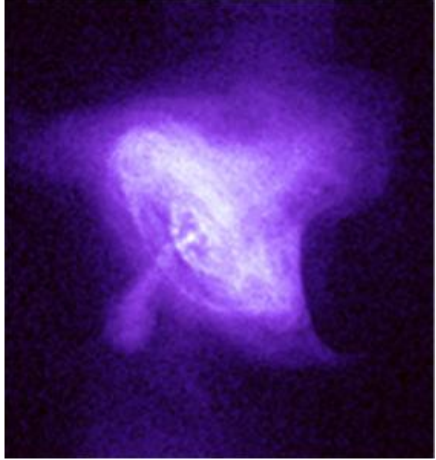


펄사와 중성자별의 기초



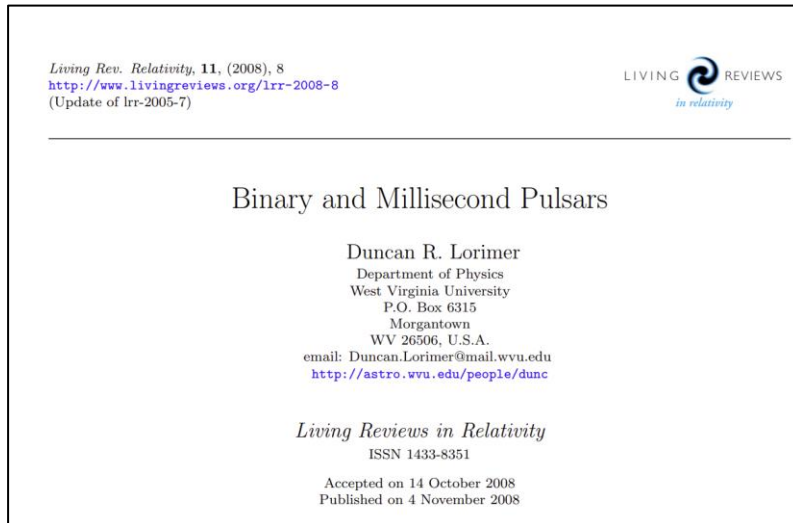
Chunglee Kim 김정리
(Ewha Womans U.)

2026 NRGW summer school

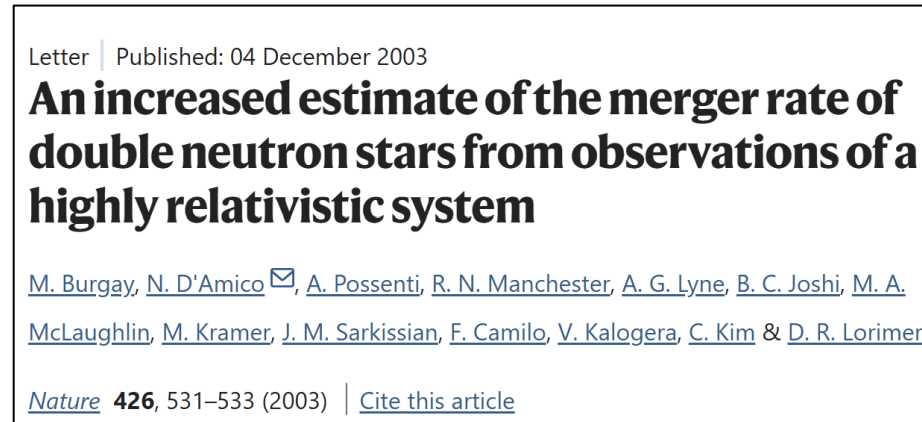
2026.07.10

이 강의의 주요 대상

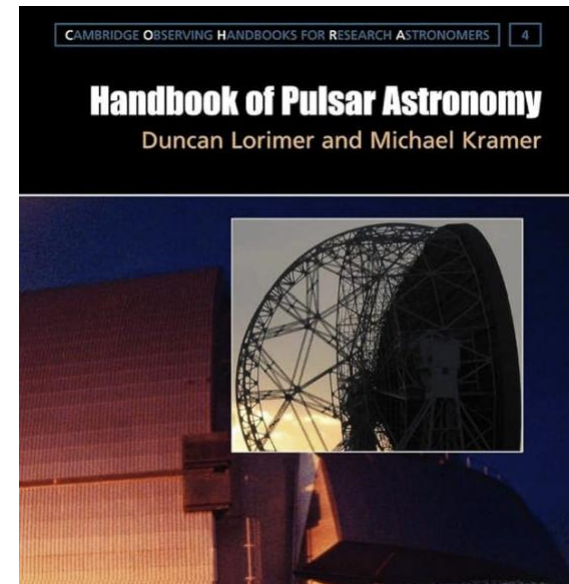
펄사와 중성자별



<https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2008-8>

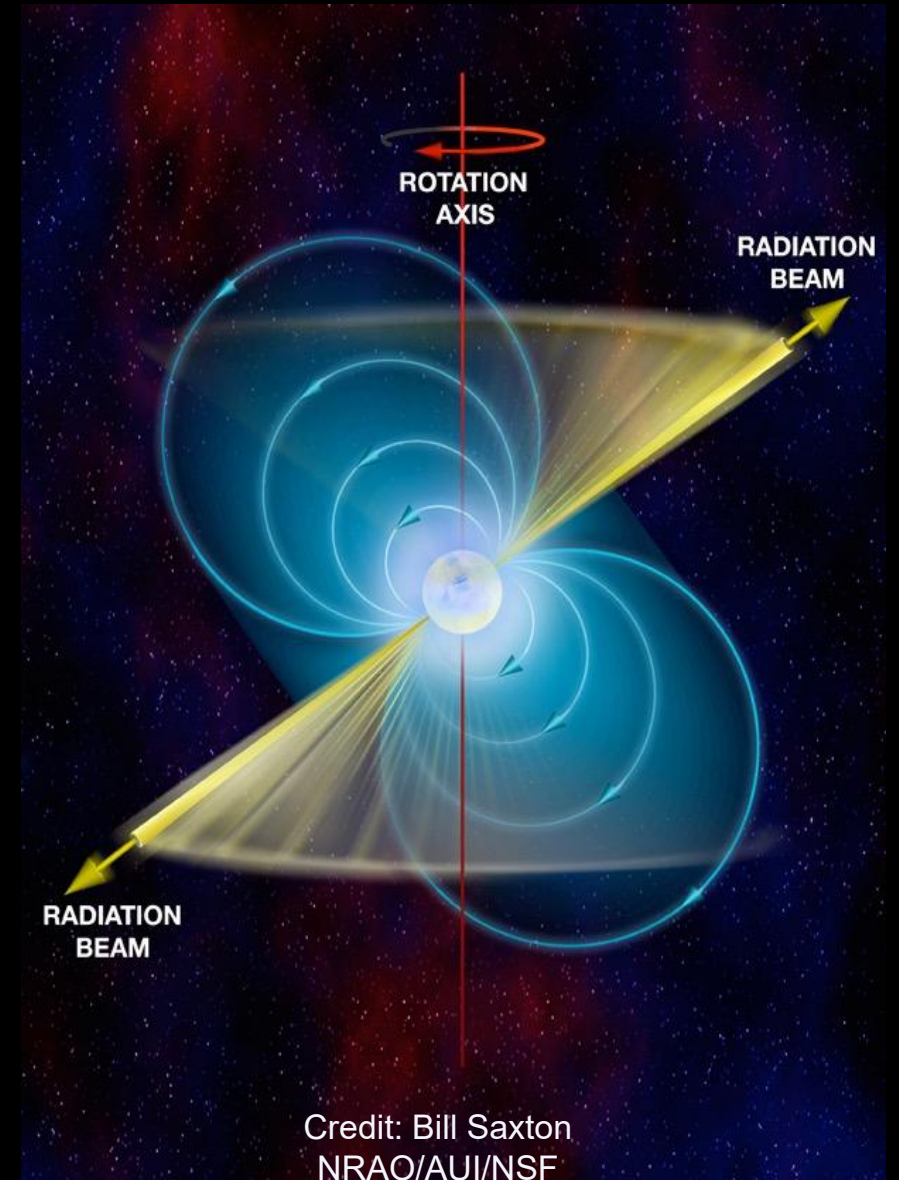


<https://www.nature.com/articles/nature02124>

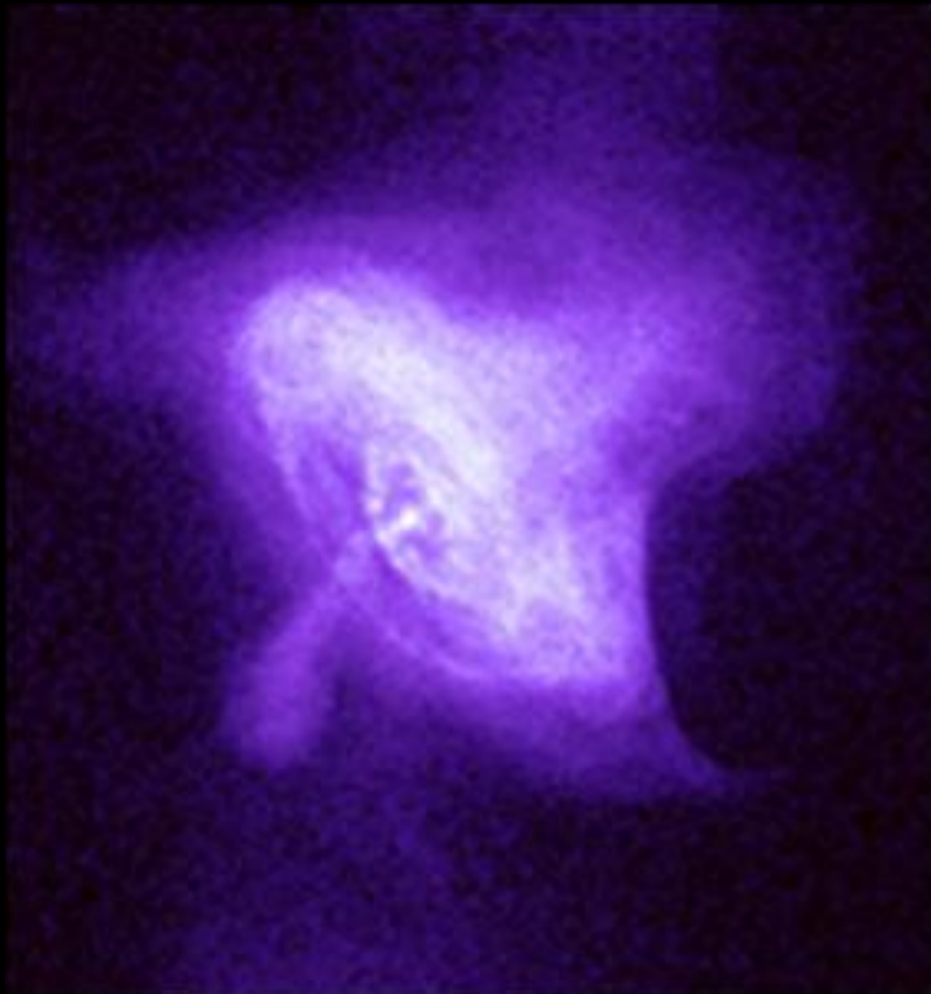


중성자별 (a neutron star)

- 밀집성 중 하나, 무거운 별의 마지막 진화 단계 ($8-25 M_{\text{sun}}$)
- 질량~ 태양질량 ~ 태양질량 2.5배 정도
- 지름 ~ 10-14 킬로미터, 질량은 태양정도
- 표면온도: $\sim 10^5-6 \text{ K} \rightarrow$ 흑체복사: soft X-ray source ($\sim 0.1 \text{ keV}$)
- 구성성분(particle composition): 원자핵(nuclei), 자유 중성자(free neutrons), 양성자(protons), 전자(electrons) 등의 입자들과 이들간의 상호작용을 고려하여 상태방정식(Equation of State, EOS)을 적을 수 있다.



펄사 (a pulsar)



게자리 펄서 (Crab pulsar)
찬드라 위성망원경이 찍은
X-ray 이미지 (NASA)

매우 강한 자기장을 띄고 빠르게 자전하는 **중성자별**
관측 신호에 따른 명칭, 이 강의에서는 rotational-
powered pulsar를 주로 펄사라 부름.

자기축(자축)과 자전축이 나란하지 않은 경우
자축 부근에서 방출되는 복사 빔이 등대와 같이 중성자
별의 자전 주기와 동일한 주기를 가지고
펄스 신호로 관측됨

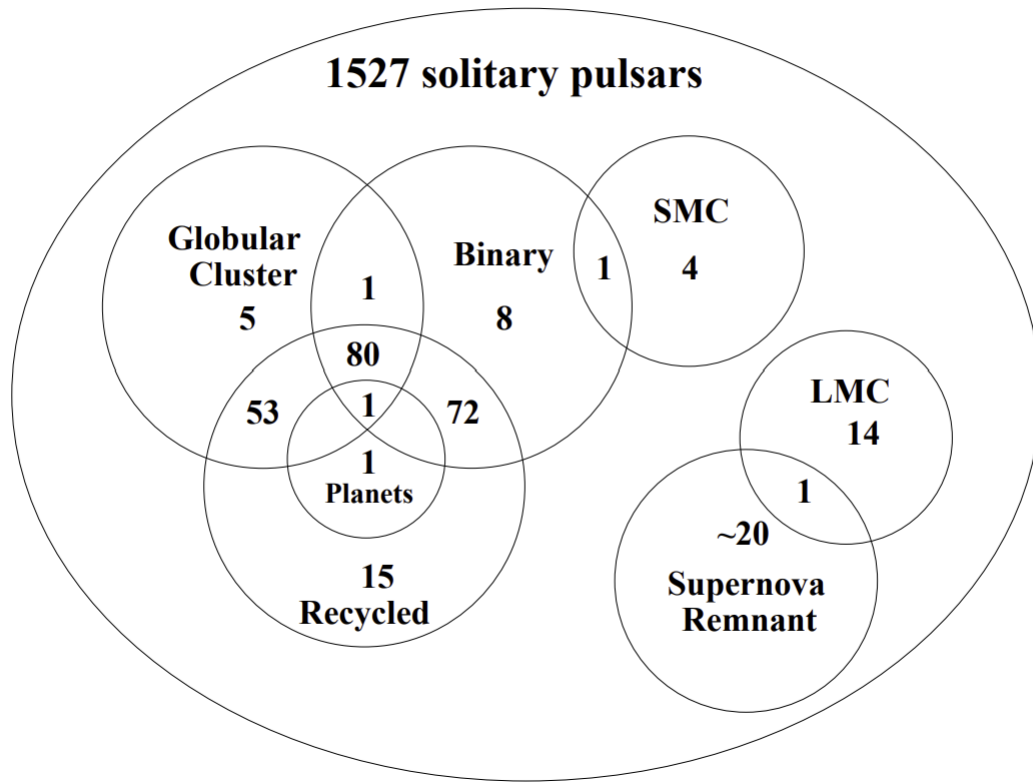
즉, 펄사 빔의 도착 주기 ~ 중성자별의 자전 주기

- 표면 (dipole) 자기장: $10^8 \sim 10^{15}$ G (마그네타 후보)
- 자전 주기: ms ~ 10 s
- 종류: **전파 펄사** 엑스선 펄사, 감마선 펄사 관측으로 확인

게자리 펄사와 같이 전파 ~ 감마선 모든 스펙트럼에서 강한 펄스
신호를 방출하는 경우도 있고, 특정 주파수 대역에서만 펄스 신호
가 관측 가능한 경우도 있음.

[NOTE] 특정 대역에서 펄스가 관측되지 않는다고 해서 그 대역의 복사가 존재하지 않는다고 단정할 수 없음. 망원경의 감도, 관측 시간, 에너지 대역, 빔의 방향, 성간 흡수와 산란 등에 따라 검출 여부가 달라짐₄

ATNF pulsar catalogue 2.8.1 기준 4393개 전파 펄사 발견
<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>



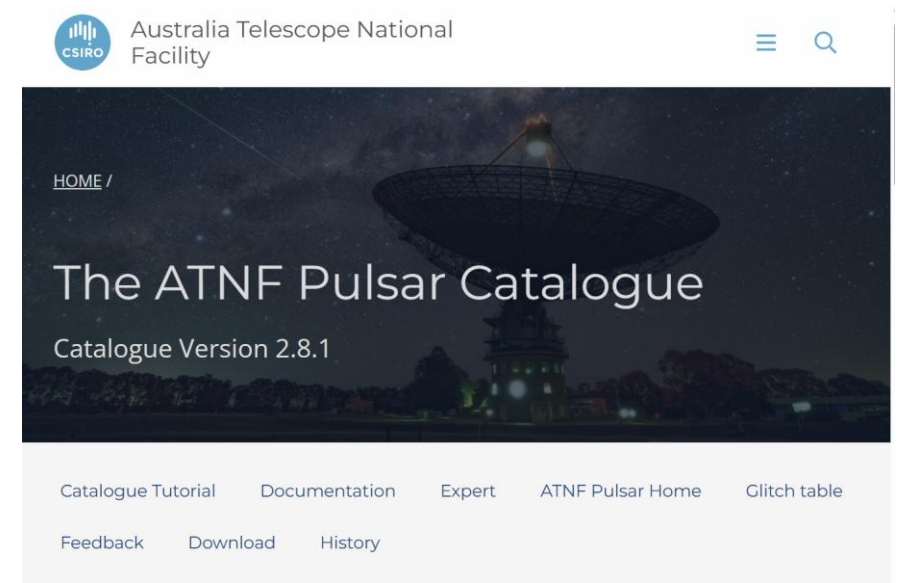
ATNF Pulsar Catalogue

Catalogue Version: 2.8.1

#	PSRJ		F0 (Hz)		DM (cm ⁻³ pc)	
4391	J2355+04	ttk+24	1.044	4	ttk+24	2
4392	J2355+1523	dcm+23	0.91374580877	9	dcm+23	10
4393	J2355+2246	acd+19	0.54318721077	9	acd+19	7

2008 LLR by D. Lorimer

<https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2005-7>



연구/관측 대상으로서의 펄사 vs 중성자별 구분

- 일반적으로 모든 펄사는 중성자별이다 → 참
- 중성자별 중 복사 빔을 펄스 형태로 방출하는 것만 펄사로 관측이 가능하다 → 참
- 우주에 존재하는 [펄사의 수 $\ll$ 중성자별의 총 개수]
- 우리 은하에 존재하는 중성자별 개수 → 무거운 별의 개수, 형성률, 진화단계, 은하의 나이 등을 고려하여 추정 → 10^{8-9} 개 (cf. 우리 은하에 존재하는 일반적인 별의 개수 : 10^{11} 개)
- 중성자별 관측 방법 : 빛 (모든 스펙트럼 가능하나 전파, 엑스선, 감마선이 특히 펄사 관측에 유리)
- 우리 은하 및 주변에서 발견된 대다수의 펄사는 전파 펄사
- 단독 펄사가 80% 정도이고 binary도 10-20%

중력파 존재의 간접 증거 ← 전파 펄사 타이밍 관측 헐스-테일러 펄사 (PSR B1913+15) 1975년 논문



The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.

Share this: 7

The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse
Prize share: 1/2

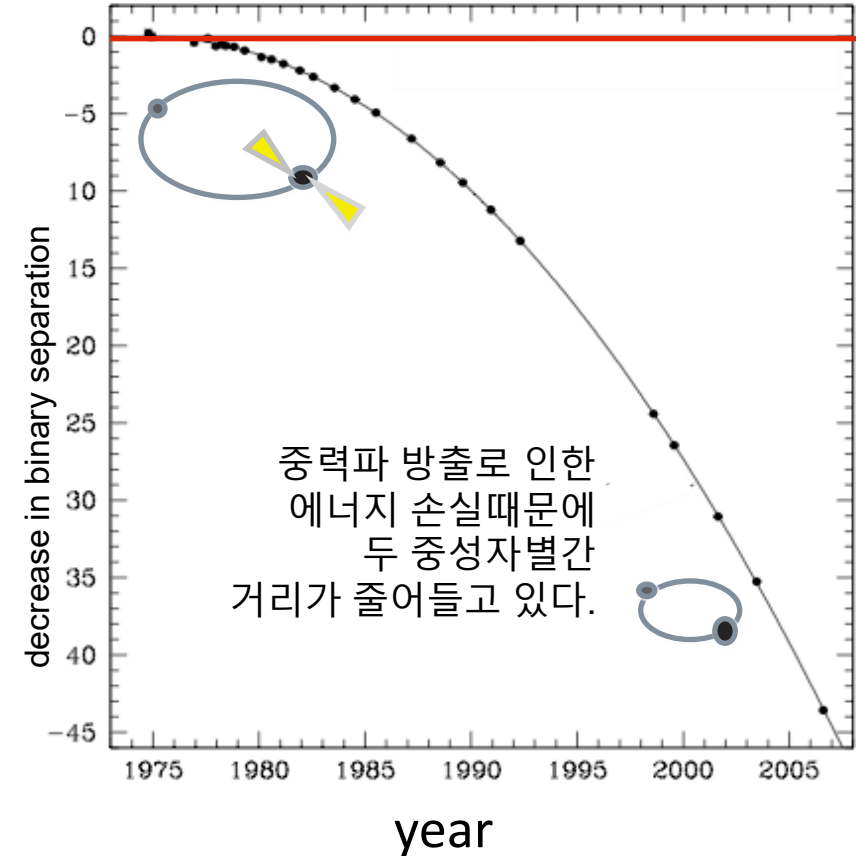


Joseph H. Taylor Jr.
Prize share: 1/2

For the discovery of a new type of pulsar,
a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

쌍성계 궤도변화가 없다면 관측 데이터가
붉은색 수평선위에 놓여있을 것이다.



GR prediction (line) and observation (points) are well
consistent by less than a few %

중성자별은 강한 중력파원이다

- 밀집성/고중력천체 compact object
 - 백색왜성, 중성자별, 블랙홀

- compact binary coalescences (CBCs)
merging binaries consisting of WD/NS/BH

“밀집쌍성”

아래에서 발견된 NS들은 “외부은하 중성자별” 펄사 여부 알수 없음

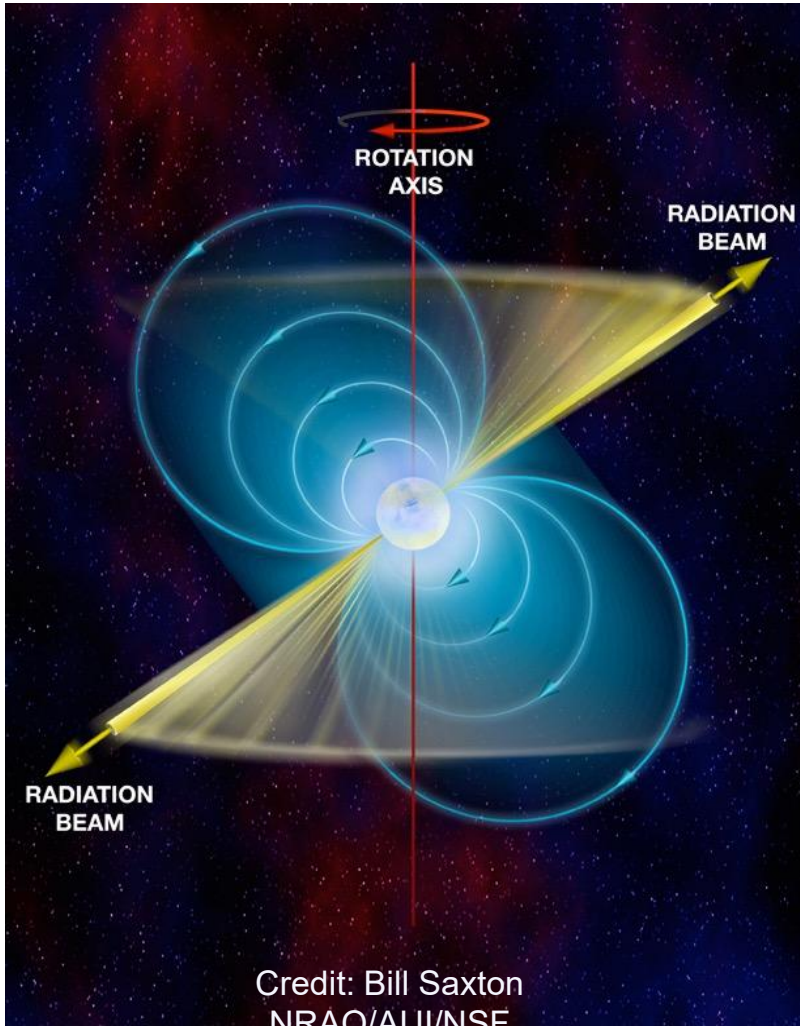
Types of known CBCs in GW transient catalog (as of GWTC-5)

NS-NS (GW170817, GW190425)

BH-BH (binary black holes = BBHs) “stellar-mass” black holes

NS-BH candidate (GW200105, GW200115)

중성자별이 흥미로운 연구대상인 이유



입자물리학, 핵물리학, 천체물리학, 중력이론
중성자별 상태방정식 및 구조,
여러 물리량 (ellipticity, moment of inertia)
중성자별 생성기작, 진화
고자기장 환경하에서의 복사 방출 기작
고중력 환경하에서의 극한 물성/입자 상호작용
특이한 입자의 존재탐색 (quark star)

천체물리학, 중력이론
모은하내 형성율, dynamics

천문관측(빛의 전 스펙트럼, 중력파)
전파 관측(펄사 타이밍 포함)
엑스선, 감마선 등 고에너지 빛 관측 (위성 사용)
중력파 (mHz ~ kHz 에서는 중력파원
nHz에서는 관측도구로 활용가능)

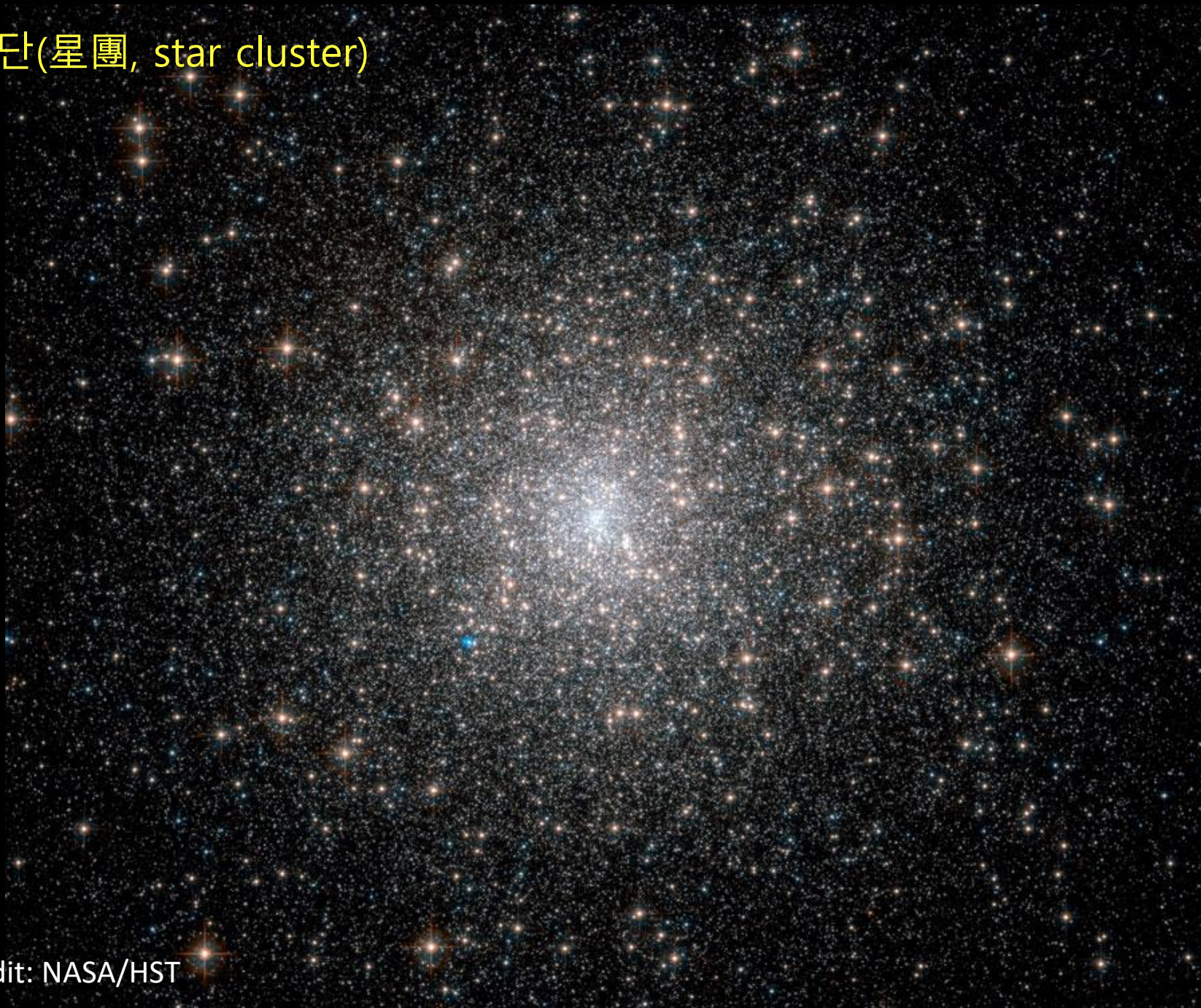
별부터 우주

천문관측

별(星, star)



성단(星團, star cluster)



Credit: NASA/HST

빛으로 본 우주 (visible/near IR)

은하(銀河, galaxy)

[Basic units in astronomy]

- ❖ mass : 1 solarmass (M_{sun} or $M_{\odot}$) = 2×10^{33} kg
- ❖ distance: 1 parsec (pc) = 3×10^{16} m
1 light-year (yr) = 3.26 pc

안드로메다 은하

(Andromeda galaxy)

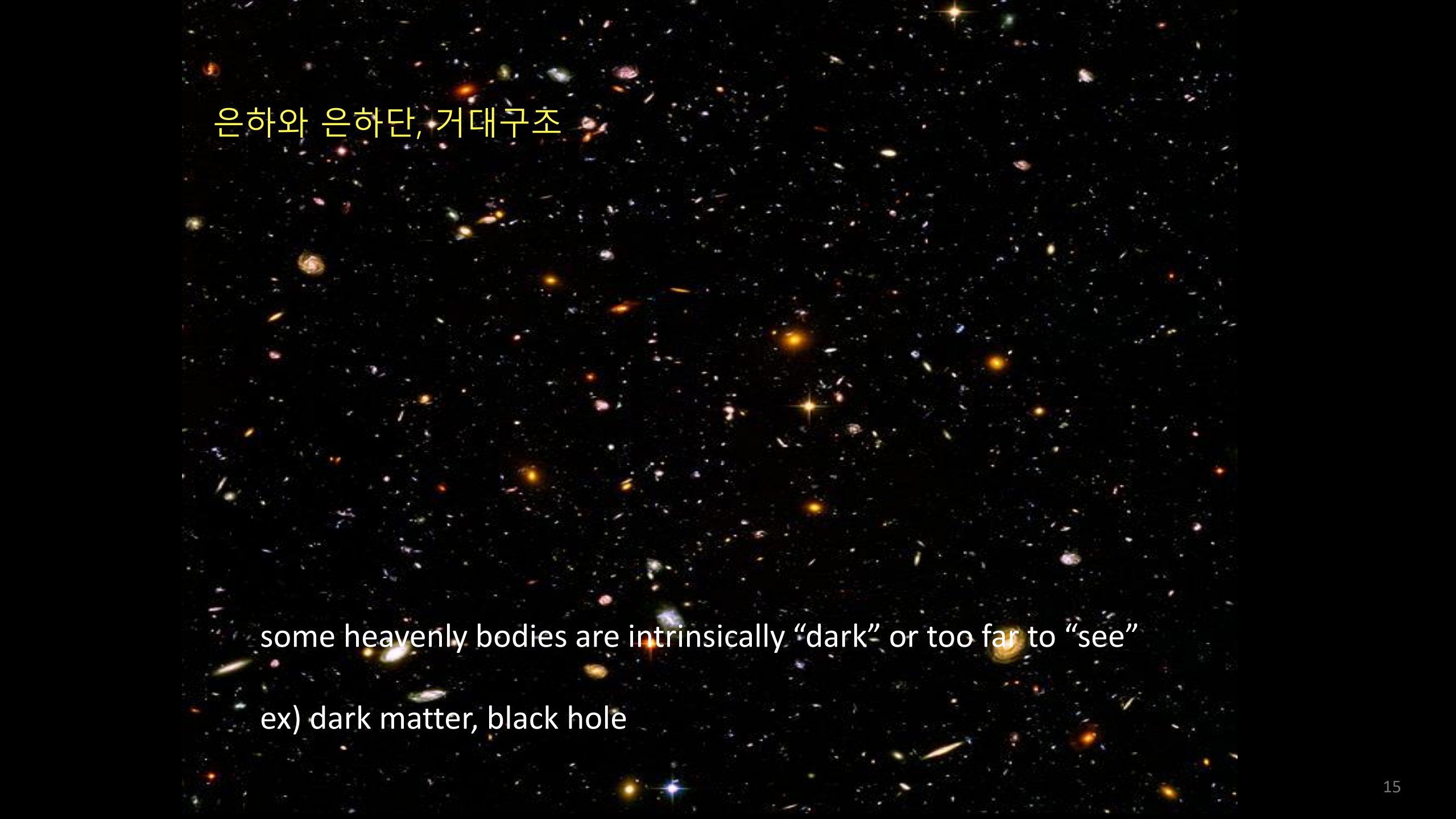
nearest galaxy from the milky way ($d \sim$ almost 1 Mpc)

2.537 million light years away

$(2.4 \times 10^{19} \text{ km})$



Earth-Sun distance: $1.5 \times 10^8 \text{ km}$
size of our Galaxy: 50,000 light years



은하와 은하단, 거대구조

some heavenly bodies are intrinsically “dark” or too far to “see”

ex) dark matter, black hole

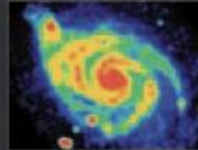
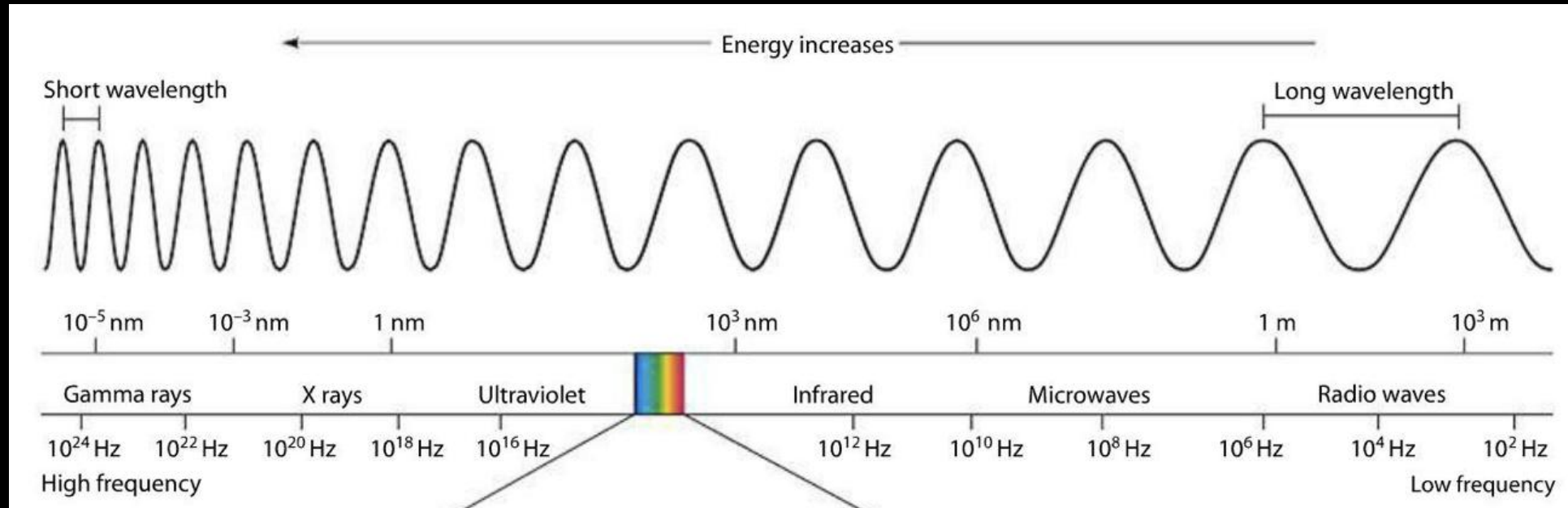
Gamma-ray Universe

("transients" = one-time strong emission of lights)

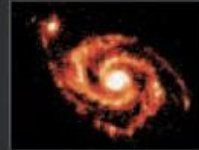


Pulsars are another examples of transients

light and astronomy



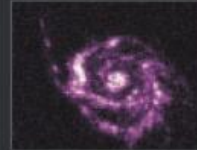
Radio



Infrared



Visible



Ultraviolet



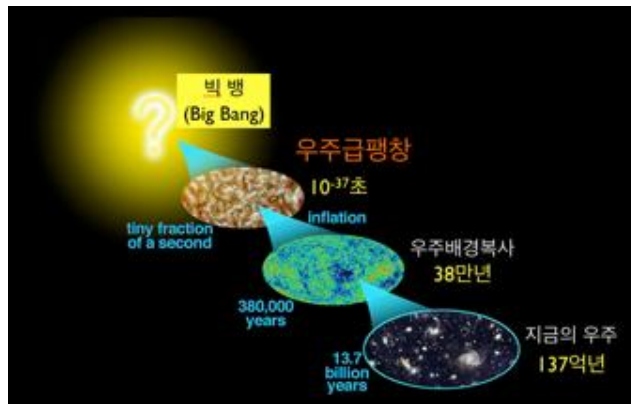
X-Ray

The Whirlpool Galaxy at different wavelengths

Scientists use a variety of telescopes in space and on the ground to measure the full range of electromagnetic waves emitted by celestial objects.

GW universe

early universe



black holes and
neutron stars
at cosmic distances



supernovae
(in Our Galaxy)



GW frequency: 10^{-16} Hz (early Universe) $\sim$ 10,000 Hz (supernovae)

Gravitational Waves (GWs) are “ripples” in spacetime.

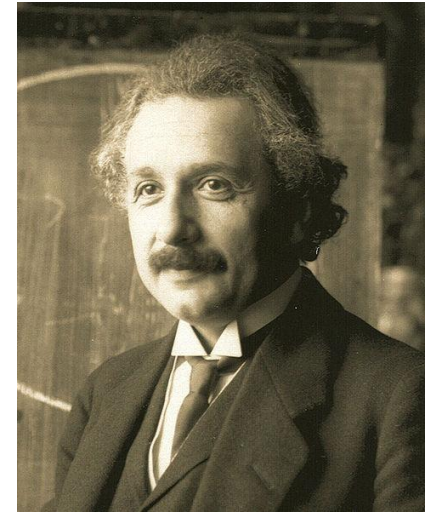
Accelerated mass with non-zero quadruple (or higher) moments perturbs spacetime.
The perturbation propagates outward from the “source” at the speed of light :

gravitational waves

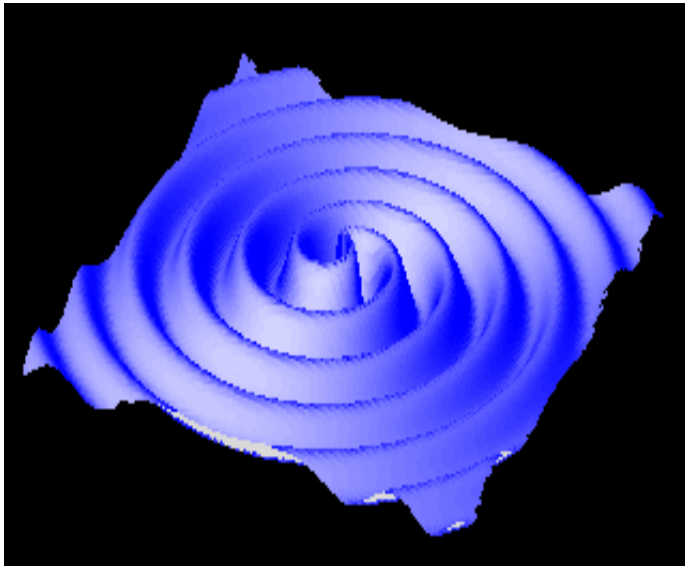
$$h_{ij}^{\text{TT}}(t, \mathbf{x}) = \frac{2G}{Rc^4} \ddot{I}_{ij}^{\text{TT}} \left(t - \frac{R}{c} \right)$$

$$I_{ij} = \int \rho(\mathbf{x}) \left(x_i x_j - \frac{1}{3} r^2 \delta_{ij} \right) d^3x$$

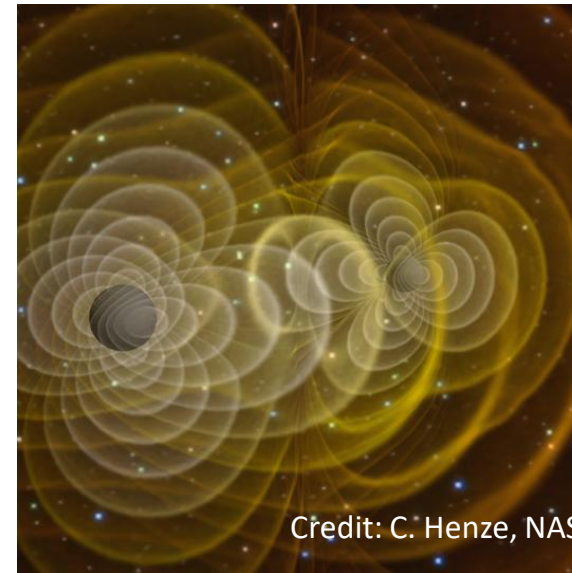
acceleration of the mass distribution



* metric = Minkowski + perturbation h



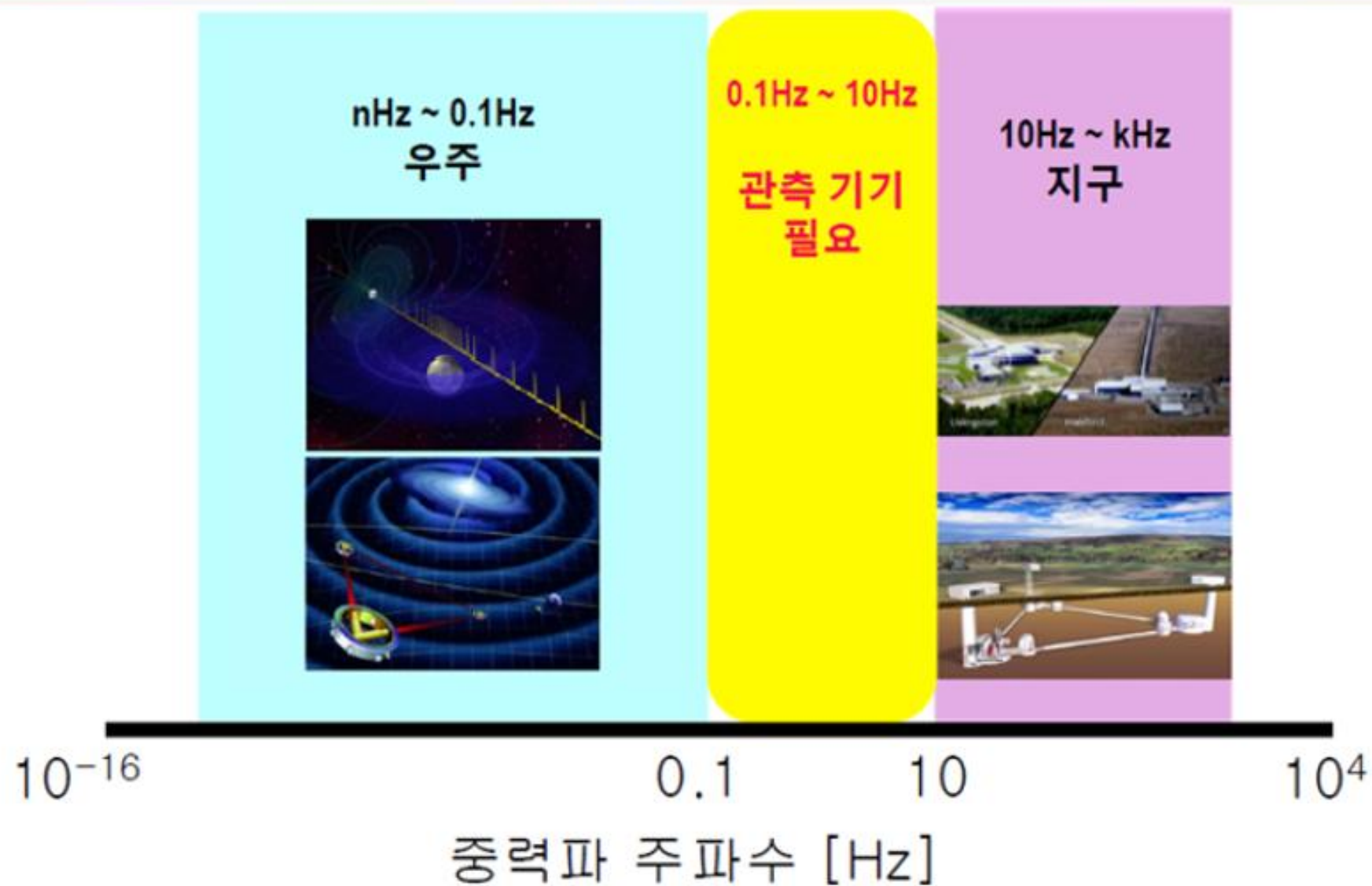
GWs emitted by “inspiral” motion of a binary



Credit: C. Henze, NASA

GWs emitted from a merging BH-BH system

우주 중력파 주파수: 10^{-16} Hz (초기 우주) ~ 10,000 Hz (초신성 폭발)



Masses of compact objects as GW sources

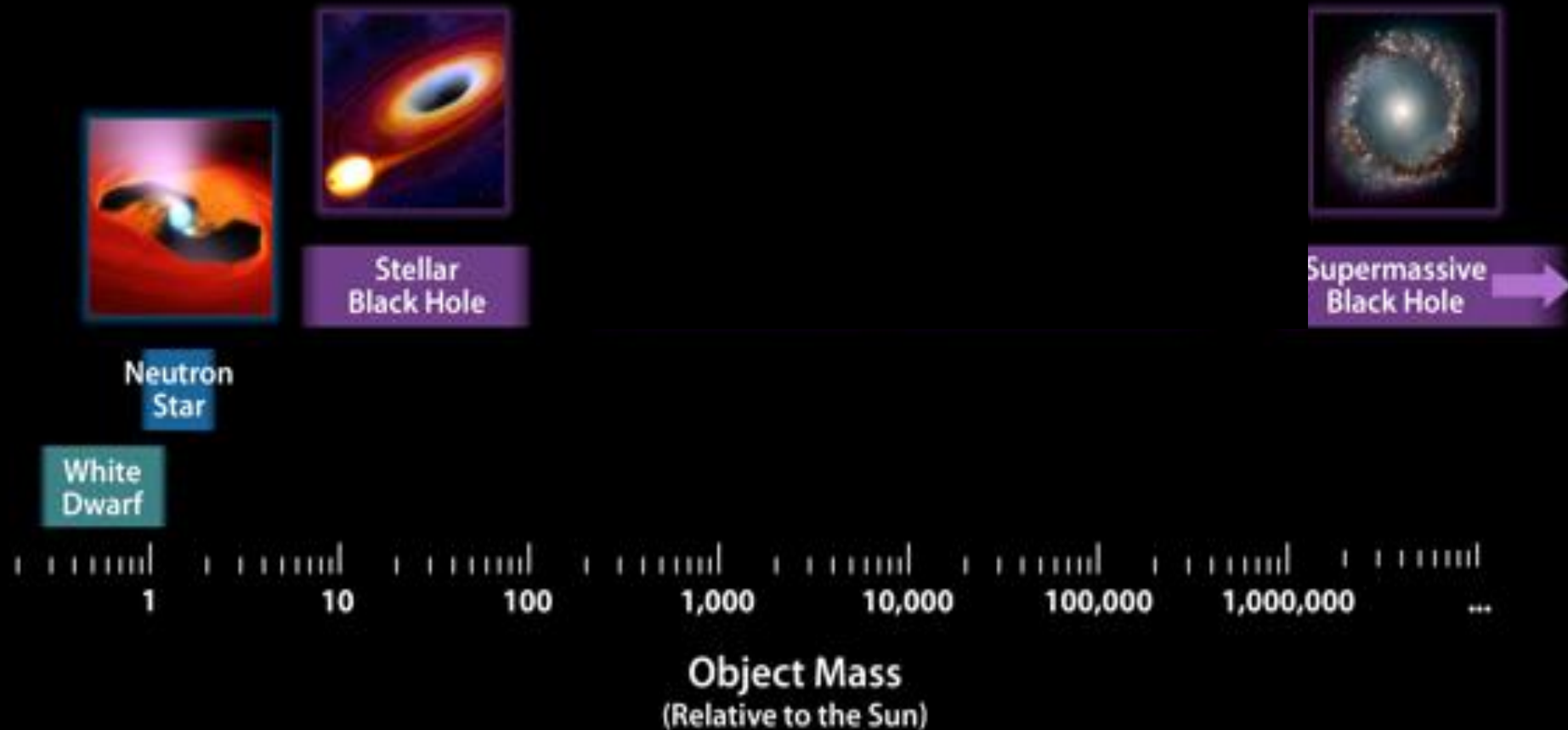
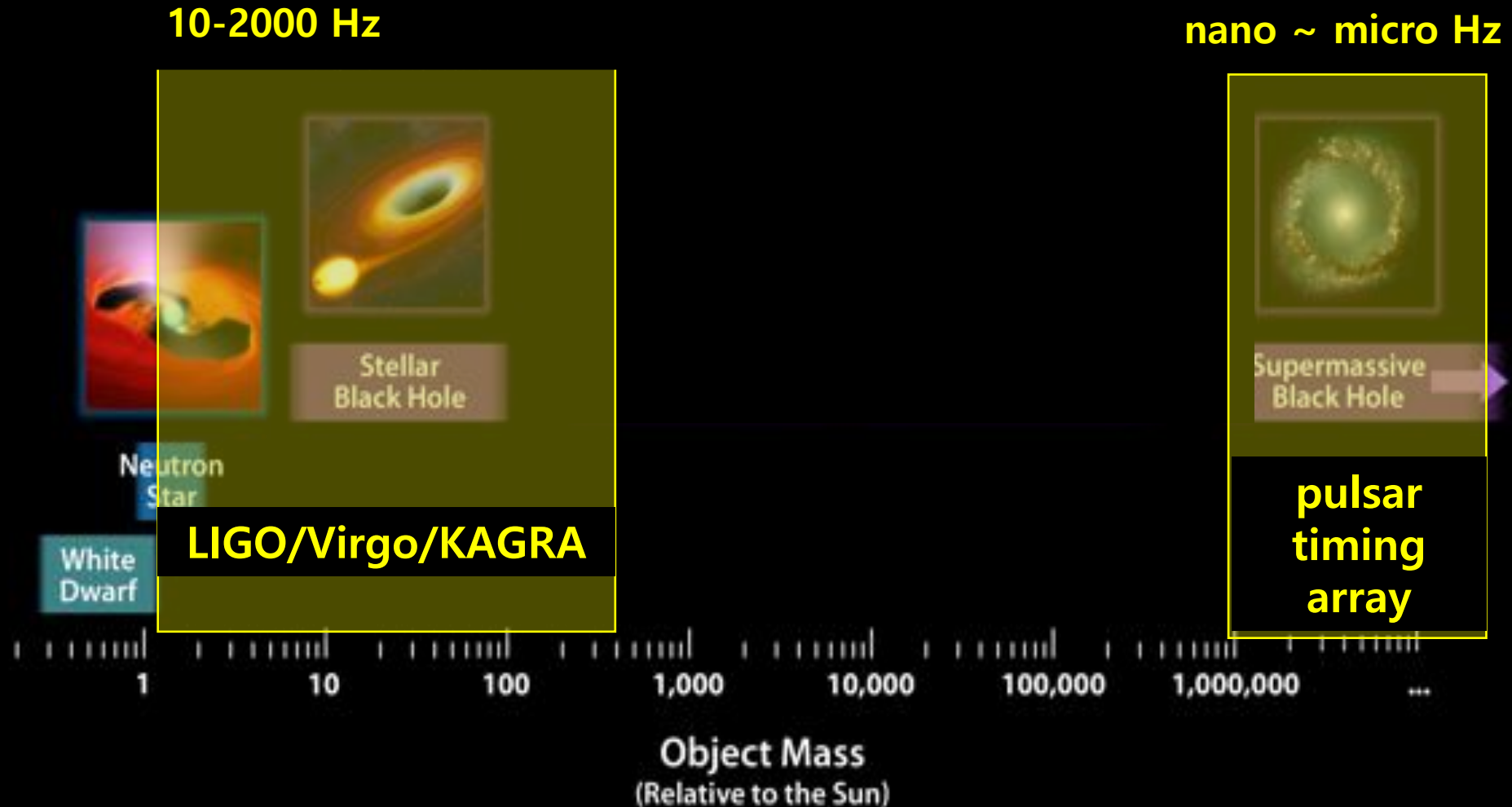


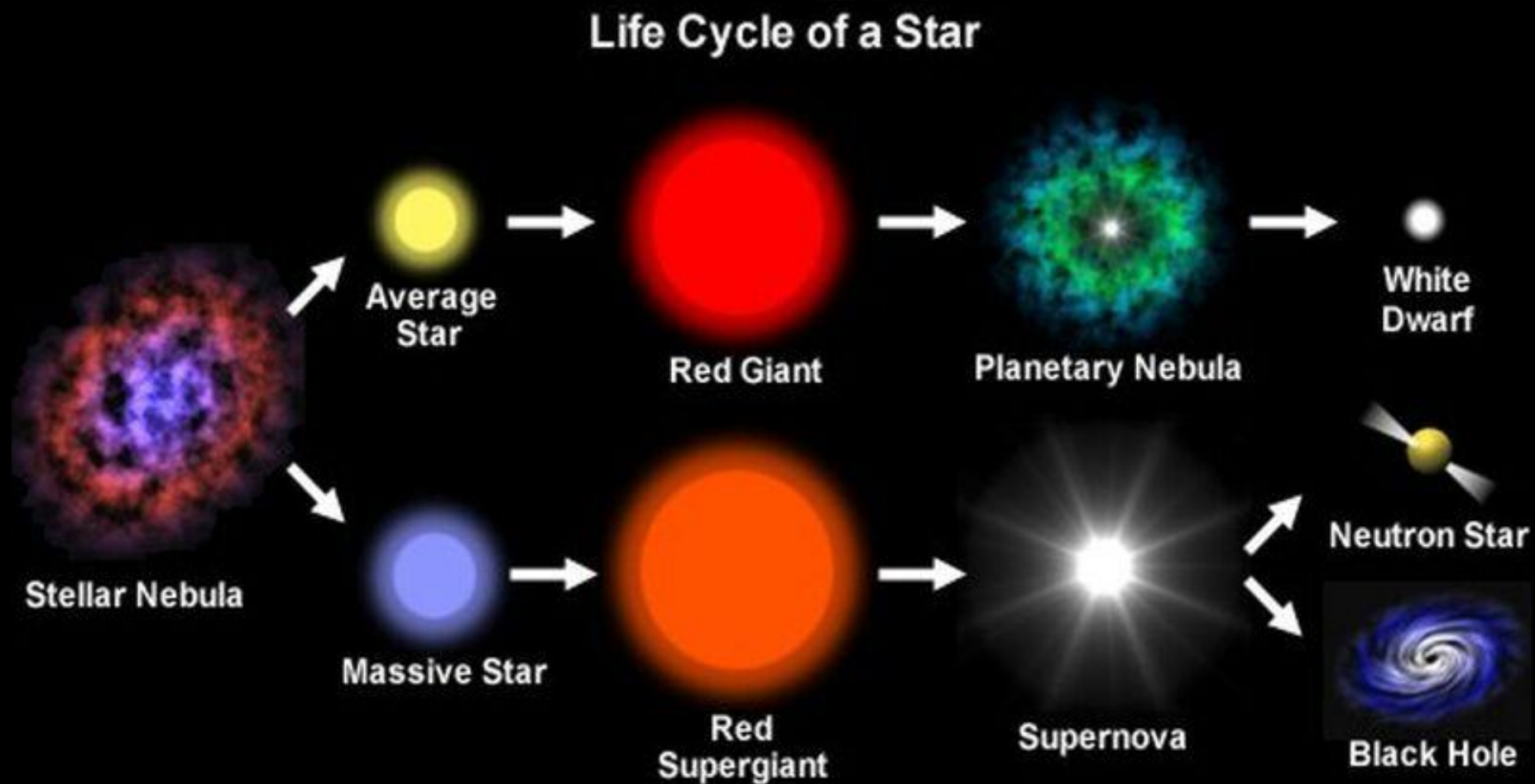
Image credit: NASA/JPL-Caltech

Masses of compact objects as GW sources

GW frequency = 2 x orbital frequency
frequency $\leftarrow$ Kepler's law



무거운 별의 마지막 진화 단계



중성자별 천체물리학

몇 가지 주요 개념들

밀집성(compact object)과 Compactness

천체의 중력이 얼마나 강한지를 나타내는 무차원(dimensionless) 양이다.

$$C = \frac{GM}{Rc^2}$$

- G : 중력상수 (Gravitational Constant)
- M : 천체의 질량
- R : 천체의 반지름
- c : 빛의 속도 (Speed of Light)

Compactness of an astrophysical object 가 크다
→ 의미는?

- 중력이 강하다.
- 시공간 곡률(spacetime curvature)이 크다.
- 일반상대론 적용 필요하다

밀집성(compact object)과 Compactness

천체의 중력이 얼마나 강한지를 나타내는 무차원(dimensionless) 양이다.

$$C = \frac{GM}{Rc^2}$$

- G : 중력상수 (Gravitational Constant)
- M : 천체의 질량
- R : 천체의 반지름
- c : 빛의 속도 (Speed of Light)

지구(Earth)

- 질량: 5.97×10^{24} kg
- 반지름: 6371 km

$$C \simeq 6.9 \times 10^{-10}$$

중성자별(Neutron Star)

가정

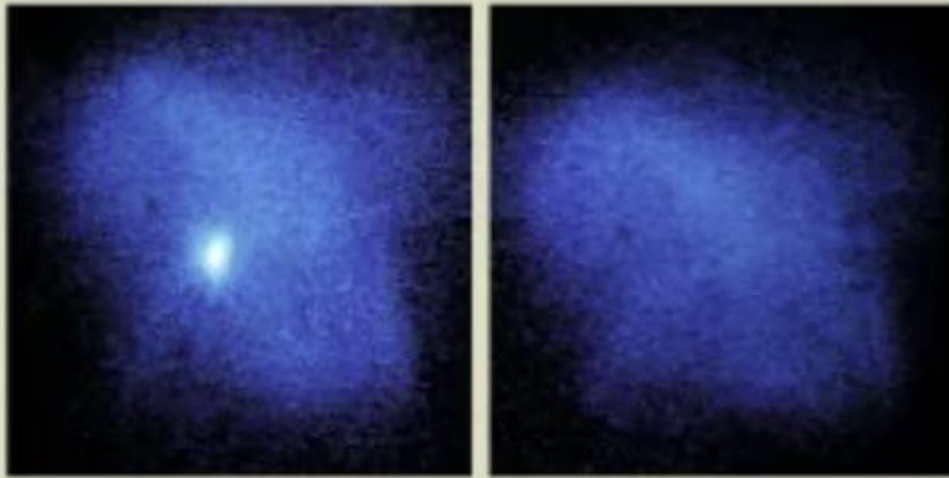
- 질량: $1.4 M_{\odot}$
- 지름: 20 km
- 반지름: 10 km

TOV 방정식으로 계산되는 전형적인 중성자별의 경우

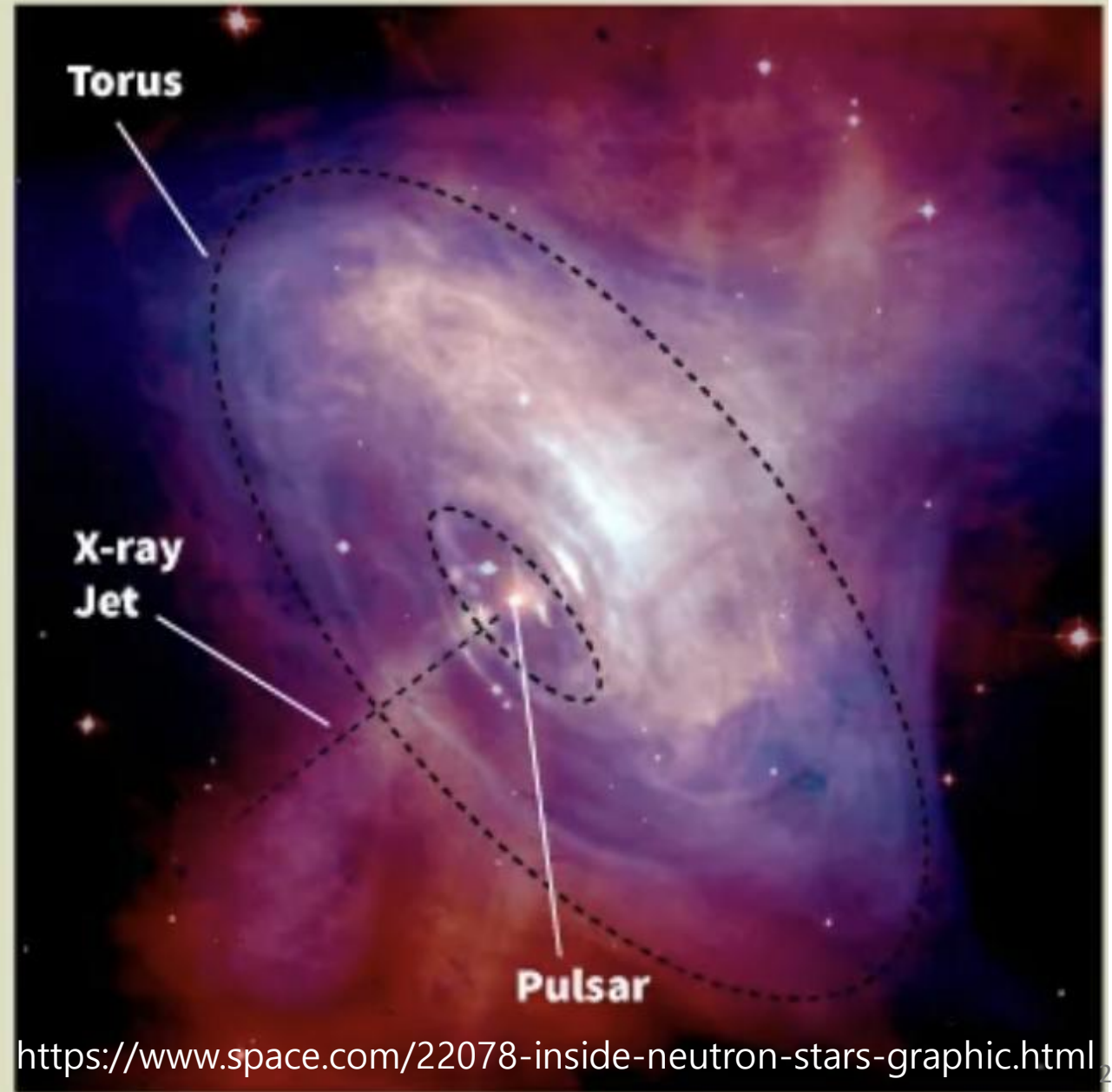
$$C \simeq 0.21$$

PULSAR: A FLASHING NEUTRON STAR

Pulsars are spinning neutron stars that emit a **narrow radiation beam**. The beam is offset from the pulsar's spin axis, sweeping across space like a lighthouse. As the pulsar rotates, the beam may sweep across the Earth, appearing to astronomers as a flashing object. If the beam does not point in the direction of Earth, it cannot be seen. All pulsars are neutron stars, but not all neutron stars are pulsars.



ABOVE: FROM EARTH, THE CRAB NEBULA PULSAR APPEARS TO BLINK "ON" AND "OFF." RIGHT: CRAB NEBULA PULSAR IN DETAIL (PHOTOS: NASA)



중성자별 연구에는 **상태방정식**이 중요한 연구목적이기도 하고 기본 방정식이기도 하다

상태방정식 (Equation of State, EOS) : $P=P(\rho, T)$ $P=P(\rho, T, \{X_i\})$

- 압력과 밀도, 온도, 조성(composition) 사이의 관계를 정의한다.
- 천체 내부 물질의 미시적 성질(microphysics)을 거시적 구조(macroscopic structure)와 연결하는 핵심 방정식
- 중성자별에서는 핵물질(nuclear matter)의 EOS가 최대질량, 반지름, 조석변형성(tidal deformability)을 결정

중성자별 상태방정식

- 상대론적(relativistic) 핵물질 (nuclear matter)의 열역학적 물리량사이의 관계를 정의하는 함수
- 상태방정식 기술에 필요한 물리량: 압력 P , 온도(temperature, T), 에너지밀도(energy density) ϵ ,
바리온 개수 밀도(baryon number density) n , 구성요소(particle composition)

EOS와 가장 밀접한 6가지 항성구조 방정식

1. 정역학 평형(Hydrostatic Equilibrium)

- 압력 기울기를 결정하므로 EOS가 직접 들어간다.

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

2. 질량보존(Mass Conservation)

- 밀도 분포가 EOS를 통해 압력과 연결된다.

3. 에너지 생성(Energy Generation)

- 일반적인 중성자별에서는 거의 영향을 받지 않는다.

4. 에너지 수송(Energy Transport)

- 열용량(specific heat), 열전도도(thermal conductivity) 등이 EOS와 관련된다.

5. 상태방정식(Equation of State)

- EOS 자체이다.

6. 경계조건(Boundary Conditions)

- EOS와 직접 연결되지는 않지만 전체 구조를 결정하는 과정에서 함께 사용된다.

중성자별의 구조를 계산할 때 가장 중요한 방정식은

- 질량보존
- TOV 방정식
- EOS

의 세 가지이다.

중성자별 상태방정식(EOS)을 이해하기 위해 특수상대론(Special Relativity)이 필요한가?

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

➔필요하다

[이유]

- 중성자별 내부에서는 핵자의 페르미 운동량(Fermi momentum)이 매우 크므로 입자의 속도가 광속(speed of light)에 가까워진다.
- 전자(electron)는 거의 완전히 초상대론적(ultrarelativistic)이다.
- 중성자(neutron) 역시 중심부에서는 상대론적 운동을 한다.

운동량을 특수상대론 적용하여 계산할 때, 천체의 거시물리량중 직접 영향을 받는 것은? 속도 (분포), 압력, 온도

중성자별 상태방정식(EOS)을 이해하기 위해 특수상대론(Special Relativity)만 적용하면 충분한가?

➔ 불충분하다. 중성자별은 일반상대론을 적용해야 정확히 기술가능한 천체

[이유]

- EOS 자체를 계산하는 데에는 특수상대론이 필요하다.
- 그러나 중성자별 전체 구조(질량-반지름 관계)를 계산하려면 일반상대론(General Relativity)이 필요하다.

즉,

- 미시적 물리(Microphysics): 특수상대론 + 양자역학(Quantum Mechanics) + 핵물리학(Nuclear Physics)
- 거시적 구조(Macrophysics): 일반상대론 + TOV 방정식

으로 구분할 수 있다.

Mass-radius curves of representative equations of state (EOS) of a neutron star

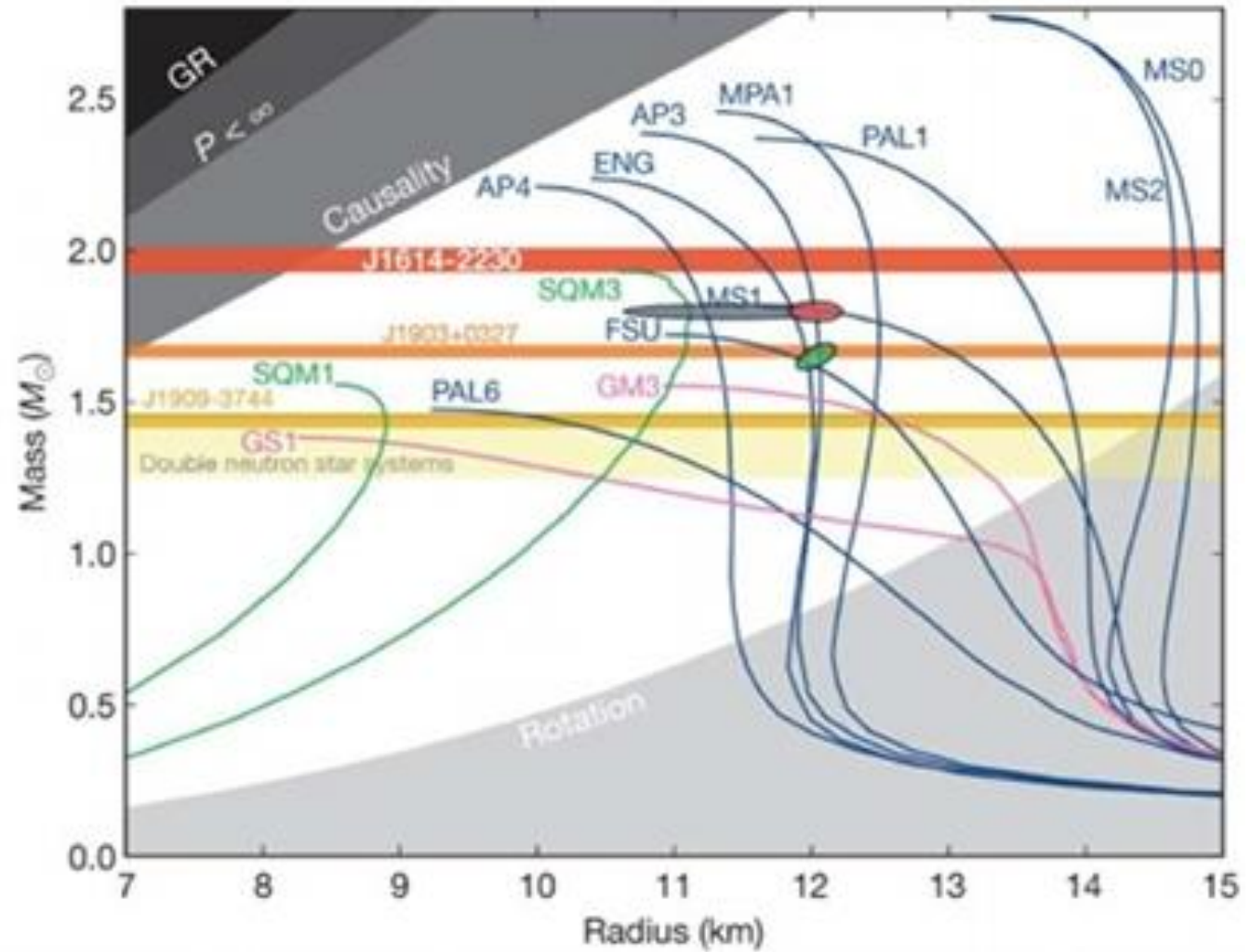
- 중성자별 반지름 vs 질량 그래프
- 곡선 하나하나가 다른 EOS 모델의 결과

무엇을 봐야하나?

- 최대/최소 반지름
- 최대/최소 질량
- Degeneracy between M and R

관측과의 비교

다른 밀집성과 공전하는 전파 펄사의 타이밍 관측으로 펄사(중성자별)의 질량을 상당히 정확히 측정할 수 있다.



<https://sci.esa.int/web/loft/-/49338-equation-of-state-for-neutron-stars>

The most massive neutron star mass estimates derived from pulsar timing

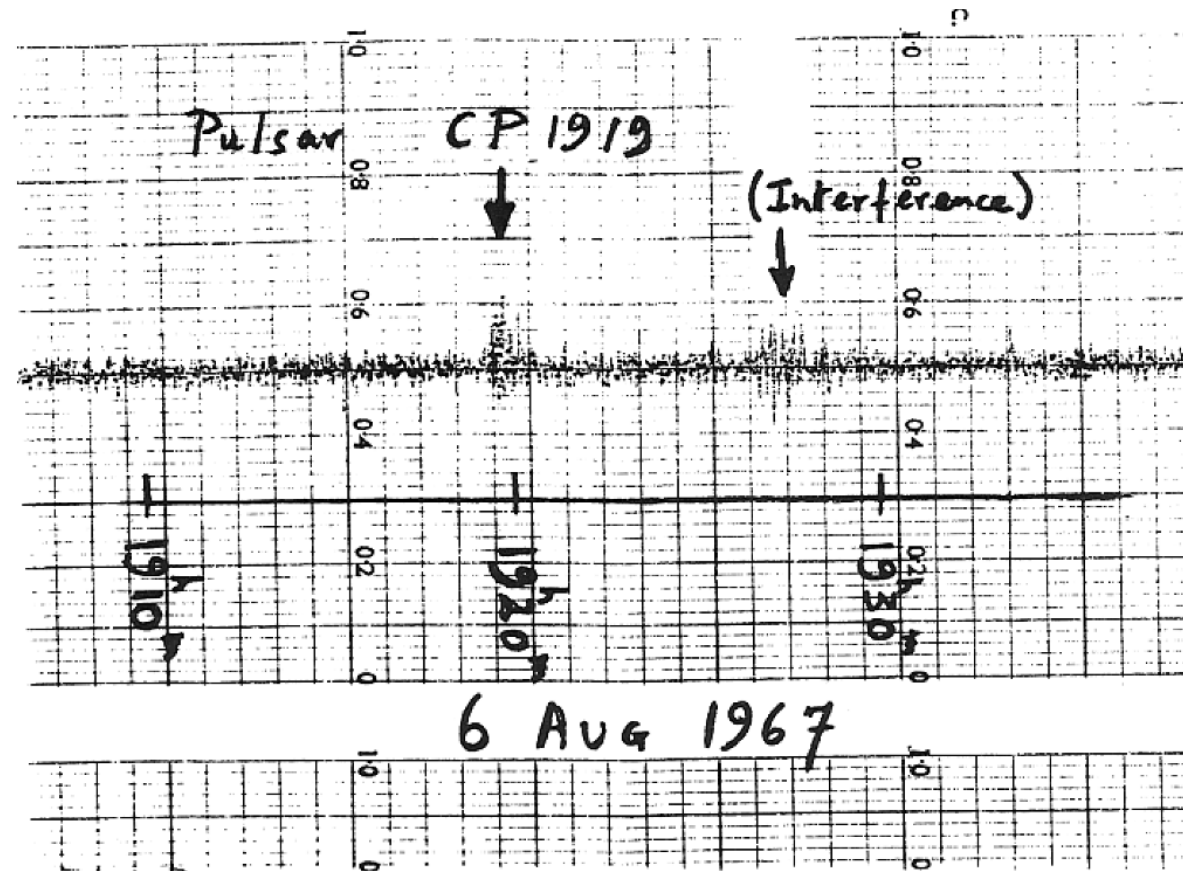
Below is a list of high-mass [neutron stars](#).

Name	Mass ($M_{\odot}$)	Distance (ly)	Companion class	Mass determination method	Notes	Refs.
PSR J1748-2021B	$2.548^{+0.047}_{-0.078}$	27,700	D	Rate of advance of periastron .	In globular cluster NGC 6440 .	[3] [1] [2] [4]
4U 1700-37	2.44 ± 0.27	$6,910 \pm 1,120$	O6.5Iaf ⁺	Monte Carlo simulations of thermal comptonization process.	HMXB system.	[5] [6]
PSR J2017-1614	2.4 ± 0.6	4,570	Substellar object		Black widow pulsar, in a tight 2.3 hour binary.	[7]
PSR J0952-0607	2.35 ± 0.17	3,200–5,700	Substellar object	Radio-measured Shapiro delay	Black widow pulsar. Fastest spinning galactic pulsar.	[8]
PSR J1311-3430	2.15–2.7	6,500–12,700	Substellar object	Spectroscopic and photometric observation.	Black widow pulsar.	[9] [10]
PSR J1600-3053	$2.3^{+0.7}_{-0.6}$	$6,500 \pm 1,000$	D	Fourier analysis of Shapiro delay's orthometric ratio .		[11] [12]

11 pulsars with mass estimates larger than $2 M_{\text{sun}}$

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_massive_neutron_stars

전파 펄사 관측



전파 펄서 관측 기본: 전파 망원경 종류

망원경 개수 기준

- Single dish 단일경

➔ 큰 전파 망원경 1대

- Interferometry array 간섭계

➔ 작은 전파 망원경 여러 대

[목적] 가능한한 “큰 눈” 구현



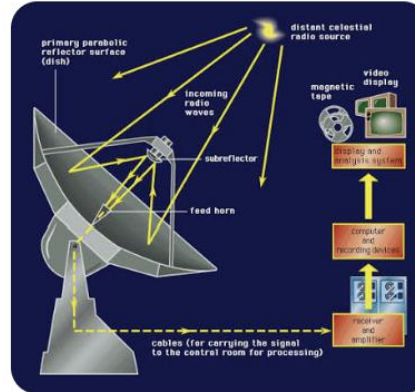
What are Radio Telescopes? – National...
National Radio Astronomy Observatory



Radio telescope | Images, Definition, &...
Britannica



List of radio telescopes - Wikipedia
Wikipedia



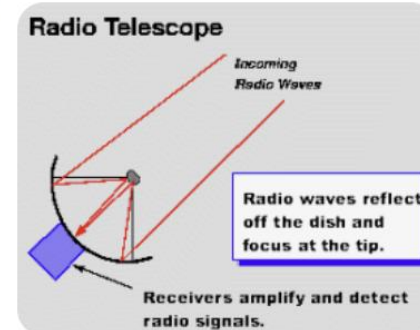
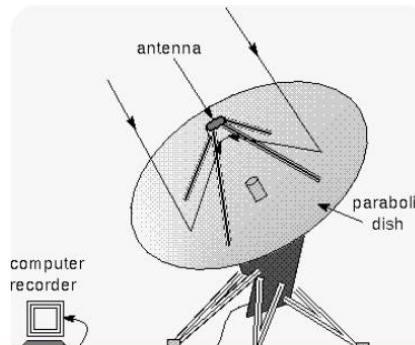
Radio Telescope
pages.uoregon.edu



Biggest radio telescope on Earth ready t...
NS New Scientist



Radio telescope - Simple English...
Simple Wikipedia



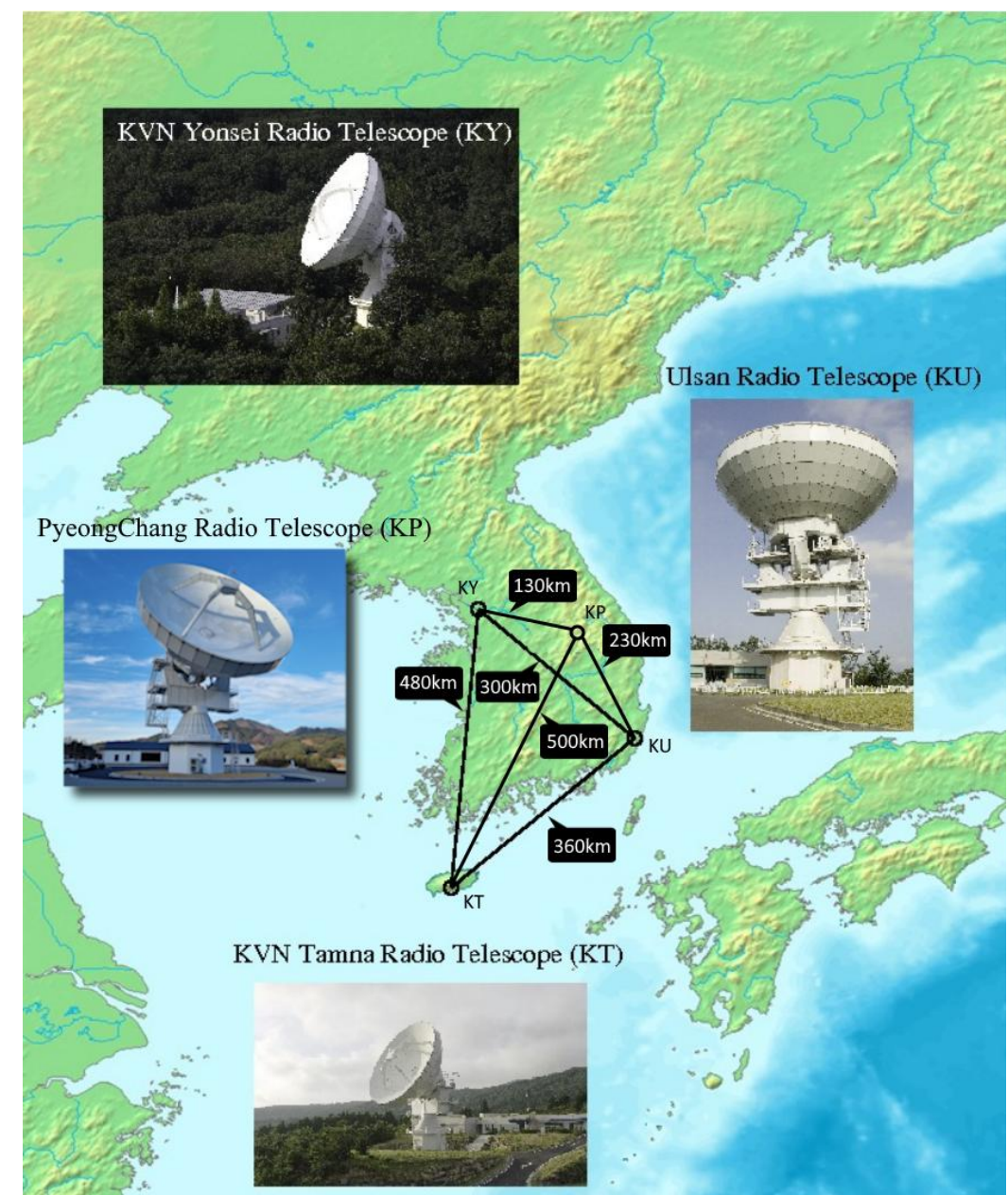
What are Radio Telescopes? – National...
National Radio Astronomy Observatory



The History of the Radio Telescope - Mini...
Mini-Circuits Blog

간접계 예:

KVN (Korean VLBI Network) 한국우주전파관측망



https://radio.kasi.re.kr/kvn_ko/about_kvn.php

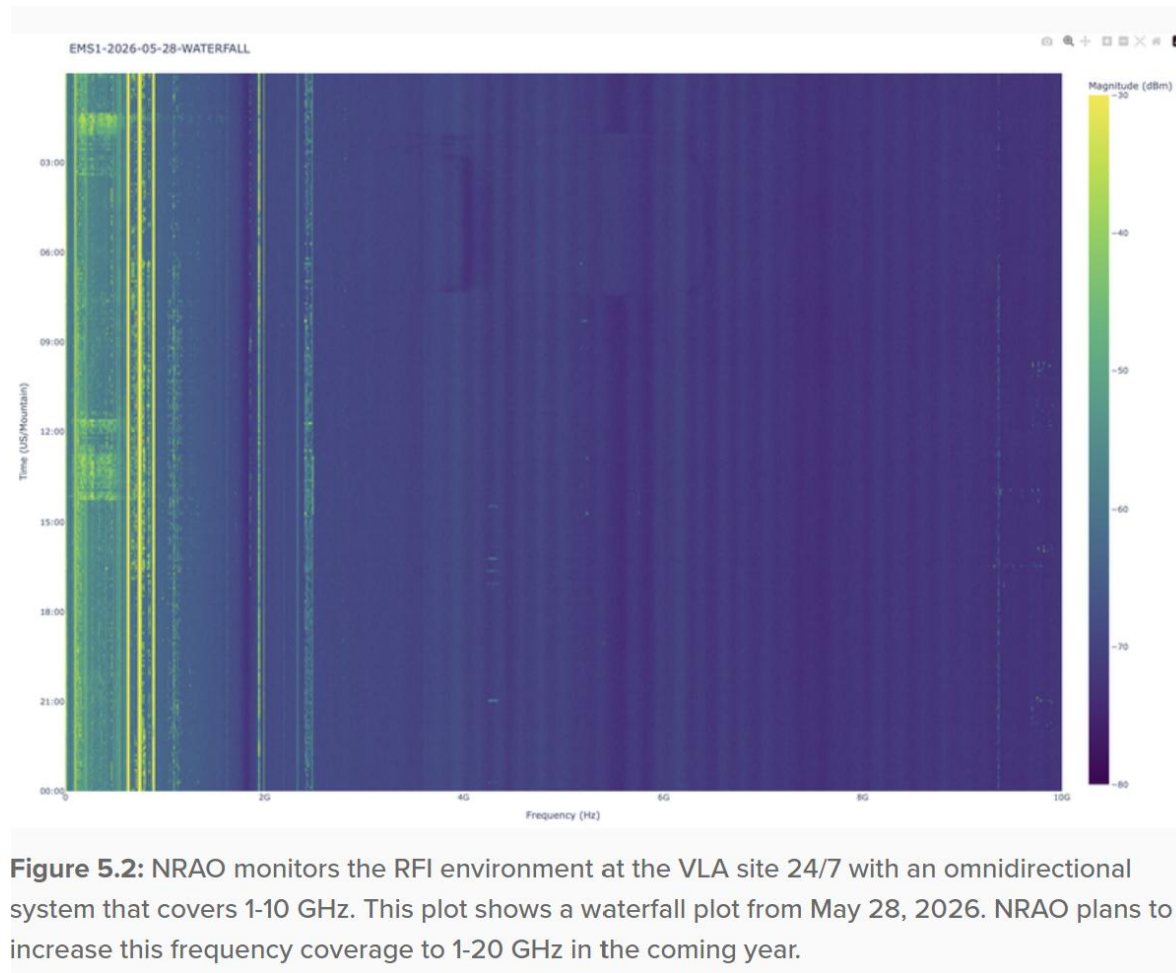
전파 펄서 관측 기본: 주파수별 관측 대역과 대표 망원경

구분	주파수	파장	대표 망원경
저주파 (Low-frequency Radio)	약 10–300 MHz	30–1 m	LOFAR, LWA, MWA, NenuFAR
중간 주파수 (Mid-frequency Radio)	약 300 MHz–3 GHz	1 m–10 cm	FAST, Parkes, GBT, MeerKAT, ASKAP
고주파 (High-frequency Radio)	약 3–100 GHz	10 cm–3 mm	Effelsberg, GBT, ALMA (일부), VLA
초고주파 (Millimeter/Submillimeter)	100–1000 GHz	3 mm–300 μ m	ALMA, NOEMA

L-band(약 1–2 GHz)는 성간산란이 비교적 작고 펄서의 전파 세기가 충분하여 대부분의 펄서 탐색과 정밀 타이밍에 가장 유리한 관측 대역이다.

그러나 최근 이동통신(4G/5G), 위성통신, GNSS 등 다양한 무선통신 시스템의 증가로 전파 주파수 간섭 Radio Frequency Interference(RFI)가 지속적으로 증가하고 있으며, 국제적으로 보호된 1400–1427 MHz 대역에서도 인접 대역의 강한 송신 신호에 의한 간섭(out-of-band emission, receiver saturation 등)이 전파천문학의 중요한 기술적 문제로 대두되고 있다.

전파 주파수 간섭 Radio Frequency Interference(RFI)



The most massive neutron star mass estimates derived from pulsar timing

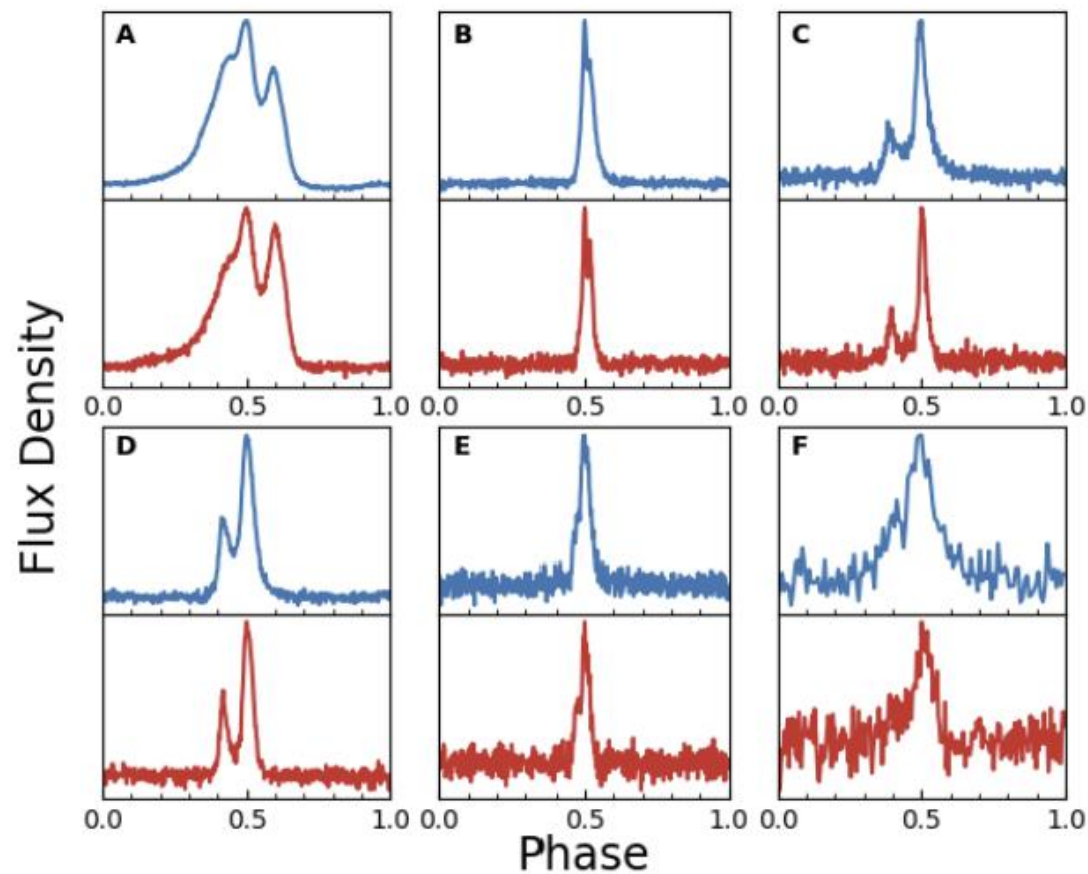
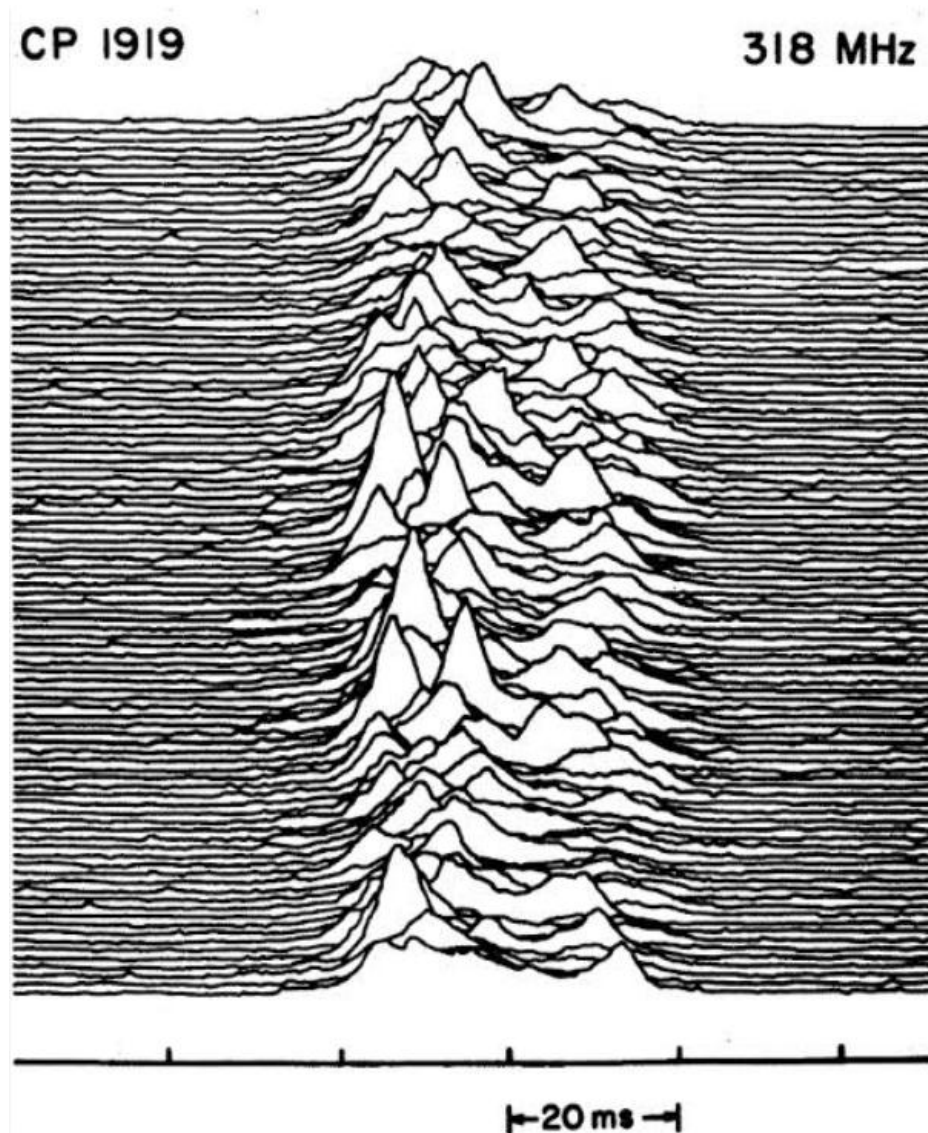
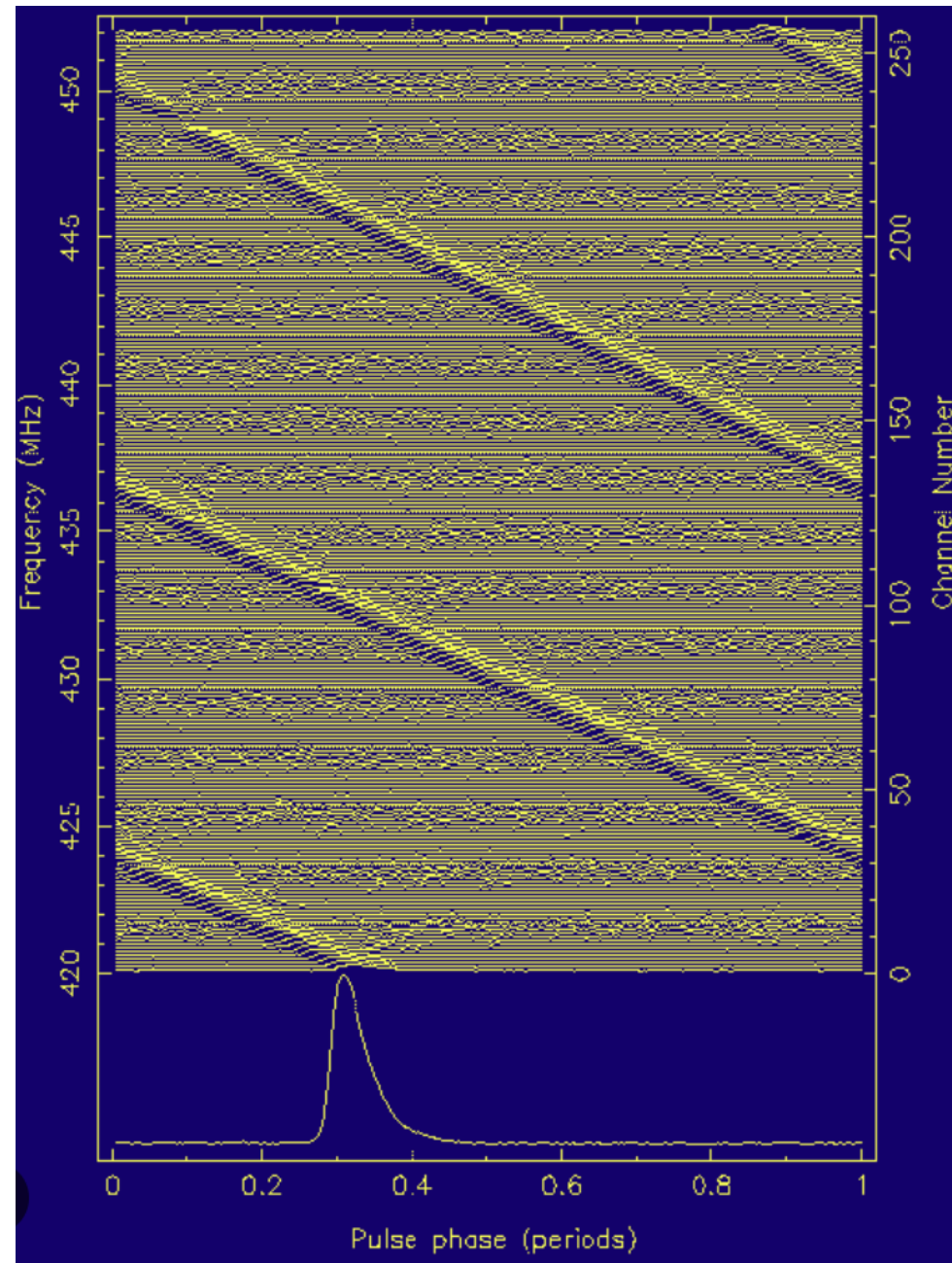


Figure 1. The averaged summed profiles of each pulsar over one full rotation. They are obtained by summing together each pulsar's GUPPI observations at 1.5 GHz (blue) and 2 GHz (red).

전파 펄서 관측 기본: 성간물질과 전파 dispersion

$$DM = \int_0^d n_e dl,$$

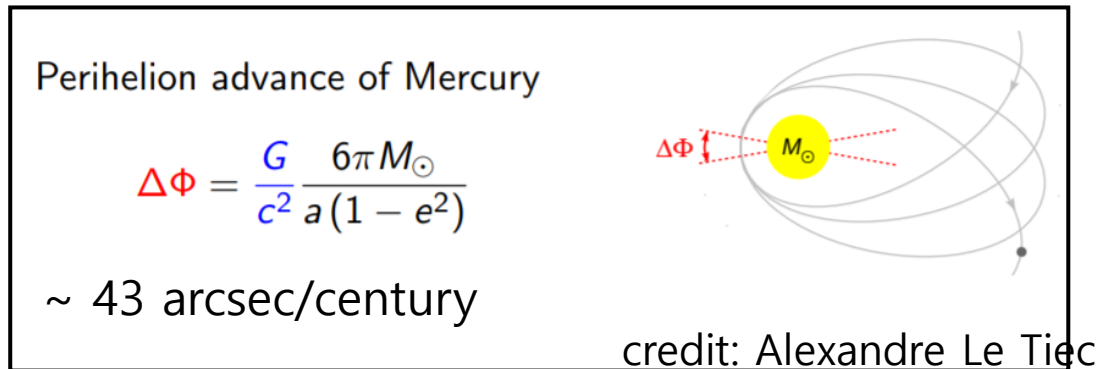
Dispersion measure is proportional to the **electron number density** along the propagation path from the source to the observer



펄사 타이밍 → 매우매우 유용한 관측 방법!

for a radio pulsar in a binary

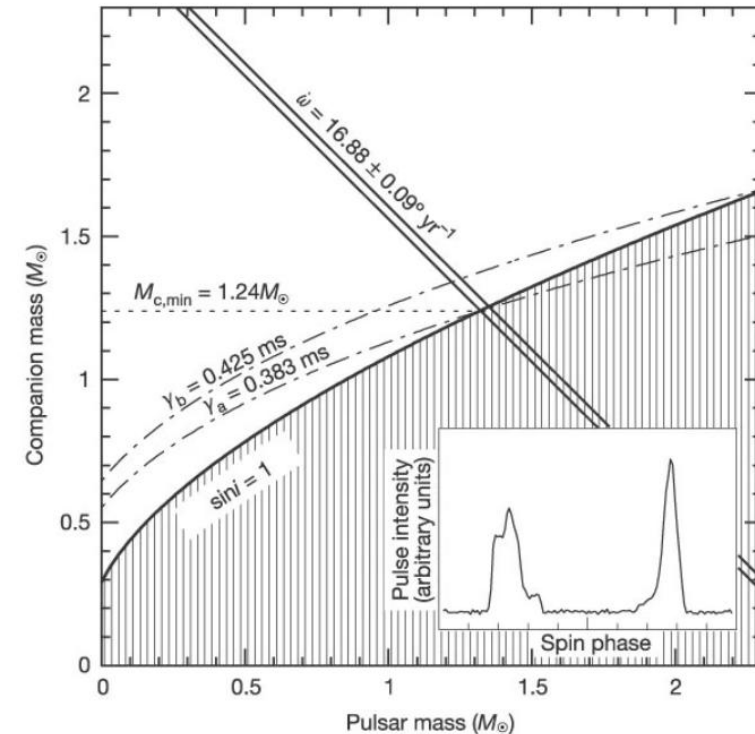
- mass function $f(m_1, m_2, \text{inclination})$
- post-Keplerian parameters
(e.g. advance of periastron or
rotation of the major axis "direction")



$$\dot{\omega} = 3T_\odot^{2/3} \left(\frac{P_b}{2\pi} \right)^{-5/3} \frac{1}{1-e^2} (M_p + M_c)^{2/3}$$

$f(m_1, m_2, \text{inclination})$

$$M_f = \frac{(m_c \sin i)^3}{(m_c + m_p)^2} = \frac{4\pi^2 (a \sin i)^3}{GP_b^2}$$

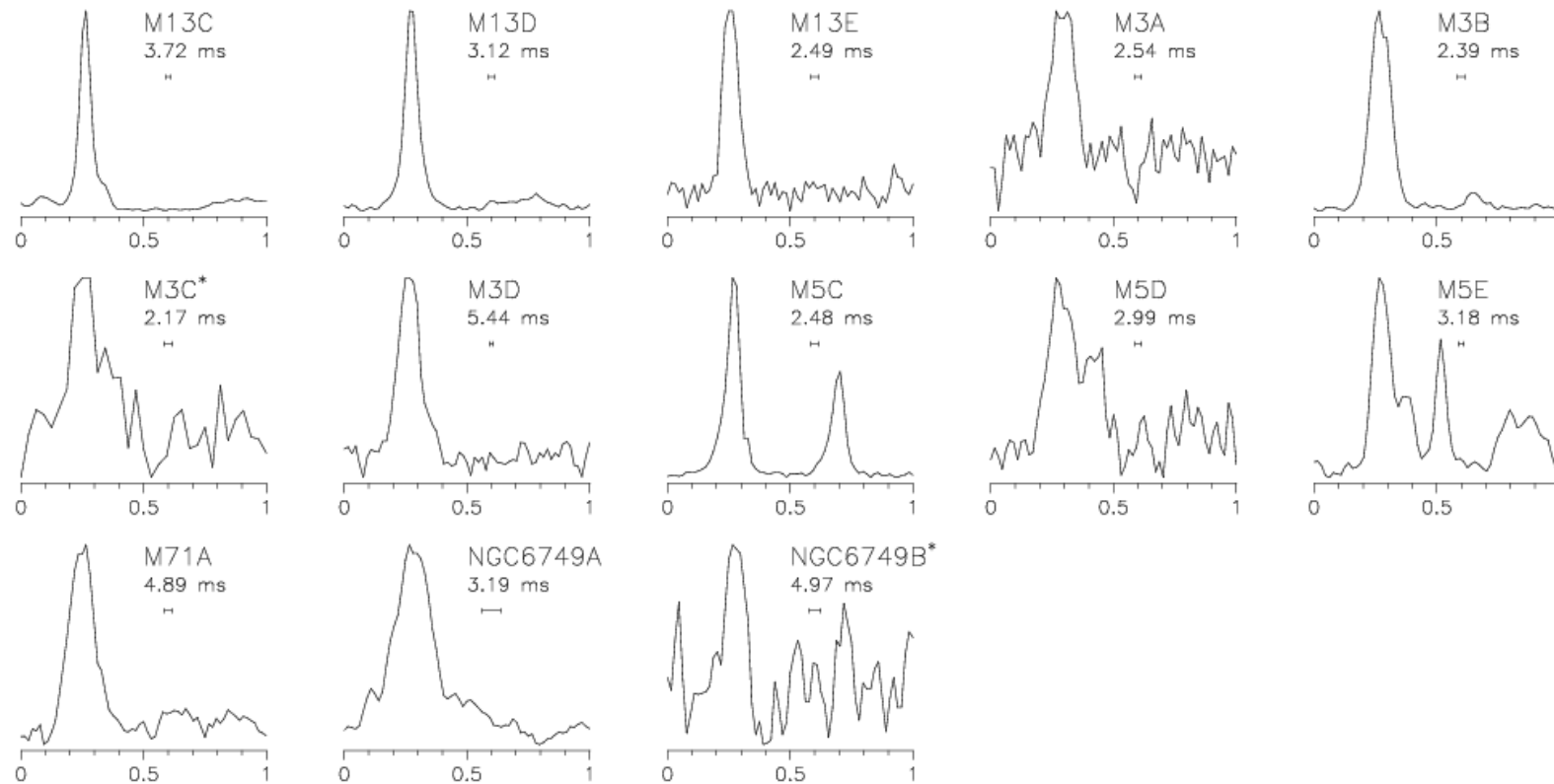


PSR J0737-3039A/B

Burgay, ..., CK, et al. (2004)

Arecibo Radio Telescope Finds a Dozen New Millisecond Pulsars

the wide Arecibo radio dish, the world's largest and most sensitive radio telescope, to uncover a dozen new super-fast-spinning pulsars. The team directed their search toward our Milky Way galaxy. The pulsars they have discovered are all spinning hundreds of times a second and all but one has a binary companion. Three of them are in the *Journal (preprint)*.



Formation of a pulsar binary and types of pulsar binaries

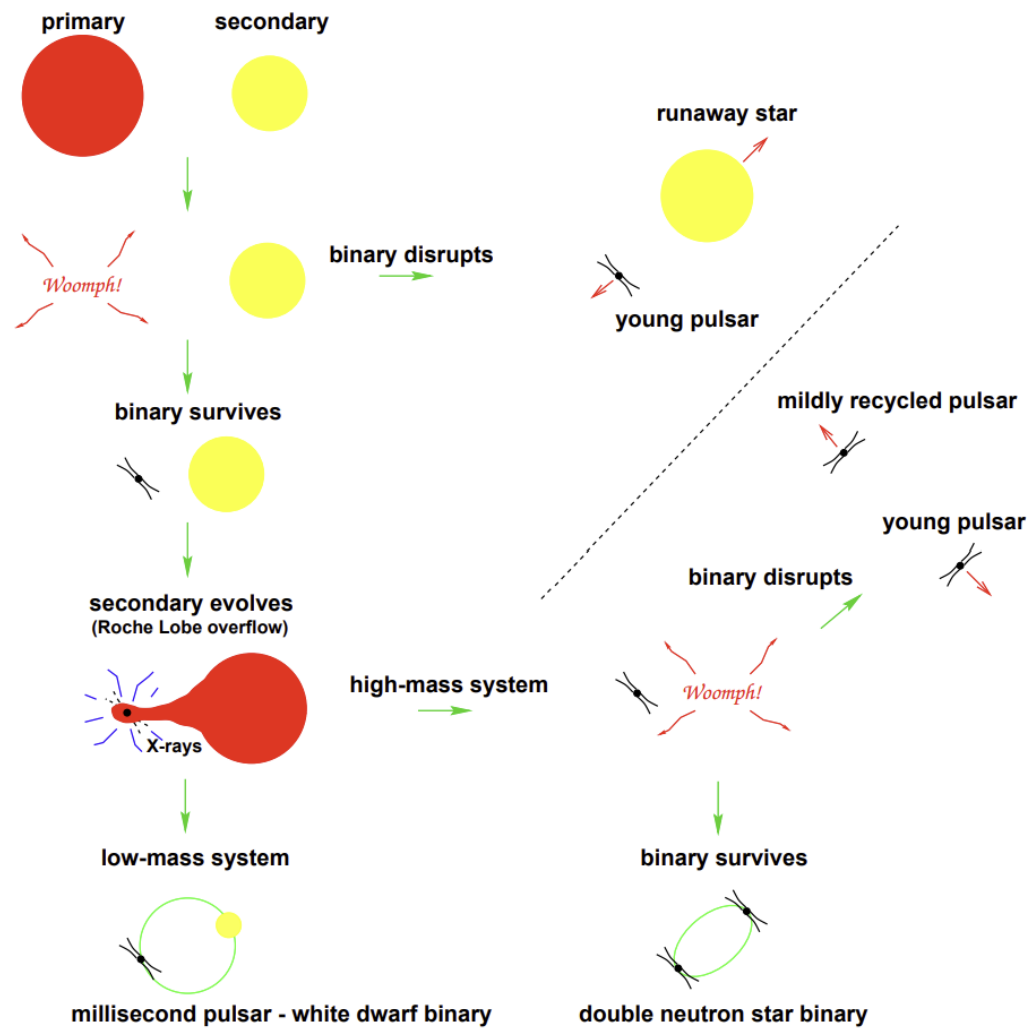


Figure 7: Cartoon showing various evolutionary scenarios involving binary pulsars.

Galactic Pulsar population and the P-Pdot diagram

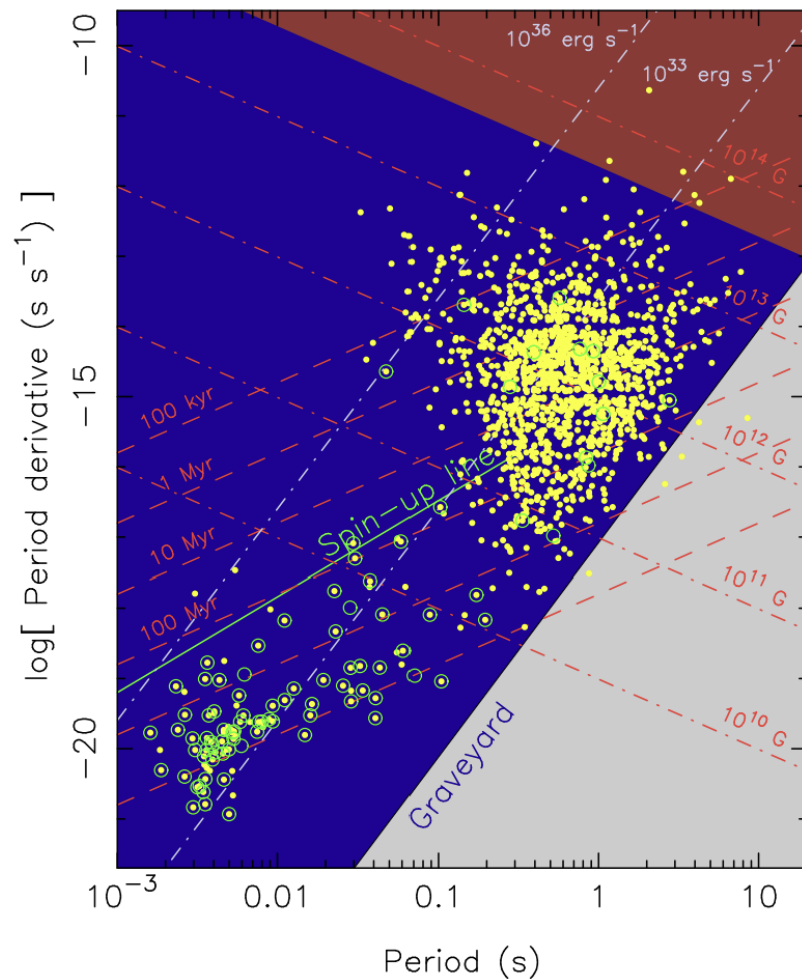


Figure 3: The $P-\dot{P}$ diagram showing the current sample of radio pulsars. Binary pulsars are highlighted by open circles. Theoretical models [77] do not predict radio emission outside the dark blue region. Figure provided by Michael Kramer.

There are different types of pulsars categorized by their evolutionary phases and/or systematic characteristics

“population” 천체의 모 집단

모 집단은 단일 그룹일 수도 있으나 보통 관측 샘플 수가 증가함에 따라 여러 그룹 (subpopulation)이 발견되곤 한다.

P-Pdot diagram: similar to the HR diagram for stars, a 2D correlation between the spin period P and dP/dt , showing the diversity of pulsar population, properties

Galactic Pulsar population and the P-Pdot diagram

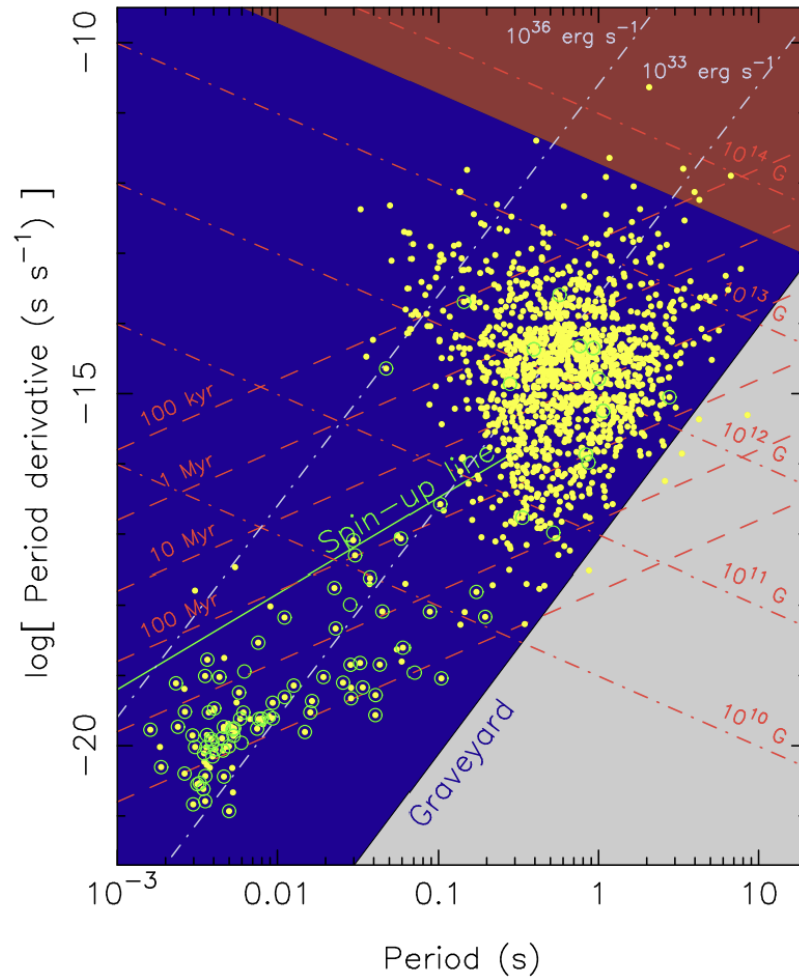
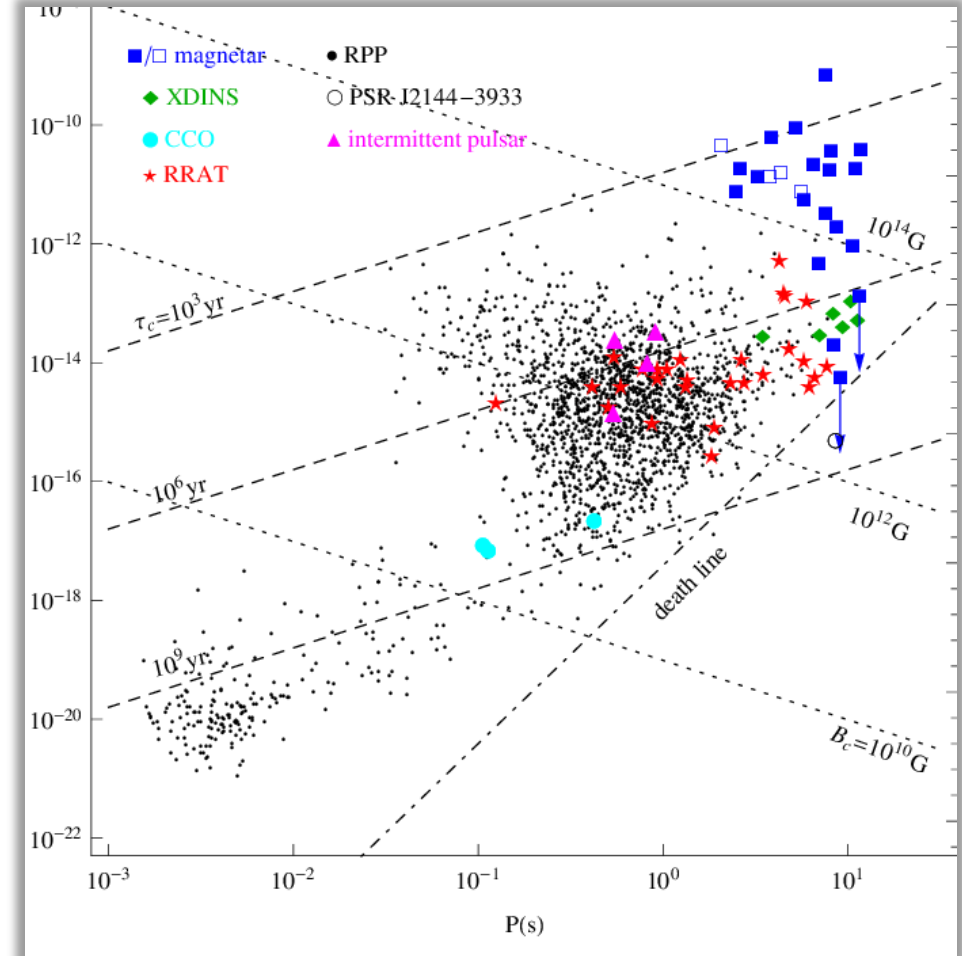


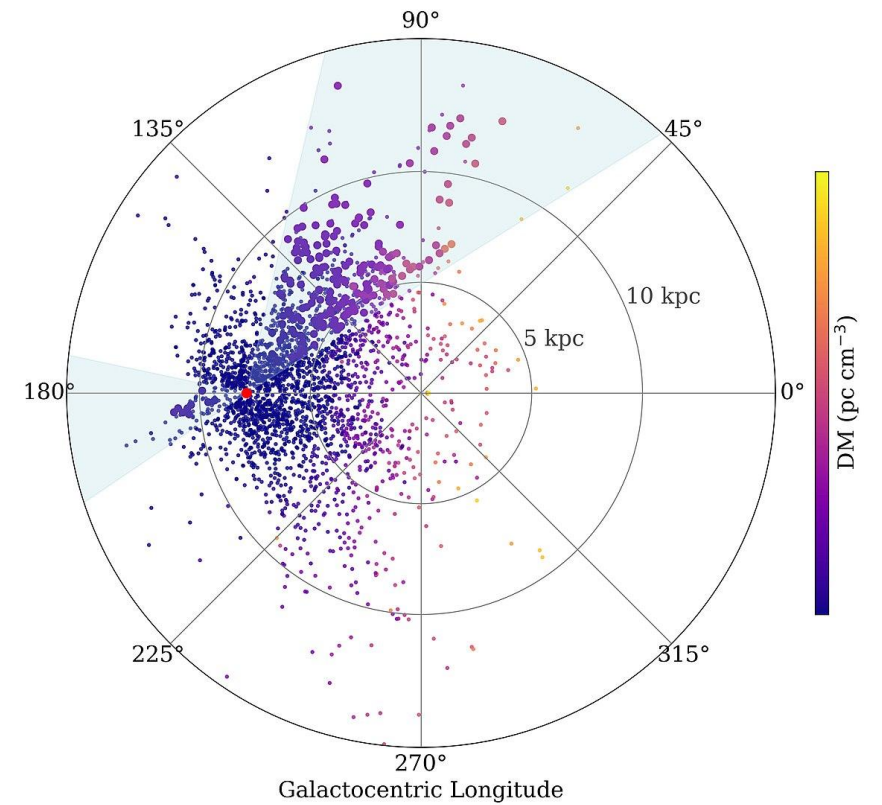
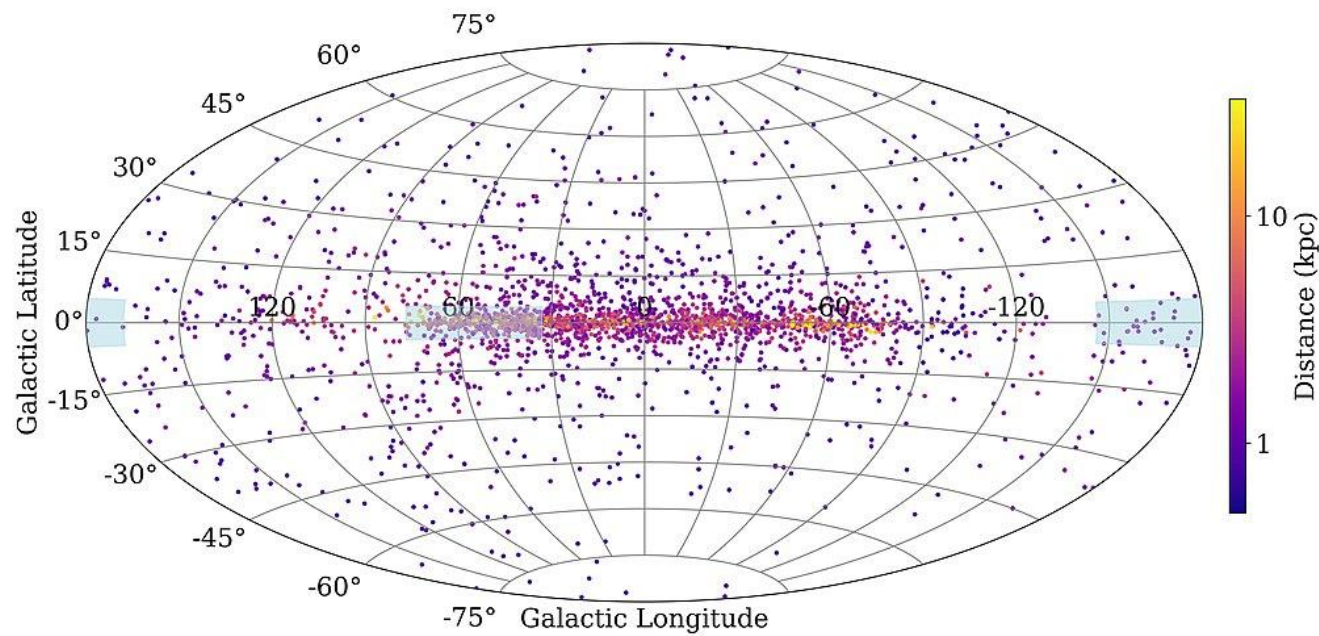
Figure 3: The $P-\dot{P}$ diagram showing the current sample of radio pulsars. Binary pulsars are highlighted by open circles. Theoretical models [77] do not predict radio emission outside the dark blue region. Figure provided by Michael Kramer.

(2008?)



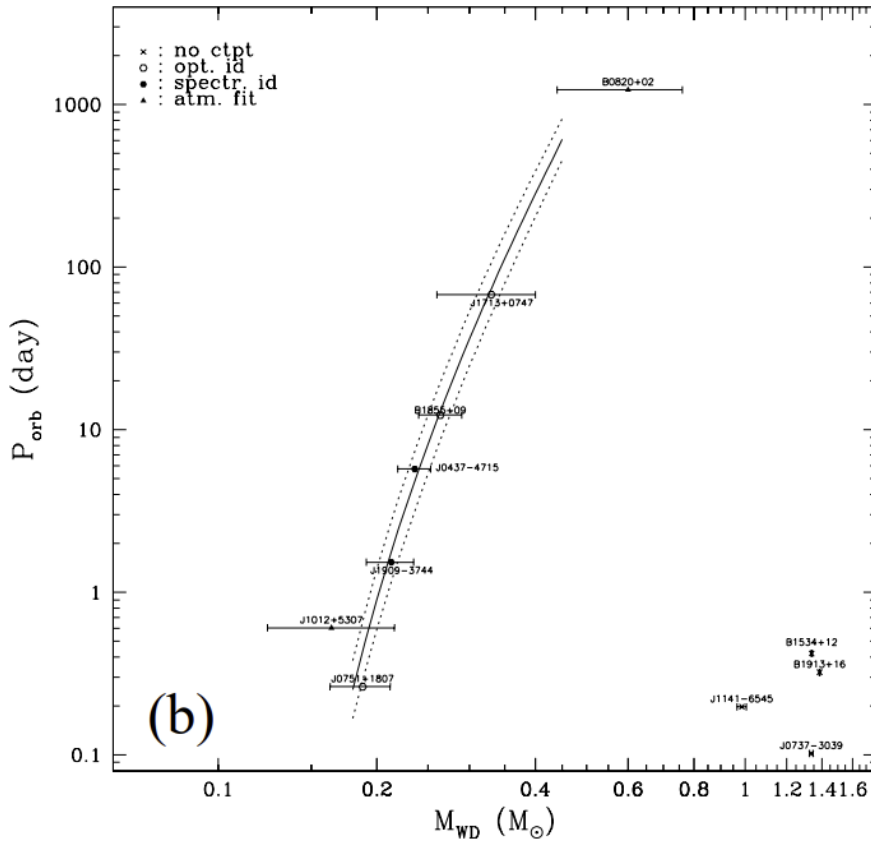
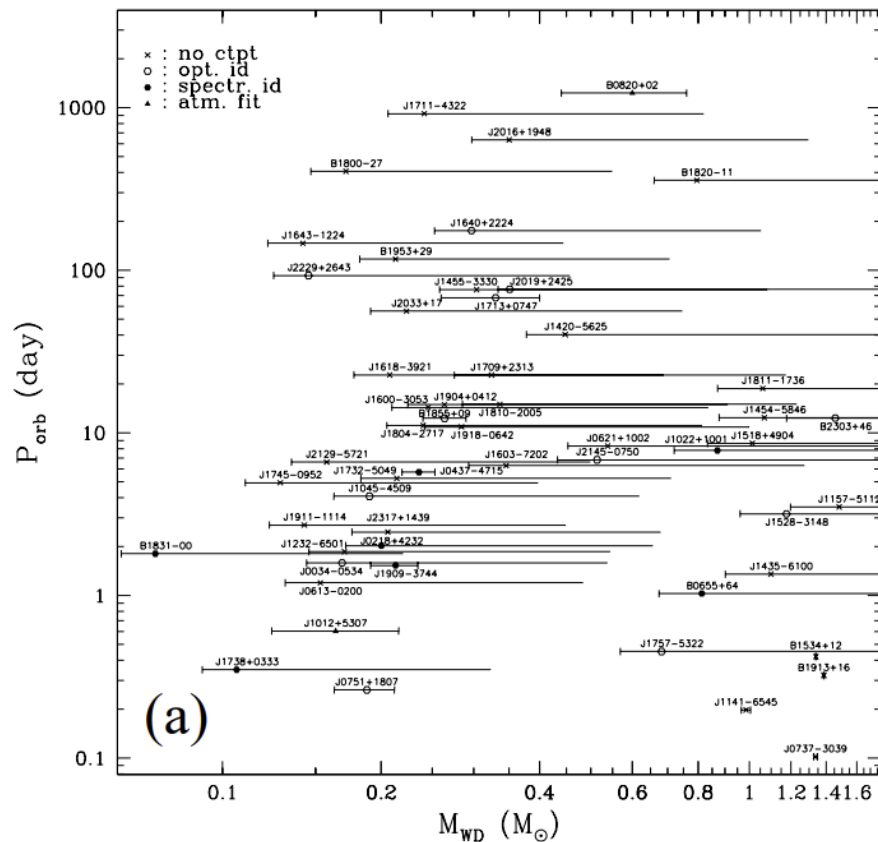
Tong & Wang (2014)

Sky map of radio pulsars in the Milky Way discovered by Arecibo telescope



펄사 바이너리가 상대론검증 및 천체물리학적으로 유용한 이유 :

케플러 법칙 + 상대성이론 + 전파 타이밍 관측을 적용 → 질량 측정 + 거리도 측정가능



펄사 바이너리가 천체물리학적으로 유용한 이유 :

케플러 법칙 + 상대성이론 + 전파 타이밍 관측을 적용하여

- Binary의 총 질량은 상당히 정확하게 측정가능하다
- 펄사(중성자별)의 동반성(companion)의 질량을 꽤 정확하게 추정할 수 있다
- Binary의 두 질량 중 하나가 펄사인 경우, pulsar parallex와 DM등의 여러 방법으로 거리도 어느 정도 측정가능하다

[유리한 이유] 모든 펄사는 중성자별.

즉, 펄사의 질량을 찬드라세카 질량으로 가정가능.

혹은 관측된 모든 펄사의 중간값인 $1.35 M_{\text{sun}}$ 으로 가정.

[주요 오차] 공전 경사각 (orbital inclination), 중성자별의 상태방정식 (M-R relation)

compact binaries as GW sources

왜 compact binary가 강한 중력파원인가

- 수학/물리학/천체물리학 원리
- **시스템 정의**
- 기본(지배) 방정식 찾기/만들기
- 물리량 조합/변형하여 운동방정식, 운동방정식 상수, 주요 물리량 정의/찾기
- 질문에 대한 답(내가 찾고 있는 물리량)을 왼쪽에
- **적절한 값을 대입**

For two masses in a circular orbit,

$$I \sim \mu a^2,$$

where a is the orbital separation.

The first derivative is approximately

$$\dot{I} \sim \mu a^2 \Omega,$$

and the second derivative is

$$\ddot{I} \sim \mu a^2 \Omega^2,$$

where Ω is the orbital angular frequency.

Using Kepler's law,

$$\Omega^2 = \frac{GM}{a^3},$$

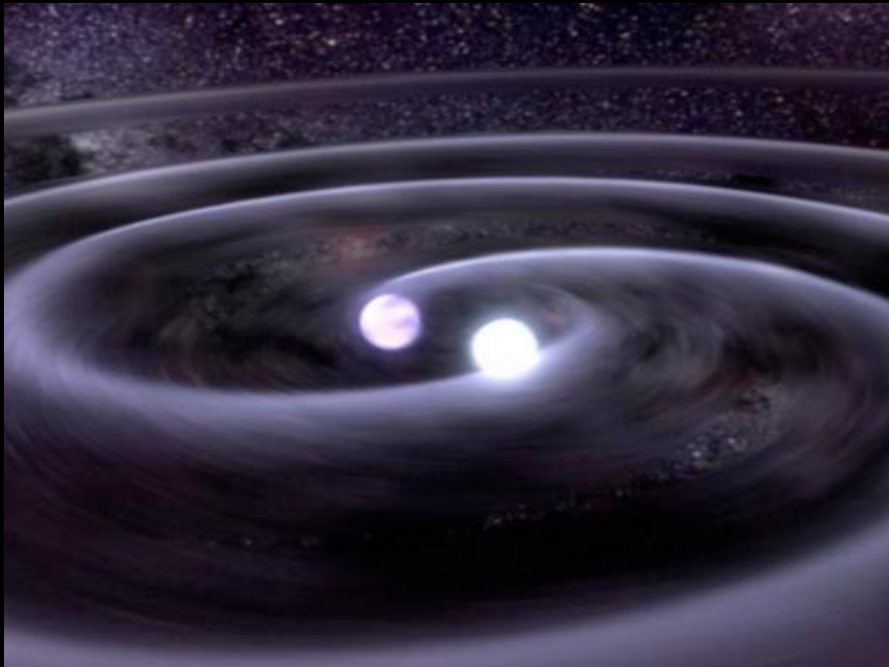
we obtain

$$\ddot{I} \sim \frac{G\mu M}{a}.$$

Therefore,

$$h \sim \frac{2G}{Rc^4} \frac{G\mu M}{a}.$$

쌍성(binary)과 공전운동 compact binaries as GW sources



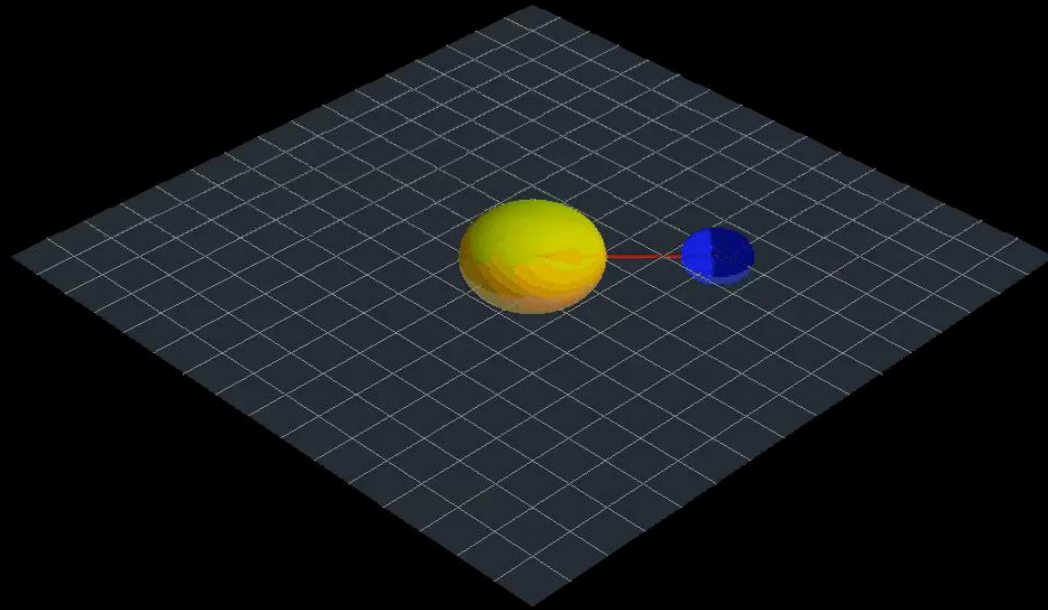
binary BH-BH (BBHs)
BH-NS
NS-NS
orbit size < 1000 km



Solar system
(size ~ 3 billion km)

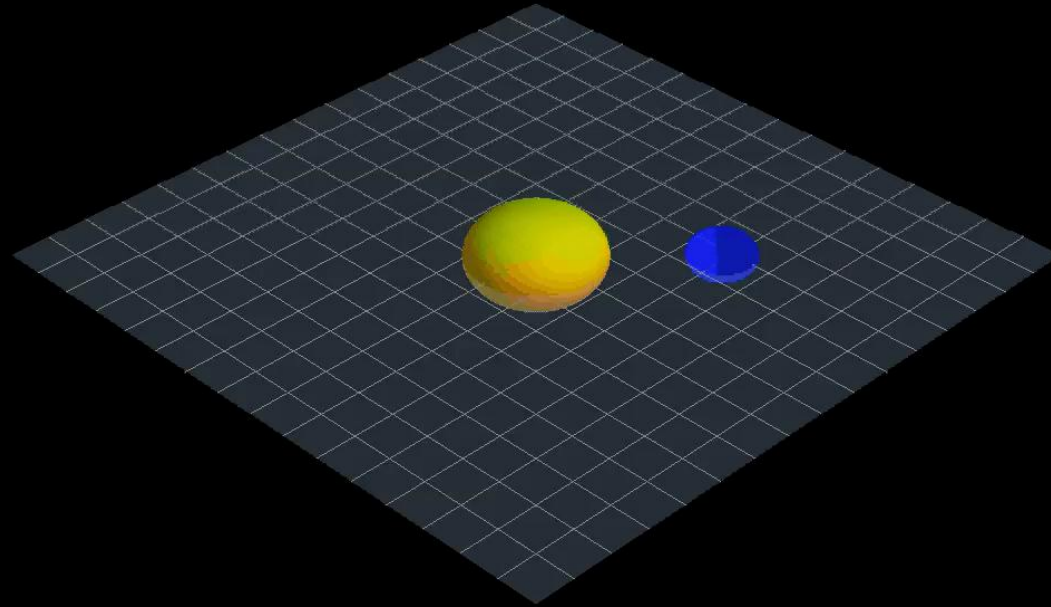
뉴턴의 만유인력과 쌍성 운동

쌍성의 궤도운동이 시간과 공간을 변화시키지 않음



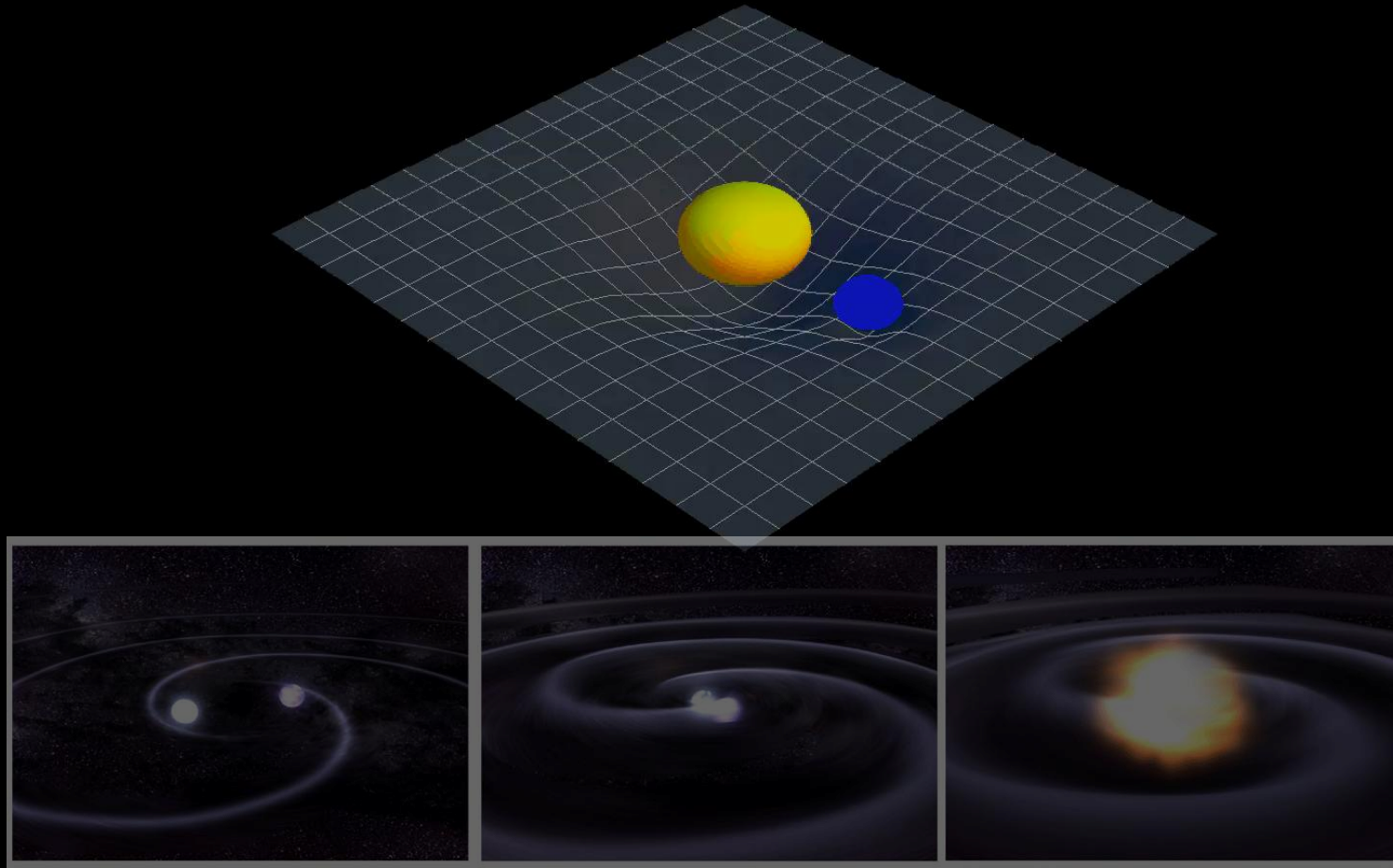
아인슈타인의 상대성 이론 우주를 4차원 시공간으로 기술

“질량이 있는 물체 ~ 시공간이 휘어짐”



아인슈타인 중력(상대성이론)과 쌍성 운동

- 질량을 가진 물체가 빛의 속력의 수십 %로 가속 운동 → 중력과 방출
→ 에너지 손실, 각운동량 손실 → 두 블랙홀이 점차 가까워지다 결국 충돌
→ 하나의 블랙홀로 합병 → 중력과 방출량 점차 감소 → 중력과 방출 종료

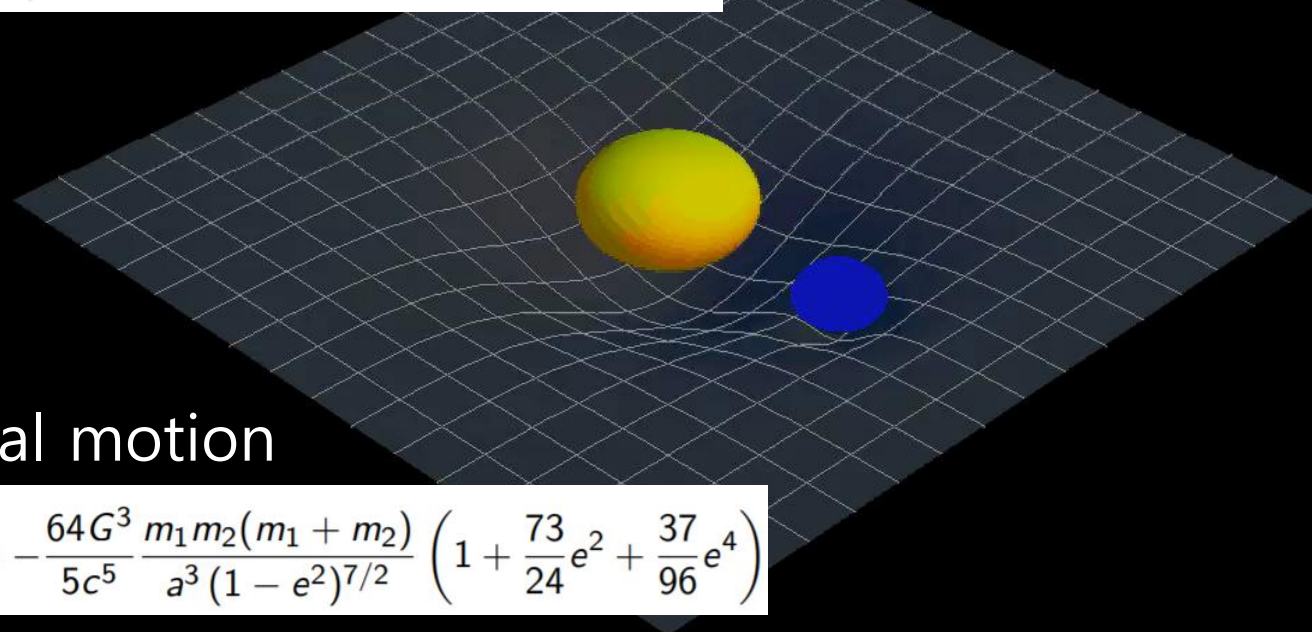


Einstein's general relativity and the binary motion

쌍성의 궤도운동이 시간과 공간을 변화시킨다.

→ 시공간의 변화가 쌍성으로부터 빛의 속력으로 "퍼져" 나간다 → 중력파

$$\tilde{h}(f) = \sqrt{\frac{5}{24}} \pi^{-2/3} Q(\varphi) \frac{\mathcal{M}^{5/6}}{r} f^{-7/6} e^{-i\Psi(f)}$$



inspiral motion

$$\left\langle \frac{da}{dt} \right\rangle = -\frac{64G^3}{5c^5} \frac{m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{a^3 (1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right)$$

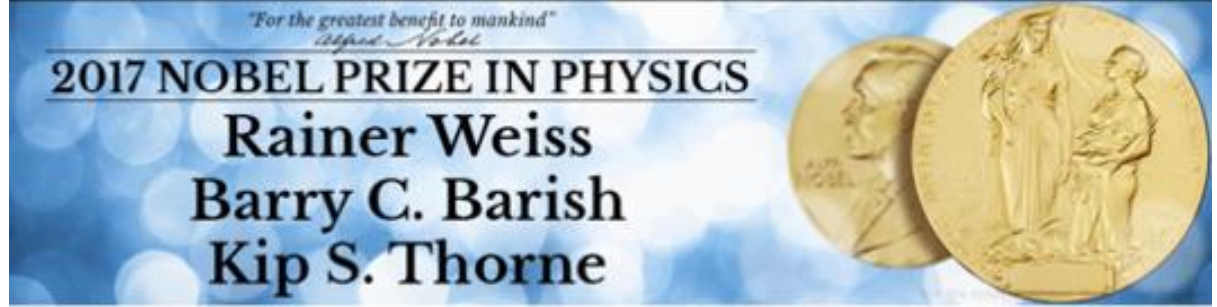
circularization

$$\left\langle \frac{de}{dt} \right\rangle = -\frac{304G^3}{15c^5} \frac{m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{a^4 (1 - e^2)^{5/2}} \left(e + \frac{121}{304} e^3 \right)$$

Credit: Carl Rodriguez

중력과 검출기

laser interferometer



미국 LIGO



유럽 Virgo



일본 KAGRA



목표:

- 중력과 검출
- 자연계의 4가지 기본 힘중 하나인 중력을 이해
- 중력파로 우리 우주를 관측하고 천문현상을 탐구



천체물리연구의 예

중력파원의 물리량을 “측정”



분포함수

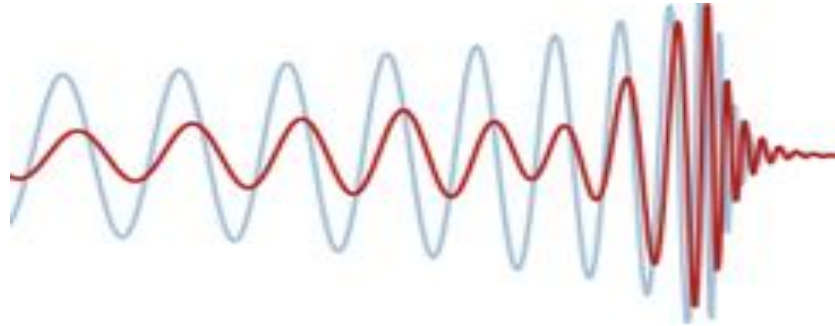
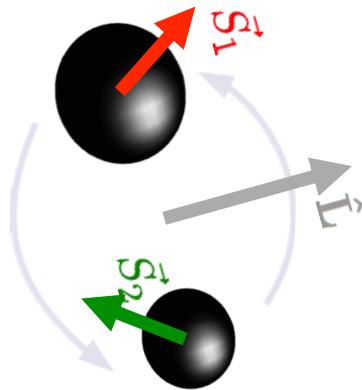


이론

(예) m_1 , m_2 , m_{final} , d , e 등

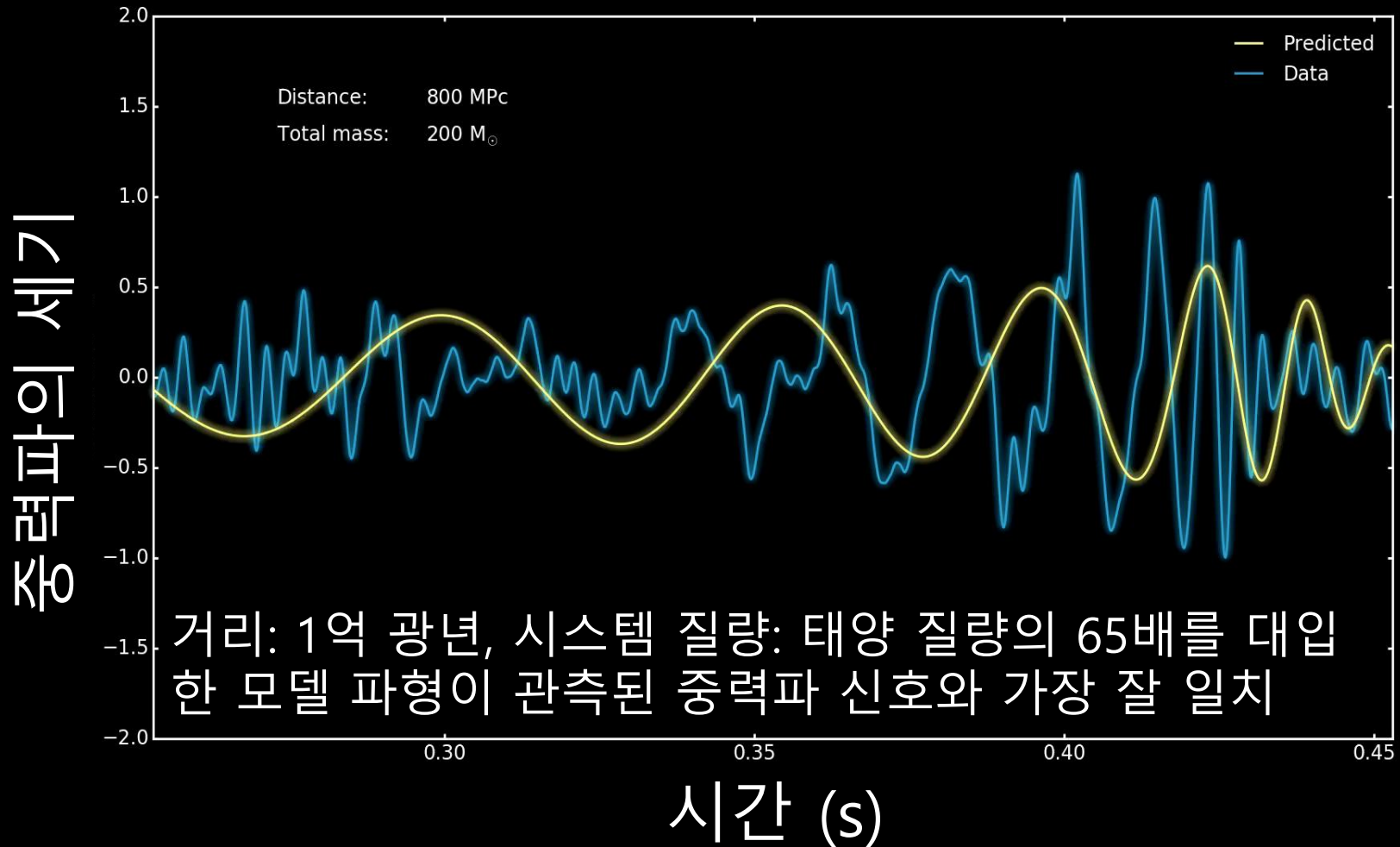
천체의 [질량]을 알면 그 천체의 과거와 미래(생성, 진화)를 알 수 있다

천체까지의 [거리]를 알면 에너지 방출량, 우주 내 물질 분포를 알 수 있다

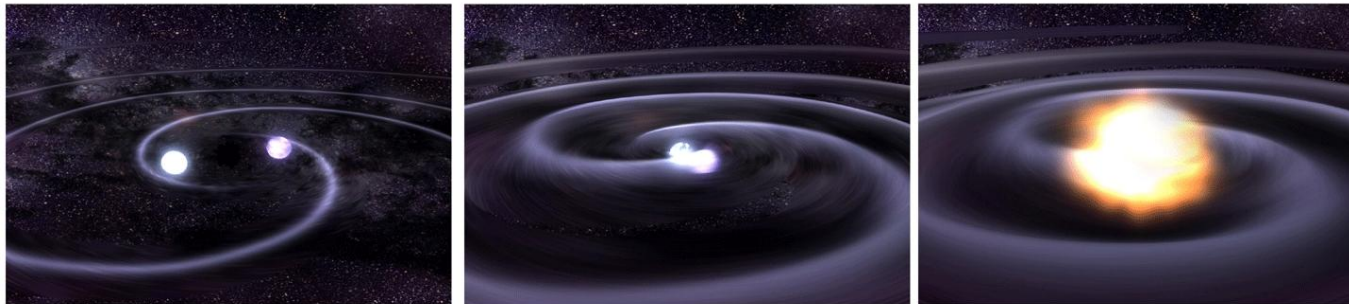
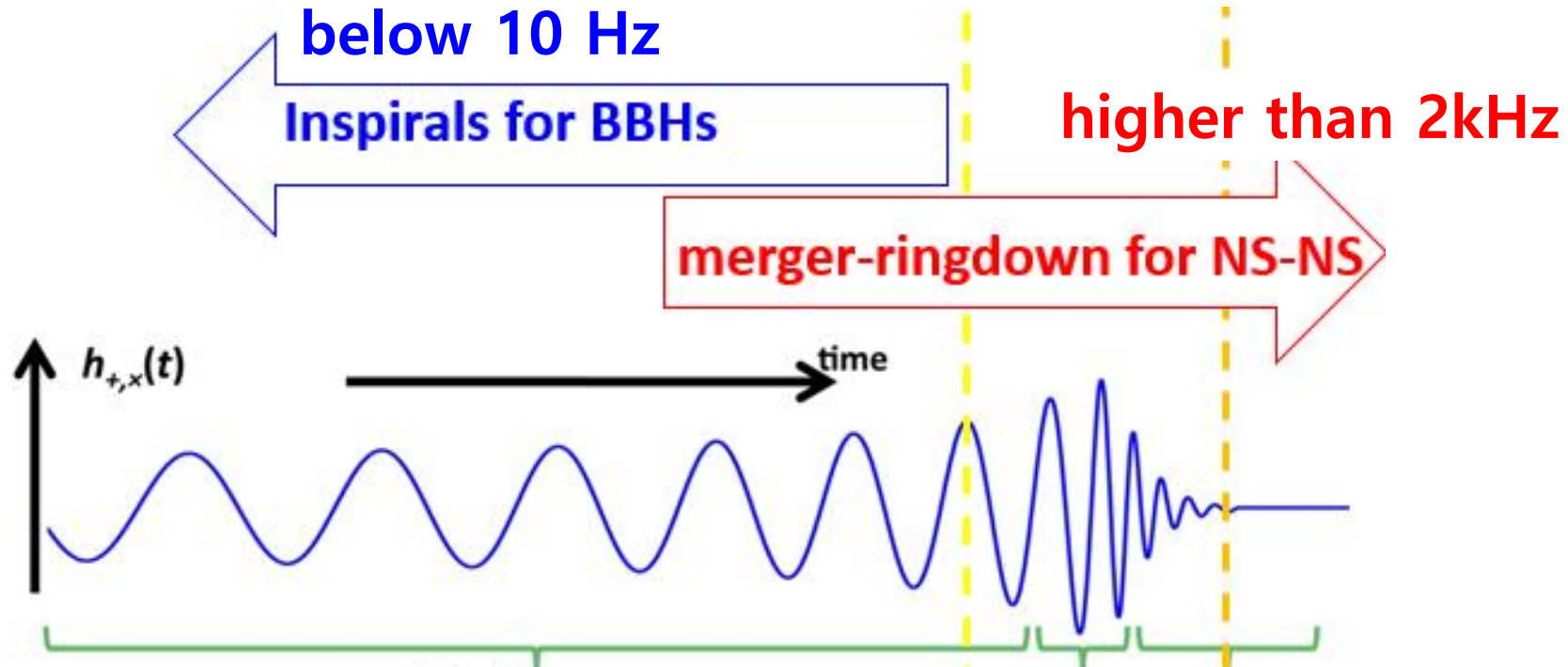


GW150914 : $35 M_{\text{sun}} - 30 M_{\text{sun}}$ 블랙홀 쌍성의 병합에서 방출된 중력파

중력파는 “wave” = 진폭 * 위상

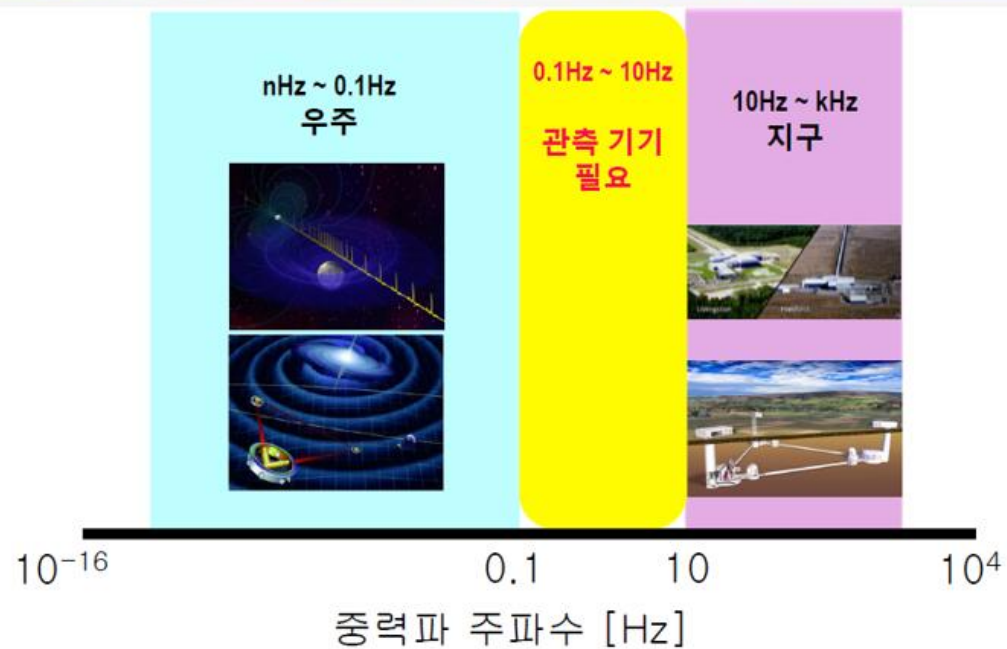


GW frequency band and observable phases of NS/BH mergers



$$h(t) = Ae^{-t/\tau} \cos(2\pi f_{\text{QNM}}t + \phi)$$

우주 중력파 주파수: 10^{-16} Hz (초기 우주) ~ 10,000 Hz (초신성 폭발)

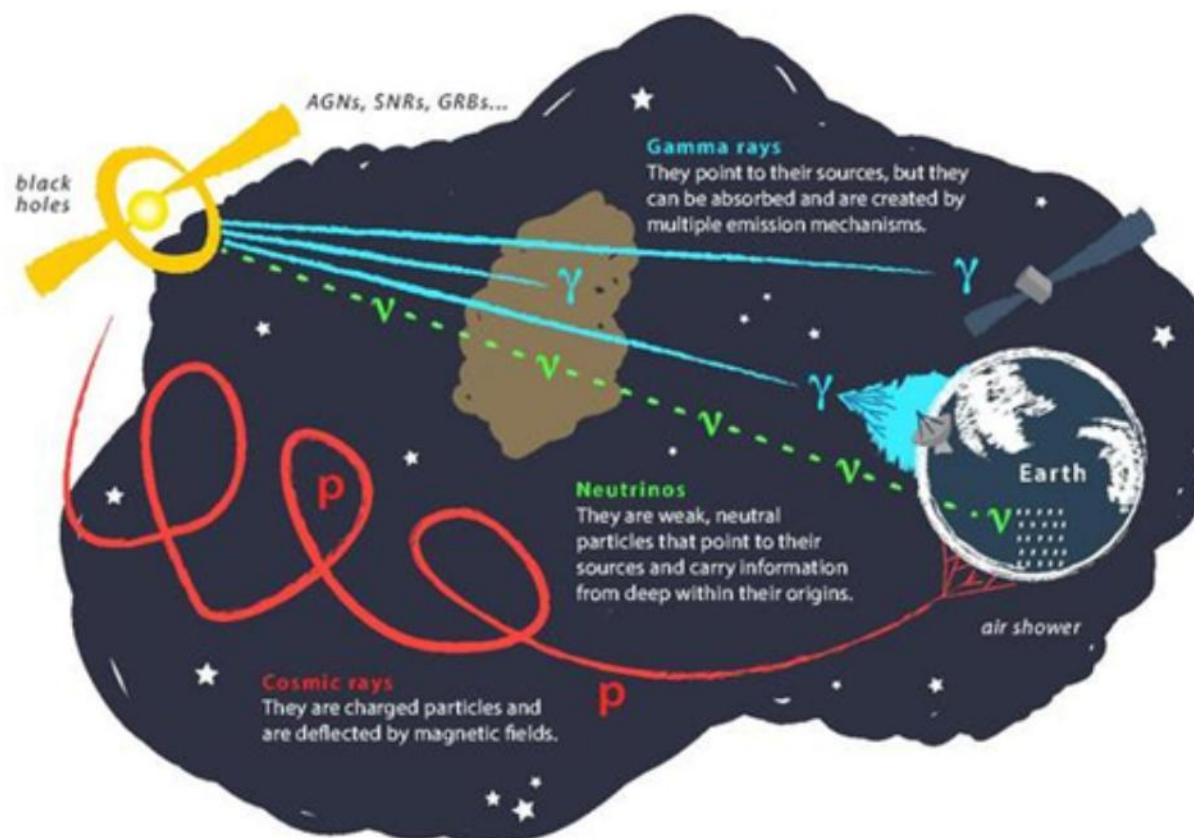


$$R = \int_0^{z_{\max}} \frac{d^2 M_{SF}}{dV_c dt_e dt_0} g_{cl} g \int_{M_{cl, \min}(z)}^{M_{cl, \max}} \frac{f(M_{cl})}{\int M_{cl} f(M_{cl}) dM_{cl}} dM_{cl} \frac{dV_c}{dz} dz$$

검출빈도 = 단위 시간당 단위 부피당 별 생성을
 $\times$ 중간질량 블랙홀 쌍성의 개수 비율 $\times$ 검출 가능 부피

중성자별과 다중신호 천문학 **multimessenger astronomy**

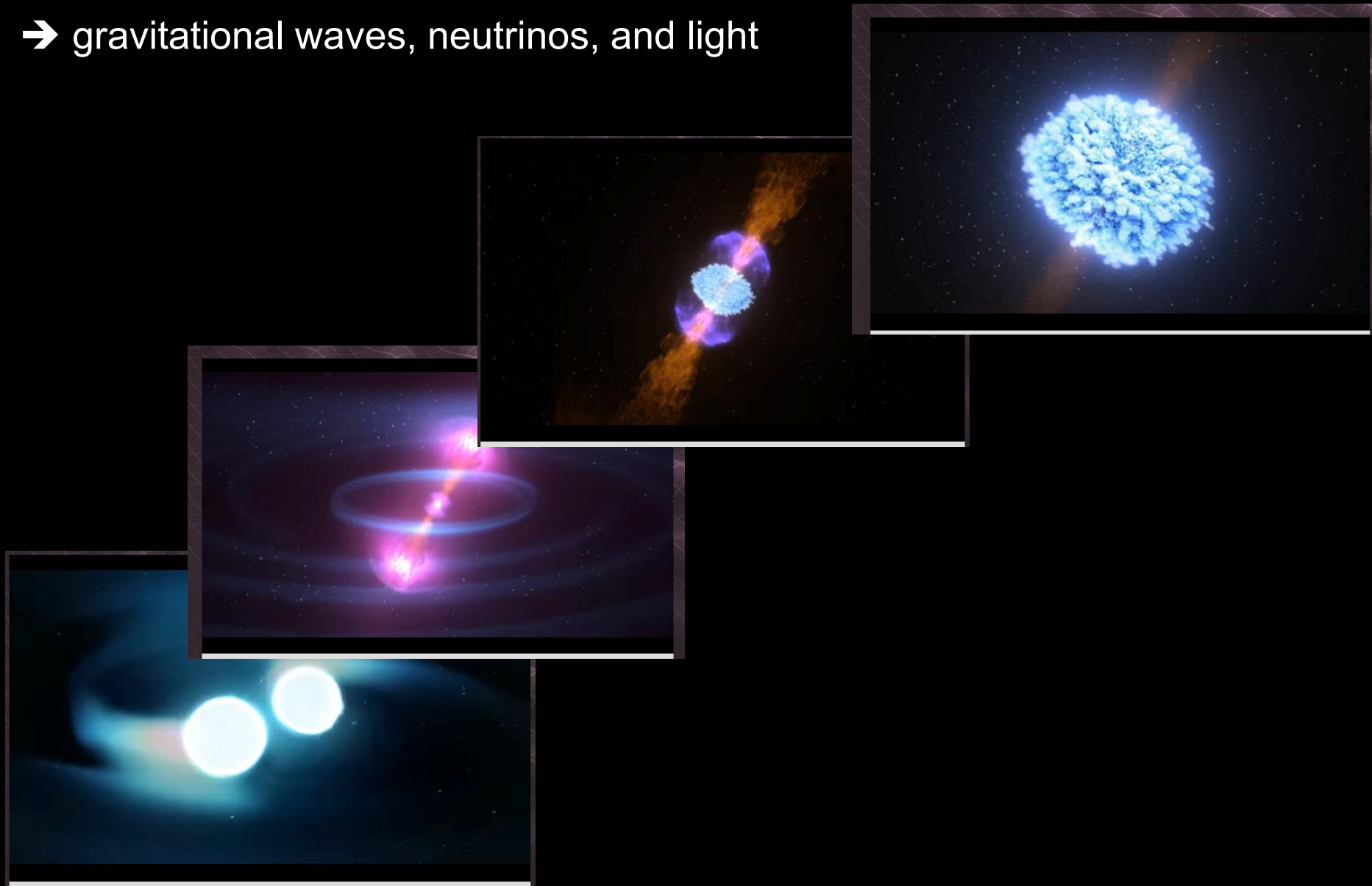
GW170817: light + gravitational waves



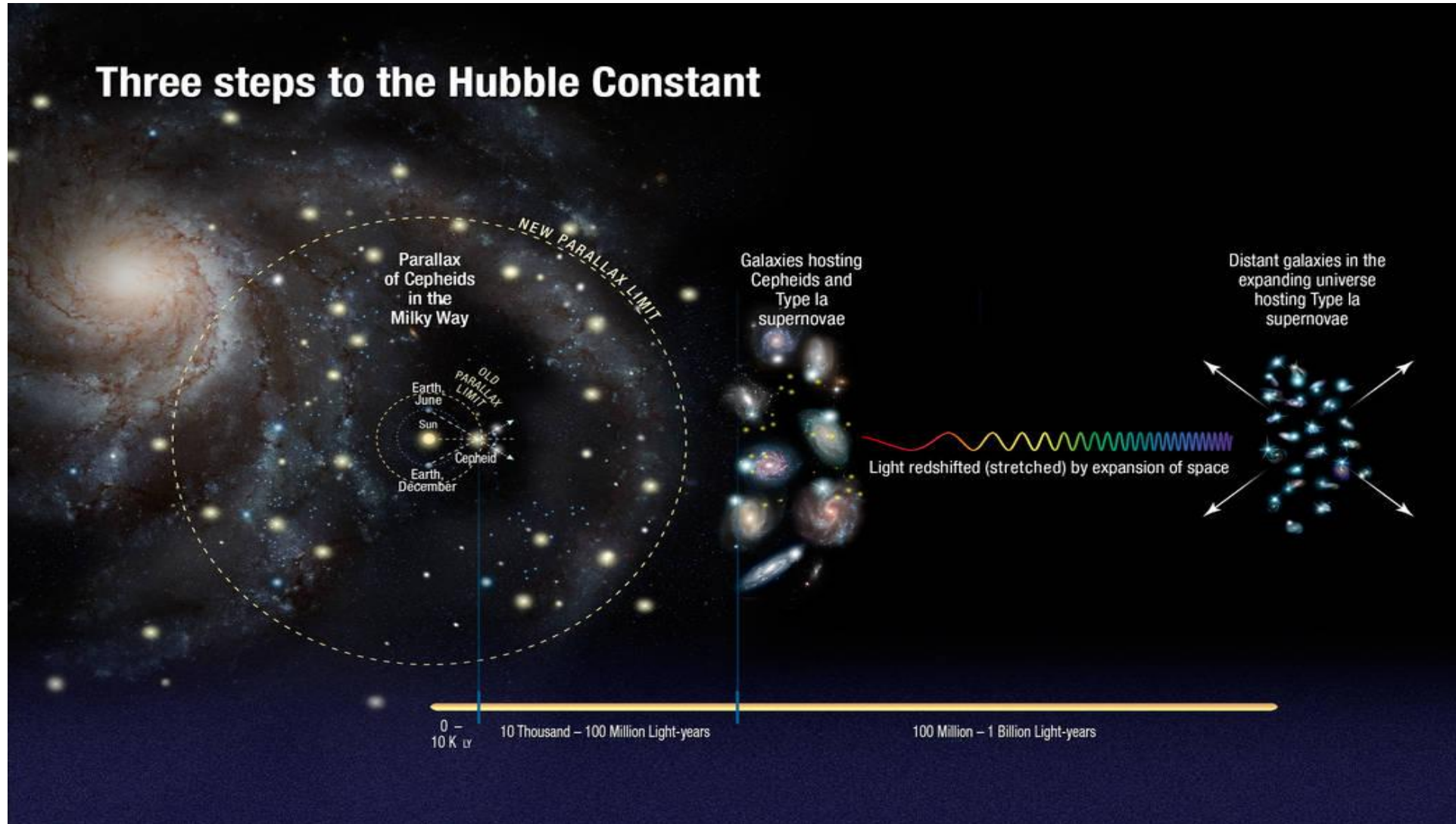
Best targets for MMA:

mergers of two neutron stars (ex: GW170817)

→ gravitational waves, neutrinos, and light



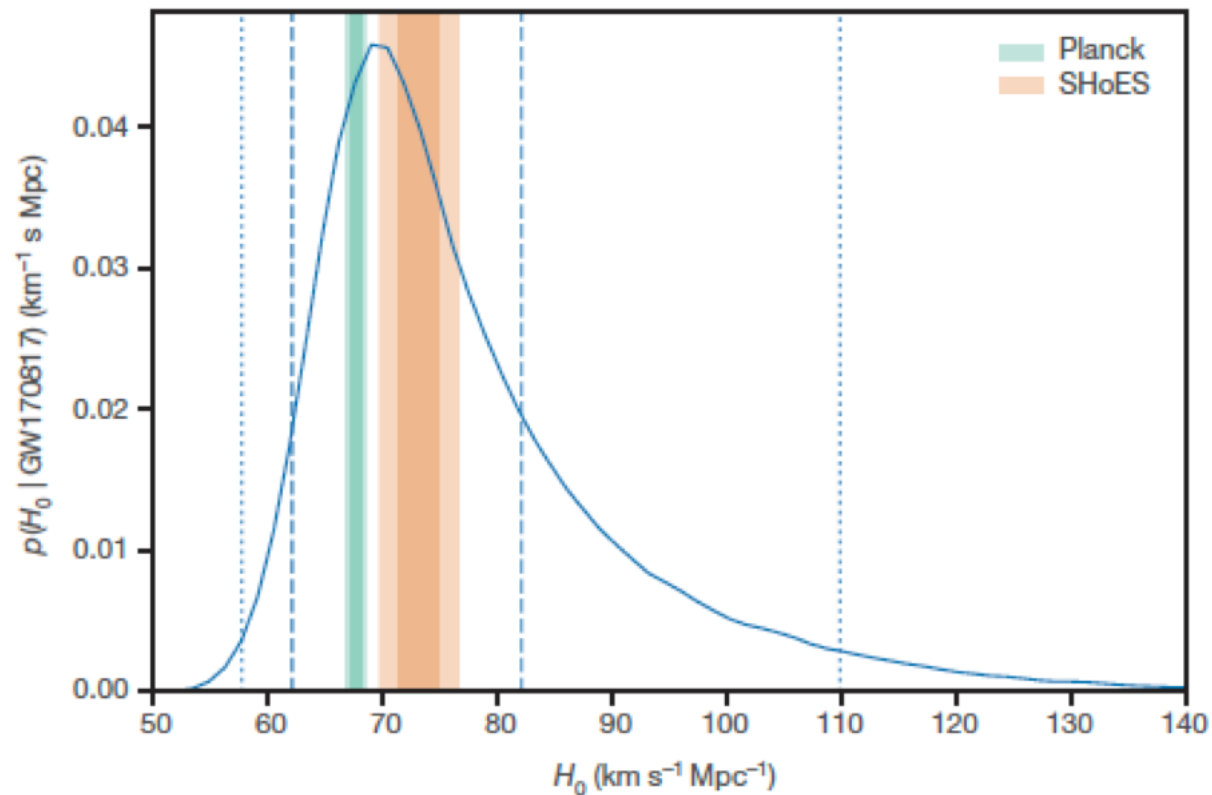
우주사다리 (방법론): 천문학적 거리를 측정하는 간접적인 방법
중력파로 천체까지의 거리를 정확하게 “직접” 측정할 수 있다면?



Hubble constant with GW observation

허블 법칙: $v = H_0 d$ (v : 후퇴속도, d : 거리, H_0 : 허블 상수)

- GW observation $\rightarrow d$
- EM observation $\rightarrow v$



펄사 타이밍 어레이 (맛보기)

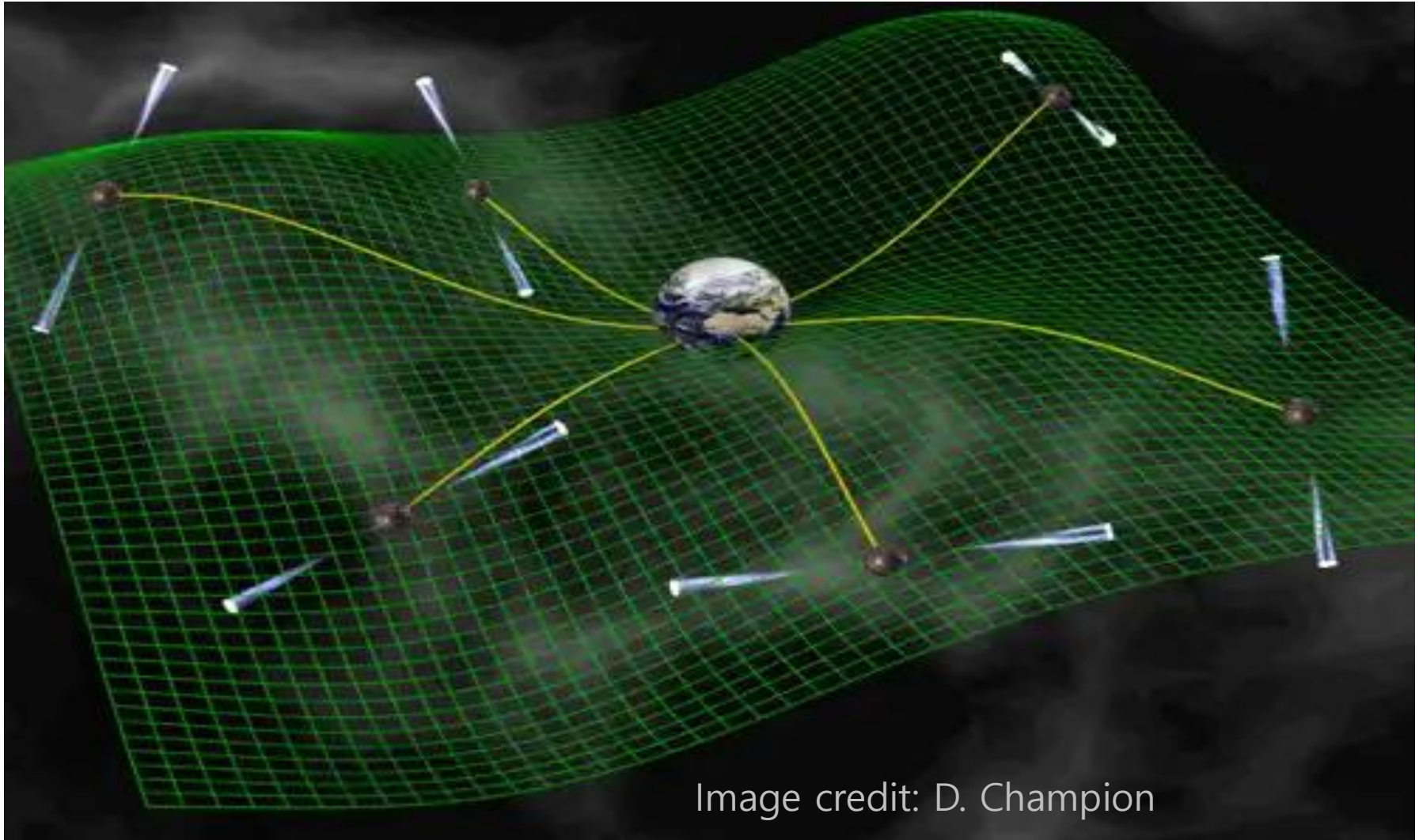
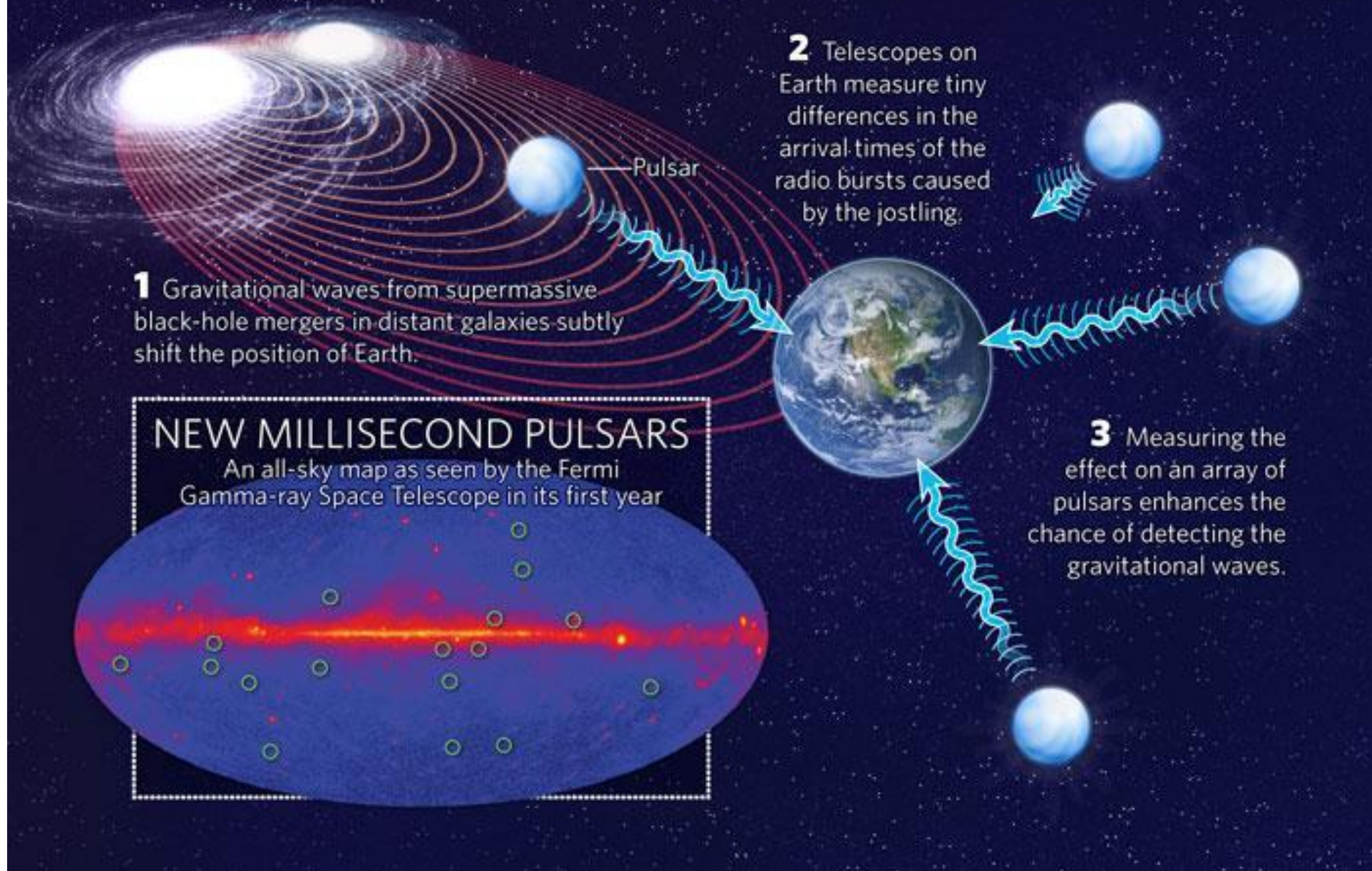


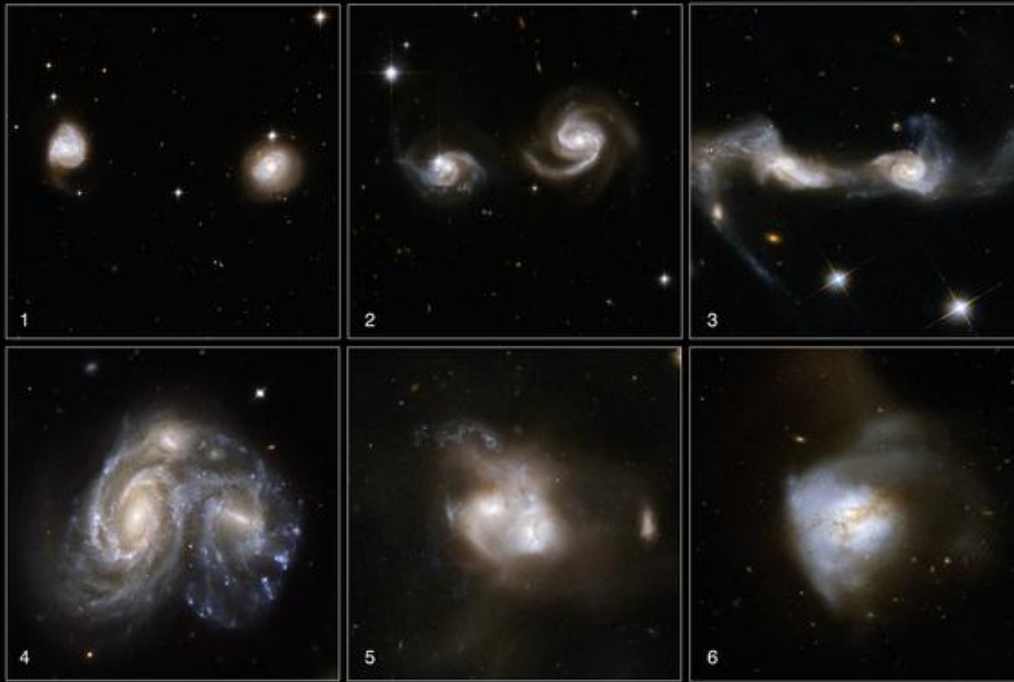
Image credit: D. Champion

HUNTING GRAVITATIONAL WAVES USING PULSARS



merging galaxies = supermassive BH binaries

- ok, stellar-mass BBHs do merge (GW150914)
- Do SMBHBs merge ?



$$f_{\text{GW}} = 2f_{\text{orb}}$$

$$f_{\text{GW}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{GM}{a^3}}$$

$$f_{\text{GW}} \approx (2 \times 10^{-8} \text{ Hz}) \left(\frac{M}{10^6 M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a}{10^{-3} \text{ pc}} \right)^{-\frac{3}{2}}$$

Pulsar timing array (PTA) collaborations (alphabetical order)

- **European Pulsar Timing Array (EPTA)**
Europe: Effelsberg, Lovell, Nancay, Sardinia, and Westerbork Radio Synthesis Telescope
- **North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav, 2007-)**
USA/Canada: Arecibo Telescope, Green Bank Telescope (GBT)
- **Parkes Pulsar Timing Array (PPTA, 2004-)**
Australia: Parkes Radio Telescope

arXiv.org > astro-ph > arXiv:1602.03640

Astrophysics > Instrumentation and Methods for Astrophysics

[Submitted on 11 Feb 2016]

The International Pulsar Timing Array: First Data Release

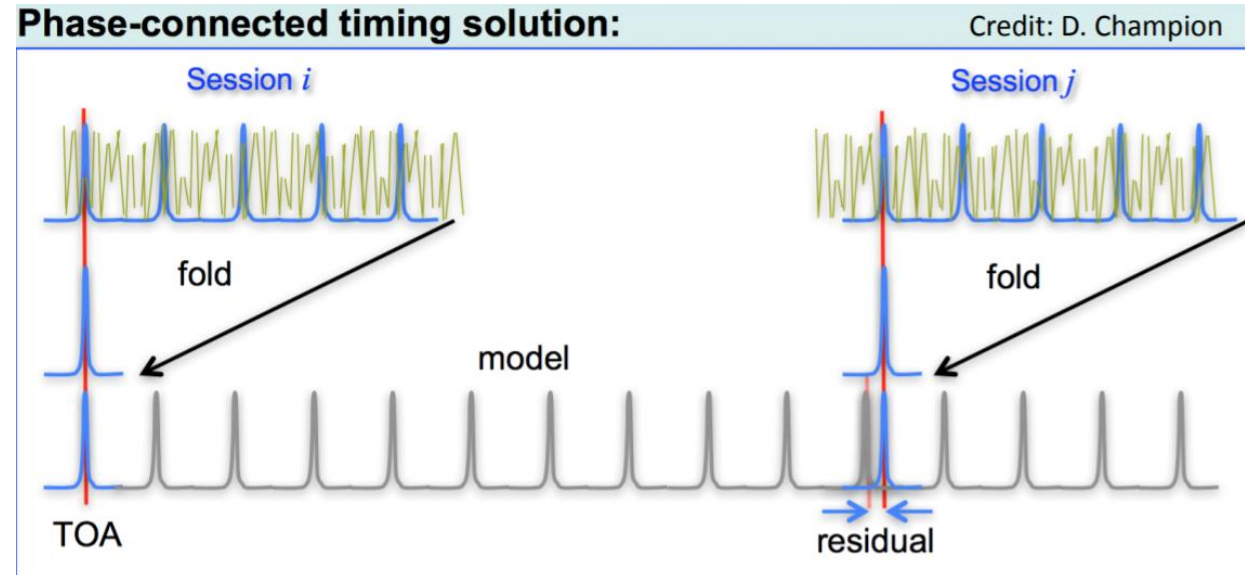
J. P. W. Verbiest, L. Lentati, G. Hobbs, R. van Haasteren, P. B. Demorest, G. H. Janssen, et al.

Pulsar timing

measuring time of arrival (TOA) of pulsed signals

$$t = t_{\text{topo}} - t_{0,\text{topo}} + \Delta_{\text{clock}} - \Delta_{\text{DM}} + \Delta_{\text{R}\odot} + \Delta_{\text{E}\odot} + \Delta_{\text{S}\odot} + \Delta_{\text{R}} + \Delta_{\text{E}} + \Delta_{\text{S}}$$

TOA accuracy $\sim \frac{\text{SNR}}{\text{pulse width}}$



- measuring minute deviations from the expected “template”
 - ➔ **timing residuals** can be attributed to **intrinsic radio emission variability**,
neutron star glitches, **electron density along the line-of-sight**, **relativistic effects**
- **high precision measurement with MSPs** (with narrow single-peaked pulses)
 - ➔ **sensitive to relativistic effects** (if all other effects are correctly removed)

Pulsar timing array (PTA)

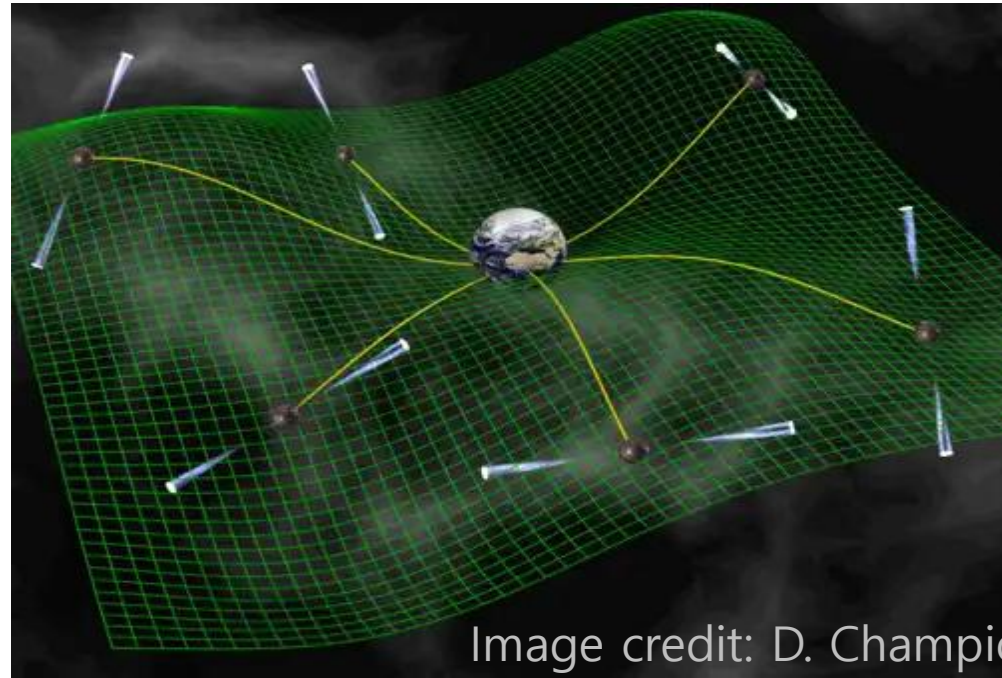


Image credit: D. Champion

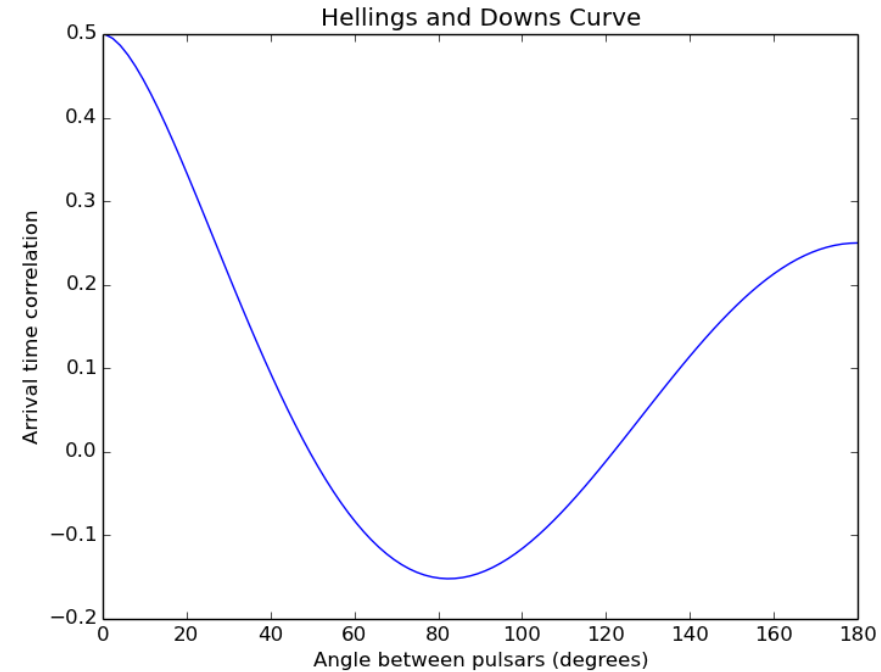
$$h_{ij}(t, \hat{\Omega}) = e_{ij}^+(\hat{\Omega})(h_+(t_a^p, \hat{\Omega}) - h_+(t, \hat{\Omega})) + e_{ij}^\times(\hat{\Omega})(h_\times(t_a^p, \hat{\Omega}) - h_\times(t, \hat{\Omega}))$$

- Goal: to measure **coordinated changes in the arrival times of radio pulses** from pulsars with ns precision

**measuring deviations in timing residuals (measured TOA - expected TOA)
for a few dozens up to hundreds of MSPs around the Earth**

→ this can be interpreted as **GW signal strength**

Pulsar timing array (PTA)

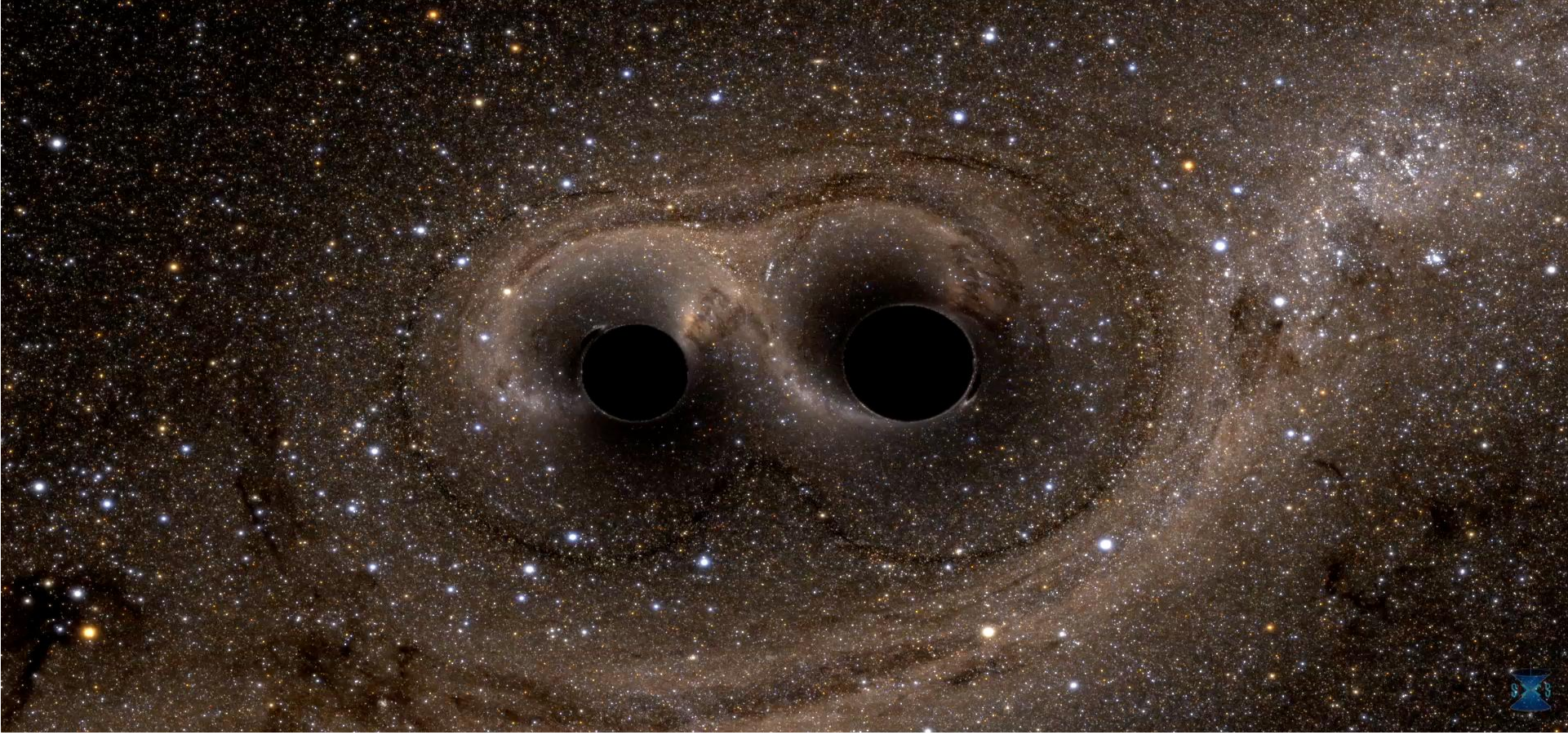


$$h_{ij}(t, \hat{\Omega}) = e_{ij}^+(\hat{\Omega})(h_+(t_a^p, \hat{\Omega}) - h_+(t, \hat{\Omega})) + e_{ij}^\times(\hat{\Omega})(h_\times(t_a^p, \hat{\Omega}) - h_\times(t, \hat{\Omega}))$$

- Goal: to measure **coordinated changes in the arrival times of radio pulses** from pulsars with ns precision

**measuring deviations in timing residuals (measured TOA - expected TOA)
for a few dozens up to hundreds of MSPs around the Earth**

→ this can be interpreted as **GW signal strength**



중성자별, 중력과 천체물리학, 다중신호 천문학

➔ 항성천체물리학(Stellar astrophysics), 우주론, 물리학

chunglee.kim@ewha.ac.kr